

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Томский государственный архитектурно-строительный университет»

А.И. Федоров

**ИМПУЛЬСНЫЕ ГАЗОВЫЕ УФ-ЛАЗЕРЫ,
ВОЗБУЖДАЕМЫЕ САМОСТОЯТЕЛЬНЫМ РАЗРЯДОМ
С УФ-ПРЕДЫОНИЗАЦИЕЙ**

Томск
Издательство ТГАСУ
2023

УДК 621.375.826
ББК 22.345.914
Ф333

Федоров, А.И.

Ф333 Импульсные газовые УФ-лазеры, возбуждаемые самостоятельным разрядом с УФ-предыонизацией : монография / А.И. Федоров. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2023. – 236 с. – Текст : непосредственный.
ISBN 978-5-6049093-1-7

В монографии представлены результаты исследований и разработки УФ-лазеров на молекулярном азоте и эксимерных молекулах галогенидов инертных газов. Особое внимание уделяется процессам образования объемных разрядов и их устойчивости в газовых эксимерных смесях. Анализируются факторы, повышающие эффективность лазеров этого класса. Подробно рассматриваются электроразрядные системы накачки с различными типами источников УФ-предыонизации при работе в газовых средах высокого давления. Обсуждаются особенности режимов работы лазеров при возбуждении как быстрым разрядом, так и в режиме длительного самостоятельного разряда. Это квазистационарный режим накачки и генерации, подробно исследуемый в настоящей работе.

Для специалистов в области физики и техники лазеров, газового разряда, лазерных технологий, а также студентов и аспирантов физико-технических специальностей.

УДК 621.375.826
ББК 22.345.914

Рецензенты:

Ф.А. Губарев, докт. техн. наук., профессор Севастопольского государственного университета.

ISBN 978-5-6049093-1-7

© Томский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2023
© Федоров А.И., 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Введение	7
1. Импульсные системы возбуждения с источниками УФ-предыонизации для лазеров высокого давления с накачкой самостоятельным разрядом	8
1.1. Механизмы возбуждения инверсной среды азотных и эксимерных лазеров	8
1.1.1. Азотные лазеры с прямым возбуждением	8
1.1.2. Эксимерные лазеры на галогенидах благородных газов ...	9
1.2. Требования, предъявляемые к электроразрядным системам накачки газовых лазеров высокого давления	12
1.3. Электроразрядные схемы накачки с источниками УФ-предыонизации для азотных и эксимерных лазеров	16
1.4. Газовая система и способы приготовления рабочих смесей	35
1.5. Аппаратура, методика эксперимента и обработка экспериментальных данных	36
2. Азотные лазеры с источниками УФ-предыонизации	40
2.1. Азотные ТЕ-лазеры низкого давления	40
2.2. Азотные лазеры с УФ-предыонизацией и поперечным разрядом возбуждения	48
2.3. Азотные лазеры с УФ-предыонизацией и продольным разрядом возбуждения	64
3. Эксимерные лазеры с коронным источником УФ-предыонизации	70
3.1. Эксимерные лазеры на молекулах KrF, XeF и XeCl, возбуждаемые быстрым разрядом	71
3.2. Объемный самостоятельный разряд в азоте, гелии и He:Xe:CCl ₄	74
3.2.1. Объемный самостоятельный разряд в азоте	74
3.2.2. Объемный разряд в гелии	76
3.2.3. Объемный разряд в газовых смесях He:Xe:CCl ₄	77
3.3. Объемный самостоятельный разряд в аргоне и Ar:Xe:CCl ₄	80
3.3.1. Особенности развития объемного разряда в аргоне	82
3.3.2. Объемный разряд в газовых смесях Ar:Xe:CCl ₄	84

3.4. ХеСl-лазер с двухконтурной схемой возбуждения	87
3.4.1. ХеСl-лазер с быстрым режимом возбуждения	93
3.4.2. ХеСl-лазер с квазистационарным режимом возбуждения	98
4. Эксимерные лазеры с искровым источником УФ-предыонизации	103
4.1. Режимы накачки с источником искровой УФ-предыонизации в обострительном контуре возбуждения.....	103
4.2. Режимы накачки с источником искровой УФ-предыонизации в накопительном контуре возбуждения	114
4.3. Квазистационарный режим возбуждения с буферным газом неоном.....	119
4.4. ХеСl-лазер с УФ-предыонизацией и продольным разрядом возбуждения	131
5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации	142
5.1. Быстрый режим возбуждения ХеСl- и ХеF-лазеров с плазменным электродом и буферными газами аргонем, гелием и смесями Аг:Не.....	142
5.2. Быстрый режим возбуждения ХеСl-, ХеF- и КгF-лазеров с плазменными электродами и буферными газами аргонем, гелием и смесями Аг:Не.....	151
5.3. Квазистационарный режим возбуждения и генерации ХеСl-лазера с плазменными электродами и буферными газами гелием, аргонем и смесями Не:Аг	159
5.4. Квазистационарный режим возбуждения и генерации ХеСl-лазера с буферным газом неоном и смесью Не:Не.....	165
5.5. Особенности формирования объемного самостоятельного разряда в смесях Ne(He):Хе:НСl для квазистационарного режима возбуждения.....	180
5.5.1. Устойчивость разряда в смесях инертных газов с галогенидами.....	181
5.5.2. Самоподдерживающийся разряд в эксимерных смесях ..	203
5.6. Историческая справка	208
Заключение	216
Библиографический список	219

ПРЕДИСЛОВИЕ

Создание азотных, а затем эксимерных лазеров позволило получить эффективные источники когерентного излучения в ультрафиолетовой области спектра. За последние десятилетия появилось много работ, посвященных исследованию и созданию таких лазеров. По мере увеличения энергии и мощности излучения лазеров расширялась область их применения.

К настоящему времени опубликован ряд обзоров, посвященных эксимерным лазерам. В основном в них рассматривались физические условия получения генерации на эксимерных молекулах и механизмы формирования населенности рабочих уровней. В 1981 г. издательство «Мир» выпустило коллективную монографию «Эксимерные лазеры» под редакцией И. Роудза. В ней дается подробный обзор эксимерных систем: димеров, монооксидов, галогенидов инертных газов и моногалогенидов металлов. Кратко показаны особенности различных методов накачки, таких как накачка электронным пучком и самостоятельным разрядом с УФ-предыонизацией. В книге А.В. Елецкого и Б.М. Смирнова «Физические процессы в газовых лазерах» (Москва: Энергоиздат, 1985) рассмотрены характеристики эксимерных молекул и оптимальные параметры эксимерных лазеров. В книге В.Ю. Баранова, В.М. Борисова, Ю.Ю. Степанова «Электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов» (Москва: Энергоатомиздат, 1988) представлены результаты исследований физики электроразрядных эксимерных лазеров на галогенидах инертных газов, работающих с большой частотой следования импульсов возбуждения. Подробно рассматривались схемы накачки мощных эксимерных лазеров, исследовались процессы, определяющие параметры объемных разрядов и их устойчивости для режима накачки лазера. В книге Г.А. Месяца, В.В. Осипова, В.Ф. Тарасенко «Импульсные газовые лазеры» (Москва: Наука, 1991) представлены технические особенности CO_2 и эксимерных лазеров, лазеров на парах металлов и инертных газов. Приведены результаты исследований лазеров импульсно-периодического действия.

При написании настоящей книги автор избегал рассмотрения вопросов, достаточно полно освещенных в обзорной литературе. Основное внимание было сосредоточено на проблемах, связанных с ис-

следованием и созданием УФ-лазеров на азоте и эксимерных молекулах с возбуждением самостоятельным разрядом с различными источниками УФ-предыонизации.

Книга имеет следующую структуру. Во введении формулируются основные проблемы по созданию мощных УФ-лазеров и нахождению условий формирования пространственно-однородных самостоятельных разрядов накачки для активных газовых сред высокого давления. В первом разделе приводится оригинальная экспериментальная техника для накачки активных газовых сред азота и эксимерных молекул самостоятельным разрядом высокого давления. Во втором разделе представлены первые результаты исследований азотного лазера с поперечным и продольным разрядом возбуждения с различными типами источников УФ-предыонизации. В третьем разделе приведены первые исследования объемных разрядов в газовых смесях (Ar)He:Xe:CCl₄ в зависимости от их компонентов и энергетических параметров излучения KrF-, XeF- и XeCl-лазеров, возбуждаемых самостоятельным разрядом с источниками коронной УФ-предыонизации. В четвертом разделе представлены первые результаты исследований разрядных и энергетических параметров излучения XeF- и XeCl-лазеров с буферными газами гелием, неоном и аргоном при накачке поперечным или продольным разрядом с искровыми источниками УФ-предыонизации в режимах возбуждения быстрым или квазистационарным разрядом. В пятом разделе приведены одни из первых результатов исследований разрядных и энергетических параметров излучения KrF-, XeF- и XeCl-лазеров с плазменным источником УФ-предыонизации и буферными газами гелием, неоном и аргоном в режимах возбуждения быстрым или квазистационарным разрядом.

Впервые сформированы общие требования, необходимые для реализации квазистационарного режима возбуждения и генерации XeCl-лазера самоподдерживающимся самостоятельным разрядом.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Газоразрядные лазеры составляют в настоящее время один из наиболее многочисленных классов оптических квантовых генераторов (ОКГ). Они перекрывают спектральный диапазон от вакуумного ультрафиолета до субмиллиметровой области спектра. Наиболее привлекательным считается импульсный режим генерации, т. к. удастся получить лазерное излучение на значительно большем числе активных сред и переходов, а также в более широкой области спектра по сравнению с непрерывным.

В начале 70-х гг. прошлого столетия появились первые работы, в которых успешно применялся поперечный разряд для накачки N_2 -, CO_2 - и Cu -лазеров. Однако характеристики излучения были далеки от предельных, что обуславливалось нестабильностью объемных разрядов, используемых для накачки лазеров. Данная проблема стала ключевой после открытия эксимерных лазеров на новых многокомпонентных активных средах. Практический интерес к ним был связан с их высокими параметрами УФ-излучения, частотными режимами работы, надежностью в эксплуатации и экономичностью для применения в новых технологиях: фотолитографии, фотохимии, медицине, биологии и т. д. Одной из перспективных областей применения считается атмосферная оптика: спектроскопия и дистанционное зондирование параметров атмосферы. Так, для высотного зондирования атмосферы эффективно используются эксимерные лазеры, а также мощные CO_2 - и Cu -лазеры.

Целью настоящей работы являлось исследование и создание мощных импульсных лазеров высокого давления, возбуждаемых самостоятельным разрядом с УФ-предыонизацией, на активных средах азотных и эксимерных молекул для задач атмосферной оптики. Для решения этой проблемы необходимо было выполнение следующих принципиальных задач:

1. Определение областей существования объемных самостоятельных разрядов и их поддержание в активных газовых азотных и эксимерных средах высокого давления.

2. Нахождение оптимальных режимов возбуждения и генерации для азотных и эксимерных лазеров УФ-диапазона излучения.

3. Создание эффективных систем накачки с источниками УФ-предыонизации для возбуждения самостоятельных разрядов в газовых эксимерных смесях высокого давления.

1. ИМПУЛЬСНЫЕ СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ С ИСТОЧНИКАМИ УФ-ПРЕДЫОНИЗАЦИИ ДЛЯ ЛАЗЕРОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ С НАКАЧКОЙ САМОСТОЯТЕЛЬНЫМ РАЗРЯДОМ

1.1. Механизмы возбуждения инверсной среды азотных и эксимерных лазеров

Нами были разработаны и исследованы оригинальные азотные и эксимерные лазерные системы. Общим, что объединяло исследование данных типов лазеров, было использование в качестве источника накачки самостоятельного разряда с различными типами УФ-предыонизации. Эти системы накачки обеспечивали «быстрый» режим разряда для возбуждения активных сред лазеров. В результате его детального исследования был обнаружен новый квазистационарный режим разряда, обеспечивающий длинные импульсы генерации. Данные режимы накачки позволяли лазерам на вышеназванных активных средах работать при повышенных давлениях с высокими параметрами излучения. Хотя следует отметить, что их газовые среды относятся к разным классам лазеров по механизму возбуждения.

1.1.1. Азотные лазеры с прямым возбуждением

Лазеры с прямым возбуждением верхнего лазерного уровня электронным ударом кажутся простыми устройствами, однако их практическая реализация вызывает определенные затруднения. Они связаны с необходимостью найти такие рабочие частицы, процессы и условия возбуждения, при которых селективно заселяются верхние лазерные уровни этих частиц.

Возбуждение электронных состояний двухатомных молекул в процессе прямого электронного удара позволяет создать лазеры с широким набором длин волн генерации (рис. 1.1). «Классическим» лазером данного типа является азотный лазер [1]. Верхний лазерный уровень азота ($C^3\pi_u$) заселяется в процессе возбуждения при столкновениях электронов с молекулами азота, находящимися в основном состоянии $X^1\Sigma_g^+$, причем сечение этого процесса больше, чем сечение возбуждения

1. Импульсные системы возбуждения с источниками УФ-предыонизации

колебательных состояний нижнего лазерного уровня азота ($B^3\Pi_g$). Лазерная генерация осуществляется на переходе $0-0$ системы $C - B$ (вторая положительная система) на длине волны 337,1 нм. В целом азотный лазер характеризуется низкой энергией в импульсе с малым КПД лазера порядка 0,1 %, что также обусловлено накоплением частиц в процессе возбуждения на нижнем метастабильном лазерном уровне.

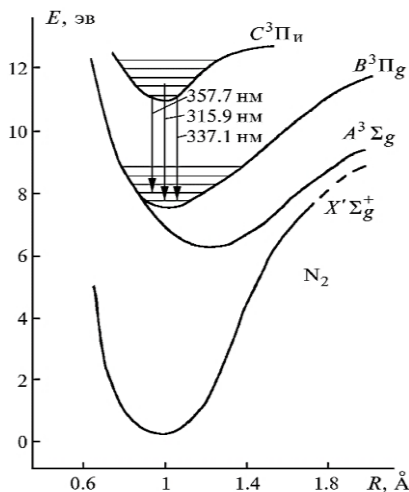


Рис. 1.1. Диаграмма энергетических уровней азотного лазера

1.1.2. Эксимерные лазеры на галогенидах благородных газов

Поиск новых, более эффективных и высокоэнергетических активных сред видимого и ультрафиолетового диапазона, привел к созданию эксимерных лазеров. Впервые авторы работы [2] при изучении соединений ArO и $ArCl$ наблюдали интенсивную УФ-флуоресценцию галогенидов инертных газов. В начале 1975 г. эти результаты были подтверждены в работе [3]. Авторами этой работы был предложен новый класс лазеров на основе галогенидов инертных газов. Авторы работы [4] первыми получили вынужденное излучение на молекулах $XeBr$ ($\lambda \sim 281,8$ нм) при возбуждении их электронным пучком. В работе [5] были вычислены длины волн стимулированного излучения для ряда

молекул галогенидов инертных газов (XeBr, XeCl, XeF и KrF), которые оказались в хорошем согласии с экспериментальными результатами, полученными в работе [6]. Впервые стимулированное излучение на молекулах (XeF, KrF и ArF) при возбуждении самостоятельным разрядом наблюдалось авторами работ [7–11].

В 1977 г. в работах [12, 13] была показана возможность получения генерации на молекуле XeCl при возбуждении самостоятельным разрядом. Образование эксимерных молекул происходит при двух частичных столкновениях возбужденных атомов инертного газа и молекул или атомов галогена. В результате химической реакции образующиеся электронно-возбужденные галогениды инертных газов первоначально находятся на высоких колебательных уровнях. При столкновении с буферным газом (Ar, Ne или He) они релаксируют на нижние колебательные уровни. Лазерное излучение, как правило, для всех молекул инертных газов возникает на переходе с нижнего колебательного уровня верхнего состояния на разлетное нижнее состояние для всех галогенидов, за исключением XeF и XeCl, для которых нижнее состояние является связанным (рис. 1.2) [14].

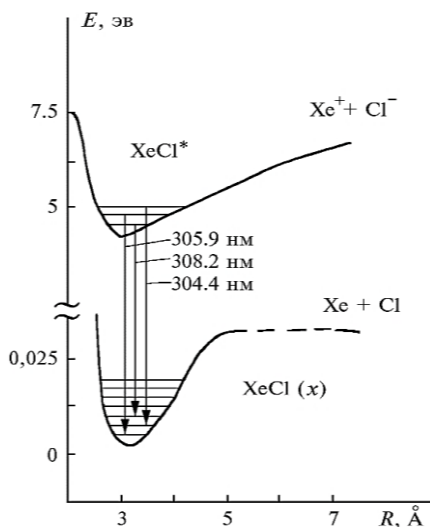


Рис. 1.2. Диаграмма энергетических уровней XeCl-лазера

1. Импульсные системы возбуждения с источниками УФ-предыонизации

Энергия, вводимая в газовые смеси разрядом, может идти как на образование метастабильных атомов [10, 15], так и на образование ионов инертных газов [16, 17]. Если преимущественно образуются метастабильные атомы инертного газа, то должны протекать следующие основные процессы согласно [15, 18]:

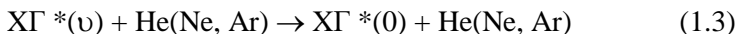
1. Возбуждение атомов



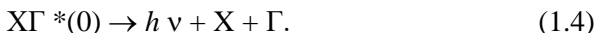
2. Возбужденные атомы реагируют с донорами галогенидов $R\Gamma$. В результате образуются электронно-возбужденные молекулы галогенидов инертных газов (реакция гарпунного типа)



Они после колебательной релаксации в столкновениях с буферным газом



распадаются, испустив квант света



В этом случае основным процессом дезактивации возбужденных молекул считаются столкновения с донорами галогенидов [18]:



3. Ионы инертного газа и галогенидов образуются по следующим реакциям [19, 20]:



Вероятность образования ионов инертного газа и галогенидов велика [21], хотя основным процессом считается ступенчатая ионизация (1.7). В результате трехчастичных столкновений образуются электронно-возбужденные молекулы галогенидов инертных газов (МГИГ):



В зависимости от условий возбуждения (режима возбуждения) самостоятельным разрядом с УФ-предыонизацией, рабочих давлений, буферного газа (He, Ne и Ar) и МГИГ возможен тот или иной, а также одновременно оба механизма образования эксимерных молекул. В работах, посвященных эксимерным лазерам, это показано экспериментально.

1.2. Требования, предъявляемые к электроразрядным системам накачки газовых лазеров высокого давления

На основании рассмотренных работ [10, 22–24] по механизмам образования активных сред и генерации азотных и эксимерных лазеров высокого давления для их накачки требуются мощные короткие импульсы возбуждения. Длительность импульса накачки ограничена устойчивостью горения тлеющего разряда высокого давления. Время его существования можно увеличить как за счет дополнительного источника УФ-предыонизации, так и путем уменьшения подводимой к разряду энергии, однако в этом случае порог генерации удастся пре-
взойти лишь незначительно [15, 22, 25]. Поэтому необходимо вкладывать как можно больше энергии в разряд до возникновения неустойчивостей [26–29]. Энергия, подводимая в течение устойчивой стадии разряда, определяется:

- $U_{\text{пр}}$ – напряжением в момент пробоя, которое зависит от времени нарастания напряжения на разрядном промежутке;
- скоростью подвода энергии, которая непосредственно связана с временем нарастания разрядного тока;
- согласованием импедансов источника энергии и разрядного промежутка, т. е. активного газового объема.

В зависимости от типа схемы накачки и режима возбуждения возможны изменения перечисленных параметров. Идеальной же схемой накачки является такая, которая обеспечивает вышеперечисленные требования. Следовательно, выбор типа импульсного источника накачки и его параметров в значительной мере определяет количество энергии,

1. Импульсные системы возбуждения с источниками УФ-предыонизации

вкладываемой в газ или газовые смеси, а соответственно, энергетические параметры лазера. При создании газовых лазеров широкое применение нашли высоковольтные импульсные источники, классификация которых наглядно представлена на рис. 1.3 [29]. В данной работе все перечисленные источники накачки применялись по мере накопления знаний лазерной физики и техники по каждому классу лазеров. Классическими импульсными высоковольтными источниками накачки являются генераторы Аркадьева – Маркса (А-М) и Блюмляйна (Бл-н), позволяющие получить на нагрузке в n раз увеличение зарядного напряжения. Кроме того, особенностью генератора Блюмляйна считалось то, что он выполнялся на отрезках линий с распределенными параметрами.

На рис. 1.3 представлены LC - и RC -инверторные генераторы. Принципиальная схема каждого из генераторов может быть приведена к одноконтурной схеме замещения (рис. 1.3, б). Накопительные конденсаторы в схемах накачки (рис. 1.3, б – з) можно заменить на отрезки линий с распределенными параметрами (рис. 1.3, а), а также на генераторы (А-М) или (Бл-н). Более эффективные и сложные с точки зрения выбора параметров генератора являются двух- и трехконтурные источники питания (рис. 1.3, в, з), в которых параллельно нагрузке, т. е. основному лазерному промежутку, устанавливается дополнительная емкость, получившая название «обостряющая емкость» ($C_{об}$). Она выполнялась в виде ряда конденсаторов, расположенных вдоль электродной системы. Ее величина могла быть в n раз меньше основной емкости накопителя (C_n). При зарядке $C_{об}$ к промежутку на короткое время прикладывалось высокое напряжение, обеспечивающее создание плазмы с высокой проводимостью, а ввод основной доли энергии в активную среду мог осуществляться при более низких значениях E/N . При использовании многоконтурных источников питания, в принципе, возможно управление формой импульса генерации. Так, типичные осциллограммы напряжения на электродах и тока разряда приведены на рис. 1.3, а – з при использовании вышеперечисленных генераторов накачки.

На основании перечисленных требований к источникам питания газовых лазеров высокого давления в данной работе основное внимание уделялось исследованию и разработке двух- и трехконтурных схем накачки с различными дополнительными источниками УФ-предыонизации. Для наглядного сравнения преимущества двухконтурного гене-

ратора накачки по сравнению с генератором Блюмляйна приведены их эквивалентные схемы замещения (рис. 1.4). В эквивалентной схеме замещения генератора Блюмляйна (рис. 1.4, а): L_1 – индуктивность контура перезарядки C_1 ; L_2 – индуктивность основного разрядного контура; Л – лазерный промежуток.

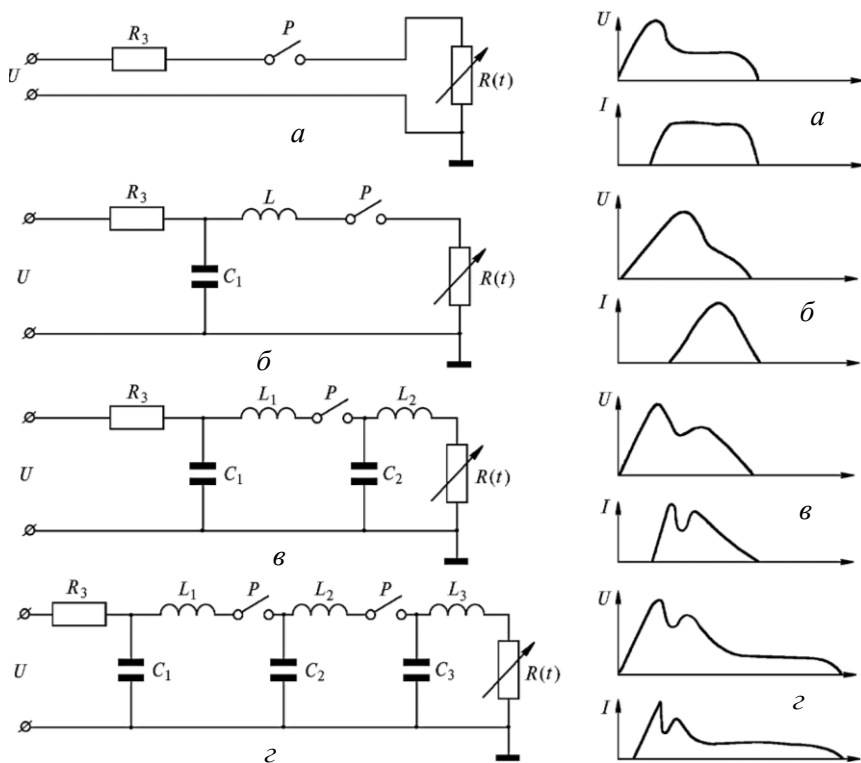


Рис. 1.3. Типичные схемы импульсных источников для возбуждения газовых лазеров и соответствующие им осциллограммы напряжения на промежутке и тока разряда [29]:

а – генератор накачки на отрезках линий с распределенными параметрами; *б* – одноконтурная схема замещения, к которой может быть сведена схема каждого из этих генераторов накачки (*а*, *б*, *г*); *в* – двухконтурная схема генератора накачки; *г* – многоконтурная схема генератора накачки

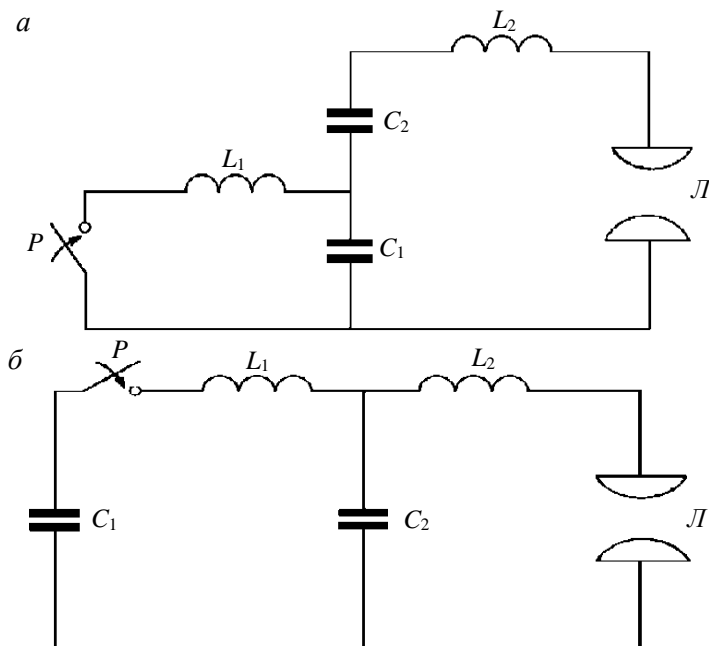


Рис. 1.4. Эквивалентные схемы замещения:

a – генератора Блюмляйна (CL -инвертор); *б* – двухконтурного генератора накачки

Время нарастания напряжения на промежутке определяется индуктивностью L_1 , а время нарастания разрядного тока через активную среду (после пробоя) – индуктивностью L_2 . Эта схема первоначально выполнялась как на полосковых линиях Бл-н (C_n) для азотных или эксимерных лазеров [30–32], так и на полосковых линиях, состоящих из дискретных конденсаторов Бл-н (C) [8, 33].

В первом случае Бл-н (C_n) время нарастания разрядного тока мало, т. к. нет соединительных элементов, соответственно импеданс цепи равен 0,01–0,1 Ом. Это приводило к хорошему согласованию импеданса с сопротивлением разрядного промежутка (активной средой) [25, 34, 35]. Во втором случае Бл-н (C) индуктивность L_2 определялась соединительными элементами конденсаторов, а время нарастания разрядного тока как $L_2/R_{пл}$

(где $R_{пл}$ – динамический импеданс разряда). В этом случае импеданс цепи на порядок выше, т. е. равен 0,1–1 Ом [25, 34, 36]. Системы Блюмляйна хорошо себя зарекомендовали при низких энерговкладах и при получении предельных параметров излучения, в частности, для максимального КПД азотного [30] или эксимерного лазера [37]. Следовательно, недостатками данных систем можно считать их ограничение по достижении максимальной выходной энергии излучения, т. к. разрядные емкости находились под постоянным напряжением и, соответственно, быстро выходили из строя. Для полосковых линий с низкой диэлектрической проницаемостью (ϵ), при реализации высоких энергий излучения, возникали проблемы, которые обусловлены как значительными габаритами, так и сложной технологией изготовления. Данные недостатки полосковых линий накладывали ограничения по применению их для частотных режимов работы лазеров.

Более перспективные, по сравнению с генераторами Блюмляйна, являются двухконтурные генераторы накачки. На рис. 1.4, б приведена эквивалентная схема замещения двухконтурного генератора накачки: L_1 – индуктивность контура зарядки обострительной емкости C_2 ; L_2 – индуктивность основного разрядного контура. В данном случае требования к L_1 снижаются, т. к. нарастание напряжения на промежутке определяется соотношением емкостей C_1/C_2 . При этом следует учитывать, что емкости C_1 и C_2 могут быть в виде полосковых линий с низким значением ϵ [38]. В этом случае L_2 может быть минимальной по сравнению с дискретными конденсаторами, что увеличивало КПД азотного лазера [39]. Снижение требований к L_1 позволяло работать данным схемам накачки с высокой частотой повторения с высоким уровнем лазерного излучения, используя в качестве коммутаторов тиратроны [40]. Поэтому в данной работе основное внимание уделялось разработке и исследованию двухконтурных генераторов накачки для различных классов газовых лазеров.

1.3. Электроразрядные схемы накачки с источниками УФ-предыонизации для азотных и эксимерных лазеров

В данном подразделе приведены результаты исследований и разработанные оригинальные системы накачки с различными автома-

1. Импульсные системы возбуждения с источниками УФ-предыонизации

тическими источниками УФ-предыонизации для азотных и эксимерных лазеров. На рис. 1.5 приведены схемы накачки азотного лазера на отрезках линий (высоковольтные кабели) с распределенными параметрами (рис. 1.5, *а*) [50] и генератором Бл-н (C) с сосредоточенными параметрами [33, 36]. Накопительными элементами, питающими лазерные промежутки (L), служили полосковые линии (C_n) и конденсаторы C_1 и C_2 , волновое сопротивление которых можно было менять. Нами впервые полосковые линии были собраны на керамических конденсаторах с высокой диэлектрической проницаемостью. В случае (*а*) высоковольтный импульс напряжения длительностью 60 нс, подаваемый на накопительный элемент (C), формировался с помощью зарядной линии ρ_1 с волновым сопротивлением 4 Ом, разрядника P и передающей линии ρ_2 (аналогичной линии ρ_1). В случае (*б*) напряжение на лазерный промежуток подавалось за счет перезарядки полосковой линии (C_2) через разрядник. Скорость нарастания и амплитуда напряжения на лазерном промежутке подбирались таким образом, чтобы пробой рабочего газа происходил для всех исследуемых режимов при одном напряжении 25 кВ [36]. Длина лазерных электродов, равная 15 см, оставалась постоянной во всех экспериментах. Межэлектродный промежуток изменялся от 0,4 до 3 см, а ширина электродов – от 0,2 до 1,2 см. Резонатор состоял из алюминиевого зеркала и кварцевой плоскопараллельной пластины.

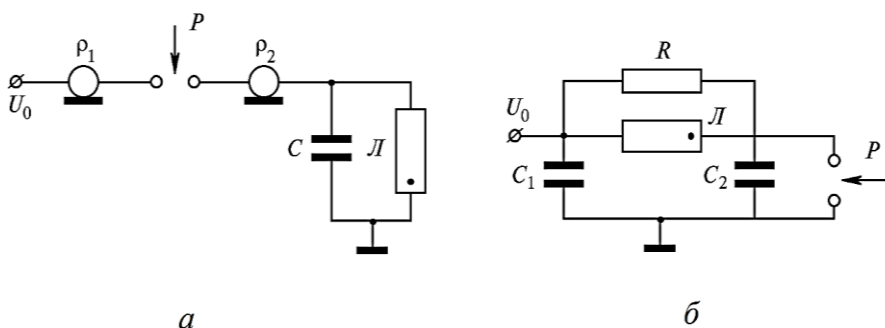


Рис. 1.5. Схема накачки азотного лазера на отрезках линий с распределенными параметрами (*а*) и с генератором Блюмляйна на конденсаторах (*б*) [33, 36]

На рис. 1.6 приведена электрическая схема накачки мощного азотного лазера с двойным генератором Бл-н (C) и 10 параллельно включенными искровыми разрядниками [40, 41]. Конструктивно лазерная камера была выполнена таким образом, что боковые стенки из диэлектрика были удалены от электродов.

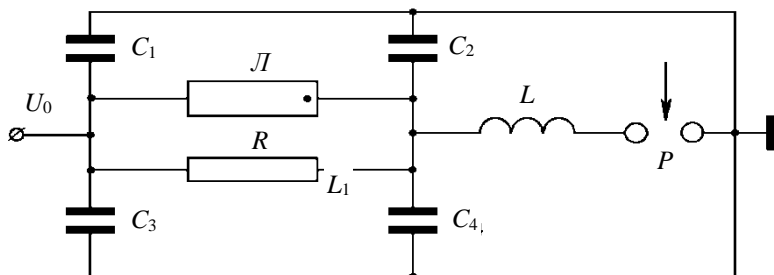


Рис. 1.6. Схема накачки азотного лазера с двойным генератором Блюм-ляйна [40, 41]

Это обеспечивало равномерный разряд в основном объеме и, соответственно, равномерное распределение мощности излучения по ее апертуре. Волновое сопротивление разрядного контура равнялось 0,1 Ом, а зарядное напряжение не превышало 15 кВ, что повышало надежность работы лазера. Активный лазерный объем соответствовал $2,2 \cdot 0,3 \cdot 10^4 \text{ см}^3$. Данная схема накачки в дальнейшем нами была успешно использована в первых экспериментах по исследованию эксимерных молекул.

На рис. 1.7 приведена схема накачки с двойным генератором Бл-н (C) и автоматической коронной УФ-предыонизацией на обоих электродах для азотного и эксимерного лазера высокого давления [42, 43] или на одном из электродов [44–46].

Их активные объемы равнялись $0,5 \cdot 0,3 \cdot 17 \text{ см}^3$ и $0,9 \cdot 0,2 \cdot 20 \text{ см}^3$. От источника постоянного напряжения заряжались емкости четырех полосковых линий $C_1 = C_2 = C_3 = C_4$. После срабатывания разрядника (P) от синхроимпульса или на самом пробое полосковые линии C_2 и C_4 начинают перезаряжаться через разрядник и индуктивность (L). В этом случае к лазерному промежутку прикладывается напряжение $\sim 1,5 U_0$.

1. Импульсные системы возбуждения с источниками УФ-предыонизации

Величина индуктивности в схеме подбиралась экспериментально, так, чтобы пробой рабочего газа или газовой смеси происходил с максимальным напряжением на промежутке. Ударная емкость систем накачки составляла $C_{уд} = 5\text{--}25$ нФ при запасаемой энергии $W_3 = 2,5\text{--}10$ Дж. Разрядный ток равнялся $\sim 1\text{--}3 \cdot 10^4$ А для зарядного напряжения 16 кВ. Данные системы накачки обеспечивали работу лазеров с частотой повторения 10 Гц. Основная часть экспериментов была выполнена в двухконтурной схеме накачки, эквивалентная схема которой приведена на рис. 1.5, б. В дальнейшем все основные изменения в системах питания были связаны лишь с использованием традиционных или новых типов УФ-предыонизации и режимов возбуждения газовых сред.

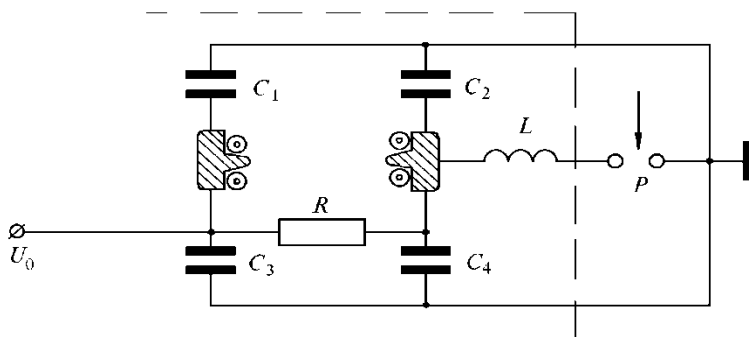


Рис. 1.7. Электрическая схема накачки с двойным генератором Блюмляйна и конструктивное исполнение электродов с УФ-предыонизацией азотного и эксимерного лазера высокого давления [42–46]

На рис. 1.8 приведена трехконтурная схема накачки с искровой УФ-предыонизацией [46–50]. От двухступенчатого генератора импульсного напряжения (ГИН) с ударной емкостью $C_1 = 25$ нФ с зарядным напряжением 30 кВ при срабатывании управляемого разрядника заряжалась емкость $C_2 = 13$ нФ, равномерно распределенная по длине электродов. Предварительная фотоионизация газа осуществлялась за счет разряда между сеткой, которая являлась катодом основного промежутка, и острями, соединенными через развязывающие конденсаторы (общей емкостью $C_3 = 0,4$ нФ) с анодом. Запаздывание основного разряда

относительно импульса УФ-предыонизации составляло ~ 100 нс. Для зарядного напряжения 30 кВ в ГИН запасалась энергия 10 Дж. В данной трехконтурной схеме накачки удавалось поддерживать объемные разряды в эксимерных смесях длительностью до 400 нс [48]. Активный объем лазера соответствовал $1,6 \cdot 2 \cdot 100$ см³. В данной схеме накачки нами впервые была показана возможность получения для эксимерных лазеров апертур излучения с $H > D$ (т. е. ширина излучения была больше, чем межэлектродный промежуток). Кроме того, впервые показано эффективное использование буферного газа аргона [47]. Следовательно, данная схема накачки была прототипом для дальнейшего исследования характеристик разряда, типов УФ-предыонизации и новых режимов возбуждения с различными буферными газами: гелием, неоном и аргоном.

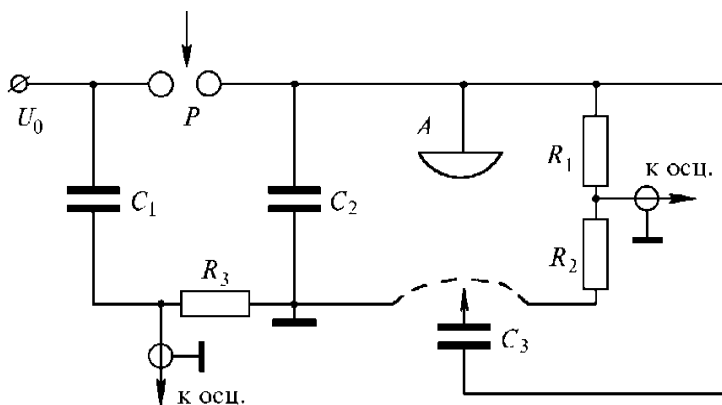


Рис. 1.8. Электрическая трехконтурная схема накачки для ХеСІ-лазера с сетчатым электродом и искровой УФ-предыонизацией [46–50]

На рис. 1.9 приведена двухконтурная схема накачки с УФ-предыонизацией коронным разрядом. Она позволяла исследовать разрядные и энергетические характеристики ХеСІ-лазера и его усилителя от параметров разрядных контуров [51–53]. Емкость конденсатора $C_1 = 20$ нФ заряжалась от источника постоянного напряжения и тиратроном Т (или управляемым разрядником) разряжалась на емкость C_2 , которая набиралась из конденсаторов КВИ-3, расположенных по обеим сторонам

1. Импульсные системы возбуждения с источниками УФ-предыонизации

лазерной камеры. Общая емкость конденсатора C_2 могла меняться от 3 до 12 нФ в зависимости от экспериментов, при этом обеспечивалась минимальная индуктивность разрядного контура.

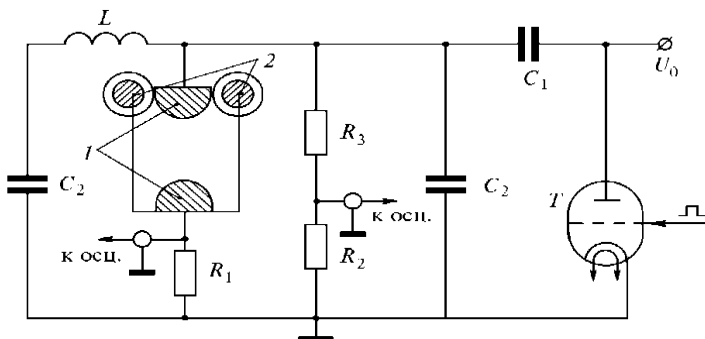


Рис. 1.9. Электрическая схема накачки XeCl-лазера с коронной УФ-предыонизацией [51–53]

Лазерная камера была изготовлена из фторопласта-4. Подсветка активного объема осуществлялась за счет автоматической коронной УФ-предыонизации у катода (в виде стеклянных трубок с проводниками внутри, соединенными с анодом). Активный объем лазера соответствовал $2 \cdot 0,3 \cdot 20 \text{ см}^3$. Резонатор состоял из алюминиевого зеркала и плоскопараллельной кварцевой пластины. В ряде экспериментов данный лазер исследовался в режиме усилителя. В этом случае вместо зеркала устанавливалась вторая плоскопараллельная кварцевая пластина, а в качестве задающего генератора использовался эксимерный лазер, разработанный нами в работе [44].

На рис. 1.10 приведена двухконтурная схема накачки с искровой УФ-предыонизацией в накопительном контуре (рис. 1, а) или в обострительном контуре (рис. 1, б). Она использовалась нами для исследования CO_2 , N_2 и эксимерных лазеров [53–58]. В работе [54] при исследовании эксимерных молекул в качестве накопительной емкости (C_n) применялся двойной двухступенчатый генератор (ГИН), собранный на конденсаторах К-15-10 (10 нФ, 40 кВ). Ударная емкость генератора составляла 10 нФ.

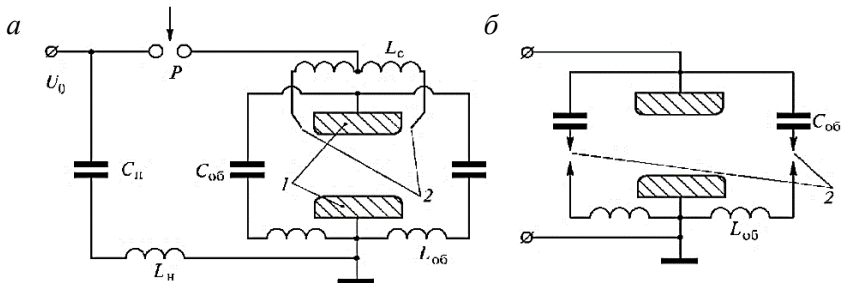


Рис. 1.10. Двухконтурная схема накачки азотного и эксимерного лазера с искровой УФ-предыонизацией в накопительном (а) или в обострительном контуре (б) [53–58]

При зарядном напряжении 30 кВ в ГИН запасалась энергия, равная 18 Дж. Емкость для лазерного промежутка ($C_{об}$) набиралась из конденсаторов К-15-4 (0,47 нФ, 40 кВ), соответствовала 10 нФ и была равномерно распределена по длине электродов. УФ-предыонизация осуществлялась от 40 искровых промежутков, включенных в накопительную цепь (рис. 1.10, а) или обострительную (рис. 1.10, б) и установленных с одной или с двух сторон от электрода анод. Индуктивность обострительного контура изменялась от 1,6 до 5 нГ. Индуктивность накопительного контура могла изменяться от 50 до 100 нГ. Высокая скорость нарастания напряжения на промежутке достигалась за счет ГИН и соответствующей компоновки элементов лазерной системы, которые были собраны внутри стальной трубы диаметром 19 см. Труба была разделена диэлектрической пластиной на два объема. В одном объеме, заполненном азотом до 2 атм, находился ГИН или накопительная емкость (60–260 нФ), в другом объеме – лазерный промежуток, обострительная емкость и искровые промежутки УФ-предыонизации. Размер активной области равнялся $2,4 \cdot H \cdot L \text{ см}^3$. Ширина электродов (H) изменялась от 0,5 до 2 см, а длина электродов (L) – от 60 до 80 см. Общий объем лазерным промежутком соответствовал 10 л, что позволяло длительное время работать без смены газовой смеси. В данной системе исследовались энергетические и спектральные характеристики молекул XeF^* , XeCl^* , KrF^* , KrCl^* и ArF^* [53–55, 59]. Как показали эксперименты, основным недостатком ГИН являлось применение трех разрядников, требующих жесткой синхро-

1. Импульсные системы возбуждения с источниками УФ-предыонизации

низации их работы, которая должна обеспечивать стабильность работы лазера с заданными характеристиками. В последующих экспериментах использовалась лишь накопительная емкость, которая осуществляла как быстрый, так и квазистационарный режим возбуждения эксимерных молекул. Основные эксперименты проводились с накопительной емкостью 60 нФ. Она позволяла запасать при зарядном напряжении 36 кВ электрическую энергию 40 Дж. Обострительная емкость изменялась от 5 до 20 нФ. Оптимальный активный объем соответствовал $2,5 \cdot 1 \cdot 70 \text{ см}^3$. В данной системе возбуждения также были проведены исследования N_2 - и CO_2 -лазеров [58].

На рис. 1.11 приведена электрическая схема накачки для исследования объемного разряда высокого давления с УФ-предыонизацией коронного типа. На ней проводились исследования самостоятельных разрядов в азоте и эксимерных смесях $\text{Ar}(\text{He})\text{:Xe:CCl}_4$ [53, 60]. Возле одного из электродов диаметром 1 см устанавливались трубки из молибденового стекла, внутрь которых вставляли медные проводники, соединенные с противоположным электродом. Ширина плоской части второго электрода соответствовала 2,6 см для исключения влияния усиления электрического поля на краях электрода. При подаче напряжения на электроды по поверхности стеклянных трубок развивался коронный разряд, который осуществлял подсветку основного промежутка $D = 1 \text{ см}$ и его длины $L = 4 \text{ см}$. Активный объем разряда равнялся $1,6 \text{ см}^3$.

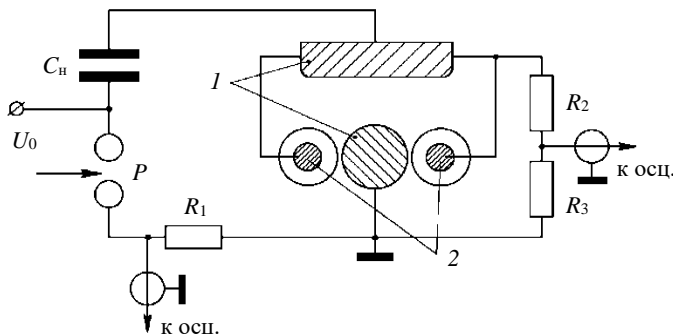


Рис. 1.11. Электрическая схема установки с УФ-предыонизацией для исследования объемного самостоятельного разряда в азотных и эксимерных газовых смесях [53, 60]

Индуктивность контура накачки составляла 60 нГ, а волновое сопротивление $\sim 2,5$ Ом. Энергия, запасаемая в накопительной емкости 10 нФ при зарядном напряжении 15 кВ, равнялась 1 Дж. Разряд исследовался в N_2 , в чистых газах Ar, He, Xe, Kr и газовых смесях Ar(He):Xe:CCl₄ при рабочих давлениях 0,1–4 атм. Вольт-амперные характеристики регистрировались с токового шунта R_1 и делителя напряжения R_2 – R_3 . Фотографирование интегральной картины свечения разряда вдоль и поперек электродов позволяло судить о его устойчивости горения в зависимости от начальных условий и газовых компонентов. Исследования XeCl-лазера с искровым источником УФ-предыонизации позволили нам впервые показать высокую эффективность использования в качестве буферного газа аргон [47, 48]. Однако в системе с УФ-предыонизацией коронным разрядом наблюдалась генерация с буферным газом аргоном, но менее эффективная, чем с буферным газом гелием [48]. Исследования объемного разряда с УФ-предыонизацией коронным разрядом в аргоне и аргоновых смесях позволили обнаружить новый режим развития разряда, который отличался от обычного разряда. Нами впервые был предложен и реализован режим накачки самостоятельным разрядом с плазменным катодом эксимерных лазеров с буферным газом аргоном [48, 60–62].

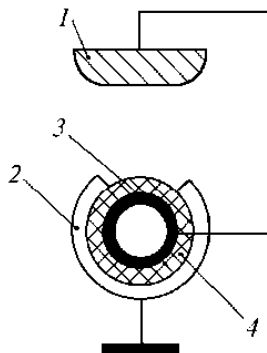
На рис. 1.12 приведено конструктивное исполнение первого эксимерного лазерного промежутка с плазменным катодом [53, 61, 62]. Накачка осуществлялась двойным генератором Бл-н (С). Анодом (1) служил сплошной алюминиевый электрод, катодом (2) – медная фольга, которая обжимала диэлектрик (стеклянную трубку 4) на 2/3 поверхности. Внутри нее – вспомогательный электрод (3) – медная фольга, соединенная с анодом. При подаче импульса накачки между вспомогательным электродом и катодом зажигался поверхностный разряд (за счет токов смещения), на который замыкался основной разряд.

Достоинство данной системы в том, что УФ-предыонизация осуществлялась в автоматическом режиме, а само устройство компактное и простое в конструктивном исполнении. Объемный стабильный разряд и генерация наблюдались в смесях Ar(He):Xe:NF₃ и Ar(He):Xe:CCl₄ [53, 61]. Разряд по диэлектрику возникал лишь в аргоне или аргоновых смесях галогенидов инертных газов. В гелии и гелиевых смесях разряд развивался по двум каналам, замыкающимся на кромки фольги катода.

1. Импульсные системы возбуждения с источниками УФ-предыонизации

Активный лазерный объем соответствовал $0,8 \cdot 0,2 \cdot 20 \text{ см}^3$. Высокая эффективность применения плазменного или плазменных электродов для накачки больших объемов эксимерных лазеров позже была подтверждена в работах [63, 64].

Рис. 1.12. Конструктивное исполнение первого эксимерного лазерного промежутка с плазменным катодом:
1 – анод; 2 – катод; 3 – вспомогательный электрод; 4 – кварцевая трубка



На рис. 1.13 приведена двухконтурная схема накачки без усиления поля с плазменными электродами для азотных и эксимерных лазеров [53, 55, 65–70]. Накопительная емкость изменялась от 10 до 260 нФ. Кроме того, она выполнялась также в виде электрической линии, состоящей из трех *LC*-звеньев [65]. В этом случае квазистационарная стадия разряда достигла 1 мкс. Обострительная емкость набиралась из конденсаторов К-15-4 (1 нФ, 40 кВ) и изменялась от 5 до 20 нФ. Она устанавливалась симметрично плазменным электродам по всей их длине. Предыонизация промежутка осуществлялась разрядом по поверхности диэлектрика на обоих электродах. Плазма, образовавшаяся на поверхности диэлектриков, являлась одновременно источником ионизации газовой среды и электродами. Electrodes изготавливались из фольгированного с двух сторон стеклотекстолита. Они выгибались навстречу друг другу. Желательно, чтобы форма поверхности электродов соответствовала профилю Роговского или Чанга. С этой целью нами был разработан плазменный электрод, обеспечивающий любой заданный профиль [71]. При длительной работе лазера необходимо было лишь заменять фольгированные стеклотекстолитовые пластины на новые.

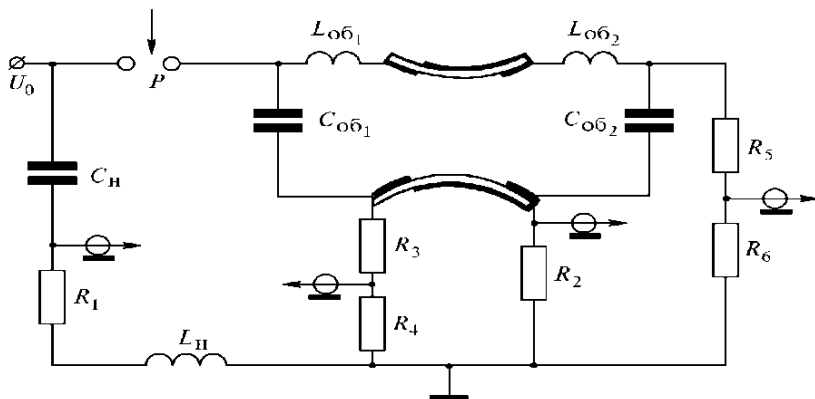


Рис. 1.13. Двухконтурная схема накачки без усиления поля с двумя плазменными электродами для азотных и эксимерных лазеров

При этом индуктивность разрядного контура была сведена до минимума и составляла 2–5 нГ. Длина электродов равнялась 60 см. Межэлектродное расстояние изменялось от 2 до 3 см. Максимальные энергетические характеристики излучения наблюдались с активным объемом $3 \cdot 1,5 \cdot 60 \text{ см}^3$ [66, 67, 69]. В данной системе исследовались разрядные, энергетические и спектральные характеристики излучения молекул N_2 , XeCl^* , XeF^* и KrF^* с буферными газами гелием, неоном, аргоном и их смесями Ne:Ne , Ar:Ne с различными режимами возбуждения. С целью увеличения ресурса работы и КПД лазера нами был разработан плазменный компактный симметричный электрод с профилем Роговского (или Чанга), который позволял снижать в 1,5–2 раза зарядное напряжение на промежутке [72]. Для создания полосковых линий на конденсаторах необходимы высокоэнергетические и малоиндуктивные конденсаторы (например, К15-10). Для уменьшения индуктивности тоководов данных конденсаторов и увеличения срока их службы в 1,5–2 раза нами была разработана специальная компоновка таких конденсаторов, обеспечивающих малоиндуктивные выводы [73, 74].

Исследования особенностей формирования объемного самостоятельного разряда в смесях He(Ne):Xe:HCl показали возможность создания двухконтурных схем накачки с плазменными электродами без

1. Импульсные системы возбуждения с источниками УФ-предыонизации

усиления поля (рис. 1.13) и с усилением поля (рис. 1.14) [75]. Нами было обнаружено, что при использовании схем питания с усилением поля образование эксимерных молекул наиболее эффективно осуществляется на стадии формирования разряда, а без усиления поля – в квазистационарной стадии разряда.

На рис. 1.14 приведена двухконтурная схема накачки с усилением поля и плазменным электродом для азотных и эксимерных лазеров [75, 76]. Коммутатор (P) может замыкаться как на промежуток (рис. 1.15), так и непосредственно на землю (рис. 1.16). В первом случае до срабатывания управляемого коммутатора на электродах разрядного промежутка поддерживается квазипостоянное напряжение $U_{\min} \leq 0,5$ кВ.

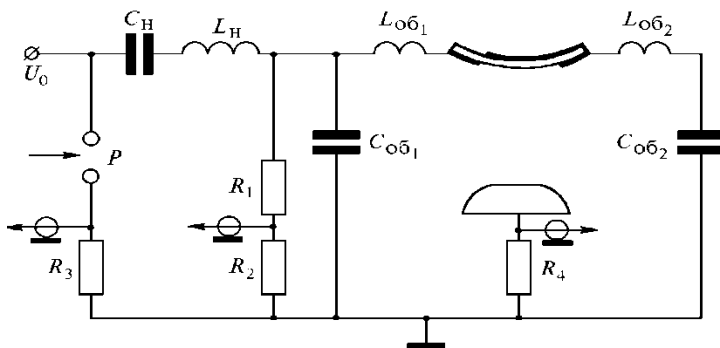


Рис. 1.14. Двухконтурная схема накачки с усилением поля и плазменным электродом для азотных и эксимерных лазеров

Данная схема нами была названа как «схема с усилением электрического поля», что наблюдалось с разрядом накопительной емкости на обострительную и, соответственно, на газовый промежуток. Во втором случае на электродах отсутствовало напряжение до срабатывания коммутатора. Эксперименты обоих режимов проводились с активным объемом $(3 \cdot 1,5) \dots (3 \cdot 15)$ см³. Индуктивность накопительного контура была ~ 150 нГ, а обострительного контура – менее 10 нГ. Известно из работ [53, 63], что плазменные электроды из стеклотекстолита обладали одним недостатком. Они имели ограниченный ресурс работы. Поэтому нами был разработан плазменно-сетчатый электрод [77]. Такая

конфигурация снижала нагрузку на поверхностную плазму диэлектрика основным разрядом. В последующих экспериментах нами в основном использовались системы с металлическим анодом и плазменно-сетчатым катодом.

На рис. 1.15 приведена двухконтурная схема накачки с плазменно-сетчатым электродом и двумя независимыми источниками питания для исследования особенностей формирования объемных разрядов в эксимерных смесях [75, 77]. Межэлектродный промежуток (анод – сетка) составлял 3 см. Расстояние между плазменным и сетчатым электродами равнялось 0,3–0,7 см. Ширина плазменного электрода соответствовала 1,5 см. Оба источника работали синхронно с заданной временной задержкой (τ_3) от 50 до 250 нс. Оптимальная задержка начала основного разряда относительно импульса УФ-предыонизации составляла ~ 200 нс.

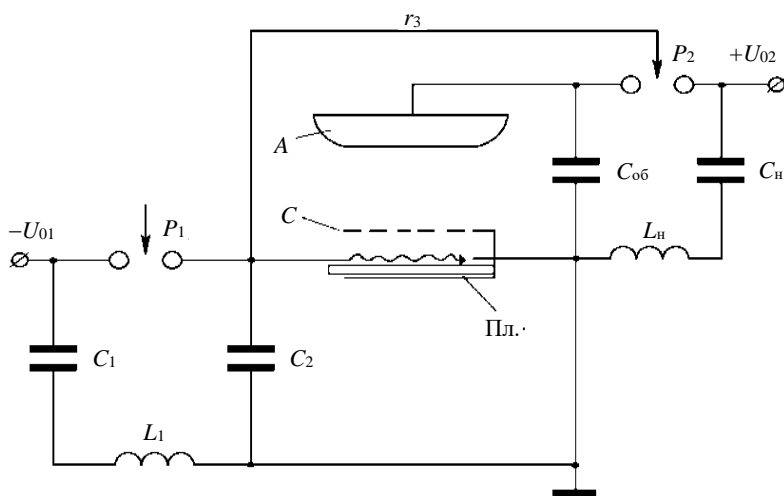


Рис. 1.15. Двухконтурная схема накачки с плазменно-сетчатым электродом и двумя независимыми источниками питания

Использование данной электродной конфигурации приводило к более однородному объемному разряду, что связано с формированием дополнительного пучка быстрых электронов в основном промежутке [75].

1. Импульсные системы возбуждения с источниками УФ-предыонизации

На рис. 1.16 приведена схема накачки азотного лазера с УФ-предыонизацией коронным разрядом, ограниченным сетчатым катодом [78, 79]. Активный лазерный объем равнялся $0,4 \cdot 0,8 \cdot 20 \text{ см}^3$. Общий объем газовой камеры соответствовал 1 л. В качестве коммутатора использовался управляемый разрядник РУ-62. Емкость накопителя равнялась 6 нФ, а обострительной емкости – 2,6 нФ. Малогабаритная лазерная установка «ЭКСИК-01F» работала с частотой 40 Гц при низком зарядном напряжении 10 кВ. Данная система накачки позволяла получать апертуру излучения с $2D = H$, что указывает на эффект стабилизации разряда в зависимости от стабилизирующей индуктивности ($L_{\text{ст}}$) и сетчатого электрода.

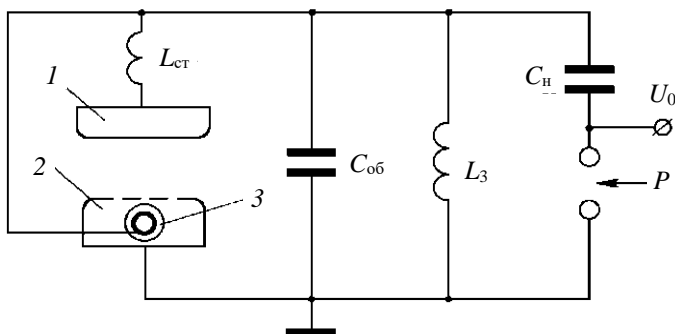


Рис. 1.16. Двухконтурная схема накачки N_2 -лазера с УФ-предыонизацией коронным разрядом, ограниченным сетчатым катодом

Нами был разработан также азотно-эксимерный лазер «ЭКСИК-2» с активным объемом $1,4 \cdot 0,7 \cdot 25 \text{ см}^3$ с УФ-предыонизацией коронным разрядом [78, 80]. В качестве источника накачки использовался двойной генератор Бл-н (С). Ударная емкость генератора равнялась 11 нФ. Лазер работал с частотой повторения 3 Гц. Данная система эффективно работала на эксимерных молекулах лишь с буферными газами аргоном и неоном.

На рис. 1.17 приведена двухконтурная схема накачки лазерной установки большого объема с двойным плазменно-сетчатым электродом и цепями точных измерений U и I в разрядных контурах [77, 81]. При создании мощных эксимерных электроразрядных лазеров с боль-

шой апертурой излучения появляются трудности при введении энергии в газовые разряды со значительными поперечными сечениями. Поэтому необходимо более точно знать потери энергии во всех элементах схемы накачки. В качестве предыонизатора использовался «двойной плазменно-сетчатый электрод» шириной 3 см [77]. Максимальное расстояние между электродами основного разряда (сплошным металлическим анодом и сетчатым катодом) – 3,2 см, длина электродов – 60 см.

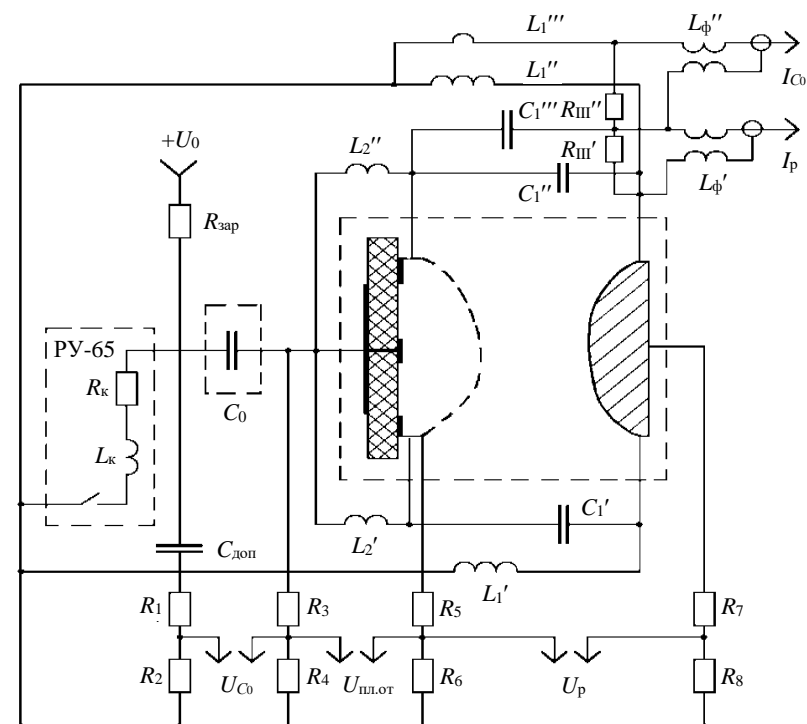


Рис. 1.17. Электрическая схема лазерной установки с двойным плазменно-сетчатым электродом и цепями измерений U и I в разрядных контурах

Питание предыонизатора осуществлялось за счет падения напряжения на дополнительных индуктивностях L_2' и L_2'' при зарядке

1. Импульсные системы возбуждения с источниками УФ-предыонизации

обострительных конденсаторов C_1' , C_1'' и C_1''' . Обострительная емкость, состоящая из конденсаторов (К15-4), была укреплена на лазерной диэлектрической трубе. Ее емкость могла изменяться от 24 до 48 нФ. В качестве накопительной емкости использовались конденсаторы (К15-10, К75-48 и КМК). Суммарная емкость накопителя изменялась от 100 до 200 нФ. В качестве коммутатора применялся серийный управляемый разрядник РУ-65. Разрядные и энергетические характеристики исследовались в смесях $\text{Ar}(\text{Ne}, \text{He}):\text{Xe}:\text{HCl}$. Были определены потери энергии, рассеиваемой на элементах схемы накачки и в активном объеме разряда.

На рис. 1.18 приведены двухконтурная (рис. 1.18, а) и трехконтурная (рис. 1.18, б) схемы накачки эксимерных лазеров с искровой УФ-предыонизацией и точными цепями измерения U и I в разрядных контурах [82]. В работе [83] было предложено для повышения КПД CO_2 -лазеров использовать многоконтурные источники накачки. Нами, при исследовании разрядных характеристик XeCl -лазера, была применена в качестве накопительного элемента электрическая линия из трех LC -звеньев с суммарной емкостью $C_{\Sigma} = 30$ нФ и обострительной емкостью $C_{об} = 1,8$ нФ. Использование многоконтурной схемы накачки позволило увеличить квазистационарную стадию разряда до 1 мкс [65] для системы с плазменной УФ-предыонизацией. В трехконтурной схеме накачки с искровой УФ-предыонизацией нами наблюдался режим «многоимпульсной генерации». Исследование данных схем накачки позволило найти причины модуляции генерации, механизм передачи энергии в разряд и распределение потерь энергии в элементах системы питания, а также выяснить способы управления временным профилем импульса генерации. Активный объем лазера соответствовал $1,5 \cdot 0,5 \cdot 20 \text{ см}^3$. Вдоль сетчатого электрода устанавливалось от 10 до 15 искровых промежутков. Схемы накачки (рис. 1.18) использовались в импульсно-периодическом режиме работы. Они имели повышенную индуктивность тоководов в лазерную камеру.

Авторами [84] были проведены исследования частотного XeCl -лазера, где рассматривались особенности измерений U и I в разрядных контурах в зависимости от работы токовых шунтов и делителей напряжения из резистивных элементов. Вносимые ими в разрядные параметры погрешности зависели от величины приложенного к ним напряжения (вливающего на изменение амплитудных характеристик) и искажения их временного поведения (из-за наличия заметной индуктивной составляющей

элементов и их емкостного экранирования). Поэтому были специально разработаны малоиндуктивные шунты из высокоомной фольги и скорректированы конструкции экранов для делителей напряжения. Аналогичные измерительные элементы и тракты передачи и ослабления сигналов были нами применены для схем накачки (рис. 1.18).

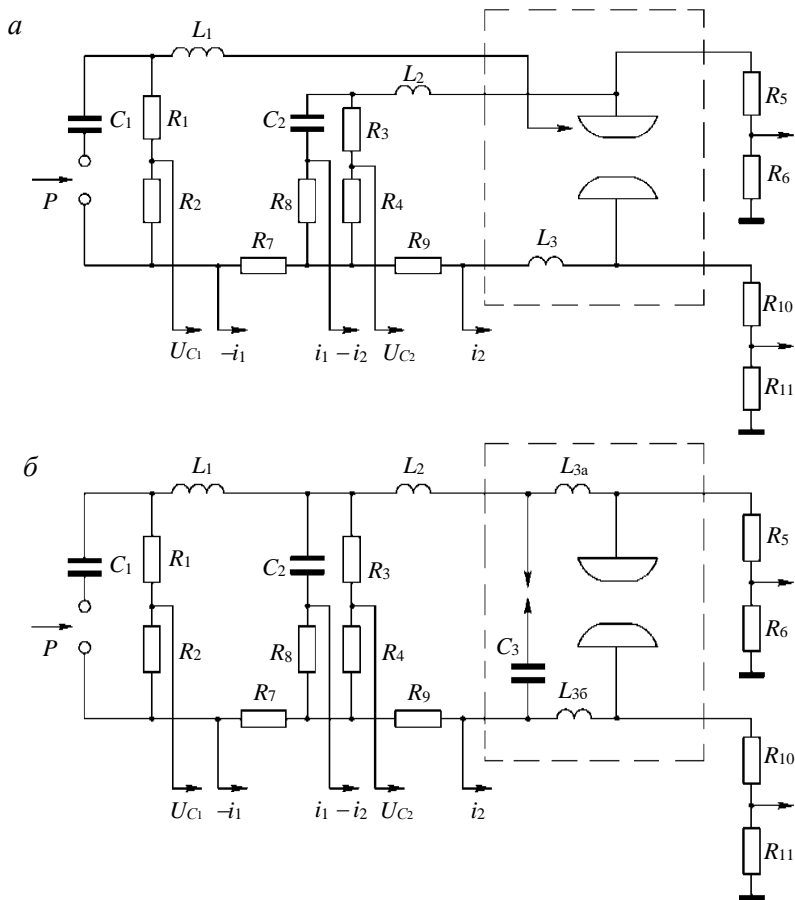


Рис. 1.18. Двухконтурная (а) и трехконтурная (б) схемы накачки эксимерного лазера с искровой УФ-предыонизацией и точными цепями измерения U и I в разрядных контурах

1. Импульсные системы возбуждения с источниками УФ-предыонизации

В результате исследований был создан опытный образец малогабаритного лазера «ЧЭПЛ-5», работающий с частотой повторения 100 Гц и средней мощностью излучения 2,5 Вт.

На рис. 1.19 показано конструктивное исполнение одной из лазерных камер импульсно-периодического эксимерного лазера «ЧЭПЛ-5» с УФ-предыонизацией. В качестве коммутатора использовался тиратрон ТГИ-1000/25 с насыщающимся дросселем.

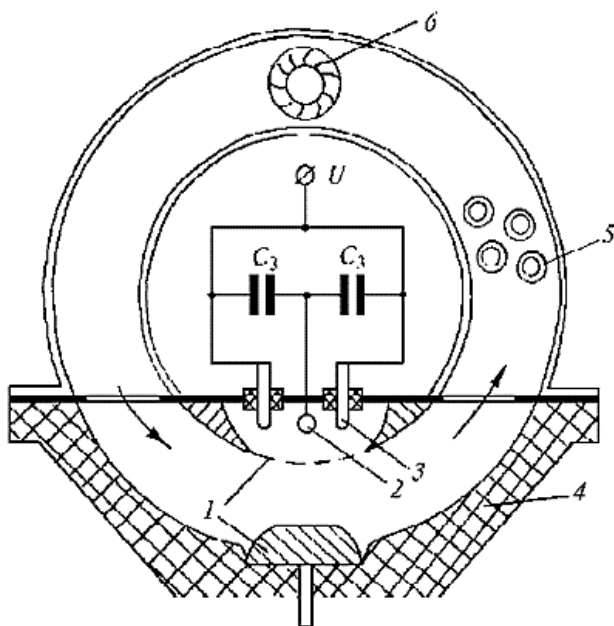


Рис. 1.19. Конструктивное исполнение лазерной камеры импульсно-периодического опытного образца эксимерной системы «ЧЭПЛ-5»: 1 – электроды основного промежутка; 2, 3 – электроды искрового промежутка; 4 – элемент лазерной камеры (изолятор); 5 – теплообменник; 6 – вентилятор для прокачки газовой среды

На рис. 1.20 приведена электрическая схема накачки миниатюрного азотного и эксимерного лазера с продольным разрядом и автоматической искровой УФ-предыонизацией «ЭКСИК-01М» [85–87]. В качест-

ве лазерного объема использовались кварцевые трубки с внутренним диаметром 4 и 5 мм. Он имел четыре лазерных промежутка, каждый из них длиной 4 см. В качестве электродов применялось 5 пар стержней из нержавеющей стали диаметром 0,4 см заданной конфигурации. Следовательно, разрядный канал имел общую длину 16 см и активный объем от 2 до 3 см³. Генератор Бл-н (С) был выполнен на конденсаторах (КВИ-3). Зарядная емкость генератора изменялась от 4 до 12 нФ.

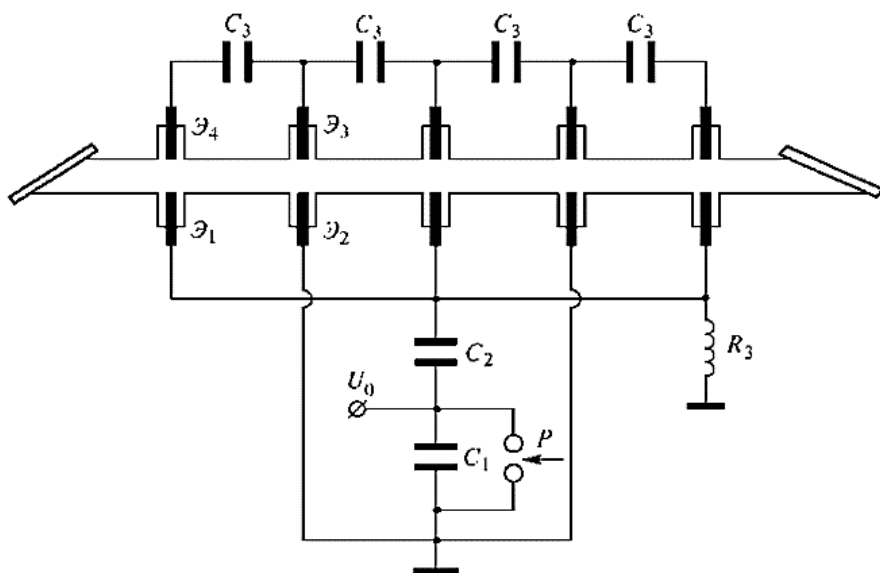


Рис. 1.20. Электрическая схема накачки миниатюрного N₂ и эксимерного лазера с продольным разрядом и автоматической искровой предыонизацией

Емкость C_3 использовалась в качестве обострительной емкости и источника УФ-предыонизации лазерного канала. Общая емкость обострительного конденсатора изменялась от 0,6 до 1,32 нФ. В качестве коммутатора применялся РУ-62, что упрощало схему накачки и позволяло получать более высокие характеристики по сравнению с тиратроном [88]. При срабатывании разрядника происходила инвер-

1. Импульсные системы возбуждения с источниками УФ-предыонизации

сия напряжения емкости C_1 и быстро возрастающий высоковольтный импульс прикладывался к парам электродов \mathcal{E}_1 – \mathcal{E}_4 , \mathcal{E}_2 – \mathcal{E}_3 через обострительные емкости C_3 . После пробоя искровых промежутков, которые обеспечивали ионизацию газа, одновременно происходила зарядка обострительной емкости. После ее зарядки до пробойного напряжения между \mathcal{E}_3 – \mathcal{E}_4 протекал основной продольный разряд. При соответствующих условиях наблюдался также разряд между электродами \mathcal{E}_1 – \mathcal{E}_2 . Таким образом, срабатывали одновременно 4 промежутка. При выборе режима работы лазера можно было использовать искровую или коронную УФ-предыонизацию. Эксперименты проводились в азоте и газовых смесях He(He, Ar):Xe:HCl. Нами впервые в продольном разряде возбуждения получена генерация на XeCl^* без буферного газа.

1.4. Газовая система и способы приготовления рабочих смесей

В экспериментах по исследованию разрядных и энергетических характеристик излучения в азотных и эксимерных молекулах ArF^* , KrF^* , XeF^* и XeCl^* использовались газы следующей чистоты: азот – с содержанием примесей менее 1 %; He, Ne, Ar, Xe и Kr – с содержанием примесей менее 0,01 %. Количество примесей определялось по паспортным данным. В качестве галогеноносителя применяли F_2 , NF_3 , CCl_4 , CHCl_3 , CF_2Cl_2 и HCl.

На рис. 1.21 представлена схема приготовления лазерных смесей, где 1, 12 – лазерная камера и смесительная кювета соответственно; 17, 20, 21 – баллоны с газами; 18, 19 – редукторы; 4, 6, 7, 9, 13–16 – вакуумные вентили; 2, 11 – манометры; 10 – вакуумметр; 5 – форвакуумный насос; 3, 8 – фильтры. Приготовление двух-, трех- и четырехкомпонентных смесей газов проводилось с помощью данной системы смешивания. Смесь приготавливалась в смесительной кювете 12 (10 л), изготовленной из нержавеющей стали, которая перед наполнением откачивалась форвакуумным насосом 5 до давления 10^{-3} торр. После откачки в смесительную кювету напускался галогенид из баллона 21, а затем добавлялся инертный газ или азот, их дозировка контролировалась вакуумметром 10 в смесительной кювете.

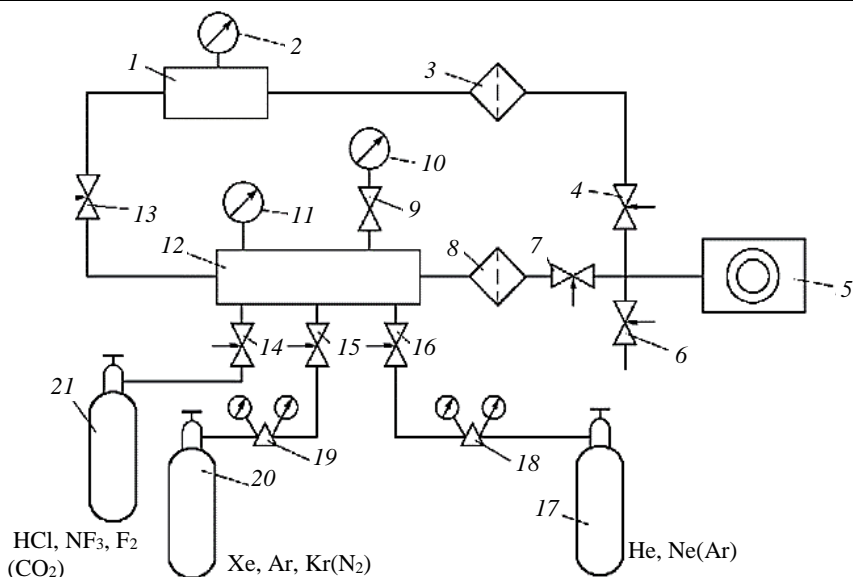


Рис. 1.21. Схема приготовления лазерных газовых смесей

Затем перекрывался вакуумметр вентилем 9 и добавлялся буферный газ или буферная смесь Ar, Ne(He), составляющая основную часть смеси, до полного давления 3–5 атм. Обычно смесь использовалась через 1–2 ч после ее приготовления. Применялись разные смесители для приготовления хлорных и фторных смесей. Влияние времени выдержки смеси в пределах 1–24 ч перед наполнением в рабочий объем было обнаружено лишь для фторсодержащих смесей. Из смесителя приготовленная смесь поступала через вентиль 13 в разрядную или лазерную камеру 1. Отработанная смесь откачивалась форвакуумным насосом.

1.5. Аппаратура, методика эксперимента и обработка экспериментальных данных

Исследования характеристик разряда и лазерного излучения ИК, видимого и УФ-диапазона проводили на установках, электрические

1. Импульсные системы возбуждения с источниками УФ-предыонизации

и конструктивные особенности которых приведены на рис. 1.6–1.20. Данные разрядные и лазерные установки позволяли изменять в широком диапазоне исследуемые параметры: индуктивности и емкости разрядных контуров, рабочие объемы разрядных и лазерных кювет, системы УФ-предыонизации, режимы ввода энергии в газы и т. д. При равных условиях: зарядном напряжении, волновом сопротивлении и емкости разрядного контура энергия излучения с единицы длины на установках отличалась не более чем на 10 %. Почти все установки работали при давлениях выше атмосферного. Энергетические параметры излучения измерялись при малых частотах повторения (до 3 Гц). При частотах работы до 100 Гц измерения проводились как без замены рабочих газов, так и с непрерывной прокачкой. Давление рабочих смесей до 1 атм измерялось калиброванными образцовыми вакуумметрами, а выше атмосферного – образцовыми механическими манометрами.

В качестве коммутирующих элементов использовались триггеры, управляемые разрядники и тиратроны.

Электроды разрядников изготавливались из нержавеющей стали. Электроды лазерных систем выполнялись из алюминия, меди, нержавеющей стали и меди с никелевым покрытием.

Эксперименты проводились в лазерных установках как с внутренними, так и с внешними резонаторами. Обычно применялись резонаторы, состоящие из плоскопараллельного зеркала и зеркала с алюминиевым или диэлектрическим покрытием. Для области ИК-излучения использовались зеркала из нержавеющей стали, медные и зеркала с золотым покрытием, в качестве выходного зеркала – плоскопараллельные пластины из германия или КРС-6. Отметим, что для эксимерных лазеров лучше подойдут внешние зеркала, т. к. из-за воздействия галогенидов мутнеют зеркала и наблюдается эрозия покрытий.

Временное поведение и мощность излучения, уменьшенная набором ослабителей, регистрировались вакуумными фотодиодами ФЭК-09; 22; 22СПУМ или фотоприемниками ФП-3, сигнал с которых подавался на осциллографы И2-7; С1-14; С8-14. Средняя мощность и энергия излучения измерялись калориметрами ИКТ-1М; ИМО-2 или ИМО-2Н. Одновременная регистрация средней мощности и осциллограмм импульсов излучения обеспечивала необходимую информацию

об энергии и мощности генерации за импульс. Эта методика позволяла получать наиболее достоверные результаты. При энергиях излучения более 0,01 Дж измерялась энергия однократных импульсов, однако в этом случае из-за малой длительности генерации измерения могли давать меньшую величину истинного значения ($\sim 30\%$). В некоторых случаях производилась калибровка фотоприемников и ослабителей, затем снимался набор осциллограмм для каждой точки исследуемой зависимости. Эти измерения давали наибольшую абсолютную погрешность до 50 %.

Для измерения тока в разрядных контурах использовались малоиндуктивные шунты, изготовляемые из нихромовой фольги или сопротивлений ТВО (или МОН). Сопротивление шунта в статическом и импульсном режиме отличается, поэтому они калибровались по опыту короткого замыкания. Измерения напряжений на лазерных промежутках производились с помощью омических делителей, собранных из сопротивлений ТВО. Следует отметить большие трудности в измерении напряжения на плазме газового разряда в контурах с низкими волновыми сопротивлениями. Индуктивность подводов и плазмы соизмерима с индуктивностью разрядного контура, что может приводить к значительным погрешностям в измерении напряжения на плазме, а соответственно, учете потерь энергии в элементах схем накачки, как будет показано далее [81].

Интегральные картины свечения разряда снимались на пленку РФ-3. Спектры излучения регистрировались спектрографом ИСП-30 или монохроматором МДР-3. Спектр излучения снимался на пленку Микрат-200.

Экспериментальные результаты получались преимущественно путем фотографирования и обработки осциллограмм тока, напряжения, свечения газоразрядного промежутка, импульса излучения или генерации, отсчета показаний киловольтметра и калориметров. Ошибка измерения в первую очередь связана с наличием погрешности используемых приборов. Для снижения погрешности при определении характеристик разряда и лазерного излучения каждая экспериментальная точка снималась несколько раз. Экспериментальные характеристики, приведенные в графиках и таблицах, представляют собой среднее из 5 измерений. Средняя квадратическая ошибка среднего арифметического \bar{X}

1. Импульсные системы возбуждения с источниками УФ-предыонизации

определялась по формуле $\sigma = \sqrt{\sum_i (\bar{x} - x_i)^2 / n(n-1)}$, где n – число измерений, x_i – результат определенного измерения. Вследствие этих причин величина ошибки могла составлять $\sim 15\%$.

Кроме того, отметим, что в разрядах наносекундного диапазона создавать точные делители напряжения трудно [89]. Поэтому нами в ряде случаев применялся расчет разрядных характеристик плазмы путем графического интегрирования и дифференцирования осциллограмм разрядного тока для быстрого режима возбуждения [51, 53].

2. АЗОТНЫЕ ЛАЗЕРЫ С ИСТОЧНИКАМИ УФ-ПРЕДЫОНИЗАЦИИ

2.1. Азотные ТЕ-лазеры низкого давления

Когерентное излучение на молекулярном азоте впервые наблюдалось Хидом в 1963 г. в условиях малой длительности разряда накачки [1]. Он обнаружил генерацию на 30 линиях в УФ-области спектра, причем наиболее интенсивное излучение было вблизи длины волны 337,1 нм. Этой длине волны соответствовал колебательный переход (0,0) во второй положительной системе азота (электронный переход $C^3 \pi_u \rightarrow B^3 \pi_g$). Поскольку время жизни верхнего уровня порядка 40 нс, а нижнего несколько десятков микросекунд, то лазеры данного типа называли лазерами на самоограниченных переходах. Благодаря возможности работы при комнатной температуре, использованию недорогого легкодоступного газа, простоте изготовления и перспективам превращения азотного лазера в мощный источник УФ-излучения он привлек к себе внимание многих исследователей. Однако оставалась нерешенной основная проблема при создании азотных лазеров – это получение очень коротких импульсов накачки большой мощности. Важным этапом в развитии азотных лазеров, а также техники газовых лазеров явилось создание поперечной системы накачки в 1965 г. Леонардом в работе [31]. При импульсной поперечной накачке была получена генерация с пиковой мощностью 200 кВт при давлении 20 торр. Шипман, используя поперечный разряд для накачки активной среды лазера и импульсный генератор возбуждения (Блюмляйн) с бегущей волной, продемонстрировал пиковую мощность излучения 2,5 МВт при длине активной среды лазера 183 см и зарядном напряжении 75 кВ [90]. Авторами работы [38] в аналогичной системе была получена пиковая мощность 2 МВт, но при длине активной среды лазера 100 см и $U_0 = 30$ кВ за счет применения низковольтной передающей линии Блюмляйна.

Следовательно, для получения больших мощностей излучения к системам накачки предъявлялись жесткие требования: 1 – малое время нарастания импульса тока (несколько десятков нс); 2 – большая амплитуда разрядного тока (десятки кА); 3 – малое волновое сопротивление контура возбуждения. Так, в работах [38, 90] лазерная камера

2. Азотные лазеры с источниками УФ-предыонизации

с поперечным разрядом возбуждалась от полосковых линий, диэлектриком в которых была майларовая пленка. Такие системы сложны, имеют большие габариты и ненадежны. В работе [91] была продемонстрирована возможность использования двухконтурной схемы накачки на керамических конденсаторах. Тем самым была показана возможность создания мощных простых азотных лазеров вместо сложных лабораторных установок. Для практических применений требовались простые и надежные УФ-лазеры с большим спектром изменения выходной энергии излучения. На рис. 1.5 приведены схемы накачки азотного лазера на отрезках линий (высоковольтные кабели) с распределенными параметрами (см. рис. 1.5, *а*) и генератор Бл-н (*С*) с сосредоточенными параметрами (см. рис. 1.5, *б*), используемые нами в работе [36] для исследования геометрии лазерной камеры, формы электродов и волнового сопротивления разрядного контура. Во всех экспериментах для данных схем накачки напряжение на рабочем промежутке поддерживалось постоянным 25 кВ, чтобы определить их эффективность. Длина электродов равнялась 15 см. Межэлектродное расстояние можно было изменять от 0,4 до 3 см. Ширина электродов могла изменяться от 0,2 до 1,2 см. Нами были проведены исследования лазерных камер двух типов: 1 – с влиянием боковых стенок (стекло) на разряд; 2 – без влияния боковых стенок, когда разряд горел по ширине электродов на расстоянии не менее 0,3 см от боковых стенок.

На рис. 2.1 приведены зависимости мощности излучения и оптимального давления газа от ширины электродов при $D = 2,4$ см (рис. 2.1, *а*) и от межэлектродного промежутка при ширине электродов 0,3 см (рис. 2.1, *б*) для камер, ограниченных боковыми стенками. Максимальная мощность излучения достигалась при апертуре излучения $2,4 \cdot 0,3$ см² и давлении 30 торр. Оптимальное давление газа слабо зависело от ширины электродов, т. е. плотности разрядного тока. Оно уменьшалось с увеличением межэлектродного расстояния D , что связано с величиной параметра E/P .

В случае разряда, ограниченного боковыми стенками, соотношение $E/P \sim 300$ В·см⁻¹·торр⁻¹, что согласовывалось с результатами работы [30]. Одновременное уменьшение D и H приводило к росту удельной мощности излучения и оптимального давления газа, что позже нами было использовано при создании малогабаритных азотных лазеров.

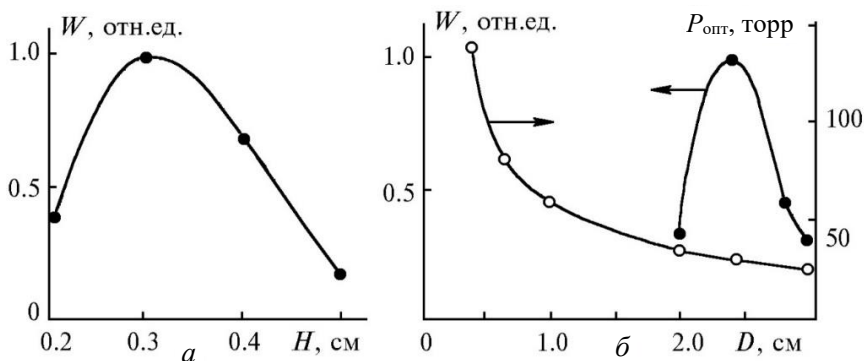


Рис. 2.1. Зависимости мощности излучения и оптимального давления газа от ширины электродов (a) и от расстояния межэлектродного промежутка (b)

Также было исследовано влияние волнового сопротивления разрядного контура на мощность излучения (рис. 2.2, a). Так, с ростом удельного волнового сопротивления линейно снижалась мощность излучения. В малых промежутках $D = 0,4$ см и $H = 0,05$ см для системы накачки с волновым сопротивлением $0,74$ Ом наблюдалась лазерная генерация при атмосферном давлении [36]. Следовательно, термин «ТЕА» можно принять для азотных лазеров с поперечной накачкой для газовых сред атмосферного давления. Было обнаружено, что выходное излучение неравномерно по сечению вследствие концентрации разряда на боковых стенках, которые играли роль вспомогательного УФ-предыонизатора, обеспечивающего генерацию при атмосферном давлении.

Были проведены исследования азотного лазера для системы накачки без влияния боковых стенок на характер горения разряда возбуждения. Боковые стенки были удалены от электродов на расстояние $\geq 0,3$ см. В данном случае сразу же появились ограничения на межэлектродный промежуток, который не мог превышать $D = 1,7$ см при заданном зарядном напряжении на промежутке 25 кВ.

На рис. 2.2, b приведены обобщающие результаты исследований, которые представляли зависимости пиковой мощности от давления газа при волновом сопротивлении разрядного контура $\rho = 1,1$ Ом

2. Азотные лазеры с источниками УФ-предыонизации

и энергии, запасаемой в накопительном элементе 1,2 Дж для промежутка с апертурой $D \cdot H = 2,4 \cdot 0,3 \text{ см}^2$ с боковыми стенками (зависимость 1) и без влияния боковых стенок $D \cdot H = 1,7 \cdot 0,3 \text{ см}^2$ (зависимость 2). Длительность импульса генерации составляла 6 нс и уменьшалась с ростом давления. Снижение волнового сопротивления разрядного контура резко увеличивало пиковую мощность излучения для случая без боковых стенок (зависимость 3 на рис. 2.2, б). В этом случае была получена мощность излучения 93 кВт. Ей соответствовала энергия излучения 0,56 мДж, КПД лазера 0,05 % при рабочем давлении 75 торр. Одновременно аналогичные исследования по влиянию боковых стенок были проведены в работе [92], однако параметры активной области не указывались. Авторы работы [93] успешно устранили влияние боковых стенок за счет использования вспомогательного импульса малой энергии, прикладываемого к дополнительным электродам, расположенным на их внешней стороне диэлектрических боковых стенок перпендикулярно основному разряду накачки. Такой способ накачки был назван методом возбуждения двойным разрядом.

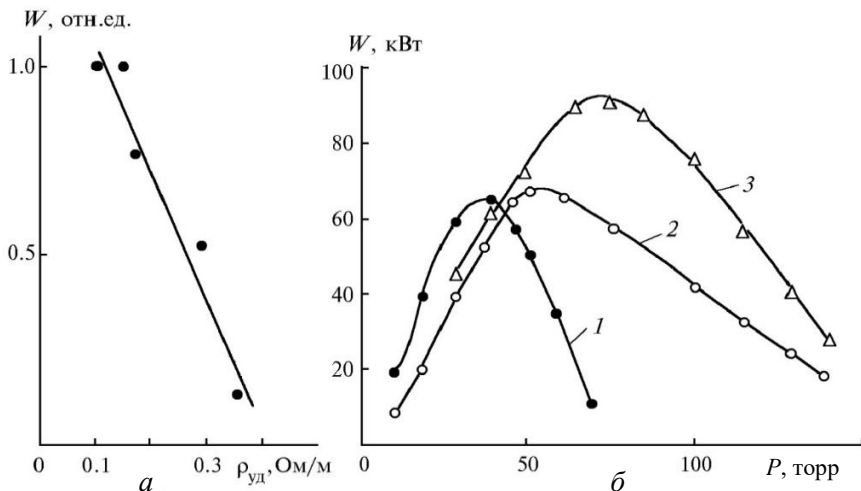


Рис. 2.2. Зависимости мощности излучения от удельного волнового сопротивления (а) и давления для различных лазерных камер (б)

На основании проведенных исследований нами был разработан мощный азотный лазер на полосковых линиях генератора Бл-н (С) [33]. Коммутирующим элементом служили десять параллельно включенных искровых разрядников, запускаемых с точностью ± 1 нс. На лазерный промежуток подавались импульсы напряжения амплитудой 20–25 кВ. Активный лазерный объем соответствовал $2,4 \cdot 0,3 \cdot 100$ см³ и ограничивался боковыми стенками. В качестве буферных газов использовали гелий или неон.

На рис. 2.3 приведены зависимости мощности излучения азотного и неоновых лазера от давления и содержания гелия и неона. В качестве активной среды можно было использовать воздух, но при этом мощность излучения уменьшалась в 2 раза. В этом случае возможно создание простых, малогабаритных и дешевых лазеров. В чистом азоте максимальная энергия излучения достигала 10 мДж, пиковая мощность – 1,4 МВт и КПД – 0,1 %. Длительность импульса генерации равнялась 7 нс (рис. 2.4, б). Добавки буферного газа гелия расширяли область рабочих давлений, но мощность излучения уменьшалась. Для фиксированного давления гелия 30; 65; 95 торр при изменении давления азота наблюдался свой максимум по давлению и мощности излучения (рис. 2.4, а). При постоянном оптимальном давлении азота 36 торр добавки газа гелия или неона приводили к линейному спаду мощности излучения (рис. 2.4, б). Качественное объяснение полученных результатов связано с максимальным разрядным током, измеренным в лазерном промежутке (рис. 2.4, а). В неоне сопротивление разрядной плазмы почти не изменялось с увеличением давления и оставалось много меньше волнового сопротивления разрядного контура. В гелиевых смесях с ростом давления азота разрядный ток резко спадал. Так же, как и ранее в работе [36], наблюдалось неравномерное распределение мощности излучения по ширине апертуры. Наибольшая плотность мощности излучения регистрировалась у боковых стенок камеры при съемке автографа генерации на фотопленку. Причиной этого явления был поверхностный разряд по диэлектрику. Он создавал предварительную ионизацию газа у боковых стенок камеры, и в первый момент времени, когда еще не произошло значительное снижение напряжения на промежутке, а электронная температура велика, основной ток разряда протекал через предварительно ионизированный газ.

2. Азотные лазеры с источниками УФ-предыонизации

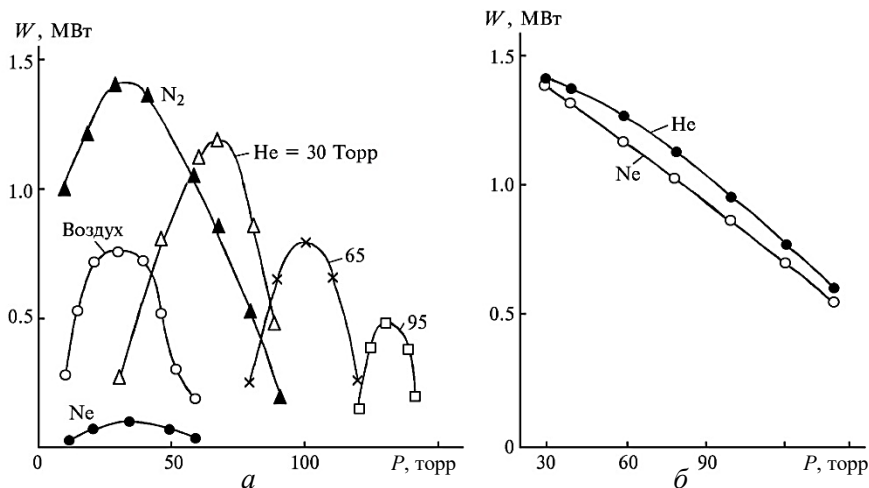


Рис. 2.3. Зависимости мощности излучения N_2 - и Ne-лазеров от давления для Ne, N_2 , воздуха и смесей $N_2 + He$ (а) и $N_2 + He(Ne)$ (б)

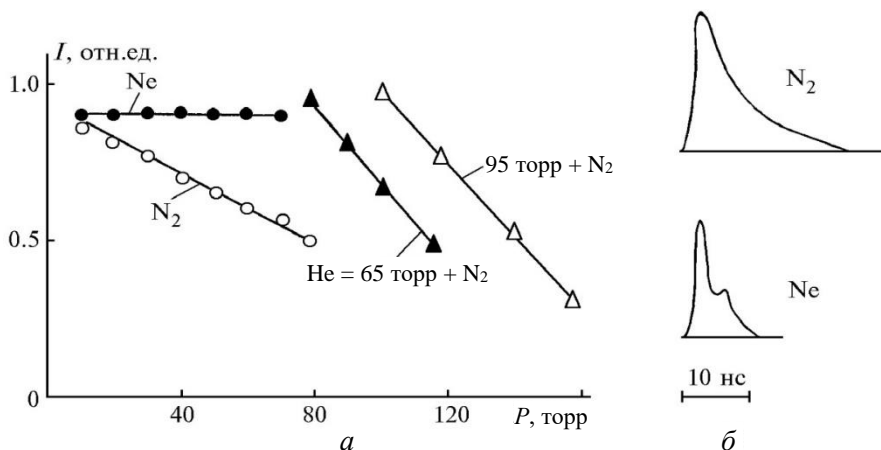


Рис. 2.4. Зависимости разрядного тока от давления для Ne, N_2 и $N_2 + He$ (а) и осциллограммы импульсов излучения для азота и неона (б)

Данный эффект был успешно использован авторами работы [23] для предварительной ионизации азота высокого давления. В дальнейшем этот способ УФ-предыонизации, обеспечивающий повышенные энергии съема с единицы объема газа (при ширине электродов $\leq 0,1$ см), будет одним из основных при создании миниатюрных УФ-лазеров [94]. Кроме того, была также получена генерация в неоне на длине волны 540,1 нм (рис. 2.3, 2.4). Мощность излучения составляла 10 кВт при давлении 35 торр. Длительность импульса генерации равнялась 3 нс на полувысоте. В смесях $N_2 + Ne = 30$ торр наблюдалась одновременная генерация на длинах волн 337,1 и 540,1 нм с мощностью излучения несколько киловатт на каждой из них. Для повышения параметров излучения была создана лазерная система, которая представлена в работе [40]. Она обеспечивала накачку активной среды двойным генератором Бл-н (С) (см. рис. 1.6). Активный объем лазера равнялся $2,2 \cdot 0,3 \cdot 10^4$ см³. Максимальная мощность излучения 2,1 Мвт была зарегистрирована при длительности генерации 5 нс с энергией 11 мДж при давлении 30 торр. На основании проведенных исследований нами был разработан опытный образец азотного лазера «АИЛ-1» в СКБ научного приборостроения «Оптика» СО АН СССР [41]. Прибор состоял из двух блоков: 1 – лазерный элемент, включающий в себя генератор накачки 2Бл-н (С), коммутаторы и лазерную камеру, 2 – источник питания и управления, форвакуумный насос и баллон с азотом.

Таким образом, на основе достижений экспериментальной физики наносекундного разряда и новых знаний по особенностям работы азотного лазера низкого давления (ТЕ) нами и рядом авторов были получены максимальные параметры излучения, которые, видимо, не являются предельными (табл. 2.1). Интересно отметить, что в первых работах [31, 38, 95, 96] использовались двухконтурные емкостные схемы накачки (С – С). Емкости выполнялись в виде полосковых линий (С_п), на отрезках кабелей (С_{каб}), конденсаторах (С) или в коаксиальном исполнении (С_{коак}) для уменьшения индуктивности разрядного контура. В конечном итоге все максимальные параметры излучения были получены в емкостных двухконтурных схемах накачки, исключением является лишь работа [30], в которой в качестве генератора накачки использовалась идеально рассчитанная полосковая линия Блюмляйна.

2. Азотные лазеры с источниками УФ-предыонизации

Таблица 2.1
Основные работы и максимальные параметры излучения для азотного лазера типа ТЕ

№ п/п	Генератор накачки	P , торр	L , см	V , л	U_0 , кВ	W , МВт	$W_{уд}$, МВт/л·атм	Q , мДж	$Q_{уд}$, Дж/л·атм	$\tau_{h/2}$, нс	КПД, %	Литер.
1	$C_{п} - C_{каб}$	20	200	—	25	0,2	—	—	—	—	—	[31]
2	$C_{п} - C_{каб}$	20	200	—	25	0,3	—	—	—	—	—	[95]
3	Бл-н	30	183	—	75	2,5	—	10	—	4	—	[90]
4	$C_{п} - C_{п}$	35	100	—	30	2	—	20	—	10	—	[38]
5	$C_{п} - C_{об}^{**}$	30	80	0,1	20	0,3	60	3	0,6	10	—	[96]
							$P_{cp} = 1,5 \text{ Вт}, f = 1200 \text{ Гц}$					
6	$C - C_{каб}$	55	100	—	30	1,1	—	13	—	12	—	[92]
7	Бл-н (C)	30	100	0,07	20	1,4	400	10	2,8	7	0,1	[33]
8	2Бл-н (C)	30	104	0,07	15	2,1	600	11	3,2	5	0,1	[40]
9	Бл-н	70	70	0,006	6 11	3 9	$48 \cdot 10^2$ $14 \cdot 10^3$	—	—	4	1	[30]
10	$C - \text{Бл-н}$	50	50	0,015	12	0,17	100	1	1,4	6	—	[97]
11	Бл-н	30	60	0,045	25	1	400	7	3,2	7	0,1	[35]
12	$C_{п} - C_{коак}$	110	30	0,001	10	0,2 2,2	$13 \cdot 10^2$ $16 \cdot 10^3$	2,2 2,6	15 19	11 1,2	3 0,5	[39]

Автор получил пиковую мощность излучения 9 МВт с максимальным КПД лазера 1 % при давлении азота 70 торр. Нами впервые были применены генераторы Бл-н (С) и 2Бл-н (С) на керамических конденсаторах [33, 36, 40]. Авторы работы [39] попытались показать потенциальные возможности азотного лазера, утверждая, что реализовали КПД равным 3 %, увеличив при этом рабочее давление азота до 110 торр без применения УФ-предыонизации. Они использовали двухконтурную схему накачки, в которой коаксиальная обострительная емкость одновременно являлась лазерной камерой. Их результаты пока не удалось повторить другим исследователям.

2.2. Азотные лазеры с УФ-предыонизацией и поперечным разрядом возбуждения

Применение дополнительных источников УФ-предыонизации для азотных лазеров (табл. 2.2) расширило область рабочих давлений активной среды, а соответственно, возрастали параметры выходного излучения. Эффективность азотных лазеров сильно зависела от типа источника УФ-предыонизации и газовых добавок гелия, SF_6 и NF_3 . При этом понятие лазера атмосферного давления «ТЕА-лазеры» оказалось неоднозначным. Например, если оптимальное давление азота 150 торр, а буферного газа гелия 600 торр, тогда это ТЕА-лазер. В другом случае концентрация азота равнялась 1500 торр и гелия 2000 торр. Это уже лазер высокого давления, названный нами «ТЕАН-лазер». В первых работах (до 1976 г.) в качестве генератора накачки использовались всевозможные конструктивные исполнения генератора Блюмляйна, обеспечивающего режим быстрого ввода энергии в разряд. Дополнительно устойчивость объемного разряда достигалась за счет применения многоострийного катода [98], вспомогательного разряда за сетчатым электродом [99], двойного разряда [93], сочетания УФ-предыонизации у анода с многоострийным катодом [100], вспомогательного поверхностного коронного разряда [23] и коронного разряда на обоих электродах, предложенного в работе [42]. Была разработана лазерная установка высокого давления, электрическая схема питания которой приведена на рис. 1.7.

Таблица 2.2

**Основные работы с максимальными параметрами излучения N₂-лазеров
с различными источниками УФ-предыонизации**

№ п/п	Генератор накачки	Тип УФ-пред.	$P(N_2)$, торр	V , л	Q , мДж	$Q_{уд}$, Дж/л·атм	$\tau_{n/2}$, нс	КПД, %	Литер.
1	2Бл-н		10 He	0,03	3	2	2,5	—	[98]
2	Бл-н		10 He	—	—	—	4	—	[99]
3	Бл-н		100	0,05	14	2,4	7	0,1	[93]
4	2Бл-н		180 SF ₆	0,04	18 20	2 2,5	8,5 6	— —	[100]
5	Бл-н		380 760	—	0,9 0,7	— —	1,4 0,9	0,03 0,02	[23]
6			1140	0,004	1	0,16	1	—	[110]
7	2Бл-н (С)		320 He	0,003	0,13 0,15	1,25 0,2	5 2	— —	[42]
8	$C_n - C_{об} - C_{уф}$		150 He He:NF ₃	0,12 $D \cdot H = 1,7 \cdot 2$	1,2 4,5 10	0,05 0,04 0,09	9	0,01 0,02 0,05	[101]
9	$C_n - C_{п.об}$		30 SF ₆	—	18 30	— —	14 19	— —	[102]
10	$C_n - C_{об}$		60 He:NF ₃	0,5 2,5 · 3,5	20 25	0,04 0,05	4 10	— —	[103]

Импульсные газовые УФ-лазеры

Окончание табл. 2.2

№ п/п	Генератор накачки	Тип УФ-пред.	$P(N_2)$, торр	V , л	Q , мДж	$Q_{дл}$, Дж/л·атм	$\tau_{н/2}$, нс	КПД, %	Литер.
11	$C_H - C_{об}$		60	0,03	1	0,3	7	—	[111]
12	$2C_H - C_{п.об}$		170 He	—	0,04	—	—	0,07	[112]
13	$C_H - C_{об}$		150 He:SF ₆	0,1	6,1 7,7	0,3 0,08	5 4,7	— 0,4	[113]
14	$C_H - C_{об}$		110 He	0,006	2	0,25	9	0,07	[114]
15			55	0,025	2,3	0,9	7	0,07	[104]
16			100 CO ₂	0,46 2,5 · 2,6	0,3 600	0,004 8,6	5 12 мкс	— —	[109]
17	2Бл-н (C)		114	0,18	10	0,4	5	0,04	[58]
18			70	0,08	10	1,25	6	—	[115]
19	$C_H - C_{об}$		100	0,008 0,6 · 0,7	0,5	0,4	5	0,01	[70]
20			150	0,009	0,3	0,15	5	0,06	[76]
21			120	0,006 0,4 · 0,7	0,13	0,13	5	0,03	[78]

2. Азотные лазеры с источниками УФ-предыонизации

Активный объем лазерного промежутка соответствовал $0,5 \cdot 0,3 \times 17 \text{ см}^3$. Особенность данной системы в том, что электроды и полосковые керамические линии Блюмляйна находились непосредственно в рабочем газовом объеме. В этом случае достигалась минимальная индуктивность между электродами и системой накачки. Большой объем камеры позволял работать длительное время без замены рабочего газа. УФ-предыонизация обоих электродов позволяла получать генерацию в азоте при давлении до 1,2 атм, а в смесях $\text{N}_2:\text{He}$ генерация наблюдалась до давления 20 атм. Длительность импульса генерации при низких давлениях равнялась 8 нс, а при давлениях выше 5 атм уменьшалась до 2 нс. Предложенные методы стабилизации объемного разряда позволяли создавать ТЕ-, ТЕА- и ТЕАН-лазеры. Им соответствовали рабочие давления азота 0,05–1,5 атм, удельная энергия излучения $2,4 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ и длительность импульса генерации 1–8 нс при КПД 0,1 %. Добавки газа SF_6 позволили повысить энергию излучения лазера за импульс до 20 мДж [100].

Дальнейшее повышение выходных параметров излучения азотных лазеров, на наш взгляд, было обусловлено режимом ввода энергии в разряд (использование квазистационарного режима накачки) и выбором типов электродов, как ранее нами было показано для XeCl -лазера [47]. Так, авторами работы [101] в трехконтурной схеме накачки была получена апертура излучения $D \cdot H = 1,7 \cdot 2 \text{ см}^2$, когда ширина разряда была больше межэлектродного промежутка. Этот факт указывает на высокую стабильность разряда, обеспечивающуюся за счет соотношения емкостей генератора накачки $C_{\text{н}}/C_{\text{об}} \geq 3$. Добавка NF_3 увеличивала энергию излучения до 10 мДж, которая почти на порядок выше по сравнению активной среды с чистым азотом. Исследования влияния поверхности электродов на выходные параметры излучения были успешно проведены авторами [102–104]. Максимальная энергия излучения 30 мДж и длительность импульса генерации на полувысоте 19 нс были получены в системе с коронной предыонизацией на аноде, с мелкорельефной поверхностью катода и добавками SF_6 [102]. Эта работа подтверждала модель взрывной эмиссии, разработанной Месяцем [105], которая обеспечивает поставку начальных электронов в газовый промежуток. И как подтверждение авторы работы [103] получили энергию излучения 25 мДж с добавками $\text{He}:\text{NF}_3$ и апертурой излучения

$2,5 \cdot 3,5 \text{ см}^2$ при атмосферном давлении активной среды, при этом роль предыонизатора выполнял сетчатый катод, т. е. неоднородности сетки стабилизировали разряд. Данная стабилизация разряда наблюдалась лишь в квазистационарном режиме накачки. Нами были проведены исследования как разрядных, так и энергетических параметров излучения азотного лазера с квазистационарным режимом накачки [58]. Схема накачки приведена на рис. 1.10, *а*. В качестве накопителя энергии использовались емкости $C_n = 10; 70 \text{ нФ}$, а в качестве обострителя емкости $C_{об} = 10; 20 \text{ нФ}$. Нами исследовалось два режима возбуждения азотного лазера: быстрого и квазистационарного. Оба режима возбуждения ранее детально изучались нами для эксимерных лазеров [55].

На рис. 2.5, *а, б* показаны типичные осциллограммы напряжения на плазме, тока обострительной емкости и импульса генерации от давления азота для квазистационарного режима разряда ($C_n = 70 \text{ нФ}$, $C_{об} = 20 \text{ нФ}$), а также зависимости энергии излучения от режима накачки, газовых компонентов и рабочего давления (рис. 2.5, *в*). Так, с ростом давления возрастало напряжение на промежутке, а соответственно, ток разряда обострительной емкости и время запаздывания пробоя на промежутке. При давлении 152 торр разрядный ток уменьшался и, соответственно, энергия излучения тоже, поэтому основной вклад мощности накачки осуществлялся в быстрой стадии разряда. Максимальная энергия излучения 10 мДж наблюдалась при давлении 114 торр с длительностью импульса излучения на полувысоте 5 нс. Отметим, что в квазистационарном режиме возбуждения основную роль при накачке активной среды играла обострительная емкость. При добавлении буферного газа гелия линейно расширялась область рабочих давлений, но энергия излучения оставалась ниже, чем в чистом азоте. Таким образом, квазистационарный режим возбуждения обеспечивал однородные разряды более высокого давления в простых и надежных системах накачки с источниками искровой УФ-предыонизации.

Особого внимания заслуживали работы по азотным лазерам [33, 36, 93, 106], в которых рассматривалась возможность создания как источников поверхностной плазменной накачки, так и плазменных электродов. Впервые скользящий поверхностный разряд был применен в коаксиальном исполнении для азотного лазера с накачкой электронным пучком [107].

2. Азотные лазеры с источниками УФ-предыонизации

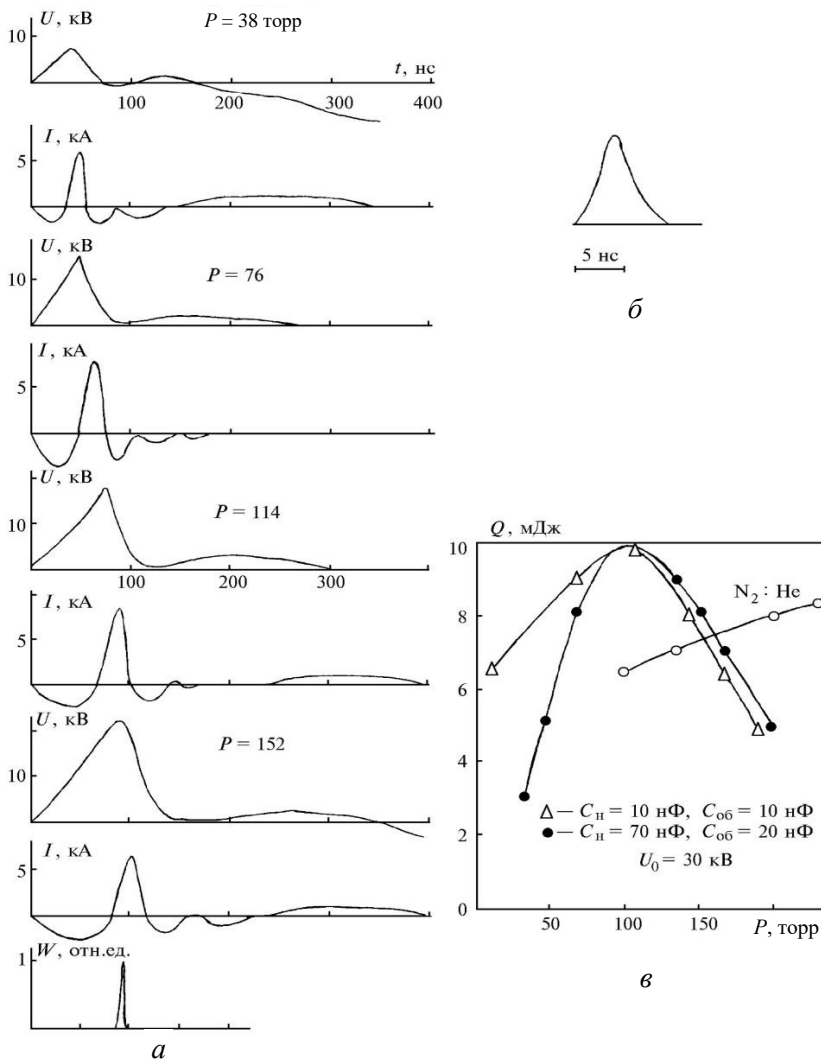


Рис. 2.5. Осциллограммы импульсов $U_{пл}$, $I_{об}$, W в зависимости от давления (а), импульс излучения (б) и энергия излучения от режима накачки и давления активной среды N_2 и $N_2:He$ (в)

В чисто скользящем разряде генерация была получена авторами работы [108] при давлении азота 18 торр. Для азотного лазера была получена максимальная мощность излучения 300 кВт с энергией 2 мДж для активного поверхностного объема накачки $4,4 \cdot 0,1 \cdot 75 \text{ см}^3$ авторами работы [109]. Кроме того, они впервые в данной системе возбуждения получили одновременную генерацию на молекулах N_2 и CO_2 .

Нами впервые была получена генерация на молекуле азота в схеме накачки с двумя плазменными электродами [70]. На рис. 1.13 приведена электрическая двухконтурная схема накачки с плазменными электродами, которая включала в себя источник питания на 20 кВ, управляемый разрядник (РУ-73) и рабочие емкости $C_n = 20 \text{ нФ}$ и $C_{об} = 5 \text{ нФ}$. Активный лазерный объем равнялся $0,6 \cdot 0,7 \cdot 20 \text{ см}^3$. Максимальная энергия излучения соответствовала 0,5 мДж при длительности импульса генерации на полувысоте 5 нс и КПД лазера 0,01 % для рабочего давления азота 100 торр. В этом случае была получена максимальная удельная энергия излучения $0,4 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ для разряда с плазменной УФ-предыонизацией (см. табл. 2.2). При исследованиях данной системы накачки нами впервые было реализовано одновременно два режима возбуждения азотного лазера [Там же]. При работе лазера наблюдались две стадии разряда: в первой осуществлялся скользящий поверхностный самостоятельный разряд, формирующий плазменные электроды и одновременно обеспечивающий УФ-предыонизацию лазерного промежутка, а затем возникал объемный разряд между сформировавшимися плазменными электродами. В этом случае излучение имело апертуру прямоугольной формы, удовлетворяющее условию $H \geq D$. При наличии только скользящей стадии разряда, которая существовала лишь при повышенных давлениях более 0,4 атм, формировалось лазерное излучение в виде двух узких полос, соответствующих профилям плазменных электродов. Следовательно, данный способ накачки обеспечивал работу азотного лазера в режиме синхронного излучения двух источников. В работе [76] нами были проведены исследования разрядных и энергетических характеристик азотного лазера с одним плазменным электродом в схеме с усилением поля (см. рис. 1.14). Параметры накопительного контура накачки соответствовали $C_n = 26,4 \text{ нФ}$, $L_n = 75 \text{ нГ}$, а обострительного контура накачки – $C_{об1} = C_{об2} = 4,7 \text{ нФ}$ и $L_{об1} = L_{об2} = 10 \text{ нГ}$. Активный объем

2. Азотные лазеры с источниками УФ-предыонизации

лазерного промежутка равнялся $0,9 \cdot 0,5 \cdot 20 \text{ см}^3$. На рабочие электроды подавалось зарядное напряжение 20 кВ.

На рис. 2.6 приведены характерные разрядные осциллограммы в активной среде азота при давлении 270 торр и зарядном напряжении 18 кВ для промежутка с плазменным электродом. Это амплитуды напряжения на обострительной емкости, разрядного тока накопительного контура, разрядного тока через промежуток и импульса излучения.

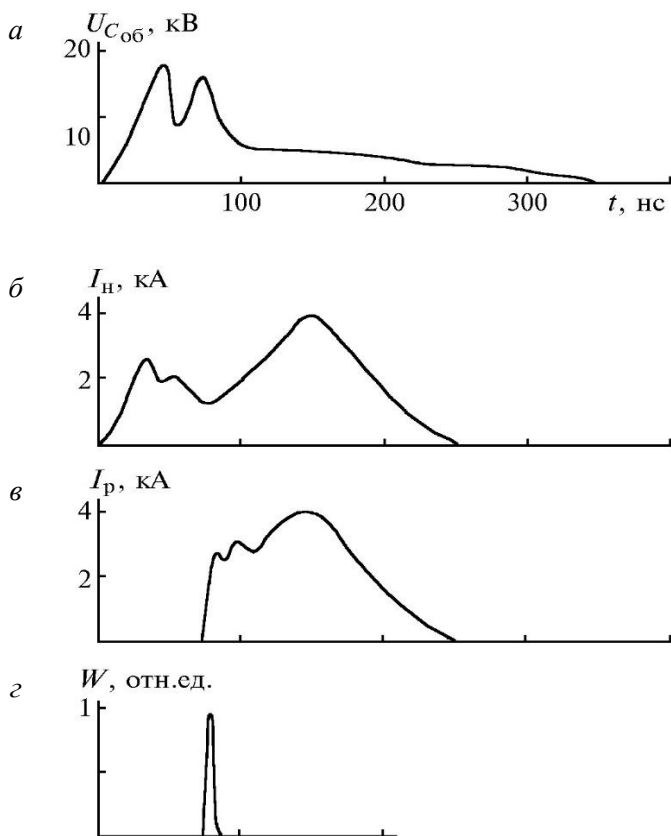


Рис. 2.6. Осциллограммы напряжения на обострительной емкости (*a*), тока накопительного контура (*б*), разрядного тока через промежуток (*в*) и импульса излучения в азоте (*г*) при давлении 270 торр и $U_0 = 18 \text{ кВ}$

Особенность работы схемы накачки с плазменным электродом наглядно иллюстрирует изменение напряжения на обострительной емкости. При замыкании коммутатора накопительная емкость заряжала обострительную емкость $C_{об1}$, которая обеспечивала работу плазменного электрода и одновременно зарядку емкости второго обострительного контура $C_{об2}$. Этому соответствовал спад напряжения на $C_{об1}$, а затем снова осуществлялась ее дозарядка. По разности амплитуды пиков напряжения можно определить долю энергии, необходимой для работы плазменного электрода. При этом происходила УФ-предыонизация основного промежутка от плазменного электрода за время порядка 15 нс. Затем обострительная емкость, а далее накопительная емкость разряжались на лазерный промежуток, что характеризовалось квазистационарным спадом напряжения ~ 250 нс. Однако импульс генерации по длительности равнялся 5 нс, что связано с особенностями работы азотного лазера на самоограниченных переходах. Основная энергия, вкладываемая в разряд, тратилась в основном на разогрев газа, КПД лазера соответствовал 0,06 %.

На рис. 2.7 показана зависимость энергии излучения от давления азота для промежутков с одним или двумя плазменными электродами. Максимальная энергия излучения 0,3 мДж соответствовала давлению азота 150 торр для одного плазменного электрода. Для двух плазменных электродов оптимальное рабочее давление азота уменьшалось до 100 торр. Энергия излучения возрастала почти в два раза до 0,5 мДж, а соответственно, повышалась эффективность лазера. Отметим, что для данной схемы накачки наблюдался линейный рост энергии излучения, аналогичный системе с источником искровой УФ-предыонизации [58].

На основании проведенных исследований была разработана двухконтурная схема накачки для сетчатого катода с источником коронной УФ-предыонизации. Она работала с частотой повторения до 80 Гц [78] (см. рис. 1.16). Активный объем лазерного промежутка соответствовал $D \cdot H \cdot L = 0,4 \cdot 0,8 \cdot 20$ см³, где ширина электродов, а соответственно, ширина излучения была в 2 раза больше, чем расстояние между электродами. Буферный объем кюветы с газовыми компонентами составлял 1 л. Для оптимального режима работы лазера использовались емкости контуров накачки с параметрами $C_n = 6$ нФ и $C_{об} = 2,6$ нФ. Максимальной энергии излучения 0,13 мДж при длительности импульса генерации 5 нс

2. Азотные лазеры с источниками УФ-предыонизации

соответствовало рабочее давление азота 120 торр. Система накачки работала при зарядных напряжениях от 6 до 12 кВ.

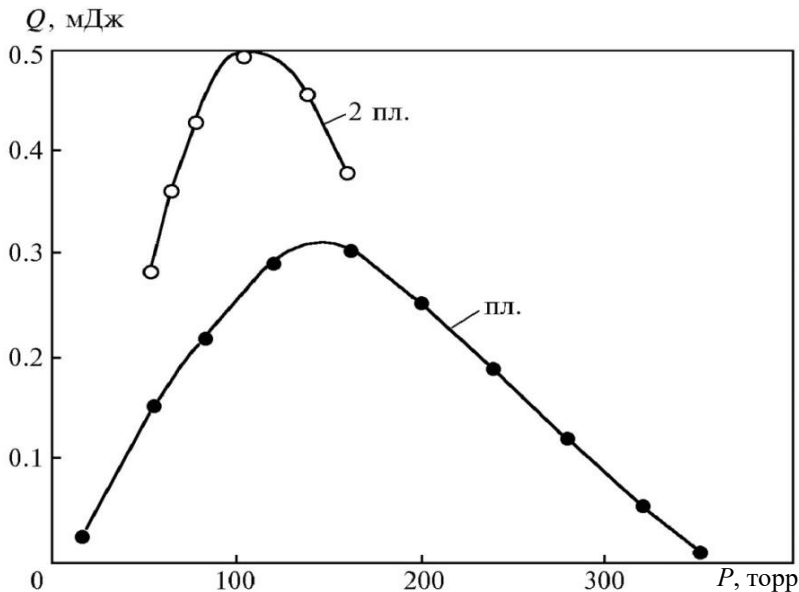


Рис. 2.7. Зависимость энергии излучения азотного лазера от давления для схем накачки с двумя плазменными электродами или с одним плазменным электродом при $U_0 = 20$ кВ

На рис. 2.8 приведены зависимости средней мощности излучения от частоты следования импульсов, зарядного напряжения и общего количества импульсов для отпаянного варианта работы лазера. Максимальная средняя мощность излучения составляла 4 мВт для зарядного напряжения 12 кВ. При оптимальной частоте следования импульсов излучения 40 Гц средняя мощность уменьшалась в два раза за количество импульсов $3 \cdot 10^6$. Таким образом, нами была показана возможность получения квадратного сечения излучения малой апертуры $D \cdot H = 0,2 \cdot 0,2$; $0,25 \cdot 0,25$ см² не только в лазерах ТЕА с генераторами Блюмляйна [94, 116], но и в ТЕ-лазерах с двухконтурными емкостными схемами

накачки с большей апертурой разряда $D \cdot H = 0,6 \cdot 0,7; 0,4 \cdot 0,7 \text{ см}^2$ и лазерного излучения с источниками плазменной и коронной УФ-предыонизации [70, 78]. При этом схема накачки проще и надежнее для работы в частотном режиме генерации. В работе [117] более подробно исследовалась схема накачки при стабилизированном источнике коронной УФ-предыонизации для получения максимального КПД азотного лазера.

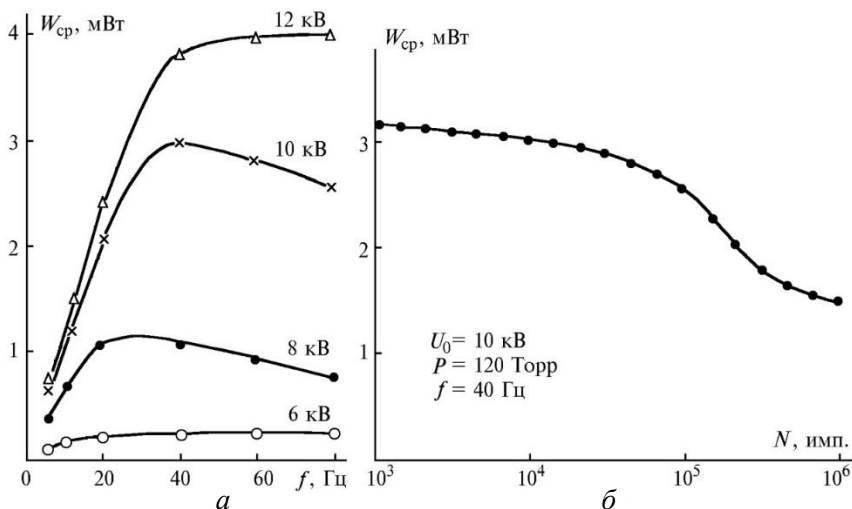


Рис. 2.8. Зависимость средней мощности излучения азотного лазера от частоты следования импульсов возбуждения при изменении зарядного напряжения (*а*) и общего количества импульсов излучения (*б*)

Недостатками азотного лазера считаются: низкий практический коэффициент полезного действия $< 0,1 \%$, низкая энергия излучения в импульсе $\leq 0,1 \text{ мДж}$, ограниченный ресурс работы активной среды $\sim 10^6$ импульсов излучения и большая расходимость излучения. Грубые оценки авторов работы [118] показали, что КПД азотного лазера может достигать 4% . В работах [30, 39] сообщалось о возможности получении КПД лазера от 1 до 3% . Высокая его эффективность достигалась за счет высокотехнологической разработки элементов системы возбуждения и их согласования с активным объемом лазера. Авторами ряда работ

2. Азотные лазеры с источниками УФ-предыонизации

также была показана возможность увеличения длительности импульса излучения до 40 нс [102, 119], повышения энергии излучения до 30 мДж [100, 102, 103, 120] и уменьшения расходимости лазерного излучения [78, 101, 103, 119]. Многочисленные попытки математического моделирования процессов, протекающих в азотном лазере, обычно касались лишь способа накачки быстрым разрядом, поэтому они не давали удовлетворительного согласования с имеющимися экспериментальными данными. Это затрудняло поиск условий для получения требуемых характеристик и создания азотного лазера с высоким КПД, исходя из традиционно сложившихся представлений о способах его накачки. Поэтому многие исследователи проявляли повышенный интерес к разработке эффективного азотного лазера [79, 120–123].

Нами рассмотрена возможность повышения КПД азотного импульсно-периодического лазера за счет применения квазистационарного ввода энергии возбуждения в активную среду, состоящую из молекулярного азота и инертных газов гелия или неона [119, 124]. Азотный лазер работал в отпаянном режиме с частотой повторения импульсов до 40 Гц. Исследования проводились на установке, параметры и конструктивные особенности которой подробно приведены в работе [78]. Поперечный разряд возбуждения осуществлялся в активном объеме $0,7 \cdot 0,5 \cdot 20 \text{ см}^3$, находящемся в общем объеме газовой смеси 1 л. Активная среда накачивалась от емкостной схемы питания с коронным источником УФ-предыонизации. Данный способ накачки позволял получать самосогласованный квазистационарный режим ввода энергии возбуждения в активную среду [119]. В качестве коммутатора применялся промышленный разрядник РУ-62. Зарядное напряжение источника питания было постоянным и равным 10 кВ. В экспериментах использовался технический азот и спектрально чистые газы гелий или неон. Нами исследовались разрядные и энергетические параметры молекулярного азота и его смесей с гелием или неоном в частотном режиме работы лазера.

В табл. 2.3 представлены максимальные параметры излучения для оптимальных рабочих давлений азота ($P_{\text{опт}}$) в зависимости от частоты следования импульсов. Это средняя мощность излучения ($W_{\text{ср}}$), импульсная мощность ($W_{\text{пик}}$), импульсная энергия ($E_{\text{пик}}$) и КПД азотного лазера. Длительность импульсов излучения равнялась на полувысоте 5 нс.

Из полученных результатов следует, что максимальные параметры излучения реализуются при низкой частоте следования импульсов 3 Гц.

Импульсные газовые УФ-лазеры

Импульсной мощности 160 кВт с энергией излучения 0,8 мДж соответствовал высокий практический КПД, равный 0,27 %, который намного выше по сравнению с традиционной схемой накачки (генератор Блюмляйна). С увеличением частоты следования до 10 Гц эффективность лазера снижалась почти в 4 раза. Она слабо менялась с ростом частоты следования импульсов до 40 Гц. Максимальной средней мощности 3,8 мВт соответствовала эффективность лазера 0,03 %.

Таблица 2.3

Максимальные параметры излучения отпаянного азотного лазера для оптимальных давлений азота в зависимости от частоты следования импульсов накачки

f , Гц	$P_{\text{опт}}$, торр	$W_{\text{ср}}$, мВт	$W_{\text{пик}}$, кВт	$E_{\text{пик}}$, мДж	КПД, %
3	120	2,4	160	0,8	0,27
10	120	2,1	42	0,21	0,07
20	120	3	30	0,15	0,05
30	90	3,5	23	0,12	0,04
40	90	3,8	19	0,095	0,03

Такое поведение параметров излучения связано с особенностями вклада энергии в разряд для фиксированного зарядного напряжения 10 кВ. Аналогичные исследования по повышению эффективности азотного лазера были проведены в зависимости от влияния инертных газов гелия или неона при рабочих давлениях от 30 до 760 торр.

На рис. 2.9 приведены зависимости средней мощности излучения для фиксированных давлений азота от 15 до 150 торр от добавок гелия от 15 до 610 торр при частоте следования импульсов 10 Гц. Генерация излучения не наблюдалась для давления азота 15 торр. Рост концентрации гелия обеспечивал линейный рост средней мощности до 0,7 мВт при суммарном давлении смеси 200 торр. В этом случае мощность излучения возрастала почти на порядок и оставалась постоянной до давления 500 торр. Далее она плавно спадала до 0,5 мВт при давлении 1 атм. Средняя мощность 0,7 мВт для давления азота 30 торр соответствовала максимальной мощности для смеси $\text{N}_2\text{:He} = (1:19)$ 15 торр и возрастала

2. Азотные лазеры с источниками УФ-предыонизации

в 2 раза для смеси $N_2:He = (1:9)$ 30 торр. Средняя мощность 1,4 мВт для давления азота 60 торр соответствовала максимальной мощности смеси $N_2:He = (1:9)$ 30 торр и возрастала на 30 % в смеси $N_2:He = (1:4)$ 60 торр. Средняя мощность 1,9 мВт для давления азота 90 торр почти соответствовала максимальной мощности смеси $N_2:He = (1:4)$ 60 торр и возрастала лишь на 10 % в смесях $N_2:He = (1:1-3)$ 90 торр. Следует отметить, что средняя мощность для чистого азота для давления не более 60 торр может быть много меньше или равна мощности, реализуемой в смесях $N_2:He$ при давлении 1 атм. Для давления азота 120 торр была получена максимальная мощность излучения 2,25 мВт, которая с добавлением гелия линейно спадала в 2 раза при давлении 1 атм. Аналогичная ситуация наблюдалась для давления азота 150 торр.

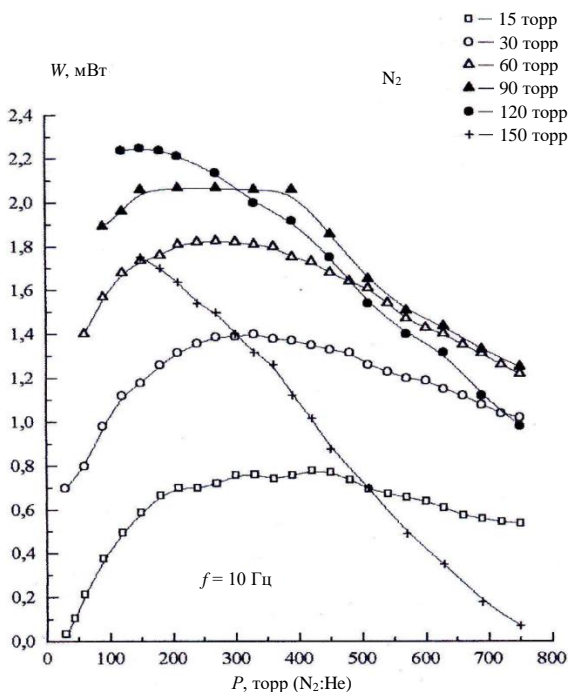


Рис. 2.9. Зависимости средней мощности излучения для смесей $N_2:He$ для фиксированных давлений азота от содержания гелия

При этом средняя мощность излучения спадала почти до нуля при давлении 1 атм. Спад средней мощности излучения с ростом давления гелия связан с контракцией разряда из-за малой начальной концентрации электронов в промежутке, создаваемой источником УФ-предыонизации. Повышение концентрации электронов было ограничено источником питания, работающим с постоянным зарядным напряжением 10 кВ.

На рис. 2.10 приведены аналогичные зависимости средней мощности излучения для фиксированных давлений азота от 15 до 150 торр от добавок неона от 15 до 610 торр при частоте следования импульсов 10 Гц. Форма и амплитудные значения зависимостей средней мощности от содержания неона почти аналогичны гелиевым смесям для фиксированных давлений азота до 60 торр.

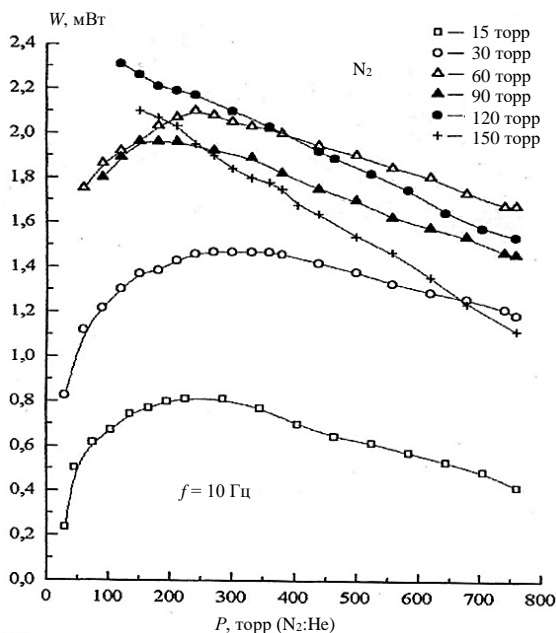


Рис. 2.10. Зависимости средней мощности излучения для газовых смесей $N_2:Ne$ для фиксированных давлений азота от содержания неона

2. Азотные лазеры с источниками УФ-предыонизации

Для давления азота 90 торр добавка неона увеличивает максимальную мощность излучения лишь на 8 % в смеси $N_2:Ne = (1:1)$ 90 торр. Эта мощность излучения меньше, чем для смеси $N_2:Ne = (1:3)$ 60 торр. Следует отметить еще одну характерную особенность для неоновых смесей. Для больших давлений азота добавки неона линейно уменьшают среднюю мощность излучения.

Она уменьшается не более чем в 2 раза при давлении 1 атм по сравнению с буферным газом гелием. Таким образом, из анализа результатов исследования следует, что выходные параметры лазерного излучения можно существенно увеличивать за счет буферного газа гелия или неона для фиксированного давления азота до 60 торр. При этом выбор буферного газа не играет большой роли для рабочих давлений порядка 0,5 атм. Для низких давлений азота или смесей азота лучше использовать гелий, а для смесей атмосферного давления неон. На основании проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. Для отпаянного азотного лазера квазистационарный режим ввода энергии обеспечивает получение пиковой мощности излучения 160 кВт с энергией 0,8 мДж с высоким практическим КПД, равным 0,27 %.

2. За счет буферного газа гелия или неона можно существенно повышать энергетические параметры излучения, а соответственно, КПД азотного лазера.

3. Разработан простой малогабаритный отпаянный азотный лазер с частотой повторения до 40 Гц, работающий при давлениях от 30 до 760 торр с высокими выходными параметрами излучения.

4. Разработаны малогабаритные азотные лазеры типа ТЕ и ТЕА с изменяющейся апертурой излучения, которые работали с УФ-предыонизацией за счет коронного или плазменного разряда.

Нами использовались источники УФ-предыонизации в виде коронного разряда на электродах [42], искрового [58], плазменного [70, 76] и коронного разряда через сетчатый катод [78]. Ранее авторы [105] попытались сделать анализ источников УФ-предыонизации для азотного лазера атмосферного давления. В качестве базовой схемы накачки была выбрана традиционная схема Блюмляйна с поверхностной коронной УФ-предыонизацией в зависимости от ее удаления от электродов накачки. Нами же сделан анализ основных работ азотных лазеров с различными источниками УФ-предыонизации и схемами

накачки (табл. 2.2). Отметим, что устойчивость объемного разряда зависела: от типа источника УФ-предыонизации; режима ввода энергии в газ; рабочей поверхности электродов (или выбора катода).

2.3. Азотные лазеры с УФ-предыонизацией и продольным разрядом возбуждения

Как с практической, так и с научной точки зрения для азотного лазера интересно сравнить удельные параметры излучения для поперечного и продольного разряда возбуждения с источниками УФ-предыонизации. Авторы работы [125], используя секционированный продольный разряд и УФ-предыонизацию, получили высокую однородность лазерного излучения для относительно низкого зарядного напряжения, равного 20 кВ. Они показали возможность создания простых и дешевых миниатюрных азотных лазеров. Для сравнения в работе авторов [126] для активной длины продольного разряда 22 см без УФ-предыонизации использовалось зарядное напряжение 100 кВ и рабочее давление 10 торр. Оптимальное рабочее давление азота лазера увеличивалось в 4–5 раз с применением УФ-предыонизации, а соответственно, возрастали удельные параметры излучения.

На рис. 1.20 приведена электрическая схема питания для азотного лазера с продольным разрядом накачки и искровой УФ-предыонизацией [87]. Были проведены исследования энергетических выходных параметров излучения в зависимости от характеристик системы накачки и вкладываемой в разряд энергии.

На рис. 2.11 показана зависимость средней мощности излучения от суммарной величины обострительной емкости. Максимальная средняя мощность излучения равнялась 0,35 мВт и достигалась при параметрах генератора накачки $C_{об} = 0,9$ нФ, $C_n = 12$ нФ $U_0 = 12$ кВ, работающего с частотой повторения 10 Гц и давлением азота 40 торр. Генератор накачки Бл-н (С) позволял работать с частотой повторения до 15 Гц. Как показали эксперименты, для частотного режима работы лучше применять емкостную двухконтурную схему накачки [78]. Длительность импульса генерации на полувывоте равнялась 2,5 нс. Она достигалась за счет уменьшения индуктивности разрядного контура. Лазер работал

2. Азотные лазеры с источниками УФ-предыонизации

в отпаянном режиме. Он обеспечивал стабильное количество импульсов излучения, равное $1 \cdot 10^5$.

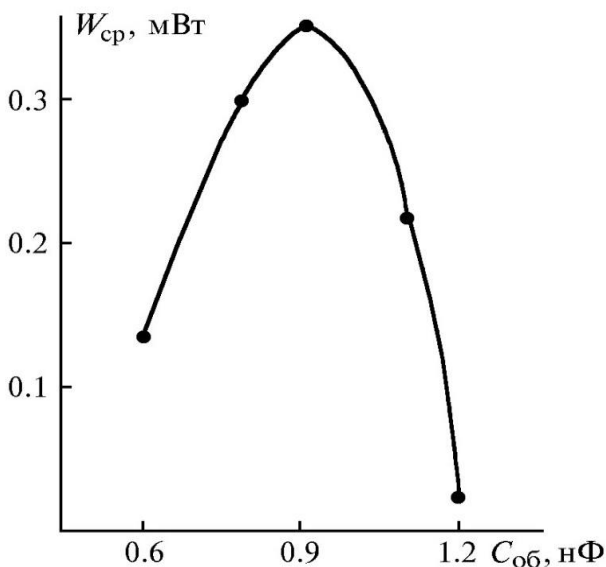


Рис. 2.11. Зависимость средней мощности излучения азотного лазера с продольным разрядом возбуждения с УФ-предыонизацией от величины обострительной емкости

На рис. 2.12 приведены зависимости средней мощности излучения от зарядного напряжения (рис. 2.12, а) при давлении 30 торр, частоте повторения 10 Гц и энергии излучения от зарядного напряжения и рабочего давления (рис. 2.12, б). С ростом зарядного напряжения линейно росли выходные параметры излучения. Особенностью данной системы является использование низких зарядных напряжений, которые более чем в два раза ниже, чем в работе [125]. А, как известно, для многих практических применений, особенно в медицине, необходимо работать при как можно более низких высоковольтных напряжениях. С другой стороны, низкие рабочие напряжения повышают надежность работы лазера в целом. Для данной системы оптимальное давление

азота равнялось 40 торр независимо от зарядного напряжения. Максимальная энергия излучения 0,05 мДж была зарегистрирована для зарядного напряжения 13 кВ.

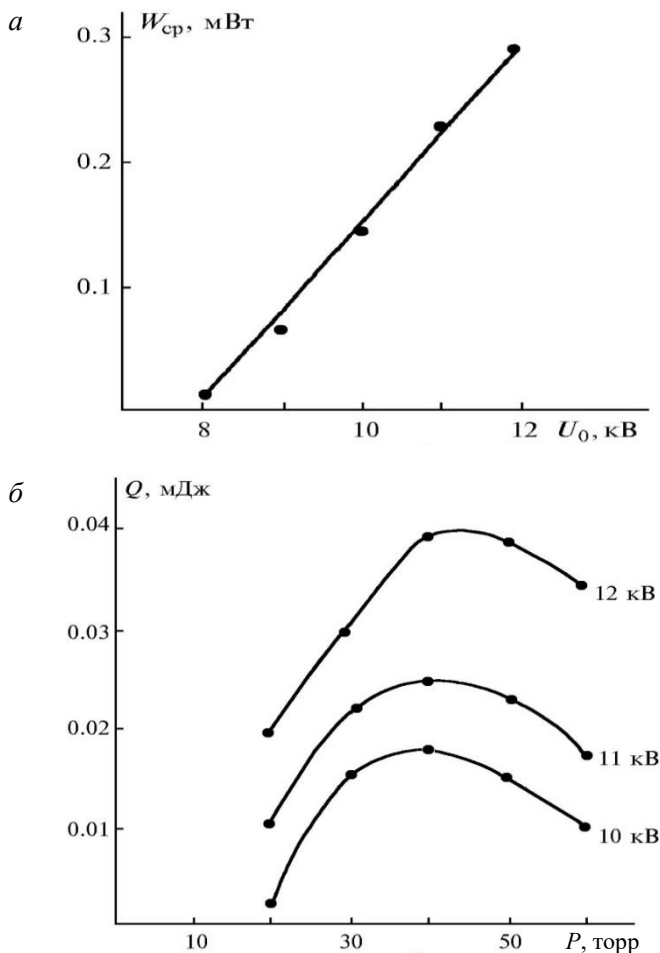


Рис. 2.12. Зависимости средней мощности от зарядного напряжения при $P = 30$ торр, $f = 10$ Гц (*а*) и энергии излучения от давления (*б*) для азотного лазера с продольным разрядом и УФ-предыонизацией

2. Азотные лазеры с источниками УФ-предыонизации

Эксперименты показали жесткую зависимость между согласованием сопротивления разрядной плазмы и источником питания для случая использования автоматической УФ-предыонизации. Коэффициент полезного действия лазера соответствовал 0,01 %. В результате исследований нами был разработан миниатюрный лазер «ЭКСИК-01М» [86, 87]. Следует особо выделить работу [127], в которой авторы круглую стеклянную трубку заменили прямоугольной, уменьшили искровые промежутки до 0,2 см, а ширину электродов увеличили до 3 см, тем самым расширив область поверхностного разряда. Схема накачки была аналогична нашей. Это позволило повысить мощность излучения до 160 кВт и энергию до 1,28 мДж за счет увеличения активного объема почти в пять раз. Следовательно, продольные схемы накачки по эффективности приближаются к системам с поперечным разрядом.

В табл. 2.4 приведены максимальные параметры излучения для лазеров типа ТЕ, ТЕА и ТЕАН на основании проведенных исследований и анализа работ других авторов. Для лазера типа ТЕ при «идеальном» согласовании системы накачки и активного объема был получен максимальный КПД лазера 1–3 % [30, 39]. Для лазера типа ТЕА была показана возможность получения импульсов излучения 2–19 нс с КПД, равным 0,1 % [39, 42, 102]. Для лазеров типа ТЕАН были получены самые короткие импульсы генерации 0,5–2 нс с КПД 0,18 % [106, 116, 128].

Таблица 2.4

Основные работы и максимальные параметры излучения для азотных лазеров типа ТЕ, ТЕА и ТЕАН

№ п/п	Тип накачки	$P_{\text{опт}}$, атм	$U_{0\text{ср}}$, кВ	W , МВт	Q , мДж	$Q_{\text{уд}}$, Дж/л·атм	$\tau_{h/2}$, нс	КПД, %
I	ТЕ	0,05–0,15	6–10	9 [30]	20 [38]	19 [38]	1,2–19 [92, 102]	1–3 [30, 39]
II	ТЕА	0,05–0,2 He:N F_3 (SF $_6$)	15	5 [102]	30 [102]	0,16 [110]	2–10 [42*, 102]	0,07 [109]
III	ТЕАН	1–2,5	12	0,6 [23]	0,6 [23]	1 [129]	0,5–2 [106, 116]	0,18 [128]

В табл. 2.5 представлены параметры миниатюрных азотных лазеров с продольным и поперечным возбуждением. Для сравнения даны работы с продольным разрядом без предыонизации. Продольный разряд с УФ-предыонизацией по своим параметрам близок к ТЕА-лазерам. Пока основным недостатком остается более низкий КПД лазера, который отличается на порядок. Однако следует отметить, что продольный разряд имеет потенциальные возможности по использованию емкостных двухконтурных схем накачки и выбору оптимальных источников УФ-предыонизации.

Таблица 2.5

**Основные работы и максимальные параметры излучения
миниатюрных азотных лазеров с продольным
и поперечным возбуждением**

№ п/п	Тип накачки	$P_{\text{опт}}$, торр	$U_{\text{оср}}$, кВ	W , МВт	$W_{\text{уд}}$, МВт/см ³	Q , мДж	$Q_{\text{уд}}$, Дж/л·атм	$\tau_{h/2}$, нс	КПД, %
I	Продольн.	10	50	0,02 [126]	0,18 [130]	0,1 [131]	10 [131]	5 [126]	—
	Продольн. с УФ- пр.	30–60	12	0,16 [127]	0,02 [125]	1,3 [127]	2 [127]	2,5–8 [87, 127]	0,01 [87, 125]
II	ТЕА	30–110	12	0,33 [104]	0,08 [57]	2,3 [104]	15 [42]	2,5–10 [104, 130]	0,1 [42]
	ТЕАН	760	12	0,1 [94]	2,5 [94]	0,2 [129]	1,25 [94]	0,5-2 [132, 42]	0,18 [128]

Выводы

1. Предложена и исследована коронная УФ-предыонизация на электродах для азотного лазера типа ТЕА и ТЕАН, а также коронная УФ-предыонизация в сочетании с сетчатым электродом при апертуре излучения, удовлетворяющей условию $H \geq D$, где H – ширина, D –

2. Азотные лазеры с источниками УФ-предыонизации

высота разрядного промежутка. Показано, что система с УФ-предыонизацией на электродах с буферным газом Не обеспечивает генерацию при давлениях до 20 атм.

2. Показано, что в случае плазменных электродов реализуется два режима возбуждения: при давлениях азота $< 0,4$ атм – обычная пространственная накачка с апертурой излучения $H \geq D$; при давлениях азота $> 0,4$ атм – накачка скользящими поверхностными разрядами – излучение наблюдалось из приэлектродных областей в виде двух полос.

3. На основе анализа работ по азотным лазерам типа ТЕ, ТЕА и ТЕАН показана конкурентоспособность миниатюрных лазеров продольного возбуждения с УФ-предыонизацией по отношению к лазерам типа ТЕА.

4. На основании проведенных исследований была разработана серия лабораторных малогабаритных и миниатюрных лазеров.

3. ЭКСИМЕРНЫЕ ЛАЗЕРЫ С КОРОННЫМ ИСТОЧНИКОМ УФ-ПРЕДЫОНИЗАЦИИ

В разд. 1 были рассмотрены механизмы образования активных сред азотного и эксимерного лазеров и методы их накачки. В частности, для многокомпонентных лазерных сред (эксимерных) скорость и эффективность образования самих рабочих молекул явным образом зависят от суммарного давления лазерной газовой смеси. Поскольку эксимерные лазеры в основном эффективно работают при давлениях ≥ 1 атм, то для достижения порога генерации должны обеспечиваться удельные мощности накачки более $0,5 \text{ МВт}\cdot\text{см}^{-3}$ и пороговые плотности электронов в разряде не менее 10^{14} см^{-3} [18]. Перечисленные требования выполняются в высоковольтном наносекундном разряде при начальном напряжении на промежутке, в несколько раз превышающем статическое пробивное значение, т. е. самостоятельном разряде. Применение вспомогательного источника начальной ионизации газа позволяет улучшать однородность разряда и снижает величину первоначального напряжения на промежутке, устанавливая ее на уровне, оптимальном для возбуждения как эксимерных, так и азотных молекул.

В разд. 2 представлены исследования азотных лазеров высокого давления с УФ-предыонизацией коронным разрядом [42, 43]. В качестве источников накачки применялись генераторы Бл-н (С) [40, 41]. Поэтому в первых экспериментах по исследованию эксимерных лазеров нами был использован опыт по разработке азотных лазеров. В качестве основного источника УФ-предыонизации нами [44] и авторами работы [133] впервые была применена для эксимерных лазеров автоматическая коронная УФ-предыонизация по поверхности диэлектрика возле одного или обоих электродов. Источниками накачки служили генераторы Блюмляйна или двухконтурные схемы возбуждения, обеспечивающие режим накачки быстрым разрядом. В настоящем разделе приводятся результаты исследования энергетических параметров лазерного излучения на молекулах KrF , XeF и XeCl с генераторами накачки Блюмляйна, а также исследования режимов поддержания объемных разрядов в азоте, гелии, аргоне и смесях $\text{He}(\text{Ar}):\text{Xe}:\text{CCl}_4$ в различных схемах возбуждения с источниками коронной УФ-предыонизации в зависимости от газовых компонентов, давления, удельных энергозатрат и параметров разрядных контуров накачки.

3.1. Эксимерные лазеры на молекулах KrF, XeF и XeCl, возбуждаемые быстрым разрядом

В 1975 г. впервые была получена авторами работ [10, 134] генерация на молекулах XeF и KrF при возбуждении быстрым разрядом без УФ-предыонизации для смесей He:(Xe)Kr:NF₃ при давлении 0,5–1 атм. В 1976 г. авторами работы [9] была впервые получена генерация на ArF в смесях He:Ar:SF₆ методом двойного разряда накачки при давлении до 8 атм. Авторы работы [12] впервые получили генерацию на молекулах XeCl в смесях He:Xe:CF₂Cl при давлении 1,2 атм. В их экспериментах менее эффективными были галогениды хлора C₂F₃Cl, BCl₃ и CCl₄. Для KrF-лазера авторы работы [135] впервые применили двухконтурную схему накачки, используя искровую УФ-предыонизацию от независимого источника питания. Максимальная энергия излучения достигалась в смесях He:Kr:N₂F₄ при давлении 3 атм. Для XeF-лазера авторы работы [32] использовали генератор Бл-н с автоматической УФ-предыонизацией, технически выполненной в виде проволоочки, натянутой возле одного из электродов, т. е. с коронной УФ-предыонизацией. Авторы работы [8], используя генератор Бл-н (С) с искровой УФ-предыонизацией сбоку от электродов, получили для KrF-лазера КПД 1 %. В качестве галогенида фтора применяли F₂. Авторы работы [11], используя генератор Бл-н без УФ-предыонизации, показали, что КПД лазера зависел от коэффициента обратной связи резонатора и величины E/N . Для XeF-лазера была получена удельная энергия излучения 10 Дж·л⁻¹·атм⁻¹, а КПД лазера равнялся 1 % для активного объема 2,5 см³.

Вся информация к началу 1977 г. об электроразрядных эксимерных лазерах, возбуждаемых самостоятельным разрядом, перечислена выше. Ясно было одно, что для высоких рабочих давлений необходим режим быстрого разряда с дополнительным источником УФ-предыонизации. Оставались открытыми вопросы: о выборе типа источника УФ-предыонизации (искровая, рентгеновская и т. д.); о режимах возбуждения; о связи между источниками возбуждения и УФ-предыонизации; о характере развития объемных разрядов высокого давления; о влиянии буферных газов (He, Ar, Ne), инертных рабочих газов (Xe, Kr, Ar) и галогенидов фтора или хлора (F₂, NF₃, CCl₄, BCl₃, HCl) как на разряд, так и на кинетику образования рабочих молекул, и соответственно на

параметры выходного излучения (временные, спектральные и удельные), и в конечном итоге на максимальный КПД лазера.

Для ХеСl-лазера вообще не было экспериментальных работ за исключением работы [12], в которой с галогенидом CF_2Cl_2 была получена генерация с энергией излучения 1 мДж. Оставался открытым вопрос о выборе галогенида для ХеСl-лазера. Из общих соображений он должен обладать следующими физико-химическими свойствами:

1. Галогенид должен иметь малое поглощение на длине лазерного излучения ($\lambda \sim 308$ нм).

2. Рабочая молекула галогенида должна иметь простую химическую формулу.

3. Химическая связь галогенида с остатком должна быть слабой, а сам остаток должен удовлетворять тем же требованиям, что и первоначальная молекула.

4. Желательно, чтобы галогенид был с малой химической активностью и достаточно высоким давлением паров насыщения.

С учетом данных критериев для исследования генерации ХеСl-лазера использовались следующие галогениды: CCl_4 , CHCl_3 и CF_2Cl_2 [136]. Исследования проводились на установках, которые представлены в разд. 1 (см. рис. 1.7). Данные системы позволяли изменять условия экспериментов в широких пределах. Активная длина электродов менялась от 20 до 100 см, а соответственно, и энергетика генераторов накачки [44, 45, 53].

На рис. 3.1 показаны типичные осциллограммы импульсов излучения на молекулах ХеСl, КrF и ХеF при активной длине электродов 100 см (рис. 3.1, а) и для ХеСl-лазера 20 см (рис. 3.1, б) в зависимости от галогенида CHCl_3 , CF_2Cl_2 и CCl_4 .

В табл. 3.1 приведены максимальные параметры излучения, полученные нами для ХеСl, ХеF и КrF в зависимости от газовых компонентов и запасаемой энергии в активной среде. Стало ясно, что данные системы возбуждения с быстрым разрядом обеспечивали относительно высокую эффективность ХеСl-лазера: энергию излучения 21 мДж при длительности импульса генерации на полувысоте 12 нс и КПД 0,23 %. Однако появились работы [13, 20, 137], в которых в качестве галогенидов эффективно использовались BCl_3 и HCl . Авторами работ была получена энергия излучения 110 мДж и КПД лазера 0,8 %.

3. Эксимерные лазеры с коронным источником УФ-предыонизации

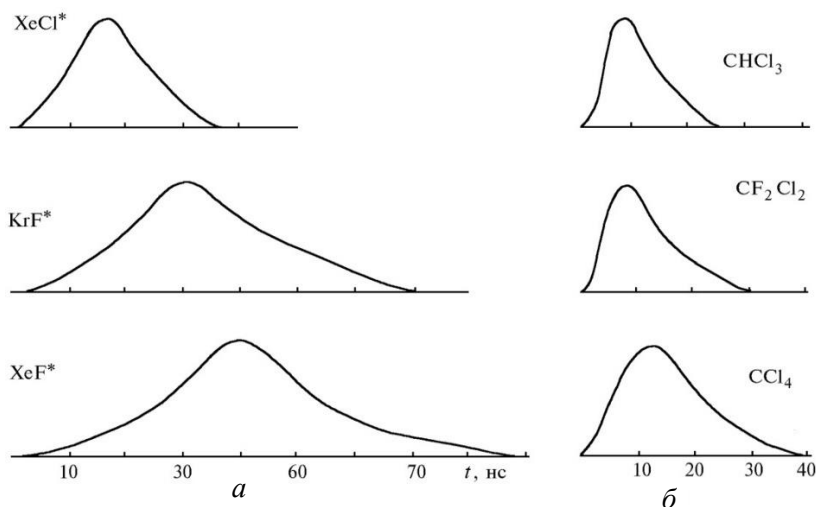


Рис. 3.1. Осциллограммы импульсов излучения на молекулах XeCl, KrF и XeF (а) и XeCl-лазера от используемого галогенида (б)

Таблица 3.1

Максимальные параметры излучения на молекулах XeF*, KrF* и XeCl* с накачкой генератором Блюмляйна (С)

№ п/п	Рабочая смесь (He)	$V, \text{см}^3$ $D \cdot H \cdot L$	U_0 , кВ	$P_{\text{опт}}$, атм	Q , мДж	$\tau_{h/2}$, нс	КПД, %	Ли- тер.
1	Xe:NF ₃ = 1:1	$1,8 \cdot 0,3 \cdot 100$	16	0,6	15	25	0,17	[44]
2	Kr:NF ₃ = 30:1		12	0,7	5	25	0,1	[45]
3	Xe:CCl ₄ = 12:1		16	1,8	2,1	12	0,23	[53]
4	Xe:CCl ₄ = 20:1	$0,9 \cdot 0,2 \cdot 20$	14	3,4	0,36	10	—	[43]
5	Xe:CHCl ₄ = 20:1		14	3,5	0,68	7	—	[43] [53]

Встал вопрос о дальнейшем повышении эффективности параметров излучения с источником коронной УФ-предыонизации в зависимости от условий поддержания объемных разрядов в газовых смесях He:Xe:CCl₄ с возможно максимальными удельными энергиями, вкладываемыми в активную среду.

3.2. Объемный самостоятельный разряд в азоте, гелии и He:Xe:CCl₄

В разд. 1 приведена электрическая схема установки (см. рис. 1.11), разработанной для исследования объемного разряда в азоте, гелии и аргоне, а также в газовых смесях при давлениях до 4 атм с источником коронной УФ-предыонизации на аноде. Особенностью данной установки являлась электродная система. Ширина катода составляла 2,6 см, а анод был выполнен в виде стержня диаметром 1 см. Такая конфигурация электродов обеспечивала высокую однородность разряда шириной 0,3–0,4 см, при этом усиление электрического поля на краях катода практически не влияло на характеристики разряда.

3.2.1. Объемный самостоятельный разряд в азоте

В разд. 2 приведены результаты исследования энергетических характеристик азотных лазеров низкого и высокого давления с коронной УФ-предыонизацией, параметры которых зависели от временного и пространственного характера формирования объемного самостоятельного разряда [60, 138]. Нами рассматривались особенности формирования самостоятельного разряда в азоте как для азотных, так и для эксимерных лазеров в виде эталонного разряда для многокомпонентных сред.

На рис. 3.2 приведены типичные осциллограммы напряжения на промежутке (рис. 3.2, *а*), тока (рис. 3.2, *б*) и фотографии интегрального свечения разряда вдоль электродов (рис. 3.2, *в*) в азоте при зарядном напряжении 15 кВ в зависимости от давления. В этих условиях объемный разряд существовал до давления 0,25 атм. Первая особенность данного режима разряда в том, что на осциллограммах напряжения на промежутке можно выделить 3 характерных стадии: I – участок нарастания напряжения до пробивного ($U_{пр}$); II – участок быстрого спада напряжения; III – участок медленного спада напряжения (или квазистационарная стадия разряда). Время нарастания напряжения соответствовало 30 нс и зависело лишь от параметров разрядного контура. Вторая особенность в том, что с давления $\geq 0,2$ атм напряжение пробоя оставалось постоянным и равным 12 кВ, оно определялось значением емкости источника УФ-предыонизации. Из осциллограмм следует, что энергия, затрачива-

3. Эксимерные лазеры с коронным источником УФ-предыонизации

емая на коммутацию и УФ-предыонизацию, не превышала 20 % от запасаемой энергии. С ростом давления время запаздывания пробоя возрастало и достигало максимума при давлении 0,4 атм. Время нарастания разрядного тока увеличивалось с 30 до 90 нс, а амплитуда уменьшалась с ростом давления. Качественный характер развития объемного разряда повышенного давления иллюстрируют интегральные фотографии его свечения (рис. 3.2, в). При давлениях до 0,1 атм наблюдался однородный тлеющий разряд с появляющимися равномерно распределенными катодными пятнами. При давлениях $\geq 0,2$ атм усиливалось одно из катодных пятен, которое при давлениях $\geq 0,3$ атм увеличивалось почти в два раза. На фронте пятен развивались кистеобразные тлеющие разряды, распространяющиеся к аноду.

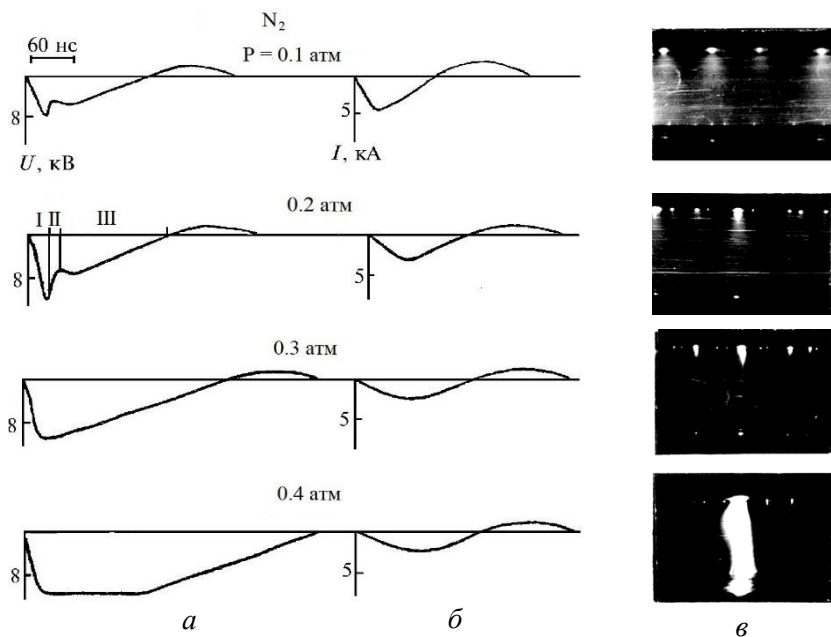


Рис. 3.2. Типичные осциллограммы напряжения на промежутке (а), тока (б) и фотографии интегрального свечения разряда вдоль электродов (в) в азоте с источником УФ-предыонизации от рабочего давления

При давлениях $\geq 0,4$ атм основное катодное пятно переросло в искровой канал, замыкающий разрядный промежуток. Следовательно, объемная стадия разряда ограничивалась развитием катодной неустойчивости с ростом рабочего давления за счет уменьшения E/N почти в два раза. Видимо, критерием однородности объемного разряда может служить наличие квазистационарной стадии на осциллограммах напряжения на промежутке.

3.2.2. Объемный разряд в гелии

Активная среда ХеСl-лазера состояла из буферного газа гелия, инертного газа ксенона и галогенида (CCl_4 , BCl_3 , HCl). Основную часть смеси составлял буферный газ, который обеспечивает релаксацию возбужденных молекул в нижние колебательные состояния в результате соударений, согласно работе [10]. Следовательно, объемный разряд в эксимерных смесях, видимо, в большей степени зависит от концентрации гелия [60].

На рис. 3.3 приведены типичные для гелия осциллограммы напряжения на промежутке (рис. 3.3, а), разрядного тока (рис. 3.3, б), фотографии интегрального свечения разряда вдоль электродов (рис. 3.3, в) и в поперечном сечении (рис. 3.3, г). В гелии равномерный диффузный разряд при давлениях до 0,1 атм занимал всю область катода, анода и даже часть поверхности источников УФ-предыонизации из-за высоких значений $E/N = 4,4 \cdot 10^{-15}$ В·см². При давлении 0,5 атм и $E/N = 5,5 \cdot 10^{-16}$ В·см² разряд ограничивался поверхностью электродов и состоял из двух каналов, замыкающихся на краях катода с наибольшим усилением поля.

На аноде формировались равномерно распределенные пятна, на которые замыкались два основных катодных канала. При давлении ≥ 1 атм число катодных пятен увеличивалось, а площадь разряда на катоде была вдвое больше, чем на аноде. При давлениях более 1,5 атм ширина свечения катода была почти равна ширине свечения анода. С ростом давления до 4 атм возрастала однородность разряда, а разрядный ток линейно спадал (рис. 3.5). В этом случае почти вся энергия в газ вкладывалась в первый полупериод разряда. Это указывало на согласование импеданса источника накачки и плазмы разрядного промежутка за счет давления при $E/N \leq 1,8 \cdot 10^{-16}$ В·см². Отметим, что однородность разряда в продольном сечении хуже, чем в поперечном.

3. Эксимерные лазеры с коронным источником УФ-предыонизации

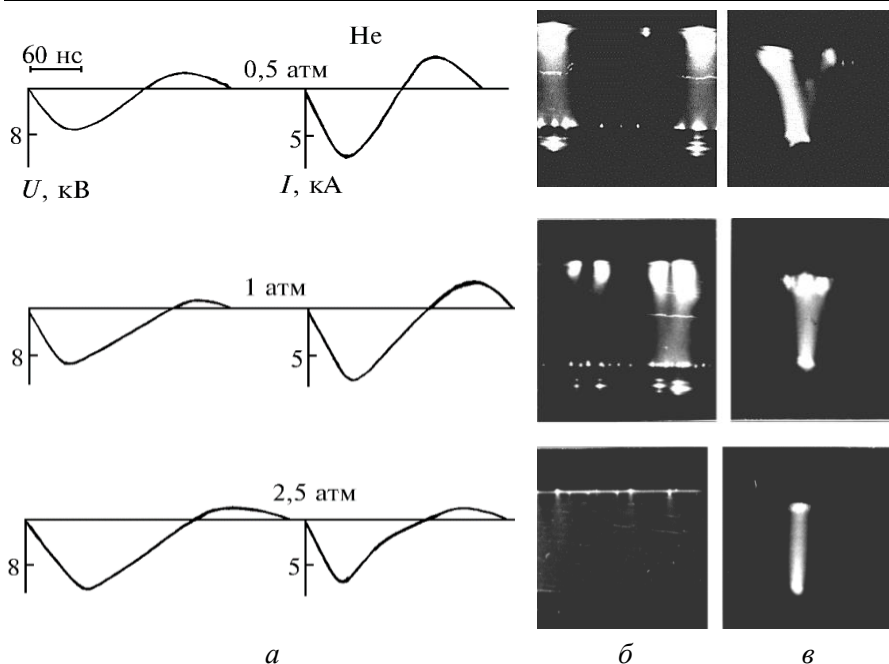


Рис. 3.3. Осциллограммы напряжения на промежутке (а), разрядного тока (б), фотографии интегрального свечения разряда вдоль электродов (в) и в поперечном сечении (г) в гелии от рабочего давления

3.2.3. Объемный разряд в газовых смесях He:Xe:CCl₄

На рис. 3.4 представлены фотографии интегрального свечения самостоятельного объемного разряда с источником УФ-предыонизации в продольном сечении электродов и типичные осциллограммы напряжения на промежутке в газовых смесях He:Xe; He:CCl₄, He:Xe:CCl₄ в зависимости от их давления 1–2,5 атм для постоянной концентрации Xe = 40 торр и CCl₄ = 2 торр при зарядном напряжении 15 кВ.

В газовых смесях He:Xe ($P_{\text{Xe}} = 40$ торр) с ростом давления катодные пятна уменьшались в размерах и количество их возрастало. При этом равномерность распределения пятен улучшалась. Анодные пятна были более мелкие и распределялись равномернее по всей длине

электрода. Равномерный объемный разряд наблюдался при концентрациях Хе до 5 % в газовых смесях и суммарного рабочего давления ≤ 4 атм при $E/N \leq 1,8 \cdot 10^{-16}$ В·см².

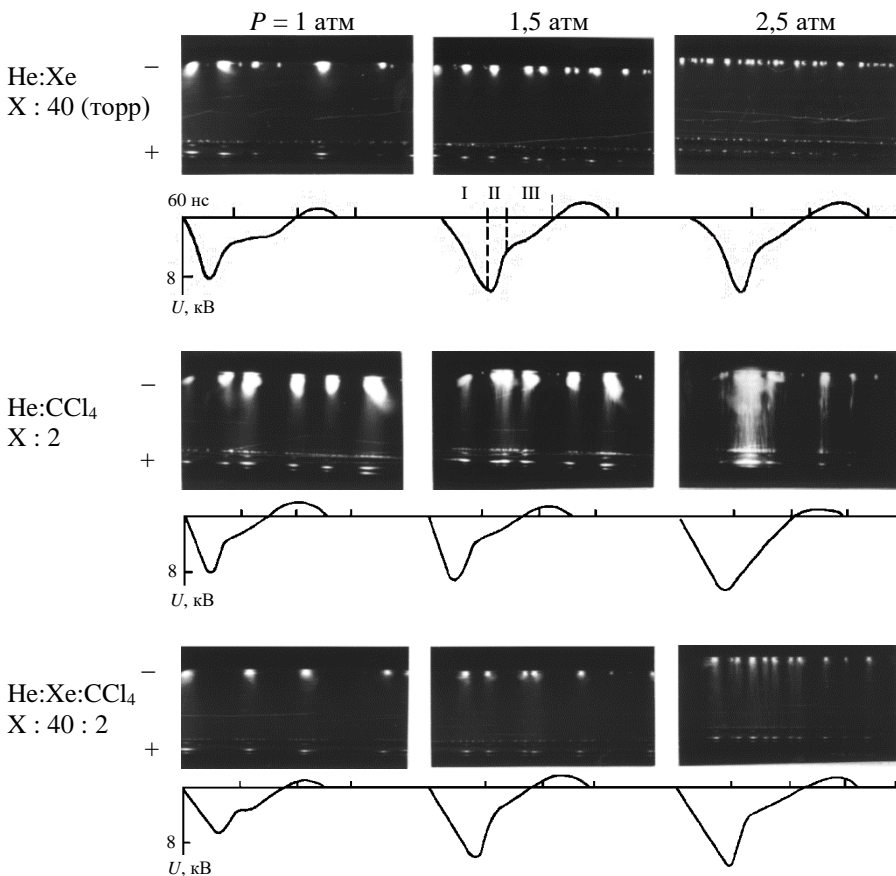


Рис. 3.4. Динамика развития объемного разряда в гелиевых двух- и трех-компонентных газовых смесях в зависимости от их концентрации

На осциллограммах напряжения на промежутке четко выделялись три стадии (по аналогии с азотом): I – стадия нарастания напря-

3. Эксимерные лазеры с коронным источником УФ-предыонизации

жения; II – стадия быстрого спада напряжения; III – квазистационарная стадия (самоподдерживающийся самостоятельный разряд). В чистом гелии квазистационарная стадия разряда отсутствовала. Следовательно, Хе влиял на квазистационарную стадию разряда, которая соответствовала объемному разряду. Можно его поддерживать при большой концентрации Хе за счет снижения суммарного давления газовой смеси. Разрядный ток линейно уменьшался с ростом давления и был ниже, чем для гелия (рис. 3.5).

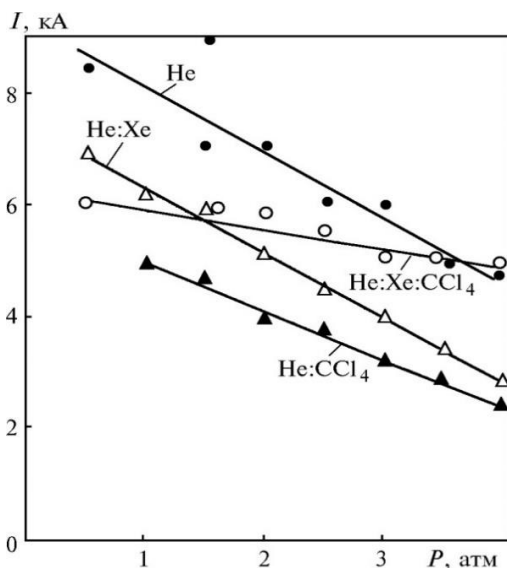


Рис. 3.5. Зависимости разрядного тока для газовых смесей от концентрации компонентов He, Хе и CCl_4 для зарядного напряжения 15 кВ

В газовых смесях $\text{He}:\text{CCl}_4$ катодные пятна были в несколько раз больше, чем для смесей $\text{He}:\text{Xe}$. Из них прорастали кистеобразные диффузные каналы, замыкающиеся на анод. При давлении 2,5 атм два основных пятна сливались в одно, занимающее площадь порядка 25 % межэлектродного промежутка.

На фоне тлеющего разряда наблюдались отдельные мелкие катодные пятна, которые перекрывали промежуток нитеобразными

каналами. При давлениях более 3 атм наблюдалось несколько основных каналов, перекрывающих промежутки. Равномерный объемный разряд существовал до давления 1,5 атм при $E/N = 2,4 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$. Объемный разряд можно было поддерживать до давления 3 атм для содержания в газовой смеси концентрации $\text{CCl}_4 < 0,1 \%$.

В газовых смесях He:Xe:CCl_4 расположение и размеры катодных пятен почти аналогичны газовым смесям He:Xe . С ростом давления более чем 2 атм в промежутке возникало множество слабо проводящих нитевидных каналов, равномерно распределенных вдоль электродов. Видимо, нитевидные каналы являются фактором присутствия CCl_4 в разряде. Однородный разряд наблюдался до давления 4 атм, когда содержание газовых компонентов не превышало $\text{Xe} \leq 5 \%$ и $\text{CCl}_4 \leq 0,1 \%$. Если содержание Xe было $\leq 10 \%$, то тогда наблюдалось усиление свечения прикатодной области. В этом случае объемный разряд происходил при давлениях $\leq 2,5$ атм. Следует отметить, что квазистационарная стадия напряжения на промежутке переходила в медленно спадающее напряжение с ростом давления с увеличением нитевидных каналов.

На рис. 3.5 показаны зависимости разрядного тока газовых компонентов для лазерной смеси от их суммарного давления: при давлениях до 1 атм – максимальный ток для газовых смесей He:Xe , а при больших давлениях – для газовых смесей He:Xe:CCl_4 , хотя для газовых смесей He:Xe и He:CCl_4 он меньше. Этот факт подчеркивает сложность кинетических процессов в многокомпонентных газовых смесях [15]. В наших условиях в объемной стадии разряда удавалось вкладывать удельные энергии до $200 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$. В работах [53, 60] для типичных лазерных смесей He:Xe:CCl_4 в самостоятельном разряде с источником коронной УФ-предыонизации нами были получены устойчивые объемные разряды до давления 4 атм длительностью 100 нс с удельной вкладываемой энергией $W_T \leq 200 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$.

3.3. Объемный самостоятельный разряд в аргоне и Ar:Xe:CCl_4

В разд. 1 показано, что образование эксимерных молекул с буферным газом гелием происходит по реакции (1.2) с последующей

3. Эксимерные лазеры с коронным источником УФ-предыонизации

релаксацией возбужденных частиц при соударениях в нижние колебательные состояния (1.3). Образованием эксимерных молекул по ионному каналу (1.9) можно пренебречь, т. к. в гелии мала вероятность данного процесса, согласно работам [10, 17]. При замене гелия на аргон его интенсивность резко возрастала [139], и образование эксимерных молекул происходило по двум каналам (1.2), (1.9). Поэтому в системах возбуждения с электронным пучком чаще использовали в качестве буферного газа аргон [139, 140]. Известно, что при возбуждении электронным пучком лазерных смесей с аргоном примерно 55 % энергии электронов идет на образование Ar^+ и 10 % на Ar^* [140]. В соответствии с результатами работы [139] в смесях $\text{Ar}:\text{Xe}:\text{CCl}_4$ протекают следующие основные реакции:

		K ($\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $\text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$)	
I.	$\text{Ar} + \bar{e} \rightarrow \text{Ar}^* + \bar{e};$		(3.1)
	$\text{Ar}^* + \text{Xe} \rightarrow \text{Ar} + \text{Xe}^*;$	$2 \cdot 10^{-10}$	(3.2)
	$\text{Xe}^* + \text{CCl}_4 \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{CCl}_3;$	10^{-9}	(3.3)
II.	$\text{Ar} + \bar{e} \rightarrow \text{Ar}^+ + 2\bar{e};$		(3.4)
	$\text{Ar}^+ + 2\text{Ar} \rightarrow \text{Ar}_2^+ + \text{Ar};$	$2 \cdot 10^{-31}$	(3.5)
	$\text{CCl}_4 + \bar{e} \rightarrow \text{CCl}_3 + \text{Cl}^-;$	$4 \cdot 10^{-9}$	(3.6)
	$\text{Ar}_2^+ + \text{Xe} \rightarrow \text{Xe}^+ + 2\text{Ar};$	$8 \cdot 10^{-10}$	(3.7)
	$\text{Xe}^+ + \text{Cl}^- + \text{Ar} \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{Ar};$	$2 \cdot 10^{-6}$	(3.8)
III.	$\text{Xe}^+ + 2\text{Ar} \rightarrow \text{ArXe}^+ + \text{Ar};$	10^{-31}	(3.9)
	$\text{ArXe}^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{Ar}.$	$2 \cdot 10^{-6}$	(3.10)

Здесь K – константы скоростей протекания реакций; I–III – основные каналы образования эксимерных молекул. Использование Ar как буферного газа в эксимерных лазерах, возбуждаемых самостоятельным разрядом, заслуживало особого внимания, т. к. в этом случае увеличивается вероятность образования возбужденных молекул по всем каналам и, следовательно, могут возрасти КПД лазеров. В работах [7, 16] были сделаны первые попытки замены гелия на аргон для XeF - и KrF -лазеров с источником искровой УФ-предыонизации. Результаты оказались отрицательными, излучения не наблюдалось. Авторы указывали, что разряд неустойчивый и развивались искровые каналы.

Нами впервые в 1977 г. в многоконтурной схеме накачки с источником искровой УФ-предыонизации были получены объемные разряды в смесях $\text{Ar}(\text{He})\text{:Xe:CCl}_4$ длительностью до 200 нс, а также эффективная генерация с буферным газом Ar с энергией 20 мДж и КПД, равным 0,5 % по энергии, вложенной в газ [47]. Данная работа стимулировала проведение более детальных исследований области существования объемных разрядов в аргоне и аргоновых смесях Ar:Xe:CCl_4 с источником коронной УФ-предыонизации аналогично газовым смесям He:Xe:CCl_4 [60].

3.3.1. Особенности развития объемного разряда в аргоне

Как отмечалось ранее, в гелии объемный разряд горит между анодом и катодом и его качество улучшается с ростом давления при $E/N \leq 1,8 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$. В аргоне оказалось, что подобный характер развития разряда сохранялся лишь до давления $\leq 0,3 \text{ атм}$ (рис. 3.6).

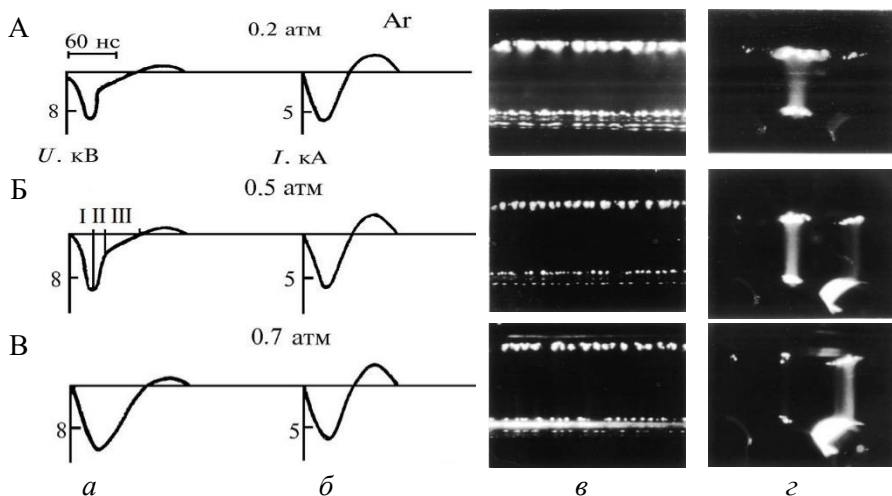


Рис. 3.6. Осциллограммы напряжения на промежутке (а), разрядного тока (б), фотографии свечения разряда вдоль электродов (в) и в поперечном сечении (г) в аргоне с источником УФ-предыонизации от рабочего давления. А, Б, В – характерные режимы развития объемного разряда

3. Эксимерные лазеры с коронным источником УФ-предыонизации

При давлениях более 0,6 атм наблюдался третий режим разряда (В). В этом случае разряд между катодом и анодом прекращался и развивался лишь в области катода с высоким усилением поля и поверхностной плазмой источника предыонизации. При этом на электродах основного промежутка наблюдалось наличие мелких пятен при $E/N = 6 \cdot 10^{-16}$ В·см². На осциллограммах напряжения отсутствовала квазистационарная стадия разряда. Особенность формирования нового типа разряда, на наш взгляд, связана с наличием дополнительных реакций, характерных для аргона [21]:



При малом давлении УФ-излучение из плазмы, образовавшейся на поверхности диэлектрика (коронный разряд), относительно равномерно ионизует и возбуждает газ в промежутке. Поэтому разряд развивался лишь между электродами. С ростом давления электронные лавины преимущественно инициировались в области катода с усилением поля и плазмы на поверхности диэлектрика, что приводило к перераспределению развития основного разряда. В итоге разряд между катодом и анодом прекращался. Данное объяснение физической картины разряда хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований эффективности распространения излучения УФ-предыонизации в молекулярных газах [22]. Эффективность проникновения определялась природой газа, рабочими давлениями, энергией и местом расположения УФ-предыонизации относительно основного разряда. В нашем случае объемный самостоятельный разряд с источником коронной УФ-предыонизации поддерживался в аргоне до 1 атм. С ростом давления почти линейно возрастало пробивное напряжение, а следовательно, увеличивалась и энергия, вводимая в газ.

Таким образом, в результате обнаружения нового типа разряда нами был создан оригинальный плазменный электрод, обеспечивающий эффективную генерацию на молекулах XeF и XeCl с буферным газом аргоном [61, 62].

3.3.2. Объемный разряд в газовых смесях Ar:Xe:CCl₄

На рис. 3.7 приведены фотографии интегрального свечения самостоятельного разряда в продольном сечении и типичные осциллограммы напряжения на промежутке в газовых смесях Ar:Xe, Ar:CCl₄ и Ar:Xe:CCl₄ от суммарного давления смеси для постоянных значений Xe = 30 торр, CCl₄ = 1,5 торр и зарядного напряжения 15 кВ.

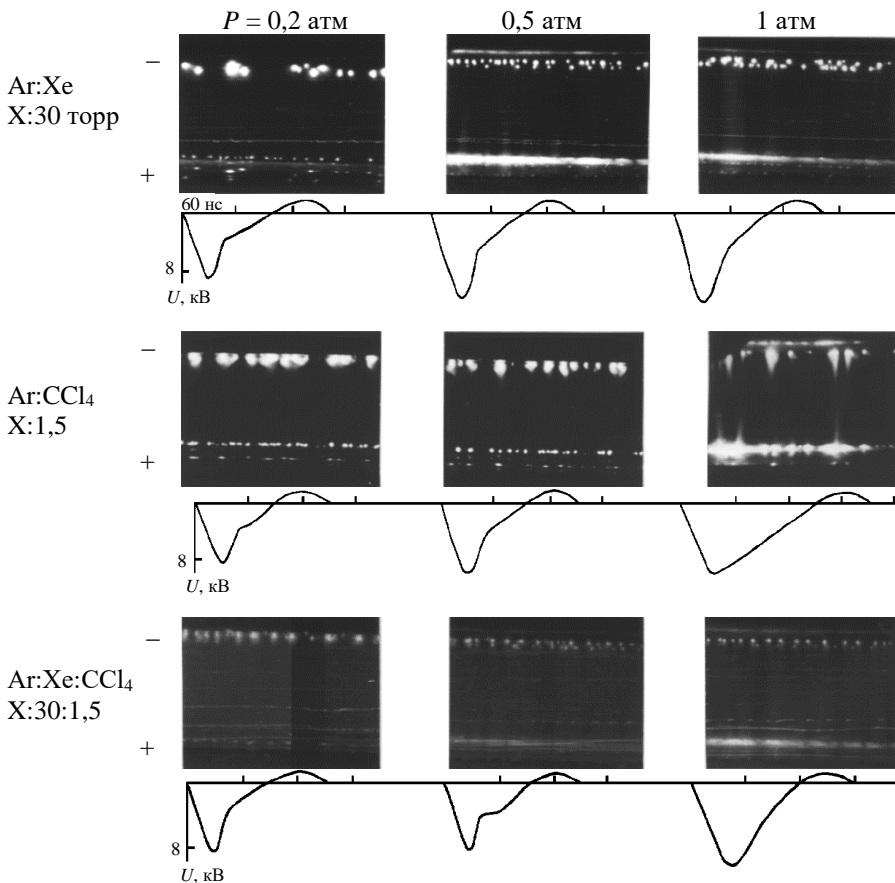


Рис. 3.7. Динамика развития объемного разряда в аргоновых двух- и трех-компонентных газовых смесях в зависимости от их концентрации

3. Эксимерные лазеры с коронным источником УФ-предыонизации

В газовых смесях Ar:Xe с ростом давления до 1 атм катодные пятна уменьшались и их количество возрастало. При этом наблюдалась характерная особенность – образование двойного слоя катодных пятен. Второй слой пятен зарождался в газовом объеме, что согласуется с результатами работ [21, 139]. На аноде наблюдалась сплошная плазменная среда. При давлении более 1 атм пространственные катодные пятна исчезали. Появлялись диффузные каналы слабой интенсивности, которые перекрывали весь промежуток и замыкались на катодных пятнах, равномерно распределенных по всей длине электрода. Равномерный объемный разряд наблюдался до давлений ≤ 2 атм при концентрациях $Xe \leq 5\%$ и $E/N = 4,4 \cdot 10^{-16}$ В·см². Увеличение диапазона давлений устойчивого горения разряда по сравнению с аргоном, видимо, обусловлено тем, что Хе играл роль легкоионизируемой добавки [141]. На это также указывает образование пространственных катодных пятен и рост разрядного тока (см. рис. 3.6). Поэтому должна увеличиваться вероятность протекания кинетических процессов (3.2), (3.7), (3.9). На осциллограммах напряжения наблюдалось три стадии разряда. Отсутствие третьей стадии разряда являлось начальным условием появления неоднородностей в промежутке или началом переключения основного разряда на плазму УФ-предыонизатора как элемента электродной системы.

В смесях Ar:CCl₄ катодные пятна были более крупными, а анодные – мелкими и равномерно распределенными. Пространственные катодные пятна отсутствовали.

При давлении более 0,5 атм размеры анодных и катодных пятен увеличивались при их неоднородности по всей длине. На катоде появлялось несколько основных пятен, прорастающих к аноду, которые замыкались на анод через нитевидные каналы. Объемный разряд наблюдался до давления 0,5 атм при концентрации CCl₄ $\leq 0,1\%$ и значении $E/N = 8 \cdot 10^{-16}$ В·см². Отметим, что в смеси Ar:CCl₄ разряд более устойчив по сравнению с разрядом в смеси He:CCl₄.

В газовых смесях Ar:Xe:CCl₄ характер катодных и анодных пятен аналогичен газовым смесям Ar:Xe, но более однороден. С ростом давления катодные пятна заканчивались равномерными диффузными каналами на плазме источника УФ-предыонизации при $E/N = 3,6 \cdot 10^{-16}$ В·см². Объемный разряд наблюдался до давления 2 атм для концентраций компонентов

$\text{Xe} \leq 5\%$ и $\text{CCl}_4 \leq 0,1\%$. При больших давлениях развивались искровые каналы. В данных экспериментах в объемной стадии разряда вкладывались удельные энергии в газовые смеси до $300 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$. В аргонных смесях однородность разряда зависела как от типа и интенсивности УФ-предыонизатора, так и от параметров газовой смеси Ar:Xe.

На рис. 3.8 показаны зависимости разрядного тока для газовых смесей от концентрации их компонентов Ar, Xe и CCl_4 , суммарного давления для зарядного напряжения 15 кВ. В газовых смесях He:Xe: CCl_4 разрядный ток определялся гелием, тогда как для Ar:Xe: CCl_4 он зависел от концентрации Ar:Xe (рис. 3.5, 3.8). Для типичных лазерных газовых смесей Ar:Xe: CCl_4 нами был впервые получен новый режим горения самостоятельного объемного разряда, который оказался характерным также для тяжелых инертных газов Ar, Xe, Kr. Его отличие от обычного разряда в том, что он развивался между катодом и плазмой источника УФ-предыонизации. Получены устойчивые объемные разряды длительностью 100 нс при давлении газовых смесей до 2 атм и удельной энергии, вкладываемой в газовые смеси, до $W_r \leq 300 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$.

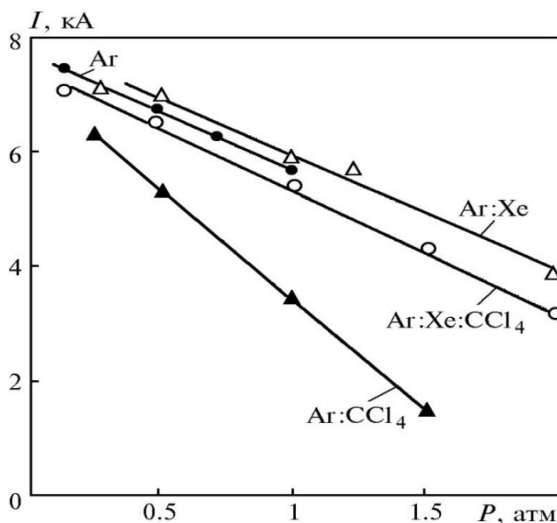


Рис. 3.8. Зависимости разрядного тока для газовых смесей от концентрации их компонентов Ar, Xe и CCl_4 для зарядного напряжения 15 кВ

3.4. ХеСl-лазер с двухконтурной схемой возбуждения

В первых работах по исследованию эксимерных лазеров, возбуждаемых самостоятельным разрядом, использовался режим быстрой накачки. Это было связано с малыми временами существования объемного разряда (порядка 30 нс) в эксимерных смесях высокого давления [25]. В качестве источника накачки применялись всевозможные модификации генератора Блюмляйна. В 1976 г. авторы работы [135] впервые применили двухконтурную схему накачки для KrF-лазера. При наличии источника УФ-предыонизации наблюдалась квазистационарная стадия напряжения. В 1977 г. нами была применена трехконтурная схема накачки с источником искровой УФ-предыонизации для ХеСl-лазера, в которой впервые наблюдалась эффективная генерация с буферным газом аргоном и квазистационарная стадия напряжения с буферными газами He и Ar для объемных разрядов длительностью до 200 нс [47]. Автор работы [142] для ХеF-лазера применил комбинированную двухконтурную схему накачки в виде генератора Бл-н (С) и контура с обострительной емкостью. Автор работы [143] для KrF-лазера использовал двухконтурную схему накачки, в которой роль основного разрядного контура выполняла импульсно-формирующая линия на конденсаторах PFL(С) с рельсовым разрядником. Авторы работы [25] для KrF-лазера реализовали энергию излучения 0,25 Дж, используя двухконтурную схему накачки. Роль обострительной емкости выполняла кабельная линия. Ими был сделан анализ одноконтурной схемы накачки (генератор Блюмляйна) и двухконтурной схемы ($C_n/C_{об}$), из которого следовало, что для двухконтурных схем (с импульсной перезарядкой емкостей) возможны более высокие скорости ввода энергии в активную среду из-за достижения минимальных индуктивностей основного разрядного контура. Следовательно, для быстрого режима возбуждения возможно получение больших энергий излучения в частотных режимах работы лазеров с максимальными коэффициентами полезного действия. В данном случае должно было выполняться условие, когда $C_n \sim C_{об}$. Поэтому обозначение емкости основного разрядного контура как «обострительная» не совсем точное для быстрого режима возбуждения. Наиболее ярко она отражает свою роль для режима квазистационарного возбуждения, как будет показано далее.

В 1978 г. нами была получена для ХеСl-лазера длительность объемного разряда с буферным газом гелием до 400 нс и с аргонном до 200 нс в трехконтурной схеме накачки [48]. Также была исследована временная и пространственная динамика развития объемного разряда в газовых смесях Ar(He):Хе:ССl₄ с коронной УФ-предыонизацией [60]. В работе [142] была подтверждена высокая эффективность двухконтурной схемы накачки для молекул ХеСl и КrСl с буферными газами Ne, Ar. В работе [143] была применена новая разновидность комбинированной схемы накачки Блюмляйн (каб.)/С₆₆, где УФ-предыонизация была в виде коронного разряда. Она обеспечивалась через сетчатый электрод и одновременно являлась составной частью контура обострительной емкости. Авторами работ [144, 145] была подтверждена высокая эффективность двухконтурных схем накачки для частотного ХеF-лазера с частотой повторения 2 кГц. В работе [146] авторы впервые использовали двухконтурную схему накачки с X-предыонизацией. В качестве основного разрядного контура применили двойную формирующую линию на воде – 2PFL (H₂O) с рельсовым разрядником. Активный объем составлял 2,5 л, а длительность объемного разряда равнялась 100 нс. Авторами было обнаружено, что для КrF-лазера импульс напряжения на промежутке имеет квазистационарную стадию разряда, т. е. наблюдался самоподдерживающийся разряд.

В 1979 г. вышла обзорная статья [147] по эксимерным лазерам с накачкой быстрым разрядом, для которого эффективно применялась двухконтурная схема возбуждения. Быстрый рост напряжения на промежутке повышал E/N , а быстрый рост разрядного тока позволял увеличивать энергию, вкладываемую в активную среду, в течение короткого времени горения разряда порядка 30 нс. Указывалось, что доминирующим каналом образования эксимерных молекул являлась гарпунная реакция, которая обеспечивала их образование ~ 80 %. Канал рекомбинации атомных ионов вносил вклад не более 20 %, а рекомбинация молекулярных ионов являлась малой частью этого канала. В теоретической работе [148] были рассмотрены необходимые условия для формирования импульсного самостоятельного разряда высокого давления. Была разработана аналитическая модель самостоятельного разряда при высоких E/N , для реализации которой необходима минимальная начальная концентрация электронов не менее 10^5 см^{-3} , а также время нарастания напряжения на

3. Эксимерные лазеры с коронным источником УФ-предыонизации

промежутке не более 50 нс. Их результаты хорошо подтверждались для быстрого самостоятельного разряда (< 100 нс) для молекул XeF, KrF и XeCl с X-предыонизацией в активных объемах несколько литров. Вопрос о том, как увеличивать длительность импульсов генерации, для авторов оставался открытым.

В противоположность этим результатам нами впервые для молекул XeCl в работах [47, 48] и авторами работы [16] для XeF и KrF были получены длинные импульсы генерации более 100 нс, а объемные разряды достигали 400 нс [48]. Экспериментальные результаты указывали на возможность получения нового эффективного режима возбуждения в квазистационарной стадии разряда. Нами были проведены исследования разрядных и энергетических характеристик XeCl-лазера для двухконтурных схем накачки с коронной УФ-предыонизацией, параметры которого зависели от вкладываемой энергии в разряд, выбора газовых компонентов активной среды и характеристик разрядных контуров возбуждения [52]. В разд. 1 приведены схема установки (см. рис. 1.9) и ее описание. Во всех экспериментах накопительная емкость была постоянной ($C_n = 20$ нФ). Изменялась лишь величина обострительной емкости ($C_{об} = \text{var}$).

На рис. 3.9 приведены зависимости энергии излучения в смесях Ne:Xe:CCl₄ от зарядного напряжения, суммарного давления и концентрации ксенона при CCl₄ = 2 торр и $C_{об} = 6$ нФ. Для XeCl-лазера оказалось оптимальным соотношение Xe:CCl₄ = 10:1 независимо от концентрации CCl₄, давления, вкладываемой энергии и величины обострительной емкости. Обнаружена характерная особенность – изменение концентрации любого из компонентов газовой смеси, приводящее к заметному изменению энергии излучения при прочих одинаковых условиях, не приводило к существенным изменениям разрядных характеристик. Так, при изменении концентрации CCl₄ (0,1–0,2 %) и Xe (0,5–2 %) время нарастания и амплитуда разрядного тока изменялись не более чем на 15 %, а энергия излучения уменьшалась в 2 раза.

Этот факт подтверждал наше предположение о перераспределении каналов образования рабочих молекул XeCl в пользу ионного канала, а следовательно, и нового режима возбуждения, «квазистационарного», при котором в принципе возможно получение длинных импульсов генерации.

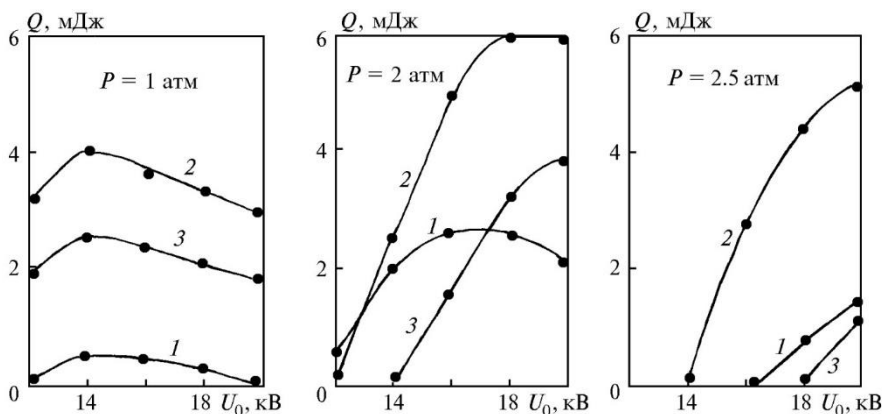


Рис. 3.9. Зависимости энергии излучения в газовых смесях $\text{He}:\text{Xe}:\text{CCl}_4$ от давления, зарядного напряжения и концентрации $\text{Xe} = 10$ торр (1); 20 торр (2); 40 торр (3)

На рис. 3.10 показаны зависимости энергии излучения и запасаемой энергии в обострительном контуре (W) от давления и зарядного напряжения для газовых смесей $(\text{He})\text{Xe}:\text{CCl}_4 = 10:1$ при $C_{\text{н}} = 20 \text{ нФ}$ и $C_{\text{об}} = 4 \text{ нФ}$. Далее все эксперименты проводились в аналогичных газовых смесях. При относительно низких давлениях (1,5 атм) с ростом зарядного напряжения $\geq 15 \text{ кВ}$ энергия излучения оставалась постоянной (рис. 3.10, б). Это связано с тем, что напряжение пробоя на промежутке оставалось постоянным и ограничивалось начальной концентрацией электронов, создающихся коронной УФ-предыонизацией. Этот факт иллюстрирует зависимость запасаемой энергии в обострительной емкости от напряжения и давления, а соответственно, и от УФ-предыонизации. Для данной схемы накачки наблюдался автоматический режим согласования разрядной плазмы при вариациях давления смеси, зарядного напряжения и начальной концентрации электронов источника УФ-предыонизации (рис. 3.10, а), т. е. выполнялось условие $E/N = 2,4 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2 = \text{const}$.

Следовательно, автоматическая УФ-предыонизация имела как преимущества (простота и надежность схемы накачки), так и недостатки. Например, увеличение E/N и dI/dt возможно за счет уменьшения

3. Эксимерные лазеры с коронным источником УФ-предыонизации

емкости или индуктивности обострительного контура, но при этом оставалось постоянным напряжение пробоя на промежутке, которое достигало лишь за меньшие времена его нарастания. Данные противоречия нами были решены в последующих исследованиях квазистационарного режима возбуждения.

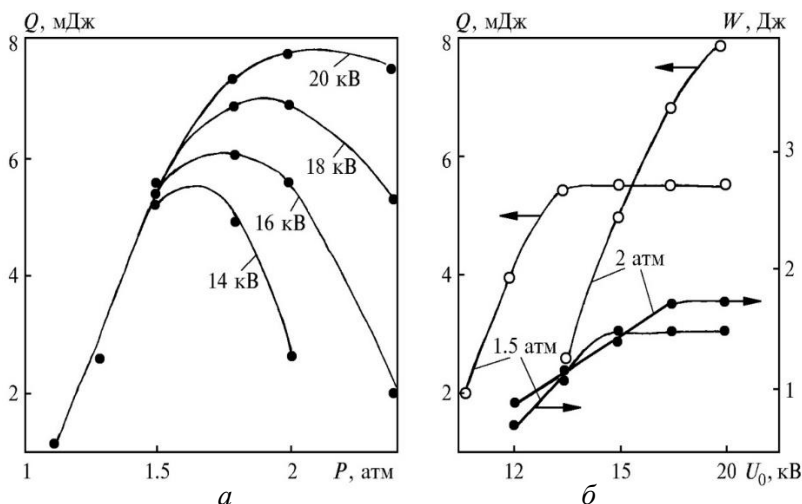


Рис. 3.10. Зависимости энергии излучения и запасаемой энергии (W) в обострительном контуре от P , U_0 в газовых смесях $(\text{He})\text{Xe}:\text{CCl}_4 = 10:1$

На рис. 3.11 приведены зависимости энергии излучения и КПД в газовых смесях $(\text{He})\text{Xe}:\text{CCl}_4 = 10:1$ от величины обострительной емкости (рис. 3.11, а) и удельной энергии, вкладываемой в газ (рис. 3.11, б), для обострительной емкости 6 нФ. При определении КПД лазера учитывалась энергия, запасаемая в обострительной емкости. Максимальный КПД наблюдался для $C_{об} = 4$ нФ, хотя в быстром режиме накачки максимальная передача энергии достигалась при соотношении емкостей $C_{об} = C_n$.

Это обусловлено, с одной стороны, УФ-предыонизацией, а с другой – новой ролью обострительной емкости, т. е. новым режимом возбуждения по сравнению с быстрым разрядом накачки. Обострительная емкость обеспечивала высокие величины E/N и вместе с УФ-предыо-

низацией лишь формировала начальную стадию объемного разряда. Длительность ее зависела в основном от параметров обострительного контура накачки.

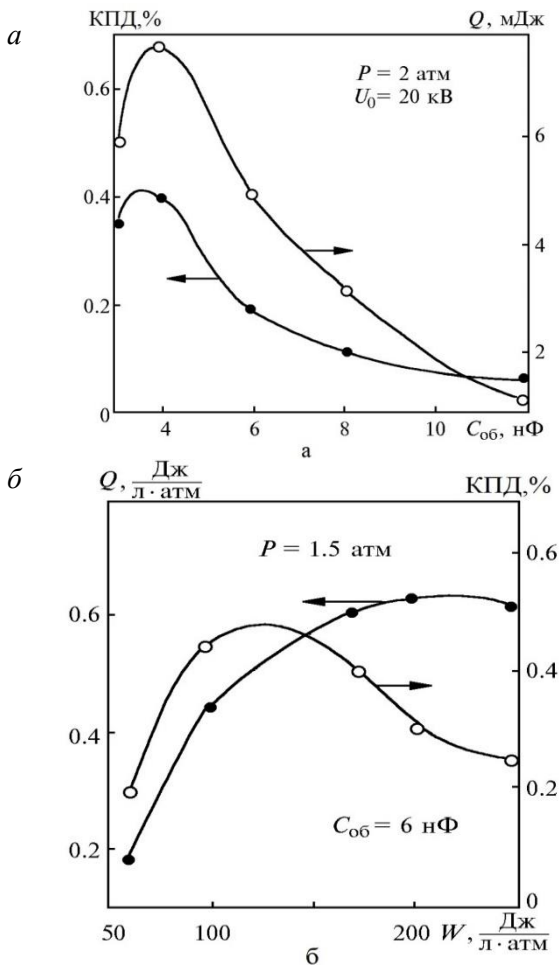


Рис. 3.11. Зависимости энергии излучения и КПД лазера в газовых смесях (He)Xe:CCl₄ = 10:1 от величины $C_{об}$ (а) и энергии, вкладываемой в активную среду (б)

3. Эксимерные лазеры с коронным источником УФ-предыонизации

В работе [147] указывалась оптимальная энергия, вкладываемая в смесь газов для быстрого режима возбуждения порядка $100 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$. В нашем случае удельная энергия излучения почти линейно росла до $W_r = 200 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ (рис. 3.11, б), что указывало на возможность реализации более эффективного режима возбуждения эксимерного лазера. Оптимальный вклад составлял $100 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ с КПД лазера, равным 0,5 %. При давлении 2 атм была зарегистрирована удельная энергия излучения $1 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$. В данной системе были проведены исследования в режиме усилителя. Измеренный ненасыщенный коэффициент усиления ХеСl-лазера соответствовал $0,15 \text{ см}^{-1}$.

3.4.1. ХеСl-лазер с быстрым режимом возбуждения

Согласно ранее проведенным нами исследованиям, в газовых смесях $\text{He}:\text{Xe}:\text{CCl}_4$ при напряжении на промежутке, превышающем пробивное статическое напряжение в 2–3 раза, наблюдалось три характерных стадии разряда:

I. Нарастание напряжения на промежутке длительностью не более 50 нс, которое зависело от источника УФ-предыонизации.

II. Быстрый спад напряжения длительностью порядка нескольких десятков наносекунд, который зависел от величины E/N .

III. Квазистационарная стадия напряжения, в течение которой разряд по своему характеру напоминал тлеющий, а время нарастания и спада разрядного тока соответствовало длительности слабо изменяющегося напряжению на плазме. Его длительность могла быть порядка нескольких сотен наносекунд.

Большой практический интерес представляло лазерное излучение в режиме формирования квазистационарной стадии разряда. Ранее нами была проанализирована роль двух стадий разряда с точки зрения оптимального режима накачки ХеСl-лазера [52, 53]. Выше нами были рассмотрены энергетические параметры излучения в двухконтурной схеме накачки. Сейчас рассмотрим разрядные характеристики ХеСl-лазера относительно параметров излучения.

На рис. 3.12 даны осциллограммы напряжения, разрядного тока обострительной емкости и импульса генерации от зарядного напряжения (рис. 3.12, а), давления (рис. 3.12, б), величины обострительной емкости

(рис. 3.12, в) и энергии излучения для газовых смесей (He)Xe:CCl₄ = 10:1 при $C_H = 20$ нФ. Согласно нашим исследованиям оптимальное соотношение рабочих емкостей равнялось $C_H/C_{об} = 5$. Эффективное время накачки в данном случае соответствовало времени спада напряжения на промежутке или времени протекания разрядного тока в первый полупериод (ввод энергии в газ в объемной стадии разряда).

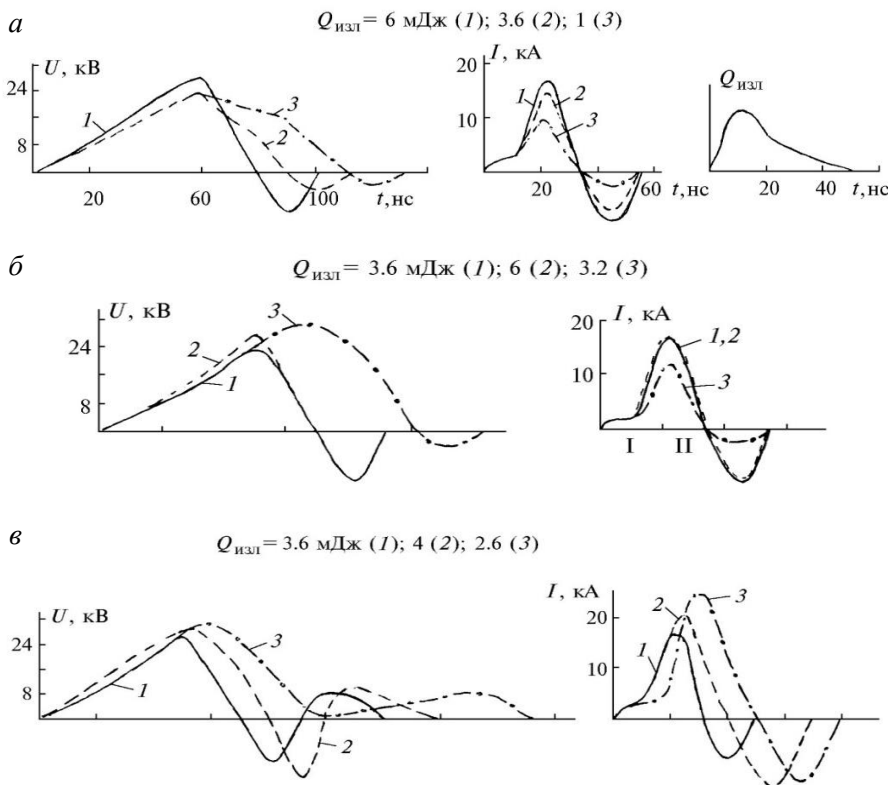


Рис. 3.12. Осциллограммы напряжения, разрядного тока и импульса генерации от зарядного напряжения (*а*), давления (*б*), обострительной емкости (*в*) и энергии излучения для смесей (He)Xe:CCl₄ = 10:1:
а – $U_0 = 20$ кВ (1), 16 (2), 14 (3) при 2 атм и $C_{об} = 4$ нФ; *б* – $P = 1,5$ атм (1), 2 (2), 2,5 (3) при $U_0 = 20$ кВ, $C_{об} = 4$ нФ; *в* – $C_{об} = 4$ нФ (1), 6 (2), 12 (3) при $U_0 = 20$ кВ, 1,5 атм

3. Эксимерные лазеры с коронным источником УФ-предыонизации

Так осциллограммы напряжения и разрядного тока обострительного контура показывали, что с ростом зарядного напряжения для постоянного давления газовой смеси (рис. 3.12, *а*) или при постоянном зарядном напряжении с уменьшением давления (рис. 3.12, *б*) происходило увеличение соотношения E/N , наблюдался более быстрый спад напряжения, а соответственно, рост энергии излучения. На осциллограммах разрядного тока выделяется медленный участок нарастания, который соответствовал току УФ-предыонизации, обеспечивающему концентрацию электронов $\sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$, достаточную для пробоя газовой смеси. Особый интерес представлял импульс генерации. Длительность по основанию достигала 50 нс, а на полувысоте – 20 нс. Быстрая стадия разряда равнялась лишь 20 нс, тогда полный разрядный ток должен включать составляющую тока от емкости накопителя. Следовательно, очевидна причина оптимального соотношения $C_n/C_{об}$. Величина обострительной емкости (рис. 3.12, *в*) влияла как на время нарастания напряжения, так и на время его спада. В силу этого для быстрого режима накачки необходима минимальная индуктивность разрядного контура. С другой стороны, с ростом обострительной емкости резко возрастала плотность разрядного тока ($J = 0,4\text{--}0,6 \text{ кА}\cdot\text{см}^{-2}$), которая очень велика и существенным образом влияла на устойчивость разряда. Поскольку в настоящих экспериментах имели дело с высокими скоростями нарастания тока, падение напряжения на паразитных индуктивностях было соизмеримо с напряжением на плазме. Это затрудняло экспериментальное измерение напряжения на плазме $U_{пл}(t)$. Поэтому напряжение на плазме определялось методом графического дифференцирования осциллограмм разрядного тока [52, 53, 89].

На рис. 3.13, *а* приведена эквивалентная схема разрядного контура, на рис 3.13, *б* – расчетные характеристики газоразрядной плазмы смеси $\text{He}:\text{Xe}:\text{CCl}_4$, а также осциллограммы импульсов генерации $P(t)$ для емкостей $C_{об} = 4; 8 \text{ нФ}$ и $C_n = 20 \text{ нФ}$. Если обозначить через $R_c(t)$ и $L_c(t)$ величины, изменяющиеся во времени как сопротивление и индуктивность разрядного контура, тогда при $R = R_a + R_c(t)$ и $L = L_a + L_c(t)$ получается следующее энергетическое соотношение:

$$P_r = d/dt \cdot Li^2/2 + d/dt \cdot CU^2/2, \quad (3.14)$$

где P_r – мгновенное значение мощности при выделении энергии на со-
противлении; C – емкость; U – напряжение на конденсаторе.

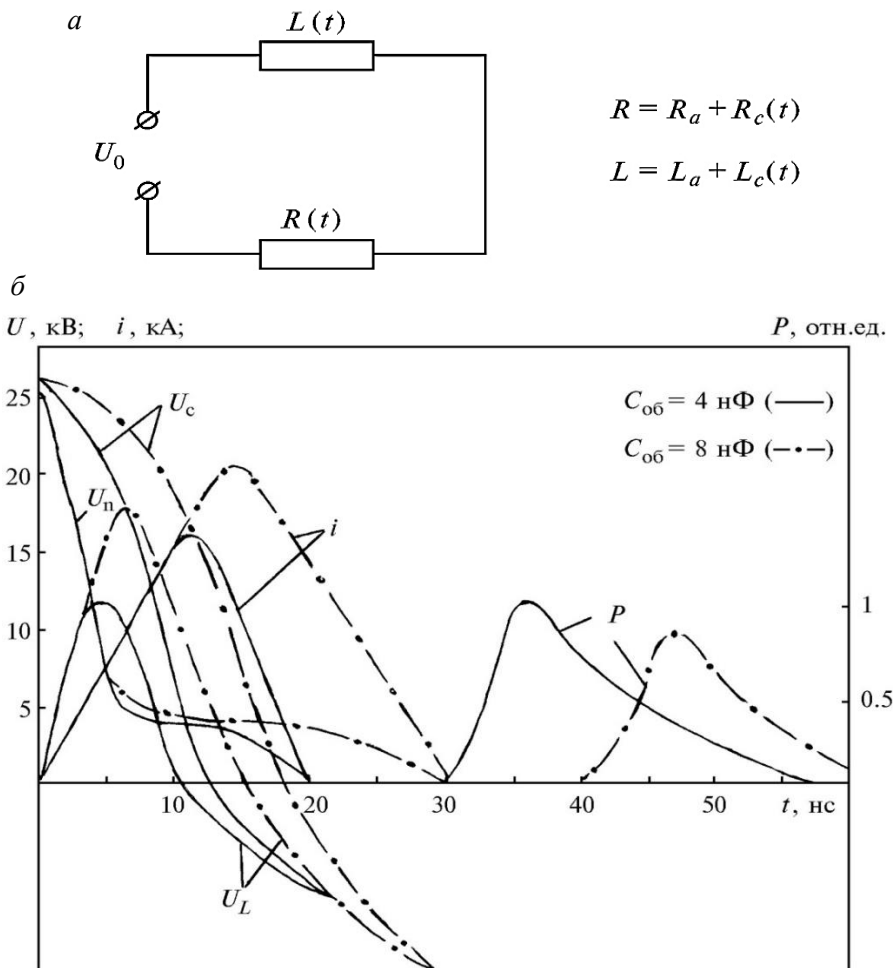


Рис. 3.13. Эквивалентная схема разрядного контура (*a*) и расчетные ха-
рактеристики газоразрядной плазмы $\text{He}:\text{Xe}:\text{CCl}_4$ и излучения $P(t)$
(*б*) для $C_{06} = 4$; 8 нФ и $C_H = 20$ нФ

3. Эксимерные лазеры с коронным источником УФ-предыонизации

Используя выражение

$$U_c = U_0 - (1/c) \int_0^t i dt, \quad (3.15)$$

где U_0 – зарядное напряжение, величина изменяющейся во времени индуктивности

$$L_c = 2d(\ln 2d/a - 1), \quad (3.16)$$

где d – длина канала; a – радиус канала.

Тогда в любой момент справедливо равенство

$$P_r = i \cdot U_0 - (1/c) \int_0^t i dt - i \cdot L \cdot d/t + i^2/t \cdot n \cdot d \cdot 10^{-9}. \quad (3.17)$$

В этом случае энергию, выделяемую в разрядном канале, можно получить при интегрировании мощности [149]:

$$W_c(t) = \int_0^t P_r dt. \quad (3.18)$$

На зависимостях напряжения на плазме ($U_{пл}(t)$) наблюдались две характерные стадии разряда (рис. 3.13, б). С ростом емкости на участке быстрого спада напряжения изменений практически не происходило, а квазистационарная стадия напряжения росла. При этом длительность импульса генерации уменьшалась. Амплитуда и время нарастания разрядного тока увеличивались, а значит, уменьшалась скорость ввода энергии в газ, что приводило к развитию неустойчивостей в разряде. Это доказывало, что для быстрого режима возбуждения необходима минимальная индуктивность основного разрядного контура накачки.

Таким образом, нами впервые были проведены исследования разрядных и энергетических параметров ХеСl-лазера для двухконтурных схем накачки. Кроме быстрого режима возбуждения был обнаружен новый режим возбуждения – квазистационарный. Длительность импульса излучения в первых экспериментах достигала 50 нс. Для его реализации необходимо было выполнение следующего требования по отношению к двухконтурным схемам накачки:

$$C_n \gg C_{об} \text{ при } J < 400 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}.$$

3.4.2. ХеСl-лазер с квазистационарным режимом возбуждения

Режим возбуждения с квазистационарной стадией разряда обеспечивал нам получение импульсов генерации до 50 нс. Дальнейшее увеличение длительности импульсов излучения было ограничено величиной накопительной емкости и высокими плотностями разрядного тока. Кроме того, не совсем ясна была роль типа источника УФ-предыонизации, т. е. его взаимосвязь с величиной разрядного тока. В дальнейшем нами будет приводиться длительность импульсов генерации по основанию, т. к. длительность импульса на полувысоте в основном зависела от добротности резонатора (коэффициента отражения выходного зеркала). Для квазистационарного режима возбуждения, как правило, коэффициент отражения должен быть $\geq 50\%$.

В 1981 г. нами были впервые сформулированы основные условия для реализации нового квазистационарного режима возбуждения и генерации для эксимерных молекул. Так с плазменной УФ-предыонизацией были получены импульсы излучения для ХеСl-лазера длительностью более 250 нс, энергией 0,5 Дж и КПД 1,4 % [55, 66].

В 1982 г. нами были проведены как теоретические, так и экспериментальные исследования разрядных и энергетических параметров излучения ХеСl-лазера с плазменной УФ-предыонизацией в квазистационарном режиме возбуждения с длительностью объемной стадии разряда до 1 мкс [53, 65]. В работе [150] сообщалось о получении генерации длительностью до 120 нс с коронной УФ-предыонизацией за счет увеличения соотношения $C_n/C_{06} = 10$ и уменьшения плотности разрядного тока (путем увеличения ширины электродов и добавления индуктивности в цепь разряда). Автором работы ХеСl-лазер с квазистационарным режимом возбуждения был назван как «длинноимпульсный лазер с индуктивной стабилизацией».

В 1983 г. автором работы [151] был получен импульс излучения длительностью до 200 нс и было подтверждено, что длительность импульса генерации в квазистационарном режиме возбуждения зависела от плотности разрядного тока, которая успешно регулировалась величиной индуктивности цепи разряда и шириной электродов. Авторы работы [37] реализовали квазистационарный режим возбуждения в системе с двумя независимыми контурами возбуждения (2НК) на водяных линиях, рель-

3. Эксимерные лазеры с коронным источником УФ-предыонизации

совыми разрядниками и Х-предыонизацией. В активном объеме 1,2 л была получена энергия излучения 4,2 Дж при длительности импульса генерации 200 нс. Первый контур возбуждения обеспечивал высоковольтный предварительный импульс, который соответствовал обострительной емкости. Второй контур соответствовал накопительной емкости, обеспечивающей основной энергетический вклад в квазистационарную стадию разряда. Авторами действительно был предложен метод реализации квазистационарного режима возбуждения с использованием трех независимых генераторов накачки (предварительный импульс, основной импульс возбуждения и Х-предыонизации).

В 1984 г. нами в работе [152] и авторами работы [153] была предложена схема 2НК, в которой роль основного разрядника выполнял магнитный ключ (MS). В нашем случае искровой разряд обеспечивал УФ-предыонизацию, во втором – в качестве УФ-предыонизатора использовался KrF-лазер. Авторы назвали такую схему накачки «магнитно-индуцируемое импульсно-лазерное возбуждение» (MIPLE).

В 1985 г. авторы работы [154] на молекуле KrF получили импульсы генерации до 140 нс, используя магнитные звенья сжатия (MPC) для двухконтурной схемы накачки с источником коронной УФ-предыонизации.

В 1988 г. авторы работы [155] на молекуле XeCl в системе 2НК/MS с коронной УФ-предыонизацией ($C_n = 500$ нФ или $C_{PFL(C)} = 560$ нФ и $\rho = 90\%$) получили импульсы излучения с энергией 0,1 Дж и длительностью 1,4 мкс. Авторами работы [156] в аналогичной системе накачки были получены импульсы генерации на молекуле XeCl длительностью до 0,7 мкс с энергией 0,1 Дж.

В табл. 3.2 приведены основные работы по XeCl-лазеру, возбуждение которого осуществлялось квазистационарным разрядом с использованием коронного источника в качестве УФ-предыонизации, где ρ есть коэффициент отражения выходного зеркала резонатора. Из работ следовало, что в простых схемах возбуждения можно получать импульсы генерации длительностью до 200 нс и КПД лазера 1 %. В сложных схемах возбуждения (для больших активных лазерных объемов) длительность импульса генерации могла достигать 1,4 мкс и КПД лазера менее 1 %. Для их сравнения в табл. 3.3 приведены максимальные параметры XeCl-лазера для быстрого режима накачки с источником коронной УФ-

предыонизации. С использованием генератора Блюмляйна на водяных линиях с минимальными индуктивностями всех элементов лазерной системы [157] или двухконтурной схемы накачки с $C_n/C_{об} = 1$ [158] для активного объема 0,1–0,2 л была получена энергия излучения до 0,5 Дж с максимальным КПД лазера 2,5 %.

Таблица 3.2

**Основные работы по квазистационарному режиму возбуждения
XeCl-лазера с коронной УФ-предыонизацией**

№ п/п	Схема накачки	буф. газ	ρ , %	V , см ³	$Q_{изл}$, мДж	$\frac{Q}{\text{л} \cdot \text{атм}}$ Дж	$\tau_{h/2}$, нс	$\tau_{осн}$, нс	КПД, %	Лит-ра
1	C_n	He Ar	–	1,6	–	–	$\tau_p = 100$ нс	–	–	[60]
2	$C_n/C_{об}$	He	8	10	8	0,5	20	50	0,5	[52]
3	$C_n/C_{об}$	He Ar Ne	Обоснование условий получения квазистационарного режима возбуждения							[53]
4	$C_n/C_{об}/L_{ст}$	Ne He	60	2,8	1,7	0,25	60	120	0,6	[150]
5	$C_n/C_{об}/L_{ст}$	He	60	2–20	10–30	–	60	200	1	[151]
6	$C_n/C_{об} + MPC$	KrF	–	–	30	–	78	140	–	[154]
7	2НК/MSC	Ne	90 75 75	500	100 500 600	0,1 0,3 0,4	1000 500 300	1400 800 –	0,4 1,5 1,3	[155]

При применении комбинированных схем накачки Бл-н(C)/ $C_{об} = 2$ [159] или $C_n/C_{об} = 0,5$ [160] для относительно больших активных объемов 0,5 л энергия излучения достигала 3 Дж с удельной энергией излучения 2,6 Дж·л⁻¹·атм⁻¹ и КПД 1,4 % при длительности импульса генерации 70 нс. Увеличение объемной стадии разряда до 100 нс, видимо, связано как с пространственно-кинетическими особенностями образования и усиления рабочих молекул в больших активных средах, так и с характе-

3. Эксимерные лазеры с коронным источником УФ-предыонизации

ром возбуждения, когда один из электродов одновременно является источником УФ-предыонизации. Отличительные особенности данных систем будут показаны в следующих разделах для источников с искровой и плазменной УФ-предыонизацией.

Таблица 3.3

Основные работы с максимальными параметрами ХеСl-лазеров с быстрым режимом накачки и коронной УФ-предыонизацией

№ п/п	Схема накачки	Буф. газ	ρ , %	V, л	$Q_{\text{изл}}$, Дж	$\frac{Q}{\text{Дж}}$ л · атм	$\tau_{h/2}$, нс	$\tau_{\text{осн}}$, нс	КПД, %	Лит-ра
1	2Бл-н (С)	He	8	0,05	0,021	0,2	12	40	0,23	[44, 45]
2	Бл-н (H ₂ O)	Ne	20	0,08	0,5	0,6	40	50	2,5	[157]
3	2Бл-н(С)/C _{об} = 2	Ne	12	0,5	2,1	1,2	40	75	1,4	[159]
4	C _н /C _{об} = 1	Ne	8	0,2	0,5 0,35	0,5 0,34	25	–	1 2,35	[158]
5	C _т /C _{об} = 0,5	Ne	8	0,3	3,1	2,6	37	70	1,2	[160]

Выводы

1. Впервые применена и показана высокая эффективность использования коронного разряда для ХеСl-лазера в качестве источника УФ-предыонизации.

2. Проведены экспериментальные исследования объемного разряда с коронной УФ-предыонизацией в газовых смесях He(Ar):Xe:CCl₄ при давлениях до 4 атм. Получены удельные энергии, вкладываемые в газовые смеси He:Xe:CCl₄ до 200 Дж·л⁻¹·атм⁻¹ при давлениях ≤ 4 атм, и объемные разряды ≤ 100 нс, а для газовых смесей Ar:Xe:CCl₄ – удельные энергии до 300 Дж·л⁻¹·атм⁻¹ при давлениях ≤ 2 атм и объемные разряды ≤ 100 нс.

3. Впервые был обнаружен и исследован новый режим формирования объемного разряда в Ar, Xe, Kr и смесях Ar:Xe:CCl₄ между электродом и поверхностной плазмой источника УФ-предыонизации за счет процессов фотовозбуждения и фотоионизации активной среды.

4. Впервые разработан плазменный электрод с незавершенным разрядом для эксимерных лазеров, повышающий их эффективность в 1,5–2 раза.

5. Впервые исследованы разрядные и энергетические характеристики ХеСl-лазера для двухконтурной схемы накачки с коронной УФ-предыонизацией. Был обнаружен новый режим возбуждения – квазистационарный, обеспечивающий длинные оптические импульсы генерации. Для его реализации необходимо выполнение одного из основных начальных условий: $C_n \gg C_{об}$.

4. ЭКСИМЕРНЫЕ ЛАЗЕРЫ С ИСКРОВЫМ ИСТОЧНИКОМ УФ-ПРЕДЫОНИЗАЦИИ

В разд. 3 были рассмотрены разрядные и энергетические характеристики эксимерных лазеров (в основном для молекулы XeCl^*) и режимы возбуждения с коронной УФ-предыонизацией. Одновременно проводились исследования XeCl -лазера с искровым источником УФ-предыонизации в двух- и трехконтурных схемах накачки. В качестве рабочей среды применялись газовые среды $\text{Ar}(\text{He}, \text{Ne}):\text{Xe}:\text{CCl}_4(\text{HCl})$. Основное внимание было направлено на исследование особенностей поддержания квазистационарного объемного разряда и генерации в многоконтурных схемах накачки. Эксперименты показали, что на квазистационарный режим накачки влияет месторасположение УФ-предыонизации и время ее существования. Так в зависимости от соотношения $C_n/C_{\text{об}}$ и расположения источника УФ-предыонизации в контуре накопительной или обострительной емкости может реализовываться быстрый или квазистационарный режим возбуждения (рис. 4.1).

4.1. Режимы накачки с источником искровой УФ-предыонизации в обострительном контуре возбуждения

Как ранее отмечалось, длительность объемной стадии разряда в эксимерных смесях зависела от интенсивности, однородности и пространственного расположения источника УФ-предыонизации. Нами впервые была применена для эксимерных молекул трехконтурная схема накачки с искровой УФ-предыонизацией через сетчатый электрод (см. рис. 1.8), в которой наблюдался объемный разряд длительностью от 200 до 400 нс с буферными газами гелием или аргоном соответственно [47, 48]. Как следствие этого, впервые была получена эффективная генерация на XeCl с буферным газом аргоном. Следует отметить, что данную схему УФ-предыонизации, видимо, можно назвать как систему с «плазменным катодом», т. к. основной разряд замыкался на плазму, образовавшуюся на поверхности сетчатого катода.

Это определение совпадает с нашими представлениями о развитии объемного разряда в аргонных смесях [60].

На рис. 4.1, *а* приведена эквивалентная схема накачки с обострительным контуром питания и искровым источником УФ-предыонизации. В зависимости от параметров контуров питания (C и L) возможны два режима накачки. Для условий $C_n = C_{об}$ и $L_{об} = \min$, $L_{ст} = 0$ осуществляется быстрый режим возбуждения с максимальным КПД лазера. Нас же интересовал квазистационарный режим возбуждения для $C_n \gg C_{об}$.

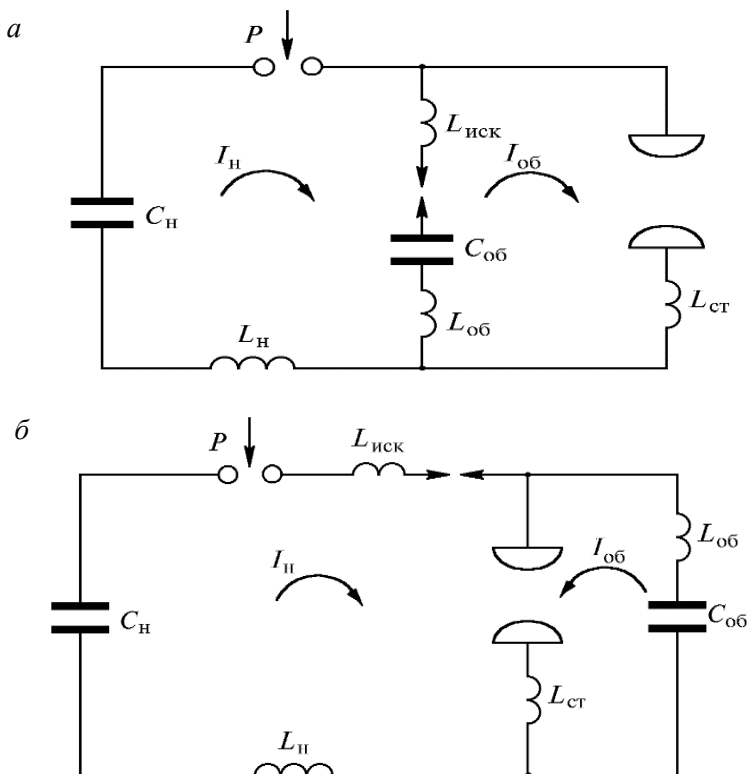


Рис. 4.1. Эквивалентные схемы питания с искровой предыонизацией в обострительном (*а*) и накопительном (*б*) контуре накачки для быстрого ($I_p = I_{об}$) и квазистационарного ($I_p = I_{об} + I_n$) режимов возбуждения

4. Эксимерные лазеры с искровым источником УФ-предыонизации

Первые эксперименты показали высокую эффективность XeCl -лазера с буферным газом аргоном [47]. С буферным газом гелием генерация не наблюдалась из-за малого рабочего давления $\leq 1,2$ атм, которое ограничивалось конструктивными особенностями лазерной системы.

Были проведены исследования энергетических параметров излучения от концентрации и соотношения газовых компонентов смесей $\text{Ar}:\text{Xe}:\text{CCl}_4$ (рис. 4.2). Концентрация хлоронесителя CCl_4 изменялась от 0,3 до 1 торр.

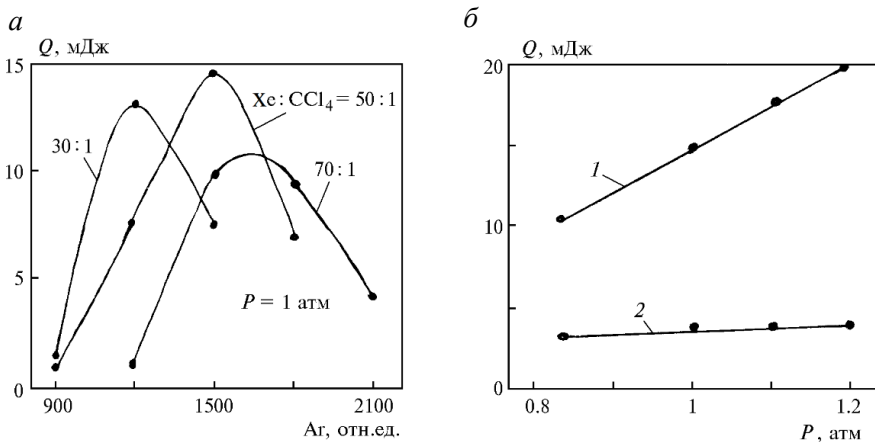


Рис. 4.2. Зависимости энергии излучения от соотношения $\text{Xe}:\text{CCl}_4$, концентрации CCl_4 , Ar (а) и давления (б); б – $\text{Ar}:\text{Xe}:\text{CCl}_4 = 1500:50:1$; 1 – УФ-излучение; 2 – ИК-излучение

Оптимальное соотношение и концентрация газовой смеси соответствовала $\text{Xe}:\text{CCl}_4 = 50:1$ (0,5 торр). С увеличением суммарного давления смеси энергия излучения линейно возрастала с ростом зарядного напряжения до 30 кВ. Отметим еще одну особенность данных газовых смесей – одновременная генерация УФ-излучения на XeCl^* - и ИК-излучения на атомарных переходах ксенона, которая нами наблюдалась впервые. На рис. 4.2, б представлены параметры этого излучения [47]. Позже автором работы [161] были получены однородные разряды высокого давления в газовых смесях $\text{Ar}:\text{Xe}$ до 7 атм.

На рис. 4.3 представлены осциллограммы импульсов напряжения на плазме и генерации для молекул XeCl и XeF с буферными газами аргоном и гелием при давлении 1 атм с галогеноносителями CF₂Cl₂, CCl₄ и NF₃. Длительность импульсов генерации зависела как от типа галогеноносителя, так и от напряжения пробоя на промежутке. Для аргоновых смесей напряжение пробоя возрастало на 40 %, а объемная стадия разряда уменьшалась на 20–30 % по сравнению с гелиевыми смесями. Отрицательные результаты, полученные авторами работы [7] при использовании буферного газа аргона, были обусловлены ступенчатой ионизацией, которая определяла разряд в аргоновых смесях и приводила к его контракции.

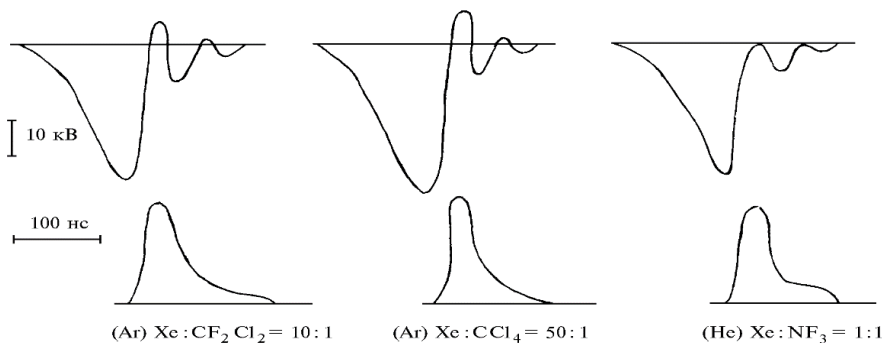


Рис. 4.3. Осциллограммы импульсов напряжения и излучения для молекул XeCl* и XeF* с буферными газами Ar(He) в зависимости от галогеноносителя при рабочем давлении 1 атм

Применение более интенсивной и однородной УФ-предыонизации (в виде плазменного катода) и многоконтурной схемы накачки позволило нам получать объемные разряды в газовых смесях с аргоном до 200 нс, в которых он являлся наиболее эффективным донором запасаемой энергии. Были проведены также исследования объемного разряда в газовых смесях He:Xe:CCl₄ в зависимости от концентрации CCl₄, влияющей на длительность квазистационарной стадии разряда [48, 53].

На рис. 4.4 показаны типичные осциллограммы импульсов напряжения на промежутке и интенсивность спонтанного излучения в смесях

4. Эксимерные лазеры с искровым источником УФ-предыонизации

He:Xe:CCl₄ от концентрации CCl₄ при давлении 1 атм (рис. 4.4, *a*) и от суммарного давления смеси (рис. 4.4, *б*) для зарядного напряжения 30 кВ. Спонтанное излучение наблюдалось с момента пробоя газового промежутка и длилось до конца квазистационарной стадии разряда.

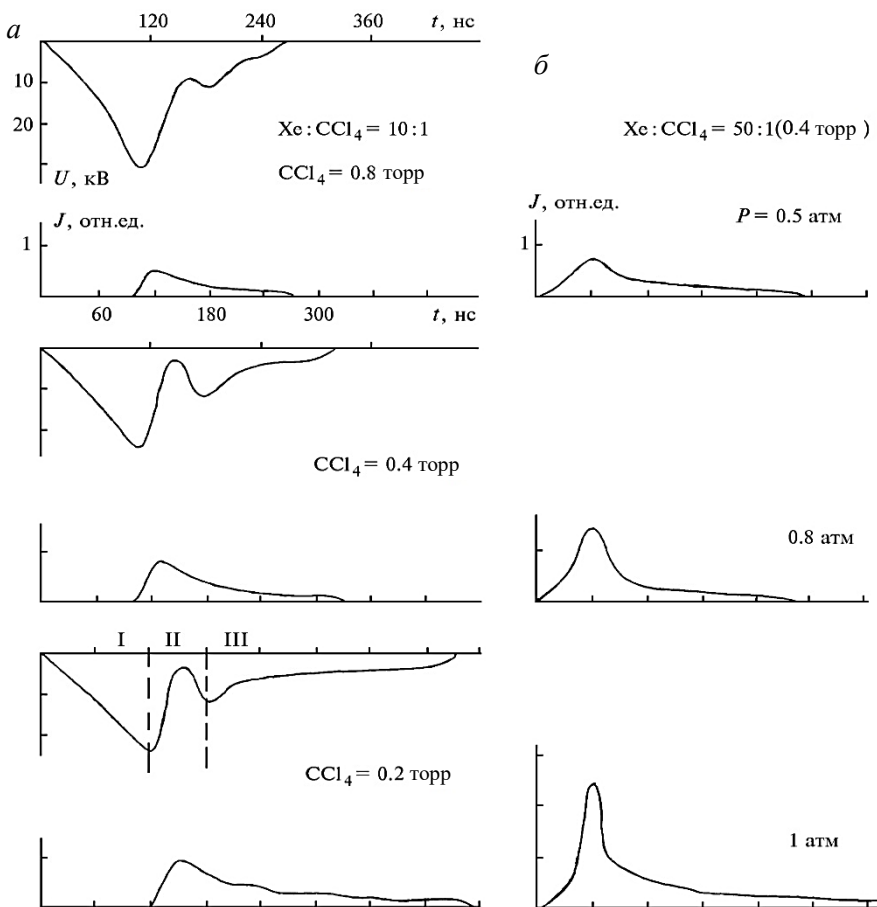


Рис. 4.4. Осциллограммы импульсов напряжения на промежутке и интенсивность спонтанного излучения в смесях He:Xe:CCl₄ в зависимости от CCl₄ при $P = 1$ атм (*a*) и от давления смеси (*б*) для $U_0 = 30$ кВ

Максимальная интенсивность излучения соответствовала быстрой стадии спада напряжения на промежутке, которая составляла 50 нс. Длительность квазистационарной стадии разряда увеличивалась с уменьшением концентрации CCl_4 . Так при $\text{CCl}_4 = 0,2$ торр длительность объемного разряда достигала 400 нс. Отметим, что для трехконтурных схем накачки характерны два пика напряжения на промежутке. Интенсивность спонтанного излучения возрастала с ростом энергии, вводимой в газ, за счет зарядного напряжения или роста суммарного давления газовой смеси. С ростом давления увеличивались интенсивность и длительность спонтанного свечения, следовательно, и объемная стадия разряда (рис. 4.4, б). С буферным газом аргоном длительность генерации достигала ~ 200 нс, а максимальная энергия излучения наблюдалась в течение 50 нс (см. рис. 4.3). Такое распределение энергии излучения за импульс было обусловлено тем, что соотношение емкостей разрядных контуров накачки не превышало $C_H/C_{об1} = 2$. В данном случае основной вклад энергии осуществлялся от $C_{об1}$ за время порядка 50 нс с дальнейшим вкладом от накопительной емкости.

Авторы работы [162] в малом активном объеме 2 см^3 исследовали параметры генерации в газовых смесях $(\text{Ne})\text{Xe}:\text{HCl} = 10:1$ от концентрации HCl до давления 20 атм при двухконтурной емкостной схеме накачки с рельсовым разрядником, X-предыонизацией и стабилизирующей индуктивностью $L_{ст} = 300$ нГ. Квазистационарная генерация до 350 нс наблюдалась при концентрации $\text{HCl} = 4$ торр и давлении газовой смеси ≤ 8 атм, а при концентрации $\text{HCl} = 5,5$ торр и давлении газовой смеси 11 атм была зарегистрирована многоимпульсная модуляция спонтанного излучения общей длительностью 350 нс.

Авторы работы [163], используя трехконтурную схему накачки и индуктивность $L_{ст} = 50$ нГ, получили импульсы генерации до 230 нс с энергией излучения 0,15 Дж. Ими наблюдались без стабилизирующей индуктивности квазистационарные импульсы генерации длительностью не более ≤ 60 нс.

В разд. 1 приведены двухконтурная (см. рис. 1.10, б) и трехконтурная (см. рис. 1.18, б) схемы накачки для газовых смесей $\text{Ar}(\text{Ne}, \text{He}):\text{Xe}:\text{HCl}$ высокого давления (4 атм) с точными цепями измерения напряжения и тока в разрядных контурах [53, 82, 164, 165]. Резонатор состоял из диэлектрических зеркал с коэффициентами отражения 98 и 33 %. Экспери-

4. Эксимерные лазеры с искровым источником УФ-предыонизации

менты показали, что для трехконтурной схемы питания реализуются три режима возбуждения: быстрый, квазистационарный и многоимпульсный. Отметим, что многоимпульсный режим возбуждения, видимо, является частным случаем квазистационарного режима возбуждения или одним из методов его получения. Необходимо было выяснить причины модуляции импульса генерации, механизма передачи энергии в разряд, распределение потерь энергии в элементах схемы накачки и способы управления временным профилем импульса излучения.

Поставленные задачи решались следующим образом. Вначале производилась достаточно точная регистрация токов и напряжений в элементах схемы питания и в разряде (с возможностью численной обработки экспериментальных осциллограмм). Затем создавалась расчетная модель сложных многоконтурных схем питания лазеров, позволяющая вычислять осциллограммы токов и напряжений во всех точках схемы, совпадающие с реальными параметрами в пределах 10–15 %. Методика определения приведена в разд. 1. Расчет осциллограмм всех токов и напряжений производился методом Рунге – Кутты (на ЭВМ) для систем от четырех и более дифференциальных уравнений первого порядка. Уравнения для трехконтурной схемы накачки записывали в следующем виде:

$$dU_{C1}/dt = -I_1/C_1; \quad (4.1)$$

$$dU_{C2}/dt = (I_1 - I_2)/C_2; \quad (4.2)$$

$$dI_1/dt = (U_{C1} - U_{C2} - U_k)/L_1; \quad (4.3)$$

$$dU_{C3}/dt = (I_2 - I_3)/C_3; \quad (4.4)$$

$$dI_2/dt = (U_{C2} - U_{C3} - U_{иск})/L_2; \quad (4.5)$$

$$dI_3/dt = (U_{C3} + U_{иск} - U_{пл})/L_3, \quad (4.6)$$

где $C_1 = C_n$, $C_2 = C_{об}$, C_3 – емкости искровых промежутков; U_k – напряжение на коммутаторе. В ходе расчета по достижении напряжения пробоя искр ($U_{иск}$), а далее основного разряда ($U_{пл}$) в него включались дополнительные уравнения (4.4), (4.5) и (4.6). Подбор вариантов расчетных моделей для газоразрядных промежутков показал, что наилучшее совпадение с реальными осциллограммами дают модели с постоянными падениями напряжения, не зависящими от тока в промежутке – и для искр, и для

основного разряда. В модель коммутатора (тиратрон) оказалось необходимым добавить активное сопротивление 0,15 Ом. Напряжение горения и импульсного пробоя промежутков в лазере, а также значения индуктивностей для расчетной модели брались из пробных экспериментов. Расхождение расчетных осциллограмм с реальными осциллограммами не превышало 15 %, кроме осциллограмм напряжения на плазме основного разряда, которые плавно спадали в течение разряда. Эксперименты показали, что режим многоимпульсной генерации наблюдался лишь с буферными газами аргоном, неоном и в малых межэлектродных промежутках ($D \leq 1,5$ см) при повышенной индуктивности тоководов. Анализ разрядных осциллограмм позволил сделать вывод, что модуляция генерации вызвана соответствующей модуляцией объемного разряда. Генерация прекращалась при смене полярности тока разряда.

На рис. 4.5, *а* приведены осциллограммы напряжений и токов для одного из вариантов схемы с параметрами $C_1 = 12$ нФ, $C_2 = 2,5$ нФ, $C_3 = 0,6$ нФ для газовой смеси (Ne)Xe:HCl = 20:1 (1,5 торр) при давлении 3,5 атм, а на рис. 4.5, *б* – импульсы излучения для $C_2 = \text{var}$. Модуляция тока разряда объяснялась многократной дозированной пересылкой через обострительный конденсатор (C_2) части энергии от накопителя (C_1) в разряд, которая возможна лишь при определенных соотношениях между емкостями конденсаторов и индуктивностями контуров схемы.

Процесс этот происходил следующим образом: заряженный от накопителя обострительный конденсатор разряжался на основной разряд, что вызывало его к дополнительной подзарядке от накопителя. Если индуктивности (L_2, L_3) достаточно высоки для того, чтобы ток разряда при уменьшении не достигал нуля, то после подзарядки обострительная емкость снова разряжалась на продолжающий «гореть» объемный разряд, вызывая дополнительный импульс тока. В нашем случае импульс излучения имел два максимума, что соответствовало импульсу разрядного тока основного промежутка.

На рис. 4.5, *б* показаны типичные импульсы генерации для изменяющейся обострительной емкости. При соотношениях рабочих емкостей $C_1/C_2 \leq 5$ реализовался быстрый режим возбуждения, которому соответствовало два максимума импульса генерации. При этом КПД лазера равнялся 1,7 % (по вложенной в газ энергии), а практический КПД соответствовал 0,9 %.

4. Эксимерные лазеры с искровым источником УФ-предыонизации

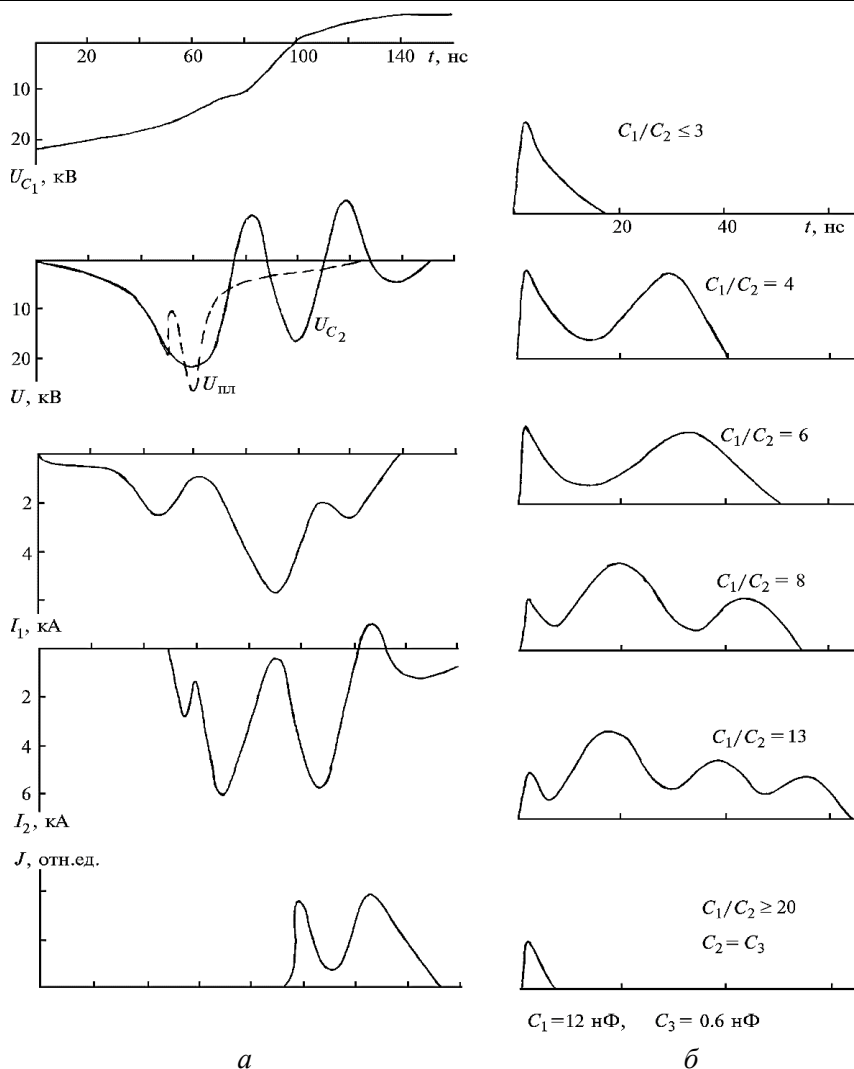


Рис. 4.5. Осциллограммы напряжения (U_{C1} , U_{C2} , $U_{\text{пл}}$), разрядного тока (I_1 , I_2) и излучения для $C_1 = 12 \text{ нФ}$, $C_2 = 2,5 \text{ нФ}$, $C_3 = 0,6 \text{ нФ}$ для смеси (Ne)Xe:HCl = 20:1 (1,5 торр), $P = 3,5 \text{ атм}$ (а); импульсы излучения при $C_2 = \text{var}$, $U_0 = 25 \text{ кВ}$ (б) для трехконтурной схемы накачки

Потери энергии (в джоулях) в элементах схемы определялись следующим образом: $W_{C1} = 2,5$; $W_k = 0,55$; $W_{иск} = 0,15$; $W_{изл} = 0,023$, и энергия, оставшаяся в элементах схемы в момент окончания объемной стадии разряда, равнялась $W_{сх} = 0,45$ Дж. С ростом отношения C_1/C_2 увеличивалась длительность импульса генерации до 60 нс, т. е. наблюдался режим многоимпульсной генерации. Так при соотношениях $C_1/C_2 \leq 20$ регистрировались короткие импульсы генерации ≤ 10 нс. В этом случае обострительная емкость равнялась емкости контура искровой УФ-предыонизации ($C_2 = C_3$) и схема работала как двухконтурная система накачки, в которой накопительная емкость практически не влияла на режим возбуждения. Следовательно, режим многоимпульсного возбуждения позволял получать необходимую форму импульса генерации, которая могла быть заранее рассчитана. Данный способ накачки наиболее благоприятен для работы эксимерных лазеров в импульсно-периодическом режиме.

В табл. 4.1 приведены основные работы с максимальными параметрами излучения ХеСl-лазера для различных режимов возбуждения с источником искровой УФ-предыонизации в обострительном контуре накачки. Максимальные параметры излучения, достигнутые для КгF-лазера: $Q_{уд} = 2,8 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ [166], а КПД лазера был равен 4 % [167]. Для ХеСl-лазера максимальные параметры равнялись: $Q_{уд} = 1,6 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ [168], КПД лазера соответствовал 2,3 % [169].

Максимальная длительность импульса генерации в квазистационарном режиме возбуждения равнялась 230 нс [163]. Ограничение длительности импульсов излучения в схемах с УФ-предыонизацией в обострительном контуре обусловлено временем существования УФ-предыонизации, которое жестко связано с длительностью объемной стадии разряда на промежутке.

Кроме того, на длительность импульсов генерации существенным образом влияла плотность разрядного тока. Она могла быть ограничена за счет резистивной [170] или индуктивной [163, 169, 171] стабилизации разряда. Следовательно, нами была подтверждена возможность получения длинных импульсов генерации в квазистационарном режиме возбуждения с искровой УФ-предыонизацией в обострительном контуре накачки.

4. Эксимерные лазеры с искровым источником УФ-предыонизации

Таблица 4.1

Основные работы и параметры излучения ХеСl-лазера с различными режимами возбуждения для искровой УФ-предыонизации в обострительном контуре накачки

№ п/п	Схема накачки	Буф. газ	ρ, %	V, л	$Q_{\text{изл}},$ Дж	$Q,$ $\frac{\text{Дж}}{\text{л} \cdot \text{атм}}$	$\tau_{h/2},$ нс	$\tau_{\text{осн}},$ нс	КПД, %	Лит.	
1	$C_1/C_2/C_3 + \text{УФ}$	Ar(He)	10	0,3	0,02	0,06	40	170	—	[47]	
2	$C_1/C_2/C_3 + \text{УФ}$	Ar(He)	10	0,3	$\tau_p = 200 \text{ нс (Ar)}$ $\tau_p = 400 \text{ нс (He)}$					—	[48]
3	$C_H/C_{\text{об}} + \text{УФ}$	—	—	1	0,5	—	30	—	0,27	[172]	
4	$C_H/C_{\text{об}} + \text{УФ}$	KrF	—	0,2	1	2,8	—	—	0,5	[166]*	
5	$\text{БЛ-н}(C)/C_{\text{об}} + \text{УФ}/R_{\text{ст}}$	He	90	0,06	0,015	—	80	120	—	[170]	
6	$C_1/C_2/C_3 + \text{УФ}$ $C_H/C_{\text{об}} + \text{УФ}$	Ar He Ne	10–40	0,1–0,3	0,3	0,4	40	170	0,7	[53]	
7	$C_H/C_{\text{об}} + \text{УФ}$	KrF	—	—	—	—	—	—	4	[167]*	
8	$C_H/C_{\text{об}} + \text{УФ}$	Ne	10	0,08	0,34	1,6	80	120	2	[168]	
9	$C_H/C_{\text{об}} + \text{УФ}/L_{\text{ст}}$	Ne	40	0,08	0,09	0,4	80	160	0,85	[171]	
10	$C_H/C_{\text{об}} + \text{УФ}/L_{\text{ст}}$	Ne	—	—	0,3	—	23	60	2,3	[169]	
11	$C_1/C_2 + L_{\text{ст}}/C_3 + \text{УФ}$	Ne	10	—	0,2	—	150	230	0,7	[163]	
12	$C_1/C_2/C_3 + \text{УФ}$	Ne	33	0,015	0,02	0,4	5	60	0,9	[82]	
13	$C_1/C_2/C_3 + \text{УФ}$	Ne	20–50	0,04	0,09	0,6	5	100	—	[173]	

* Параметры KrF-лазера даны для сравнения.

Выводы

1. Для ХеСl-лазера была применена новая трехконтурная схема накачки с источником искровой УФ-предыонизации.

2. Впервые экспериментально исследованы объемные самостоятельные разряды в смесях $\text{Ar}(\text{He}):\text{Xe}:\text{CCl}_4$ с длительностью разряда 200 нс в аргоновых смесях и длительностью разряда 400 нс в гелиевых смесях. Получена длительность импульсов генерации до 170 нс в аргоновых смесях.

3. Впервые был исследован квазистационарный режим разряда и реализован квазистационарный режим возбуждения с источником искровой УФ-предыонизации.

4. Реализован и исследован режим возбуждения многоимпульсной генерации в трехконтурных схемах накачки.

4.2. Режимы накачки

с источником искровой УФ-предыонизации в накопительном контуре возбуждения

На рис. 4.1, б приведена эквивалентная схема питания с источником искровой УФ-предыонизации в накопительном контуре накачки, обеспечивающая как быстрый, так и квазистационарный режим возбуждения в зависимости от параметров разрядных контуров. Впервые данную схему накачки в режиме быстрого разряда применили авторы работы [174] для молекул KrF , XeF и ArF . Длительность импульсов генерации соответствовала 20 нс, а искровая УФ-предыонизация осуществлялась из-под сетчатого электрода. Нами была разработана аналогичная схема накачки [54]. В разд. 1 приведено описание данной установки, рис. 1.10, а. Активный объем лазера составлял $2,4 \cdot 0,5 \cdot 80 \text{ см}^3$, а общий объем лазера равнялся 10 л, что позволяло работать в частотном режиме без прокачки газовой смеси. В первых экспериментах в качестве источника накачки применялся двойной двухступенчатый генератор Аркадьева – Маркса (А-М) с ударной емкостью 10 нФ. Емкость обострительного контура составляла также 10 нФ. Эксперименты показали, что использование трех разрядников

4. Экимерные лазеры с искровым источником УФ-предыонизации

в генераторе А-М не позволяло значительно повысить КПД лазера. Так, для зарядного напряжения 30 кВ генератора накачки максимальный КПД лазера равнялся 0,5 %.

На рис. 4.6 показаны зависимости энергии излучения от зарядного напряжения при давлении 3,5 атм для газовых смесей Хе:НСl = 10:1 и Хе:НСl₃ = 20:1 с буферным газом гелием. Максимальная энергия излучения 127 мДж была получена с НСl при длительности импульса генерации 20 нс. Индуктивность зарядного контура равнялась 50 нГ, а для обострительного контура была не более 2 нГ. В дальнейшем генератор А-М был заменен на распределенную накопительную емкость (С_н) [55].

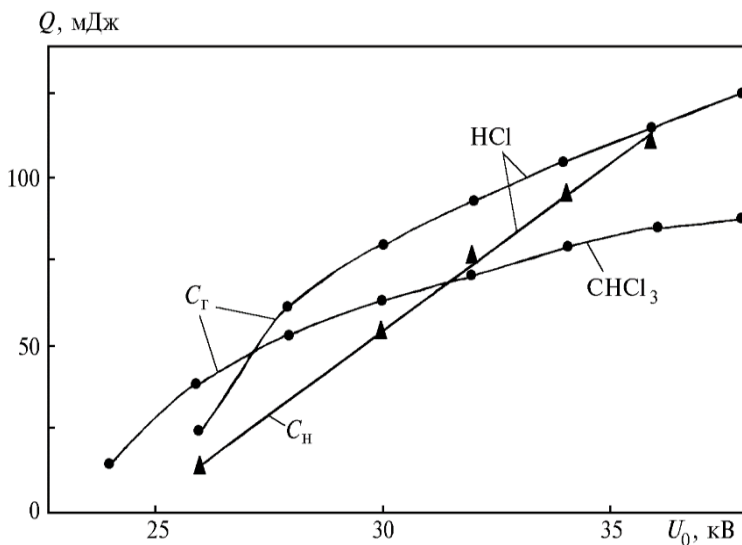


Рис. 4.6. Зависимости энергии излучения от зарядного напряжения при $P = 3,5$ атм в газовых смесях (He)Хе:НСl = 10:1 и (He)Хе:НСl₃ = 20:1 для $C_T = 10$ нФ и $C_H = 60$ нФ

На рис. 4.6 для сравнения приведена зависимость энергии излучения для накопительной емкости 60 нФ с галогенидом НСl. Оказалось, что максимальные энергии излучения соизмеримы для емкости генератора А-М (C_T) или накопительной емкости (C_H) при высоких зарядных

напряжениях, что связано с временем нарастания напряжения на лазерном промежутке. Для зарядных напряжений ниже 35 кВ энергия излучения ненамного выше для генератора А-М (C_T). При этом следует учитывать стабильность срабатывания трех разрядников генератора накачки. Основное достоинство накопительной емкости в том, что реализовалась более простая и надежная схема накачки при одном коммутаторе, которая позволяла работать в частотном режиме генерации излучения при стабильных ее параметрах.

На рис. 4.7 представлены зависимости энергии и мощности излучения для лазера с общим объемом 10 л от количества импульсов излучения (рис. 4.7, а) и частоты их следования (рис. 4.7, б) без прокачки газовых смесей He:Xe:CHCl₃ (HCl).

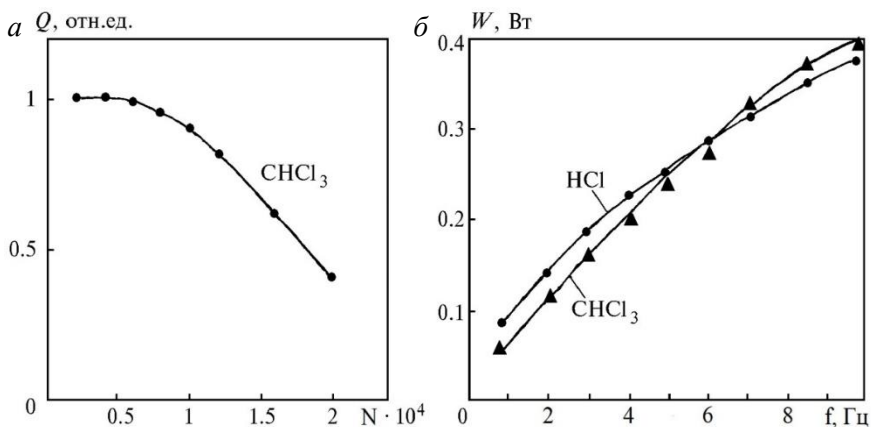


Рис. 4.7. Зависимости энергии и мощности излучения для лазера с общим объемом 10 л от количества (а) и частоты следования импульсов (б) при $U_0 = 30$ кВ, $P = 3,5$ атм в смесях He:Xe:HCl ($CHCl_3$)

Давление газовой смеси равнялось 3,5 атм, а зарядное рабочее напряжение соответствовало 30 кВ. В импульсном режиме возбуждения энергия излучения была выше для галогенида HCl (рис. 4.6). Для частотного режима возбуждения мощность излучения для HCl была соизмерима с галогенидом $CHCl_3$ (рис. 4.7, б). Было обнаружено, что

4. Экимерные лазеры с искровым источником УФ-предыонизации

CHCl_3 лучше работал в частотном режиме в системе без прокачки газовой среды (рис. 4.7, *а*). Так, за 10^4 импульсов генерации энергия излучения уменьшалась на 15 %, а за $2 \cdot 10^4$ импульсов генерации снижалась на 50 %. Если предположить, что каждая молекула CHCl_3 участвует в создании одного кванта света, то через 10^3 импульсов был бы использован весь CHCl_3 . Следовательно, в процессе работы газовой смеси лазера происходит интенсивное восстановление (рециркуляция) CHCl_3 . Поэтому он эффективен для работы XeCl -лазера в отпаянном режиме, в частности, для миниатюрных лазеров. При замене генератора А-М на генератор с распределенной емкостью $C_n = 60$ нФ нами впервые наблюдался квазистационарный режим разряда длительностью до 200 нс в экимерных электроразрядных лазерах [55], который затем был детально исследован в работе [53].

На рис. 4.8, *а* приведены типичные осциллограммы импульсов напряжения на промежутке, обострительного разрядного тока и импульсов генерации в зависимости от накопительной емкости, рабочего давления газовой смеси и зарядного напряжения в смесях $(\text{He})\text{Xe}:\text{HCl} = 10:1$ при обострительной емкости 10 нФ. Для сравнения приведены разрядные характеристики для генератора А-М с параметрами накопительной емкости (C_r) 10 нФ и обострительной емкости 10 нФ. Для генератора А-М время запаздывания пробоя составляло менее 50 нс при значении $E/N = 2,5 \cdot 10^{-16}$ В·см². Возбуждение активной среды осуществлялось в быстрой стадии разряда. Длительность импульса генерации равнялась 20 нс. С увеличением накопительной емкости до 60 нФ наблюдалась квазистационарная стадия разряда, длительность которой росла с повышением рабочего давления. В этом случае время запаздывания пробоя рабочего промежутка увеличивалось до 80 нс. С ростом же зарядного напряжения уменьшалось время запаздывания пробоя на промежутке (рис. 4.8, *а*) и возрастал разрядный ток обострительного контура накачки, что приводило к росту энергии излучения (рис. 4.8, *б*). Длительность генерации увеличивалась в два раза и достигала лишь 40 нс [53, 55, 165]. Было сделано предположение, что на квазистационарный режим возбуждения влияли как плотность разрядного тока, так и выбор рабочего буферного газа. В нашем случае использовался буферный газ гелий.

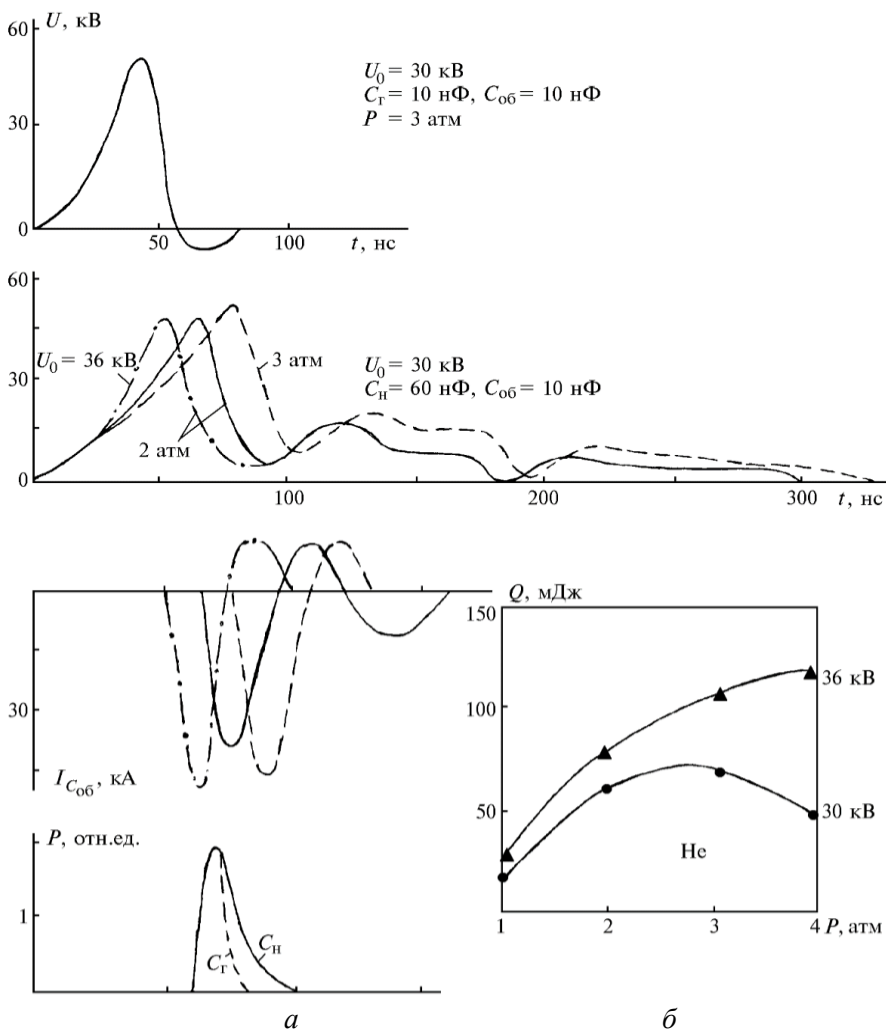
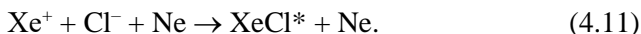
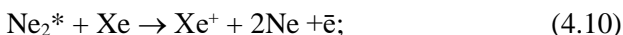
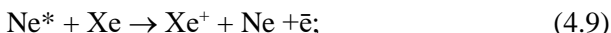


Рис. 4.8. Осциллограммы импульсов напряжения на промежутке, разрядного тока обострительного контура и излучения в смеси (He)Xe:HCl = 10:1 с искровой УФ-предыонизацией в накопительном контуре от C_n , P и U_0 (а); зависимости энергии излучения от зарядного напряжения и давления для $C_n = 60$ нФ (б)

4.3. Квазистационарный режим возбуждения с буферным газом неоном

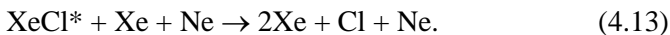
В работах [142, 143, 147] впервые успешно был применен буферный газ неон для схем накачки с источниками искровой или коронной УФ-предыонизации, что позволило значительно повысить энергию излучения эксимерных лазеров. В частности, для XeCl-лазера энергия излучения увеличивалась на 30 % [142, 147], а в работах [175, 176] она возрастала в 1,5–2 раза для режима быстрого возбуждения. В нашем случае для быстрого режима возбуждения энергия излучения увеличивалась в 1,5–2 раза с неоном по сравнению с гелием [53]. Авторы [175] предполагали, что с неоном эффективно протекает пеннинговская ионизация ксенона. В результате этого растет концентрация возбужденных молекул XeCl* по ионному каналу:



Уменьшение энергии излучения обуславливается как образованием Xe₂⁺, которые поглощают излучение [177]:



так и тушением возбужденных молекул:



На наш взгляд, это наиболее правомерное объяснение кинетики образования возбужденных молекул за счет активного участия Ne, что достаточно убедительно подтвердили последующие экспериментальные результаты.

На рис. 4.9 показаны зависимости энергии излучения от буферного газа неона и гелия и суммарного давления, а также осциллограммы напряжения на плазме, разрядного тока обострительного контура и из-

лучения в смесях $\text{Xe}:\text{HCl} = 10:1$ (3 торр) для $U_0 = 30$ кВ, $P = 2$ атм и $C_{\text{об}} = 10$ нФ, $C_{\text{н}} = 60$ нФ. Наблюдался быстрый режим возбуждения как с гелием, так и с неоном.

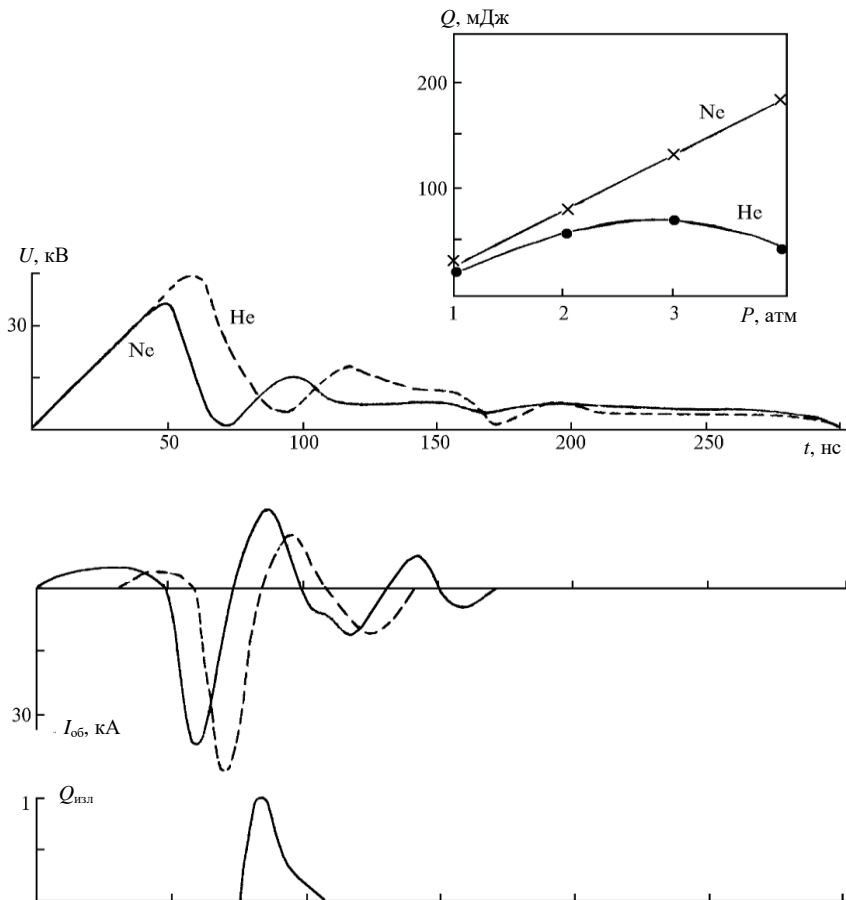


Рис. 4.9. Зависимости энергии излучения, осциллограммы импульсов напряжения на плазме, разрядного тока обострительного контура накачки и импульс генерации в смесях $\text{Ne}(\text{He}):\text{Xe}:\text{HCl} = 10:1$ (3 торр) с источником искровой УФ-предыонизации в накопительном контуре возбуждения

4. Экимерные лазеры с искровым источником УФ-предыонизации

В неоновых смесях уменьшалось время запаздывания пробоя и одновременно снижалось напряжение пробоя, а энергия излучения росла. Это связано, видимо, с эффективным образованием Xe^+ . При постоянной емкости $C_{об} = 10$ нФ и изменяющейся накопительной емкости от 60 до 120 нФ длительность импульса генерации не превышала 50 нс независимо от буферного газа неона или гелия, при этом плотность разрядного тока равнялась $0,8\text{--}1$ кА·см⁻². Отсутствие квазистационарного режима возбуждения и генерации вызвано, надо полагать, высокими плотностями разрядного тока. Нами была разработана специальная лазерная система представления (см. рис. 1.10) для выяснения этой причины. В этой системе ширина электродов изменялась от 0,5 до 2 см. В накопительный контур были введены дополнительные стабилизирующие индуктивности, а искровая УФ-предыонизация осуществлялась как с одной, так и с обеих сторон одного из электродов [53, 56, 57].

На рис. 4.10 представлены осциллограммы импульсов генерации в неоновых смесях для активного объема $2,5 \cdot 1 \cdot 70$ см³, накачиваемого генератором с накопительной емкостью 60 нф. Генератор возбуждения обеспечивал плотность разрядного тока от 200 до 350 А·см⁻², который позволял регистрировать длинные импульсы излучения. Импульс генерации можно разбить на три участка. Первый участок соответствовал быстрому режиму возбуждения, на который приходилось 50 % энергии излучения. Второй участок соответствовал переходному или квазистационарному режиму возбуждения, на который приходилось 30 % энергии излучения. Третий участок соответствовал стационарному режиму возбуждения, на который приходилось 20 % энергии излучения. Таким образом, 50 % энергии излучения реализовывалось в быстрой стадии разряда для $\rho \leq 10$ %. Как отмечалось ранее, в быстром режиме возбуждения импульсы генерации могли достигать длительности 100 нс для больших активных объемов при $\rho \geq 50$ %. В данном случае импульсы генерации в квазистационарном режиме возбуждения достигали 170 нс. При этом длительность импульса генерации в быстром режиме возбуждения равнялась 50 нс, а в квазистационарной стадии возбуждения соответствовала 120 нс. С ростом зарядного напряжения энергия излучения в квазистационарной стадии разряда увеличивалась.

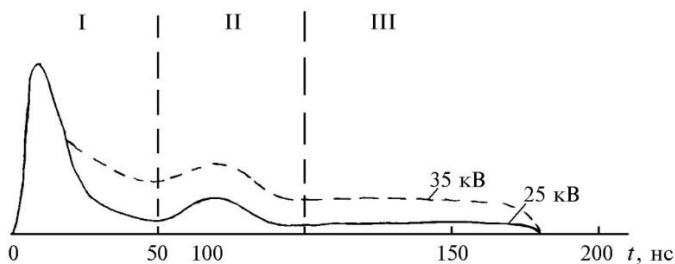


Рис. 4.10. Осциллограммы импульсов генерации в газовых смесях (Ne):Xe:HCl = 10:1 для $C_H = 60$ нФ, $C_{об} = 10$ нФ, $V = 2,5 \cdot 1 \cdot 70 \text{ см}^3$, $J = 200\text{--}350 \text{ А}\cdot\text{см}^{-2}$

На рис. 4.11 приведены зависимости энергии излучения от концентрации HCl, суммарного давления и зарядного напряжения для смесей с буферным газом неоном (Ne):Xe:HCl = 10:1.

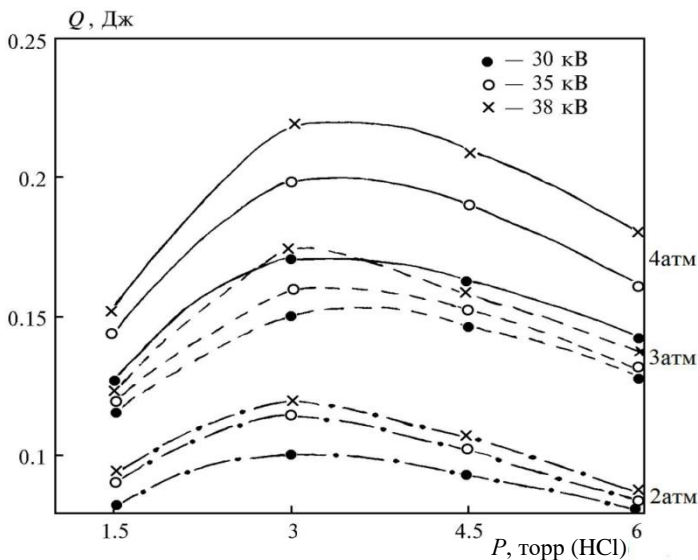


Рис. 4.11. Зависимости энергии излучения от концентрации HCl, P и U_0 для (Ne):Xe:HCl = 10:1

4. Экимерные лазеры с искровым источником УФ-предыонизации

Максимально оптимальные энергии излучения от параметров активной среды наблюдались для оптимальной концентрации галогенида $\text{HCl} = 3$ торр, что хорошо согласовывалось с результатами работы [178]. Поэтому в последующих экспериментах нами использовались лишь газовые смеси $\text{Xe}:\text{HCl} = 10:1$ с галогенидом HCl . С уменьшением концентрации HCl длительность импульса генерации возрастала. При этом энергия излучения уменьшалась. С увеличением концентрации HCl после ее оптимума энергия излучения спадала. С ростом суммарного давления газовой смеси росла энергия излучения, которая увеличивалась с возрастанием зарядного напряжения генератора накачки. Параметры излучения при концентрации $\text{HCl} = 1,5$ торр соответствовали параметрам излучения для концентрации $\text{HCl} = 6$ торр.

На рис. 4.12 показаны зависимости энергии и форма импульсов излучения от величины обострительной емкости $C_{об} = 10$ нФ (рис. 4.12, *а*) и $C_{об} = 20$ нФ (рис. 4.12, *б*) для неона и гелия при различных значениях давления газовой смеси и зарядного напряжения. УФ-предыонизация в обоих случаях осуществлялась одним рядом искровых промежутков. Для сравнения приведены зависимости в гелиевых смесях (рис. 4.12, *а*) для электрода с двухсторонней УФ-предыонизацией (пунктирная), которая увеличивала энергию излучения более чем в два раза. Для обострительной емкости 10 нФ с неоном наблюдался квазистационарный режим возбуждения и генерации с длительностью импульсов излучения до 170 нс, а для гелиевых смесей – лишь быстрый режим возбуждения с длительностью импульсов излучения 50 нс. Для неона с ростом зарядного напряжения от 25 до 38 кВ имело место изменение формы импульса генерации, которое не наблюдалось для гелия (рис. 4.12, *а*). В гелиевых смесях практический КПД равнялся 1 %, а для неоновых смесей он соответствовал 1,6 %. При увеличении обострительной емкости в 2 раза до 20 нФ (рис. 4.12, *б*) возрастал разрядный ток и энергия, вкладываемая в быстрой стадии разряда, энергия излучения практически оставалось такой же, как и с обострительной емкостью 10 нФ. Независимо от буферного газа в данном случае обеспечивался лишь быстрый режим возбуждения, который обеспечивал длительность импульсов излучения 70 нс. Отметим интересный факт, что с уменьшением соотношения газовых компонентов $\text{Xe}:\text{HCl} = 5:1$ и увеличением концентрации HCl до 6 торр возрастала энергия излучения в неоновых смесях при давлениях ≥ 4 атм

(рис. 4.12, б). Следовательно, одним из основных условий реализации квазистационарного режима возбуждения являлось оптимальное соотношение параметров элементов, которые использовались в разрядных контурах схемы накачки.

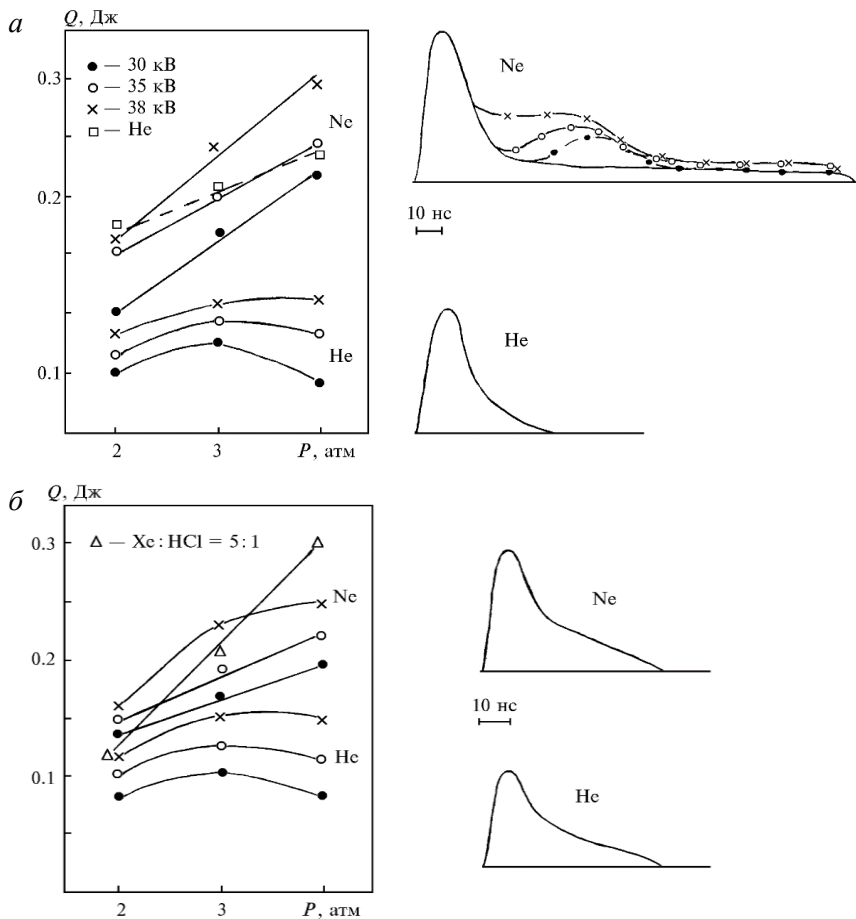


Рис. 4.12. Зависимости энергии и формы импульса излучения от P , U_0 и буферного газа He, Ne при $C_n = 60$ нФ, $C_{об} = 10$ нФ (а) и $C_{об} = 20$ нФ (б) для Xe:HCl = 10:1 (3 торр)

4. Эксимерные лазеры с искровым источником УФ-предыонизации

Для практических применений существенную роль играло реальное распределение лазерного излучения по апертуре разрядного промежутка. Авторами работы [176] были проведены исследования коэффициента усиления ХеСл-лазера с источником искровой УФ-предыонизации. Они провели исследования коэффициента усиления в зависимости от рабочего давления смеси и буферных газов гелия и неона. Отмечалось слабое усиление вблизи сетчатого катода в зоне 0,5 см для любых газовых смесей. Это связывалось с областью неоднородностей, которые появлялись из-за уменьшения концентрации электронов во время роста напряжения на промежутке. Наблюдалось слабое усиление на краях электродов в гелиевых смесях.

На рис. 4.13 приведено распределение энергии излучения по ширине электродов параллельно оптической оси лазера в зависимости от рабочего давления и буферного газа гелия (рис. 4.13, *а*) и неона (рис. 4.13, *б*). Точкой на оси абсцисс показано расположение одного ряда острий, образующих вместе с основным электродом искровые промежутки с зазором 2 мм. Распределение излучения регистрировалось с помощью диафрагмы с отверстием 1 мм и фотодиода ФЭК-22СПМ. Для гелиевых смесей максимум распределения лазерного излучения сдвинут в сторону искровых промежутков независимо от рабочих давлений. На краях электродов наблюдался спад излучения, что соответствовало наибольшему искажению электрического поля. Для гелиевых смесей распределение излучения было более симметричным и улучшалось с ростом давления смеси. Распределение излучения существенно улучшалось при использовании двухстороннего источника УФ-предыонизации (симметричного).

Нами была разработана лазерная система высокого давления с двухконтурной схемой накачки и источником симметричной искровой УФ-предыонизации через сетчатый электрод. Активный объем лазера составлял $3 \cdot 1,5 \cdot 35 \text{ см}^3$. Два ряда искровых промежутков с зазорами 0,5 см по поверхности диэлектрика находились на расстоянии 1 см от сетчатого электрода. Была обнаружена особенность формирования объемного разряда в таких системах. Металлический анод подсвечивался равномерно по всей ширине 1,5 см, а на сетчатом электроде ширина разряда равнялась 0,8 см. При этом ширина лазерного излучения для буферных газов аргона, гелия и неона соответствовала 1 см. Емкости генератора накачки составляли: накопительная емкость – 75 нФ, обострительная емкость – 10 нФ [164, 165].

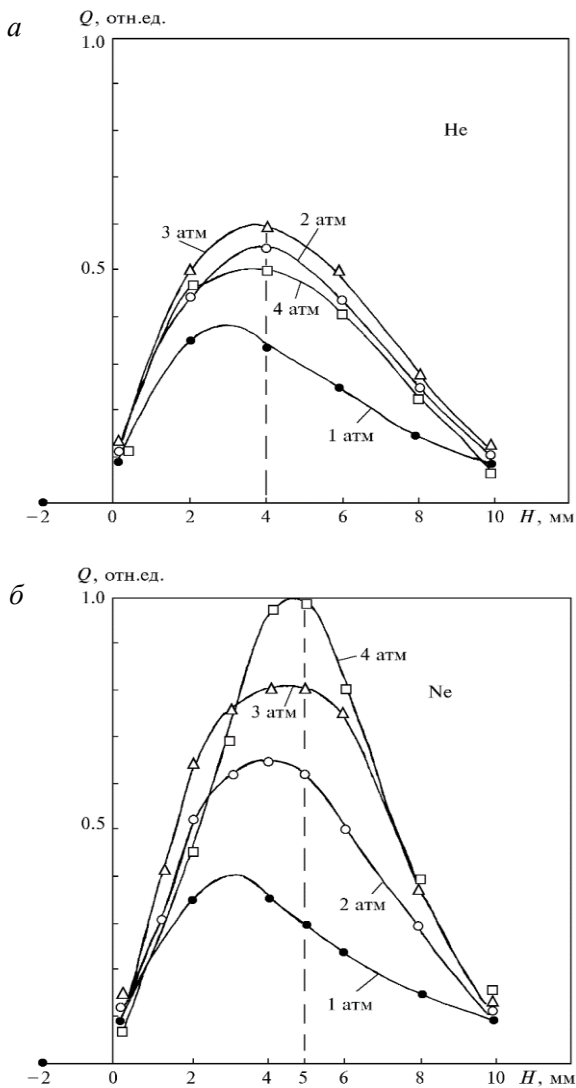


Рис. 4.13. Распределение энергии излучения по ширине электродов в смесях Хе:НСl = 10:1 с буферными газами Не (а) и Ne (б) в зависимости от их суммарного давления

4. Эксимерные лазеры с искровым источником УФ-предыонизации

На рис. 4.14 показаны зависимости энергии излучения в газовых смесях (Ar, He, Ne)Xe:HCl = 10:1 (3 торр) от давления и зарядного напряжения для активного объема $3 \cdot 1,5 \cdot 35 \text{ см}^3$ с источником сетчато-искровой УФ-предыонизации. Неожиданным результатом оказалось то, что максимальная энергия излучения 0,1 Дж наблюдалась с гелием при оптимальном давлении 3 атм, а для неона она была в два раза меньше, хотя с ростом давления она линейно росла по сравнению с гелиевыми смесями. В неоновой смеси при давлении 5 атм энергия излучения была на 20 % ниже, чем для гелиевой смеси при давлении 3 атм. Для аргоновой смеси при рабочих давлениях до 1 атм наблюдалась максимальная энергия излучения по сравнению с буферными газами неоном и гелием. Для буферного газа аргона наблюдался оптимум по энергии излучения при давлении 0,75 атм.

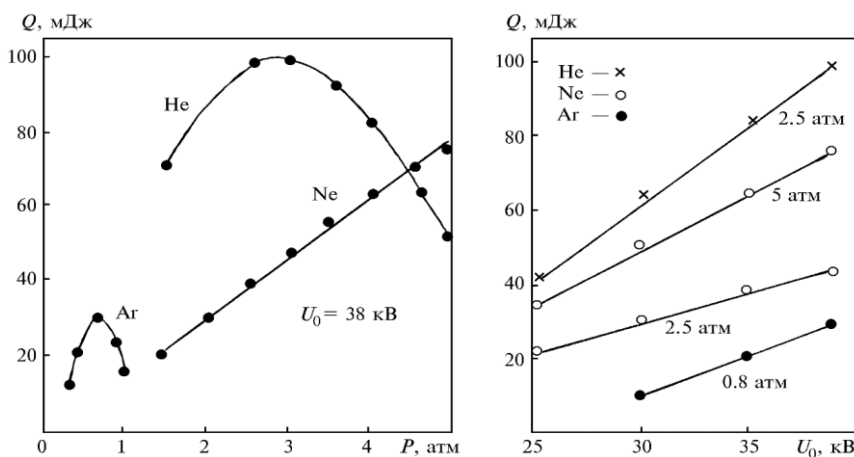


Рис. 4.14. Зависимости энергии излучения в газовых смесях (Ar, He, Ne)Xe:HCl = 10:1 (3 торр) от давления (а) и зарядного напряжения генератора накачки (б)

Для всех буферных газов регистрировался линейный рост энергии излучения от вложенной энергии в газ. Такое поведение энергетических характеристик излучения XeCl-лазера проявлялось после детальных исследований объемного разряда возбуждения.

На рис. 4.15 представлены типичные осциллограммы напряжения на плазме, разрядного тока накопительной емкости и импульсов генерации для смесей с буферными газами Ar, Ne, He при давлении 1 атм и зарядном напряжении 30 кВ с источником искровой УФ-предыонизации, ограниченной сетчатым электродом. Самое низкое напряжение пробоя и время его задержки соответствовали неону, а квазистационарная стадия разряда достигала 200 нс. С ростом давления газовой смеси наблюдался линейный рост энергии излучения. Длительность квазистационарных импульсов генерации достигала 100 нс. Максимальный разрядный ток накопительного контура наблюдался с рабочим буферным газом неоном. При этом плотность тока разряда для всех буферных газов изменялась от 0,2 до 0,28 кА·см⁻², которая ограничивала длительность импульсов генерации, а следовательно, выходную энергию излучения. Для буферного газа аргона длительность генерации достигала 50 нс, а для гелия была не более 35 нс, т. е. реализовался быстрый режим возбуждения.

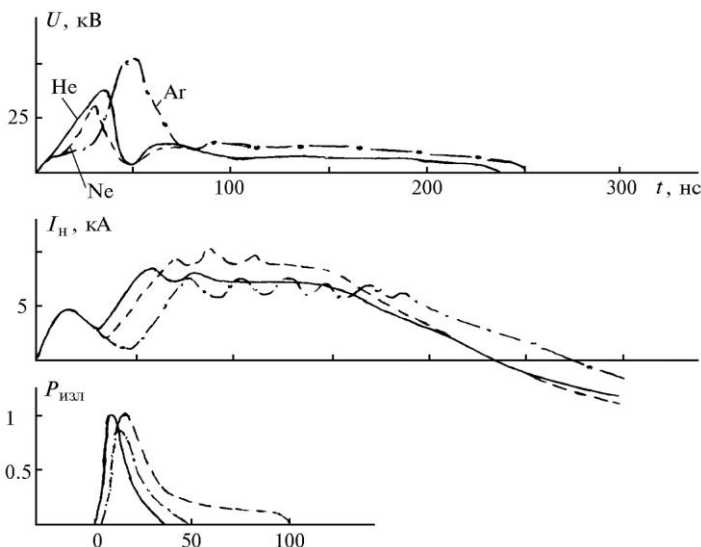


Рис. 4.15. Осциллограммы напряжения на плазме, тока накопительного контура и излучения в смесях (Ar, He, Ne)Xe:HCl = 10:1 (3 торр) при давлении 1 атм и зарядном напряжении 30 кВ

4. Эксимерные лазеры с искровым источником УФ-предыонизации

Следовательно, в двухконтурных схемах накачки при $C_n \gg C_{об}$ с источником искровой УФ-предыонизации в накопительном контуре при умеренных плотностях разрядного тока для ХеСл-лазера с буферным газом неоном была показана возможность получения квазистационарного режима возбуждения и генерации. В подтверждение данного вывода в табл. 4.2 приведены основные работы и максимальные параметры ХеСл-лазера для быстрого и квазистационарного режима возбуждения с искровой УФ-предыонизацией в накопительном контуре накачки.

Таблица 4.2

Основные работы и максимальные параметры ХеСл-лазера в режиме с быстрым и квазистационарным возбуждением с искровой предыонизацией в накопительном контуре

№ п/п	Схема накачки	Буф. газ	ρ, %	V, л	Q _{изл} , Дж	$\frac{Q}{\text{Дж}}$ л · атм	τ _{h/2} , нс	τ _{осн} , нс	КПД, %	Ли- тер.
1*	C _н + УФ/C _{об}	KrF	5	0,12 5	0,11	0,7	7	20	1	[174]
2	C _г + УФ/C _{об}	He	10	0,1	0,13	0,4	10	15	0,5	[54]
3	C _н + УФ/C _{об}	He	10–40	0,1	0,127	0,5	15	40	0,5	[55]
			Квазистационарный режим разряда							
4	C _н + УФ + + L _{ст} /C _{об}	He	10–40	0,2	0,13	0,5	15	40	0,5	[53]
		Ne	Квазистационарный режим накачки							
5	C _н + УФ/C _{об}	Ne	10	0,12	0,28 0,68	0,6 1	20 20	80 40	2,9 1,8	[179]
6	C _н + УФ + + L _{ст} /C _{об}	Ne	10	0,2	0,5	0,75	15	170	1,6	[57]
			Квазистационарный режим генерации							
7	C _н + УФ/C _{об} теор. расчет	Ne	–	0,12	5,5	11,6	75	100	5,5	[180]
8	C _н + УФ + + L _{ст} /C _{об} + L _{ст}	Ne He	7	0,18	0,5	0,75	15	170	1,6	[56]

№ п/п	Схема накачки	Биф. газ	ρ , %	V , л	$Q_{\text{изл.}}$, Дж	$\frac{Q}{\text{л} \cdot \text{атм}}$, Дж	$\tau_{\text{н/2}}$, нс	$\tau_{\text{осн.}}$, нс	КПД, %	Ли- тер.
9	$C_{\text{н}} + \text{УФ}/C_{\text{об}}$	Ne	40	1,3	0,1 0,6	— —	500 300	600 400	0,02 0,25	[181]
10	2НК/МСС	—	—	0,54	1	—	200	275	2,2	[182]
11*	$C_{\text{н}} + \text{УФ}/C_{\text{об}}$	KrF ArF	—	0,12	0,5 0,27	— —	15	30	3,9 2,1	[183]

* Приведены работы для сравнения ArF и KrF-лазеров с максимальным КПД.

В 1981 г. нами впервые был обнаружен и исследован квазистационарный режим разряда в гелиевых смесях, обеспечивающий импульсы генерации до 40 нс.

В 1982 г. нами был исследован и обоснован квазистационарный режим возбуждения для буферного газа неона при длительности импульсов генерации до 40 нс, которые были ограничены высокими плотностями разрядного тока.

В 1984 г. авторы работы [179] при соотношении параметров $C_{\text{н}} \approx C_{\text{об}}$ реализовали как быстрый режим возбуждения с $Q = 0,68$ Дж, КПД = 1,8 % и $\tau_{\text{г}} = 40$ нс, так и квазистационарный с $Q = 0,28$ Дж, КПД = 2,9 % и $\tau_{\text{г}} = 80$ нс. Высокий КПД обеспечивался за счет дополнительной энергии излучения, получаемой в квазистационарной стадии разряда, которая составляла 25 % от общего разряда возбуждения.

В 1986 г. нами были получены импульсы генерации до 170 нс с энергией 0,5 Дж и КПД = 1,6 % за счет применения стабилизирующих индуктивностей и уменьшения плотности разрядного тока до 200 А·см⁻². Авторы работы [180] сделали теоретический расчет данной схемы накачки при $C_{\text{н}} = C_{\text{об}} = 60$ нФ, $L_{\text{н}} = 200$ нГ, $L_{\text{об}} = 75$ нГ для активного объема 120 см³, в котором, по их мнению, возможно получение следующих параметров излучения: $Q = 5,5$ Дж, КПД = 5,5 % и $\tau_{\text{г}} = 100$ нс.

В 1989 г. авторы работы [181] подтвердили существование квазистационарного режима возбуждения и генерации. Для активного рабочего объема 1,3 л с $\rho = 40$ % и $C_{\text{н}} = 700$ нФ ими была получена энергия

4. Эксимерные лазеры с искровым источником УФ-предыонизации

излучения 0,1 Дж с длительностью импульса излучения 600 нс. Авторы работы [182] успешно продемонстрировали квазистационарный режим возбуждения и генерации в системе с магнитным ключом и двумя независимыми контурами накачки. Ими была получена энергия излучения 1 Дж с длительностью импульса излучения 275 нс. КПД лазера равнялся 2,2 %. Авторы работы [183] в режиме быстрого возбуждения (за счет высоких мощностей накачки, равных $1,75\text{--}2\text{ МВт}\cdot\text{см}^{-3}$) получили на молекулах KrF и ArF высокий КПД лазера 3,9 и 2,1 % соответственно при длительности импульсов излучения до 30 нс.

Следовательно, для двухконтурных схем возбуждения с источником искровой УФ-предыонизации в накопительном контуре накачки также подтверждена возможность получения длинных импульсов генерации для XeCl-лазера.

Выводы

1. Впервые получен и исследован квазистационарный режим разряда возбуждения для газовых смесей (He, Ne):Xe:НСl. Показано, что длительность режима возбуждения ограничивается плотностью разрядного тока.

2. В неоновых смесях получен квазистационарный режим возбуждения и генерации длительностью ≥ 170 нс с энергией 0,5 Дж и КПД лазера 1,6 %.

4.4. XeCl-лазер с УФ-предыонизацией и продольным разрядом возбуждения

В миниатюрных эксимерных лазерах для их накачки в основном применялся поперечный разряд [184, 185]. Продольный разряд практически не использовался из-за высоких зарядных напряжений порядка 100 кВ [186], хотя он обладал рядом достоинств. Это простота конструкций лазерных излучателей (кварцевых трубок), малая их химическая активность с рабочими газами. А круглое сечение апертуры излучения и высокая степень его однородности обеспечивают малую расходимость. Кроме того, для продольных разрядов характерны малые активные объемы и относительно низкие рабочие давления ≤ 1 атм. Эти

условия позволяли надеяться на возможность повышения эффективности возбуждения эксимерных молекул без буферного газа или при малой его концентрации. В этом случае должны были повышаться удельные параметры излучения.

В 1977 г. авторы работы [186] впервые показали возможность применения продольного разряда для накачки ХеF-лазера. При этом использовали зарядное напряжение 120 кВ для генератора накачки.

В 1978 г. авторы работы [187] впервые использовали источник коронной УФ-предыонизации для накачки молекул ХеF и KrF продольным разрядом за счет дополнительного фольгированного электрода. Позже такие системы накачки называли как «емкостное возбуждение продольным разрядом». Они позволили существенно увеличить энергетические характеристики излучения и снизить зарядное напряжение до 30–60 кВ [188, 189].

В 1983 г. авторы работы [188] впервые в продольном разряде на молекуле ХеCl получили энергию излучения 0,3 мДж в газовой смеси (Ne)Хе:НCl = 10:1 (1 торр) при давлении ≤ 1 атм.

В 1985 г. авторы работы [190] впервые в поперечном разряде с источником искровой УФ-предыонизации получили на молекулах ХеCl, KrF и ХеF генерацию в смесях без буферного газа. Слабая генерация на молекулах ХеCl наблюдалась в газовой смеси Хе:CCl₄ = 400:1 для давлений активной среды от 0,1 до 0,5 атм.

В 1987 г. авторы работы [191] впервые получили в продольном разряде с источником коронной УФ-предыонизации на молекулах KrF генерацию в рабочих смесях без буферного газа.

Дальнейшее качественное улучшение характеристик продольного разряда было продемонстрировано авторами работы [192] за счет применения n числа последовательных продольных разрядов, возбуждаемых одновременно с использованием n источников УФ-предыонизации в контуре накачки. Схема возбуждения аналогична схеме, приведенной на рис. 1.20. Они получили энергию излучения 0,1 мДж в газовой смеси Хе:НCl = 5:1 (2,4 торр) с буферным газом неоном. Давление активной среды соответствовало 1,5 атм. Длина продольного разряда возбуждения равнялась 26 см, а зарядное напряжение соответствовало 40 кВ. В табл. 4.3 приведены работы и максимальные параметры излучения ХеCl-лазера с продольным разрядом возбуждения и источником УФ-предыонизации.

4. Эксимерные лазеры с искровым источником УФ-предыонизации

Таблица 4.3

Основные работы и максимальные параметры эксимерных лазеров с продольным разрядом и УФ-предыонизацией

№ п/п	УФ- источник	Моле- кулы	Буф. газ	P , атм	U_0 , кВ	V , см ³	$Q_{изл}$, мДж	Q , $\frac{Дж}{л \cdot атм}$	τ_{hl2} , нс	КПД, %	Литер.
1	–	XeF	He	0,2	120	3,8	0,12	0,15	40	–	[186]
2	Корон.	XeF KrF	He (Ar, Ne)	0,5	30	0,03	0,04 0,05	2,6 3,4	10 10	–	[187]
3	Корон.	XeCl	Ne	0,7	36	1	0,32	0,4	35	0,005	[188]
4	Корон.	XeF	He	1	60	0,7	0,35	0,5	30	–	[189]
5	Корон.	KrF KrF	He –	0,7 0,4	84	0,12	0,18 0,08	2 1,8	15	0,17 0,04	[191]*
6	Искров.	XeCl	Ne	1,5	40	3,3	0,1	0,06	15	0,001	[192]
7	Искров.	XeCl XeCl	He, Ne, Ar –	0,04 0,04	12	1,6	0,12 0,1	1,8 1,5	5	0,01	[85]* [86]*

* Работы, в которых наблюдалась генерация при отсутствии буферного газа.

Нами были проведены исследования ХеСl-лазера с продольным разрядом возбуждения и с искровым источником УФ-предыонизации (см. рис. 1.20) от параметров двухконтурной схемы накачки и газовых компонентов с буферными газами гелием, неоном, аргоном [85, 86].

На рис. 4.16 показаны зависимости энергии излучения ХеСl-лазера от соотношения газовых компонентов Хе:НСl и суммарного давления газовой смеси для НСl = 4 торр (рис. 4.16, *а*) и НСl = 2 торр (рис. 4.16, *б*) с буферным газом гелием при зарядном напряжении 12 кВ, а также приведен импульс генерации, его длительность на высоте равнялась 5 нс. Для накачки использовалась комбинированная схема питания генератора Блюмляйна. Это генератор Бл-н (С) с источником искровой УФ-предыонизации и обострительной емкостью ($C_{об}$), которая обеспечивала короткие импульсы генерации. При высокой концентрации газовых компонентов НСl, Хе, Не (рис. 4.16, *а*) происходил спад энергии излучения. При низких же концентрациях газов основными компонентами были Хе и НСl, а эффективная генерация наблюдалась практически без буферного газа. При относительно малой концентрации НСl = 2 торр (рис. 4.16, *б*) энергия возрастала почти в два раза, и оптимальное соотношение газовых компонентов соответствовало Хе:НСl = 20:1. Увеличение концентрации гелия приводило к снижению энергии излучения.

Максимальная энергия излучения достигала 120 мкДж при пиковой мощности 20 кВт, а без буферного газа она равнялась 100 мкДж. Нами впервые была получена эффективная генерация в смесях низкого давления Хе:НСl без буферного газа. Резкое отличие в соотношениях Хе:НСl для различных концентраций НСl, видимо, обусловлено механизмом образования и возбуждения молекул ХеСl. Для гелиевых смесей оптимальное давление равнялось 30 торр.

На рис. 4.17 представлены зависимости энергии излучения от соотношения Хе:НСl и давления буферных газов аргона (рис. 4.17, *а*) и неона (рис. 4.17, *б*) при НСl = 2 торр для зарядного напряжения 12 кВ. В аргоновых смесях при больших концентрациях НСl разряд был неоднороден, наблюдались искровые каналы. Оптимальное соотношение газовых компонентов равнялось Хе:НСl = 5:1 для суммарного давления 30 торр. Максимальная энергия излучения соответствовала 70 мкДж.

4. Экимерные лазеры с искровым источником УФ-предыонизации

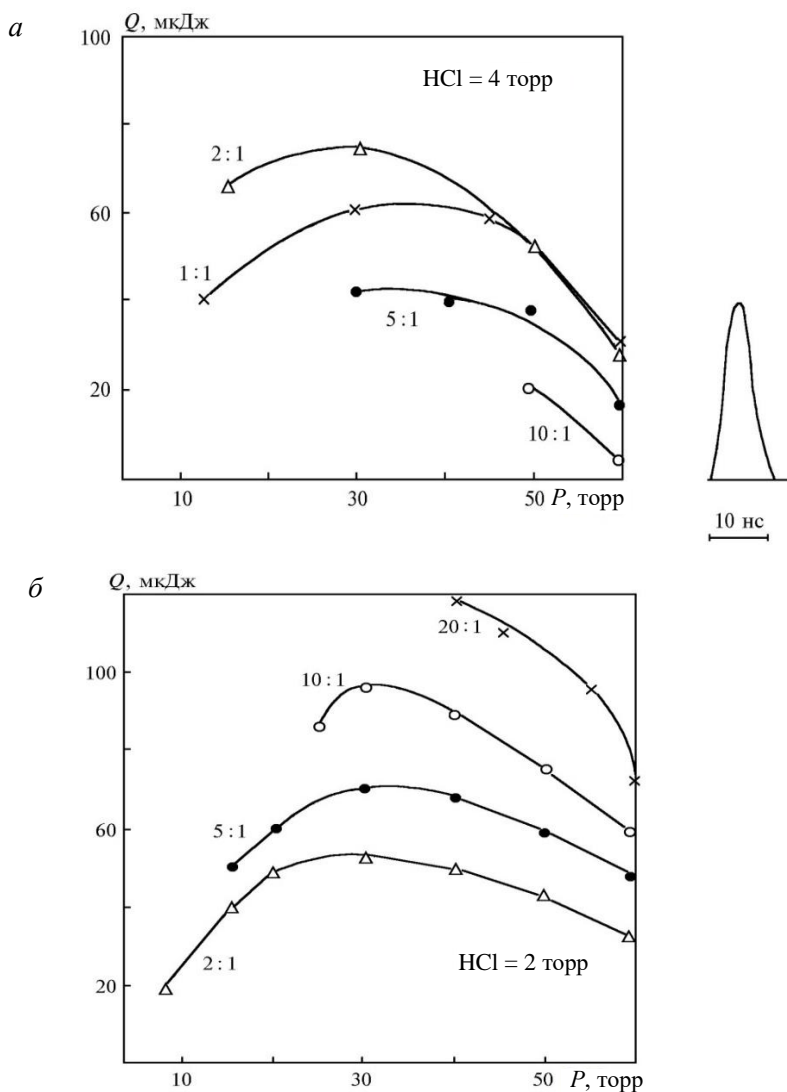


Рис. 4.16. Зависимости энергии излучения от соотношения Хе:Нсl и суммарного давления смеси для Нсl = 4 торр (а) и Нсl = 2 торр (б) с буферным газом гелием и импульс генерации

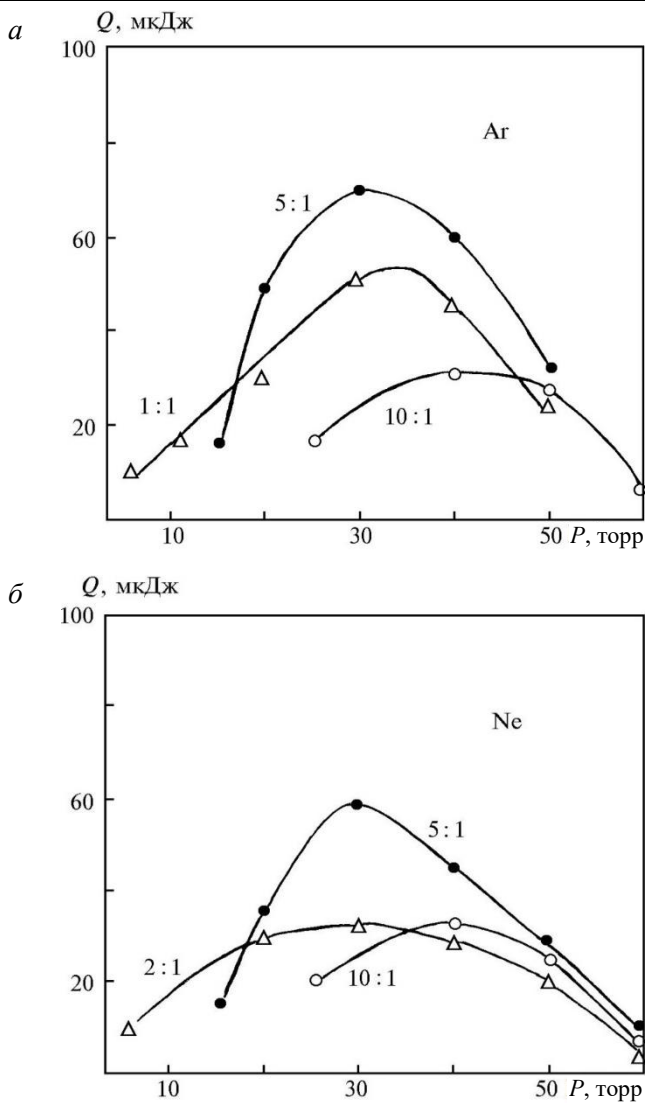


Рис. 4.17. Зависимости энергии излучения от соотношения Хе:НСl, давления аргона (*a*), неона (*б*) для зарядного напряжения 12 кВ и концентрации НСl = 2 торр

4. Эксимерные лазеры с искровым источником УФ-предыонизации

Аналогичные исследования были проведены с буферным газом неоном. Оптимальные параметры газовых компонентов и энергетические характеристики излучения аналогичны аргоновым смесям. Максимальная энергия излучения достигала 60 мкДж. Отметим, что для всех буферных газов, используемых нами, величина значения для соотношения $E/N = 2,8 \cdot 10^{-16}$ В·см² была постоянной и зависела лишь от режима быстрой накачки с источником искровой УФ-предыонизации.

На рис. 4.18 приведены зависимости энергии излучения от концентрации HCl, соотношения Хе:НCl для зарядного напряжения 12 кВ (рис. 4.18, *а*) и зависимости средней мощности излучения (рис. 4.18, *б*) от зарядного напряжения, рабочего давления для частоты следования импульсов генерации 5 Гц, соотношение газовых компонентов Хе:НCl = = 5:1 (2 торр) для буферного газа гелия. С увеличением концентрации Хе и HCl росла энергия излучения. Для HCl наблюдался оптимум, аналогичный поперечному разряду возбуждения, который соответствовал 3 торр [56].

При уменьшении концентрации HCl падала энергия излучения из-за выгорания хлора в малом активном объеме для высоких значений E/N . Эксперименты показали жесткую связь между сопротивлением плазмы разряда и источником УФ-предыонизации (рис. 4.18, *б*). Это линейная зависимость средней мощности излучения от энергии, вкладываемой в разряд (U_0), и суммарного давления смеси ($R_{\text{пл}}$). Максимальная средняя мощность излучения достигала 0,5 мВт.

На рис. 4.19, *а* показаны обобщающие зависимости средней мощности излучения в газовых смесях (Ar, He, Ne)Хе:НCl = 5:1 (2 торр) от буферных газов и давления при частоте следования импульсов генерации 5 Гц, на рис. 4.19, *б* – зависимости энергии излучения для гелиевых смесей Хе:НCl:He = N:1:1 от концентрации Хе и HCl для зарядного напряжения 12 кВ.

С ростом рабочего давления выходная мощность излучения росла до оптимального значения, а затем спадала с ростом давления независимо от типа буферного газа. В этом случае характер поведения этих зависимостей одинаков, что указывало на единый механизм возбуждения молекул ХеCl для различных буферных газов. Максимальные параметры наблюдались с буферным газом гелием.

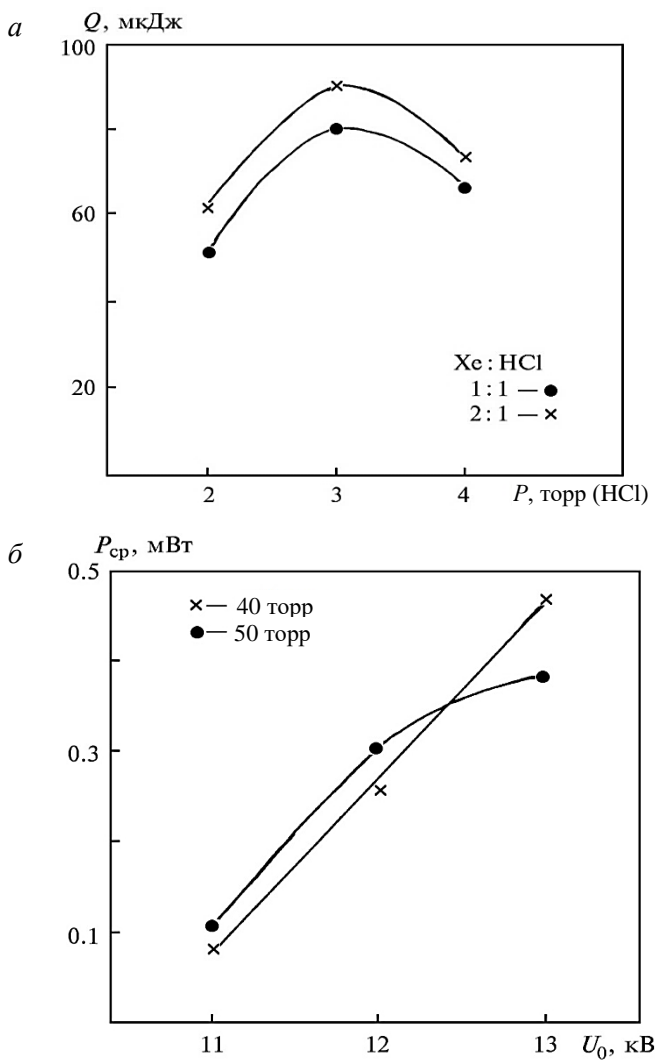


Рис. 4.18. Зависимости энергии излучения от концентрации и соотношения Хе:НСl для $U_0 = 12$ кВ (*a*) и зависимости средней мощности излучения для Хе:НСl = 5:1 (2 торр) от U_0 , P (*б*) для буферного газа гелия

4. Экимерные лазеры с искровым источником УФ-предыонизации

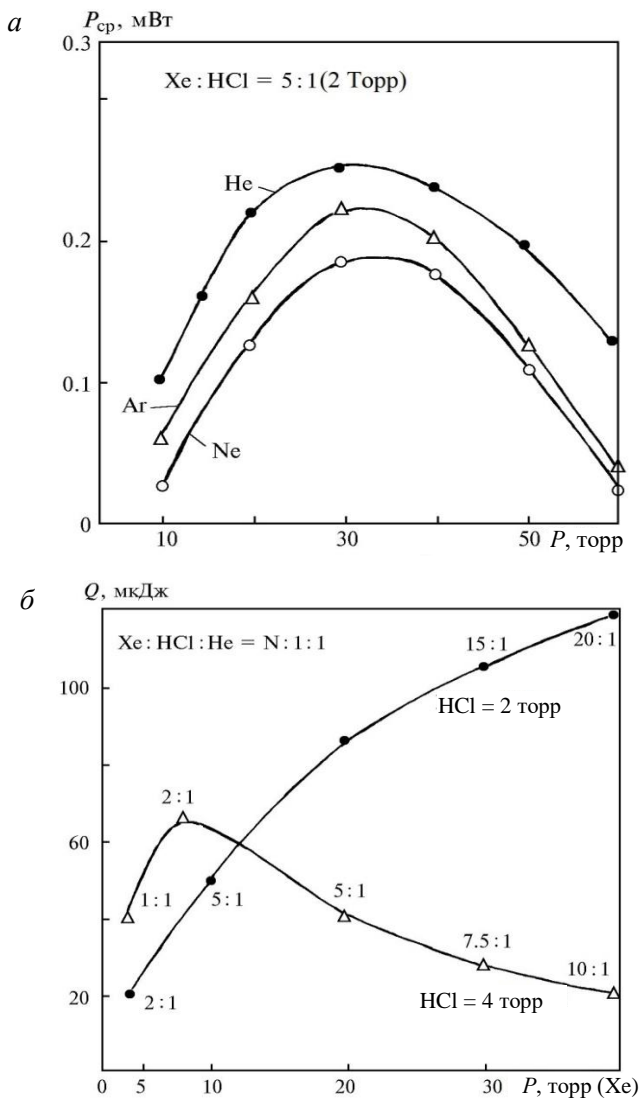


Рис. 4.19. Зависимости средней мощности излучения для газовых смесей (Ar, He, Ne)Xe:HCl от давления с Ar, He, Ne (а) и энергии излучения для буферного газа He от концентрации Xe и HCl (б)

Наиболее наглядно роль газовых компонентов Хе и HCl представлена в смеси Хе:HCl:He = N:1:1 (рис. 4.19, б), где концентрация HCl = 2; 4 торр. При низком содержании HCl = 2 торр с ростом Хе энергия излучения росла практически линейно, т. е. ксенон играл одновременно роль буферного газа. При высокой концентрации HCl = 4 торр и соотношении газовых компонентов Хе:HCl = 2:1 наблюдался максимум энергии излучения, а далее с ростом ксенона энергия излучения монотонно спадала при возрастании неустойчивости разряда.

Таким образом, использование дополнительного источника УФ-предыонизации позволило снизить зарядные напряжения более чем в 4 раза и повысить удельную энергию излучения до $1,8 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$, которая оказалась практически сравнима с энергией, реализуемой поперечным разрядом возбуждения. Достигнутый КПД лазера оказывался низким, хотя дальнейшие исследования должны повысить этот параметр. На основании проведенных исследований и анализа работ других авторов нами сделан вывод о возможности получения как быстрого, так и квазистационарного режима возбуждения ХеCl-лазера для многоконтурных схем накачки (см. рис. 4.1). Это схемы питания с поперечным или продольным разрядом возбуждения с источником искровой УФ-предыонизации независимо от ее размещения в обострительном (рис. 4.1, а) или накопительном (рис. 4.1, б) контуре питания. Особых ограничений для параметров контуров накачки в режиме быстрого возбуждения нет. Они появляются лишь при необходимости получения высоких энергий излучения или КПД лазера. В этом случае необходимо выполнение условия: $C_n \sim C_{об}$ и $I_p = I_{об}$. Для квазистационарного режима возбуждения необходимо выполнение следующих условий: $C_n \gg C_{об}$ и $I_p = I_{об} + I_n$. А это возможно лишь при введении ограничений на плотность разрядного тока. Кроме того, разрядный ток зависит от концентрации и времени существования электронов УФ-предыонизации, т. е. $I = f(C_n/C_{об}, L_n/L_{об}, L_{ст}, n_{уф})$. Данный вопрос более подробно нами рассмотрен в пятом разделе для лазерных систем с источниками плазменной УФ-предыонизации.

Выводы

1. Экспериментально показана возможность эффективного применения трехконтурной схемы накачки с источником искровой УФ-предыонизации для ХеCl-лазера.

4. Эксимерные лазеры с искровым источником УФ-предыонизации

2. Экспериментально получены и исследованы объемные самостоятельные разряды в газовых средах Ar(He):Xe:CCl_4 длительностью 200 нс для аргоновых и 400 нс для гелиевых смесей.

3. Впервые реализован квазистационарный режим получения объемного разряда и осуществлен квазистационарный режим возбуждения и генерации XeCl -лазера с буферными газами аргоном и неоном. Для неоновых смесей получены импульсы генерации более 170 нс с энергией 0,5 Дж и КПД 1,6 %.

4. Реализован и исследован режим многоимпульсного возбуждения в трехконтурных схемах накачки.

5. Определены условия получения как быстрого, так и квазистационарного режима возбуждения XeCl -лазера в многоконтурных схемах накачки с источником УФ-предыонизации независимо от его расположения в обострительном или накопительном контуре возбуждения.

6. Проведены исследования XeCl -лазера с возбуждением продольным разрядом и УФ-предыонизацией для различных буферных газов. Впервые получена эффективная генерация как с буферным газом аргоном, так и в рабочей смеси без буферного газа с удельной энергией излучения $1,5 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ при длительности импульса генерации 5 нс и давлении 30 торр.

7. В аргоновых смесях впервые получена одновременная эффективная УФ- и ИК-генерация на XeCl^* и на атомарном ксеноне. Вклад ИК составлял до 30 % от суммарного излучения.

5. ЭКСИМЕРНЫЕ ЛАЗЕРЫ С ПЛАЗМЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ УФ-ПРЕДЫОНИЗАЦИИ

Проведенные исследования разрядных и энергетических параметров ХеСl-лазера с коронным и искровым источником УФ-предыонизации позволили эффективно применять в качестве буферных газов, кроме гелия, аргон и неон [47, 53]. Кроме того, был обнаружен новый тип формирования разряда в Ar, Хе, Кг и в аргоновых буферных средах [60]. На основании полученных результатов был впервые разработан и исследован плазменный электрод для эксимерных лазеров [48, 53, 62], конструктивное его исполнение приведено в разд. 1 (рис. 1.12). Рассмотрим особенности работ плазменного электрода при возбуждении быстрым разрядом (генератор Блюмляйна) молекул ХеСl и ХеF с буферными газами аргонном, гелием и газовыми смесями Ar:He.

5.1. Быстрый режим возбуждения ХеСl- и ХеF-лазеров с плазменным электродом и буферными газами аргонном, гелием и смесями Ar:He

Предварительные эксперименты по влиянию буферного газа на энергетические характеристики ХеСl-лазера были проведены на установке (см. рис. 1.8) с гелием и аргонном [48]. Впервые наблюдалась эффективная генерация на молекуле ХеСl с буферным газом аргонном [47]. В дальнейшем наши результаты были подтверждены авторами работ [142, 147, 193].

На рис. 5.1 даны зависимости энергии излучения ХеСl-лазера с плазменным электродом для смесей Ar:Хе:ССl₄ от соотношения газовых компонентов Хе:ССl₄ и концентрации ССl₄ и Ar для зарядного напряжения 14 кВ [69, 78]. При малых соотношениях Хе:ССl₄ ≤ 10:1 с ростом концентрации ССl₄ и Ar энергия излучения линейно росла до наступления контракции разряда для постоянного зарядного напряжения 14 кВ. С ростом концентрации Хе резко возрастала энергия излучения, а увеличение концентрации ССl₄ приводило к контракции разряда и спаду энергии излучения. Отметим особенность работы лазера с плазменным электродом

5. Экимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

для давления ≤ 1 атм, соотношений компонентов $\text{Xe}:\text{CCl}_4 \geq 20:1$ и малых концентраций CCl_4 . В этом случае наблюдалась практически одинаковая энергия излучения в отличие от соотношения для малой концентрации газовых компонентов смеси $\text{Xe}:\text{CCl}_4 = 10:1$, которой соответствовала линейная зависимость роста энергии излучения с увеличением рабочего давления газовой смеси свыше 1 атм. Это указывало на особенности взаимосвязи как для развития разряда, так и кинетики образования рабочих молекул с буферным газом аргоном.

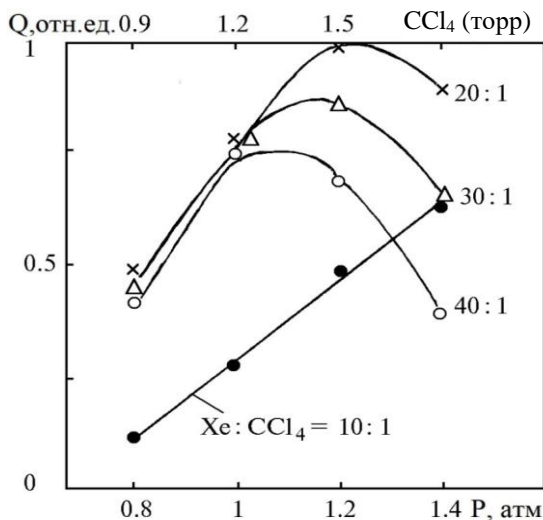


Рис. 5.1. Зависимости энергии излучения для газовой смеси $\text{Ar}:\text{Xe}:\text{CCl}_4$ от соотношения компонентов $\text{Xe}:\text{CCl}_4$ и концентрации CCl_4 и Ar для лазера с плазменным электродом

В подтверждение этого на рис. 5.2 приведены зависимости энергии излучения от количества импульсов излучения с буферными газами гелием (рис. 5.2, а), аргоном (рис. 5.2, б) и галогенидами CF_2Cl_2 , CHCl_3 и CCl_4 . С ростом концентрации CF_2Cl_2 энергия излучения росла, а затем спадала, и ей соответствовала оптимальная концентрация 3 торр. С увеличением количества импульсов излучения энергия резко спадала при

малой концентрации галогенида. Видимо, в этом случае происходило выгорание галогенида. Для буферного газа аргона (рис. 5.2, б) более эффективным оказался галогенид CHCl_3 , с увеличением количества импульсов энергия излучения медленно спадала по сравнению с галогенидом CCl_4 . Можно отметить особенность поведения CCl_4 в зависимости от содержания буферного газа гелия или аргона. Со временем в гелиевых смесях наблюдался резкий спад энергии излучения, а с аргоном в начале работы лазера регистрировалась зависимость уменьшения энергии излучения, аналогичная буферному газу гелию, до наработки $0,3 \cdot 10^3$ импульсов излучения. А затем энергия излучения возрастала до параметров галогенида CHCl_3 с последующим ее резким уменьшением. При этом параметры излучения с аргоном были выше, чем с буферным газом гелием. Данные результаты исследований в смесях $\text{Ar}:\text{Xe}:\text{CCl}_4$ можно объяснить, оценив плотность XeCl^* по каналам образования рабочих молекул (гарпунному и ионному), согласно константам, приведенным в работах [139, 145]. В условиях эксперимента величина разрядного тока была порядка 5 кА при величине соотношения $E/N \sim 5 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$.

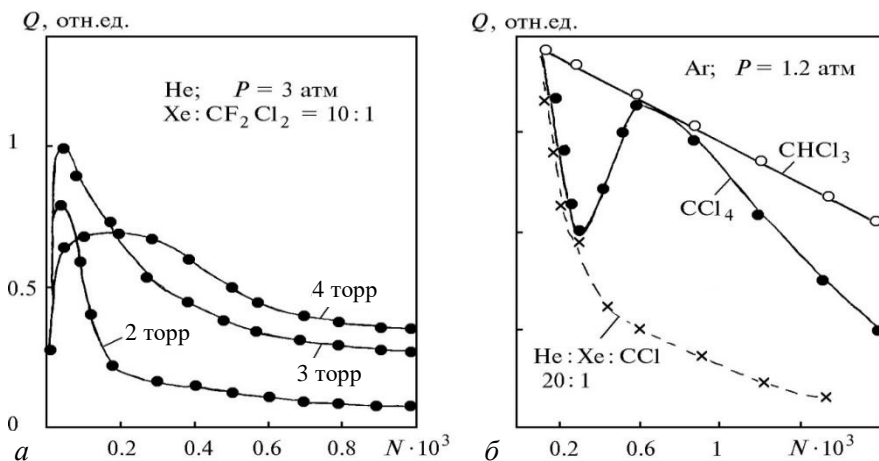


Рис. 5.2. Зависимости энергии излучения от количества импульсов генерации с буферными газами гелием (а), аргоном (б) для CF_2Cl_2 , CHCl_3 и CCl_4 для разрядного напряжения 14 кВ

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

Тогда электронную плотность можно было определить как

$$n_e = J/e \cdot V_D, \quad (5.1)$$

где J – плотность тока; V_D – дрейфовая скорость электрона.

При площади сечения разряда $20 \cdot 0,2 = 4 \text{ см}^2$ и $V_D \sim 10^6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ [194] в аргоновых смесях при величине $E/N \sim 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$ получали электронную плотность $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Эта величина плотности электронов соответствовала теоретическим расчетам электроразрядных лазеров [10, 17, 147]. Для типичных смесей (Ar):Xe:CCl₄ = 10:1 (2 торр) и при общем давлении 1 атм концентрация компонентов составляла: $n_{\text{Ar}} = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $n_{\text{Xe}} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $n_{\text{CCl}_4} = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Считая основными носителями заряда Xe^+ , Xe_2^+ , Cl^- и электроны и предполагая также квазинейтральность плазмы, имели:

$$n_{\text{Xe}^+} + n_{\text{Xe}_2^+} = n_e + n_{\text{Cl}^-} = n_- . \quad (5.2)$$

Далее определим плотность ионов CCl₄ из соотношения

$$dn_{\text{Cl}^-}/dt = k_1 \cdot n_e \cdot n_{\text{CCl}_4} - k_2 \cdot n_{\text{Xe}_2^+} \cdot n_{\text{Cl}^-} - k_3 \cdot n_{\text{Xe}^+} \cdot n_{\text{Cl}^-}, \quad (5.3)$$

где $k_1 = 4 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ [139] – скорость диссоциативного прилипания, $k_2 = k_3 = k = 10^{-6} \text{ см}^3 \cdot \text{см}^{-1}$ – скорость ион-ионной рекомбинации.

Квазистационарность дает:

$$n_{\text{Cl}^-} = k_1 \cdot n_e \cdot n_{\text{CCl}_4} / k \cdot n_- . \quad (5.4)$$

Учитывая, что $n_e \gg n_{\text{Cl}^-}$ и (5.2), тогда выражение (5.4) обеспечивает:

$$n_{\text{Cl}^-} = k_1 \cdot n_{\text{CCl}_4} / k = 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}. \quad (5.5)$$

Плотность метастабильных атомов Xe^* можно подсчитать из соотношения

$$dn_{\text{Xe}^*}/dt = k_4 \cdot n_e \cdot n_{\text{Xe}} - k_5 \cdot n_{\text{Xe}^*} \cdot n_{\text{CCl}_4} - k_6 \cdot n_{\text{Xe}^*} \cdot n_e, \quad (5.6)$$

где $k_4 = 8 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ – скорость прямого электронного возбуждения [17]; $k_5 = 10^{-9} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ – для гарпунных столкновений; $k_6 = 3 \cdot 10^8 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ – скорость прямой электронной ионизации метастабилей.

$$n_{\text{Xe}^*} = k_4 \cdot n_e \cdot n_{\text{Xe}} / k_5 \cdot n_{\text{CCl}_4} + k_6 \cdot n_e = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}. \quad (5.7)$$

Соотношение для скорости образования Xe_2^+ :

$$dn_{\text{Xe}_2^+}/dt = k_7 \cdot n_{\text{Xe}^+} \cdot n_{\text{Ar}} - k_2 \cdot n_{\text{Xe}_2^+} \cdot n_{\text{Cl}^-} - k_8 \cdot n_{\text{Xe}_2^+} \cdot n_e, \quad (5.8)$$

где $k_7 = 10^{-31} \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$ – скорость трехчастичного образования [17]; $k_2 = k_8 = k = 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ – скорость ион-ионной и ион-электронной рекомбинации соответственно. Считая условия стационарными и группируя члены, учитывая условие (5.2), получаем

$$n_{\text{Xe}_2^+} = k_7 \cdot n_{\text{Xe}^+} \cdot n_{\text{Ar}} / k = 2,7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}. \quad (5.9)$$

Тогда плотность Xe^+ из условий (5.8) и (5.2) равняется:

$$n_{\text{Xe}^+} = k \cdot n_{\text{Xe}_2^+} \cdot n_{\text{Cl}^-} / k_7 \cdot n_{\text{Xe}^+} \cdot n_{\text{Ar}} = 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}. \quad (5.10)$$

Можно записать кинетическое уравнение образования XeCl^* по основным каналам:

$$dn_{\text{XeCl}^*}/dt = k_5 \cdot n_{\text{Xe}^*} \cdot n_{\text{CCl}_4} + k_3 \cdot n_{\text{Xe}^+} \cdot n_{\text{Cl}^-}. \quad (5.11)$$

Так, для гарпунной реакции ($\text{Xe}^* + \text{CCl}_4$) получаем

$$k_5 \cdot n_{\text{Xe}^*} \cdot n_{\text{CCl}_4} = 2 \cdot 10^{23} \text{ XeCl}^* \text{ с}^{-1} \quad (5.12)$$

и для ион-ионной рекомбинации ($\text{Xe}^+ + \text{Cl}^- + \text{Ar}$)

$$k_3 \cdot n_{\text{Xe}^+} \cdot n_{\text{Cl}^-} = 1,6 \cdot 10^{23} \text{ XeCl}^* \text{ с}^{-1}. \quad (5.13)$$

Следовательно, вклад обоих каналов соизмерим:

$$k_5 \cdot n_{\text{Xe}^*} \cdot n_{\text{CCl}_4} / k_3 \cdot n_{\text{Xe}^+} \cdot n_{\text{Cl}^-} \sim 1.$$

Поэтому с ростом n_{Ar} , n_{Xe^+} , n_{Cl^-} будет возрастать концентрация XeCl^* по ионному каналу, что нами наблюдалось в частотном режиме работы лазера (рис. 5.2) [53]. Кроме того, если использовать HCl , то константа гарпунной реакции $\sim 5 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ и эффективность образования по ионному каналу в 1,5 раза выше, чем по каналу возбуждения. Полученные результаты подтверждались работой [21], в которой показано, что в газовых смесях $\text{Ar}:\text{Cl}_2$ и $\text{Ar}:\text{HCl}$ резко возрастала вероятность образования ионов Cl^- . Выполненный расчет каналов образования рабочих молекул хорошо согласовывался с экспериментальными параметрами излучения для XeCl - и XeF -лазеров с буферными газами

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

аргоном, гелием и смесью He:Ar, где использовались следующие соотношения газов: (Ar)Xe:NF₃ = 10:1; (He)Xe:NF₃ = 5:1; (He)Ar:Xe:NF₃ = 5:5:1; (He)Xe:CCl₄ = 5:1; (Ar)Xe:CCl₄ = 20:1 с зарядным напряжением генератора возбуждения 20 кВ (рис. 5.3).

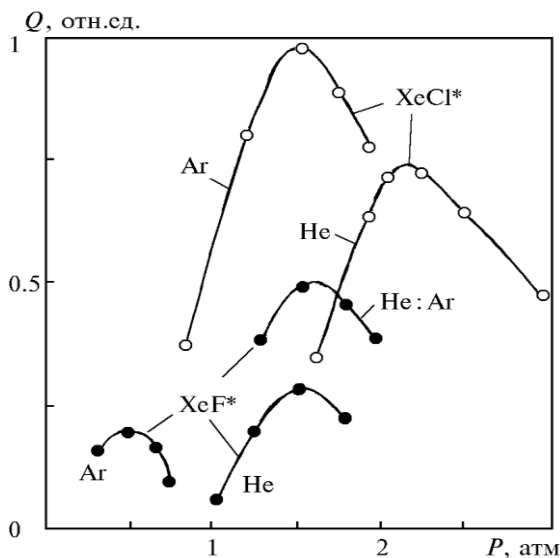
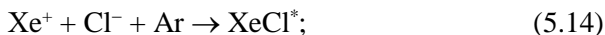


Рис. 5.3. Зависимости энергии излучения для XeF*, XeCl* от буферных газов He, Ar и Ar:He, давления и зарядного напряжения 20 кВ

Так, более высокие концентрации n_{Ar} и n_{He} приводили к значительному росту энергии излучения для XeCl-лазера по сравнению с гелием. Энергия излучения была в 1,5 раза выше с буферным газом аргоном при давлении 1,5 атм по сравнению с гелием. Для буферного газа гелия оптимальное давление газовой смеси соответствовало 2 атм. Интересен тот факт, что если соотношение компонентов смеси было одинаковым для буферных газов аргона и гелия, но оптимальным для смеси (Ar)Xe:CCl₄ = 20:1, то энергия излучения с буферным газом аргоном возросла в 3 раза при давлении, в 2 раза меньшем, чем для буферного газа гелия. Это связано как с ионным каналом образования XeCl* [139]:



так и с функцией распределения электронов по энергиям от E/N , которое для аргона в 3 раза шире, чем для гелия [142, 147]. Аналогичные эксперименты были проведены с XeF-лазером. Нами впервые в XeF-лазере получена эффективная генерация с буферным газом аргоном и смесью He:Ar. Максимальная энергия излучения с буферным газом аргоном наблюдалась для оптимального давления 0,5 атм, а с гелием – для давления 1,5 атм. При этом с гелием энергия излучения на 30 % была выше, чем с аргоном. Следует отметить особенность буферной смеси He:Ar, которая позволяла в 2 раза повышать энергетику лазера по сравнению с применением буферного газа гелия [53, 61].

На рис. 5.4 приведены зависимости энергии излучения XeF* от соотношения $\text{Xe}:\text{NF}_3 = k:1$ (7,6 торр), концентрации Xe и рабочего давления с буферным газом гелием (рис. 5.4, а) и аргоном (рис. 5.4, б).

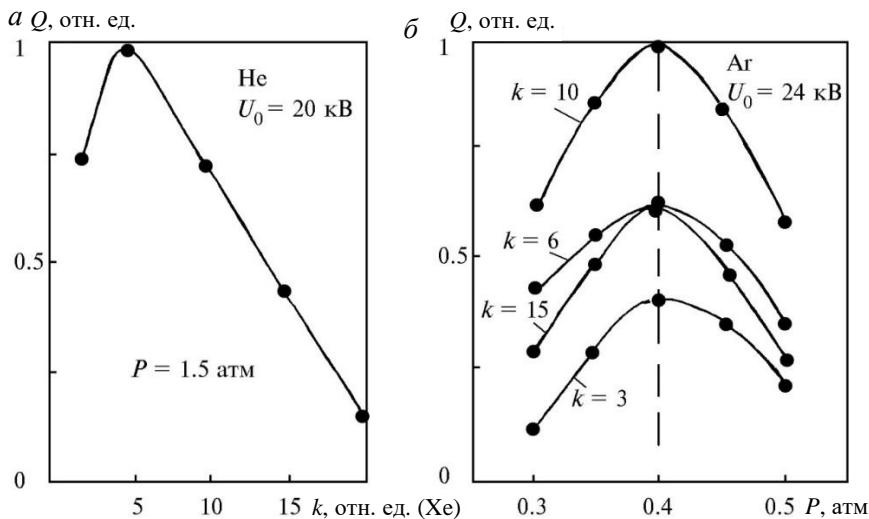


Рис. 5.4. Зависимости энергии излучения XeF* от концентрации Xe и рабочего давления для буферных газов гелия (а) и аргона (б), где $\text{Xe}:\text{NF}_3 = k:1$ (7,6 торр)

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

Для гелиевых смесей было оптимальным соотношение $\text{Xe}:\text{NF}_3 = 5:1$ при давлении 1,5 атм. Для аргоновых смесей оптимальное соотношение $\text{Xe}:\text{NF}_3 = 10:1$ при давлении 0,4 атм. Оптимальное давление определялось устойчивостью горения объемного разряда в аргоновых смесях и зависело от интенсивности УФ-предыонизации плазменного электрода. Для генератора возбуждения в гелиевых смесях оптимальное зарядное напряжение равнялось 20 кВ, а для аргоновых смесей оно составляло 24 кВ. В работах [195, 196] был получен интересный факт увеличения энергии излучения KrF -лазера за счет добавки четвертого компонента к смеси $\text{He}:\text{Kr}:\text{F}_2$. Добавка 10 % аргона позволяла повысить энергию излучения на 20 % для устойчивого резонатора и на 50 % для неустойчивого резонатора. Аналогичные эксперименты впервые нами были проведены для XeF -лазера.

На рис. 5.5 представлены зависимости энергии излучения от добавок буферного газа аргона и суммарного давления смеси (рис. 5.5, а) для газовых смесей $(\text{He})\text{Ar}:\text{Xe}:\text{NF}_3 = k:5:1$ и зарядного напряжения для буферных газов аргона, гелия и смеси $\text{He}:\text{Ar}$ (рис. 5.5, б).

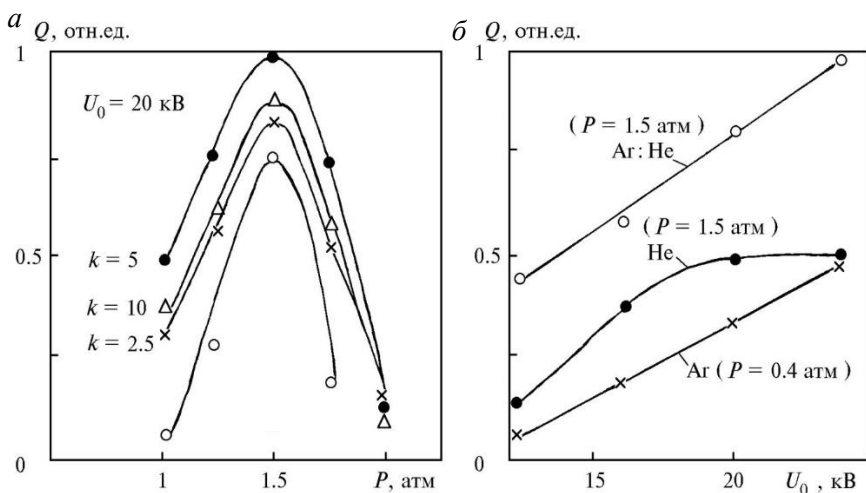


Рис. 5.5. Зависимости энергии излучения XeF^* от добавок буферного Ar и суммарного давления (а) для смесей $(\text{He})\text{Ar}:\text{Xe}:\text{NF}_3 = k:5:1$ и от зарядного напряжения и буферных газов Ar , He и $\text{Ar}:\text{He}$ (б)

В оптимальных условиях концентрация примеси аргона равнялась концентрации ксенона, что соответствовало соотношению компонентов газов $\text{Ar}:\text{Xe}:\text{NF}_3 = 5:5:1$. Для четвертных смесей наблюдался оптимум по давлению, равный 1,5 атм, на который не влияла концентрация Ar. Следовательно, добавка аргона участвовала в кинетике образования рабочих молекул по ионному каналу. С добавкой аргона к гелию энергия излучения возрастала более чем в 2 раза по сравнению с чистыми буферными газами аргоном и гелием (рис. 5.5, б). С ростом энергии, вкладываемой в разряд, линейно росла энергия излучения для аргона и буферной смеси $\text{He}:\text{Ar}$. Для буферного газа гелия линейный рост энергии излучения прекращался в пределах зарядного напряжения 20 кВ. Результаты исследований энергетических характеристик хорошо согласовывались с вольт-амперными параметрами самостоятельного разряда в этих газовых смесях.

На рис. 5.6 даны зависимости напряжения пробоя (рис. 5.6, а) и разрядного тока (рис. 5.6, б) в газовых смесях $\text{Ar}:\text{Xe}:\text{NF}_3$, $\text{He}:\text{Xe}:\text{NF}_3$ и $\text{He}:\text{Ar}:\text{Xe}:\text{NF}_3$ от давления до момента образования неустойчивости в разряде.

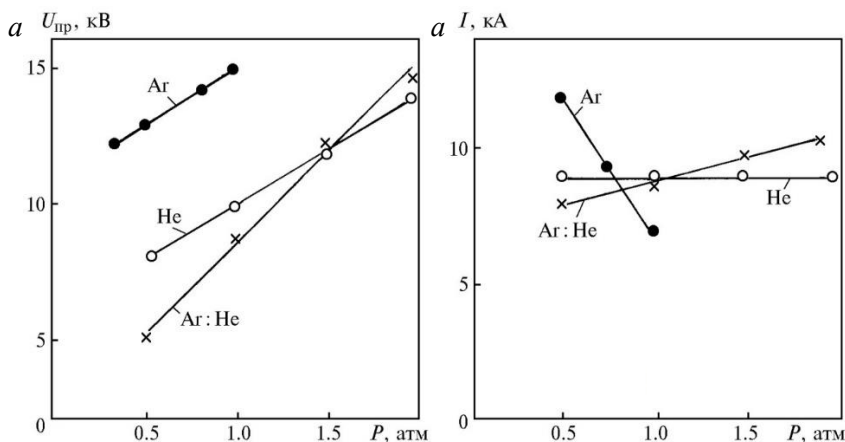


Рис. 5.6. Зависимости напряжения пробоя (а) и тока разряда (б) от суммарного давления и буферных газов Ar, He, Ar:He для компонентов смеси $\text{Xe}:\text{NF}_3$

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

При оптимальном давлении 0,5 атм с буферным газом аргоном повышались напряжение пробоя и разрядный ток, что соответствовало наибольшей энергии излучения (для максимальной энергии, вкладываемой в газовую смесь). Дальнейшее повышение рабочего давления резко понижало разрядный ток в аргоновой смеси (рис. 5.6, б). Использование аргона как четвертой компоненты газовой смеси позволяло повышать пробивное напряжение при высоких давлениях и одновременно увеличивать разрядный ток. Согласно данным работы [197], добавки Ar в смесях Ne:Xe:NeCl влияли на функцию распределения электронов по энергиям от соотношения E/N , а значит, и на кинетику образования эксимерных молекул. Для XeCl-лазера аналогичные результаты были подтверждены авторами работы [198] для смеси с буферными газами Ne:Ar.

Таким образом, применение интенсивного источника УФ-предыонизации в виде плазменного электрода позволило использовать ряд новых буферных газов и буферных смесей Ar, Ne, Ne:Ar для XeCl- и XeF-лазеров, повышающих эффективность образования рабочих молекул по ионному каналу, а соответственно, энергетику эксимерных лазеров.

Выводы

1. Впервые разработан и применен плазменный электрод с незавершенным разрядом для эксимерных лазеров.

2. Впервые получена генерация на молекулах XeCl* и XeF* с источником УФ-предыонизации плазменного типа и буферными газами Ar, Ne:Ar. Показано, что эффективность XeCl-лазера с буферным газом аргоном в 1,5 раза выше по сравнению с гелием. Для XeF-лазера с буферной средой Ar:Ne показано, что его эффективность в 2 раза выше, по сравнению с гелием, за счет повышения скорости образования рабочих молекул по ионному каналу.

5.2. Быстрый режим возбуждения XeCl-, XeF- и KrF-лазеров с плазменными электродами и буферными газами аргоном, гелием и смесями Ar:Ne

Разряд по поверхности диэлектрика ранее использовался авторами работы [199] при создании ТЕА CO₂-лазера с большим активным

объемом. Отмечалось, что в стандартных лазерных смесях, содержащих большое количество гелия, заверченный разряд по поверхности диэлектрика был неоднороден, т. е. распределялся на отдельные, визуально легко различимые каналы. Неоднородность плазмы вспомогательного разряда приводила к возникновению неоднородности в основном объемном разряде. Это обстоятельство ограничивало широкое применение подобных электроразрядных систем, в принципе являющихся весьма перспективными для накачки больших лазерных объемов [200].

Экспериментальные исследования, проведенные нами в работах [48, 60] для объемных эксимерных разрядов, позволили создать на их основе лазер с плазменным электродом [61, 62]. Он обеспечивал получение эффективной генерации в аргоновых смесях на молекулах XeCl^* и XeF^* . Эти работы послужили поводом для дальнейших исследований поверхностного заверщенного разряда по диэлектрику в качестве плазменного или плазменных электродов для накачки больших активных объемов [63, 64]. Авторы работы [63] в лазере с активным объемом $4 \cdot 3 \cdot 50 \text{ см}^3$ и плазменным электродом в гелиевых смесях получили на молекулах $\text{KrF}^* Q = 1 \text{ Дж}$, $Q_{\text{уд}} = 2,2 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$, $\text{XeCl}^* Q = 0,75 \text{ Дж}$, $Q_{\text{уд}} = 1,25 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ и $\text{XeF}^* Q = 0,5 \text{ Дж}$, $Q_{\text{уд}} = 1 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$. Ширина объемного разряда в гелиевых смесях не превышала 1,2 см. Далее авторы в работе [64] в двухконтурной схеме накачки с двумя плазменными электродами получили для KrF -лазера энергию излучения 1,75 Дж. Они отмечали, что форма импульса генерации зависела от величины обострительной емкости и не превышала 50 нс.

Нами была разработана двухконтурная схема накачки с плазменными электродами (см. рис. 1.13). Индуктивность обострительного контура была минимальной за счет единой системы плазменных электродов и обострительных конденсаторов. В первых экспериментах роль накопительной емкости выполняла ударная емкость генератора импульсных напряжений (ГИН).

На рис. 5.7 представлены типичные осциллограммы напряжения возбуждения на промежутке в газовых смесях $(\text{He})\text{Xe}:\text{HCl} = 20:1$ при суммарном давлении 3 атм и зарядном напряжении 30 кВ для емкостей $C_{\text{н}} = C_{\text{об}} = 10 \text{ нФ}$ генератора накачки с искровой (рис. 5.7, кривая 1) и плазменной (рис. 5.7, кривая 2) УФ-предыонизацией. Источник накачки с искровой УФ-предыонизацией применялся для возбуждения

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

лазера, который имел активный объем $2,4 \cdot 0,5 \cdot 80 \text{ см}^3$. Разряд возбуждения имел ширину 0,5 см. В лазере с источником плазменной УФ-предыонизации использовался активный рабочий объем $2 \cdot 1,5 \cdot 60 \text{ см}^3$. Ширина плазменного разряда равнялась 1,5 см. Импульсы напряжения на промежутке для источников накачки с искровой или плазменной УФ-предыонизацией отличались тем, что требовалось меньшее время задержки пробоя в газовом промежутке с искровым источником УФ-предыонизации. При этом наблюдалась более высокая амплитуда напряжения пробоя с резким ее спадом до нуля с дальнейшей контракцией разряда. Более высокие пробивные напряжения говорили о меньших начальных концентрациях электронов, создаваемых искровой УФ-предыонизацией. Плотность разрядного тока в системе с искровой УФ-предыонизацией была в 3 раза выше, чем с источником плазменной УФ-предыонизации. С плазменными электродами наблюдалась квазистационарная стадия разряда в силу того, что УФ-предыонизация была более однородная и интенсивная по всему объему при меньшей плотности разрядного тока. Следовательно, нами впервые наблюдался самоподдерживающийся разряд с источником плазменный УФ-предыонизации для условия $C_n = C_{об}$ [55]. В этом случае объемная стадия разряда соответствовала 100 нс, а для источника накачки, где использовалась искровая УФ-предыонизация, она равнялась 30 нс.

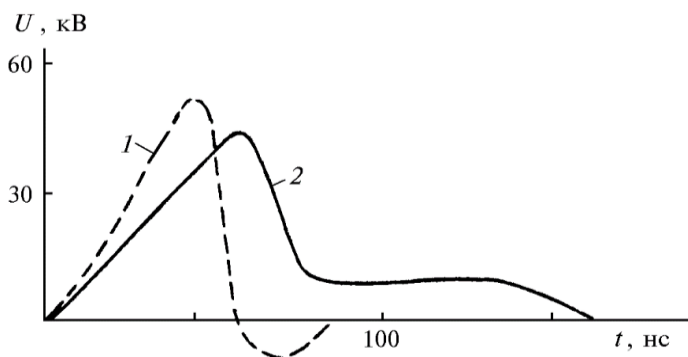


Рис. 5.7. Осциллограммы напряжения возбуждения на промежутке в газовых смесях (He)Xe:HCl = 20:1 с источниками искровой (1) и плазменной (2) УФ-предыонизации для емкостей $C_n = C_{об} = 10 \text{ нФ}$ и $U_0 = 30 \text{ кВ}$

Аналогичный квазистационарный разряд отмечали авторы работы [146] для KrF-лазера при накачке от водяной формирующей линии с X-предыонизацией. В нашем случае объемная стадия разряда равнялась 100 нс, длительность генерации не превышала 50 нс, что соответствовало быстрому режиму возбуждения. В этом случае основная доля энергии в газовую среду вводилась в течение 50 нс, т. е. длительность генерации ограничивалась пороговой мощностью накачки (рис. 5.9). Поэтому в квазистационарном разряде мощность накачки была ниже пороговой [53, 55]. Нами были проведены исследования быстрого режима возбуждения в лазере с плазменными электродами от типа буферного газа аргона, гелия и добавок аргона к гелию для молекул XeCl^* , XeF^* и KrF^* .

На рис. 5.8 приведены зависимости энергии излучения для молекул XeCl^* , XeF^* и KrF^* для лазера с плазменными электродами от буферных газов Ar, He, He:Ar и рабочего давления эксимерных смесей для генератора накачки с емкостями $C_n = C_{об} = 10$ нФ и зарядным напряжением 30 кВ.

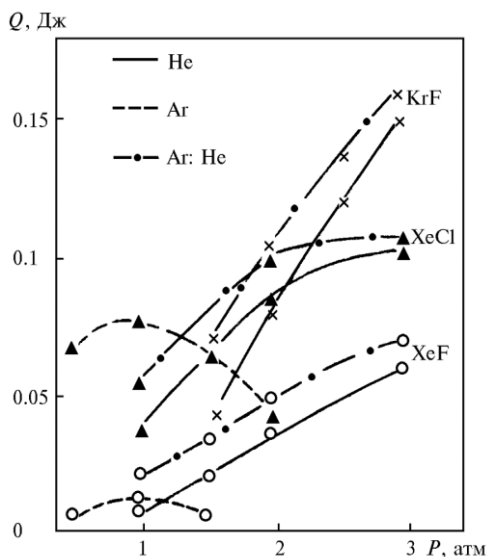


Рис. 5.8. Зависимости энергии излучения XeCl -, XeF - и KrF -лазеров с плазменными электродами от давления и буферных газов Ar, He, Ar:He для генератора накачки с емкостями $C_n = C_{об} = 10$ нФ

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

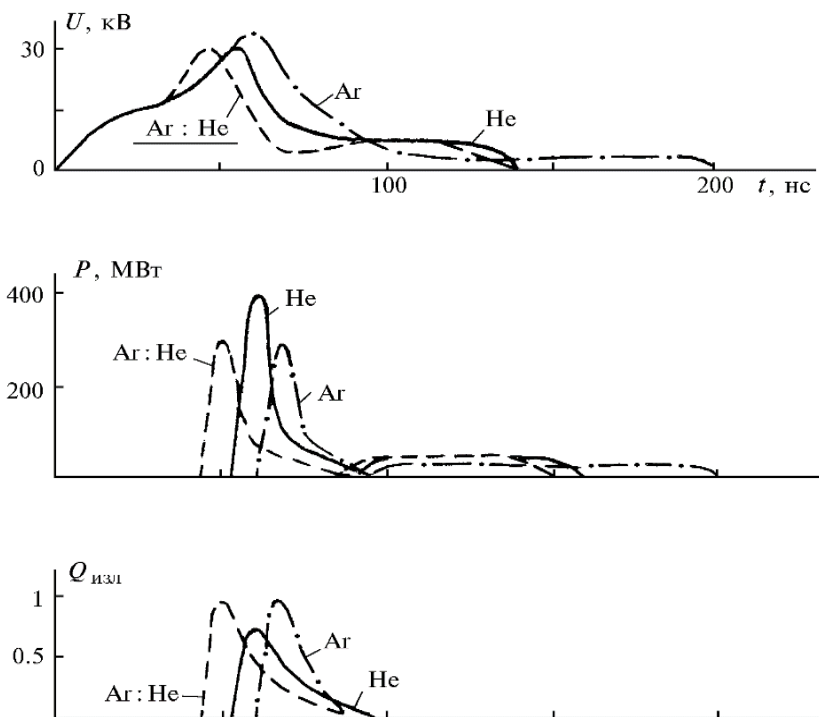


Рис. 5.9. Типичные осциллограммы импульсов напряжения на промежутке, мощности накачки, вводимой в активную среду, и излучения ХеСl-лазера с плазменными электродами в зависимости от Ar, He, Ar:He для емкостей генератора $C_n = C_{об} = 10$ нФ

Как ранее нами было показано в работах [47, 61], в лазере с плазменным электродом наблюдалась эффективная генерация на ХеСl* и ХеF* с буферным аргоном при низком давлении. С двумя же плазменными электродами в аргоновых смесях для ХеСl* энергия излучения достигала 80 мДж при $Q_{уд} = 0,4$ Дж·л⁻¹·атм⁻¹, с гелием энергия равнялась 110 мДж, но при меньшей в 2 раза удельной плотности излучения 0,2 Дж·л⁻¹·атм⁻¹. При добавках аргона порядка 1 % к гелиевым смесям для ХеСl*, ХеF* и KrF* энергия излучения возрастала почти на 20 % при

высоких рабочих давлениях. При низких давлениях для молекулы XeF^* энергия излучения увеличивалась в 2 раза, а для молекул XeCl^* и KrF^* – в 1,5 раза. Это обусловлено как особенностями ввода энергии возбуждения в разряд (рис. 5.9), так и каналами образования рабочих молекул.

На рис. 5.9 приведены осциллограммы импульсов напряжения на плазме, мощности накачки, вводимой в активную среду, и излучения XeCl -лазера в зависимости от Ar , He и He:Ar для газовой смеси $\text{Xe:HeCl} = 20:1$ (4,5 торр) и рабочего давления 1 атм, зарядного напряжения 30 кВ для генератора возбуждения с параметрами $C_n = C_{об} = 10$ нФ. Максимальное пробивное напряжение наблюдалось в аргоновых смесях, а соответственно, E/N при максимальном времени запаздывания пробоя. Для He и He:Ar смесей напряжения пробоя равны, хотя время запаздывания пробоя меньше для He:Ar . Однако мощность накачки максимальна лишь в гелиевых смесях, но энергия излучения для аргоновых смесей в 2 раза выше, а для He:Ar смесей на 30 % выше, чем для гелия. Этот факт говорит об эффективном образовании XeCl^* по ионному каналу. Длительность импульсов генерации полностью соответствовала длительности вводимой мощности в быстрой стадии разряда. Другая особенность разрядных характеристик – это наличие квазистационарной стадии напряжения, которая была максимальной для буферного газа аргона. Отсутствие излучения в квазистационарной стадии разряда связано с низкой мощностью накачки, вводимой в газовую среду (ниже пороговой). Аналогичные результаты наблюдались для молекул XeCl^* , XeF^* и KrF^* с гелием. Длительность импульсов излучения по основанию с буферным газом гелием и в смесях He:Ar равнялась 50 нс. С буферным газом аргоном длительность импульсов излучения не превышала 25 нс.

На рис. 5.10 показаны осциллограммы импульсов напряжения на плазме, разрядного тока обострительной емкости и излучения молекул XeCl^* , XeF^* и KrF^* для смесей: $(\text{He})\text{Xe:HeCl} = 20:1$ (4,5 торр); $(\text{He})\text{Xe:F}_2 = 5:1$ (4,5 торр) и $(\text{He})\text{Kr:F}_2 = 20:1$ (4,5 торр) при давлении 3 атм для генератора накачки с параметрами $C_n = C_{об} = 10$ нФ и $U_0 = 30$ кВ.

Напряжение пробоя определялось лишь буферным газом и не зависело от вида эксимерных молекул. Амплитуда и длительность квазистационарной стадии напряжения зависели от выбора галогеноносителя. Наиболее устойчивый разряд наблюдался для молекул XeCl^* .

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

Длительность импульса излучения для ХеF-лазера равнялась 20 нс. Для лазера на молекулах ХеСl*, КгF* длительность импульсов излучения соответствовала 40 нс. Увеличение длительности импульсов излучения для ХеСl* и КгF* обусловлено квазистационарной стадией разряда.

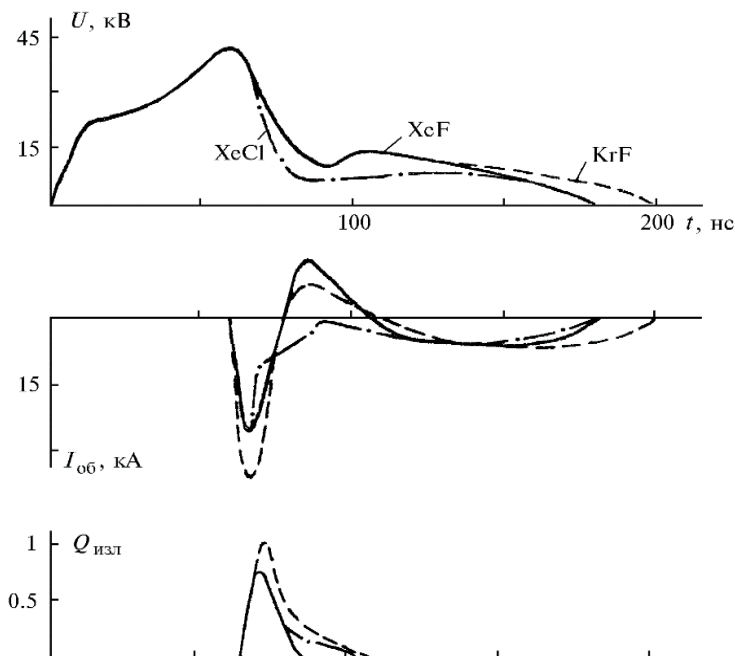


Рис. 5.10. Осциллограммы импульсов напряжения на плазме, разрядного тока обстрельной емкости и излучения на ХеСl*, ХеF* и КгF*

Следовательно, генерация в квазистационарной стадии разряда наблюдалась при равенстве $C_n = C_{об}$, которая ограничивала вводимую мощность накачки в разряд. В табл. 5.1 приведены первые работы по эксимерным лазерам с плазменным или плазменными электродами, обеспечивающими быстрый режим возбуждения с буферными газами He, Ar и He:Ar, где пл (2пл) – плазменный или два плазменных электрода.

Таблица 5.1

Работы по эксимерным лазерам с плазменными электродами, работающими в режиме быстрого возбуждения

№ п/п	Схемы накачки	Молек.	Буф. газ	V, л	$Q_{пл},$ мДж	$Q_{уль},$ $\frac{Дж}{л \cdot атм}$	$\tau_{h/2},$ нс	$\tau_{осц},$ нс	КПД, %	Литер.
1	Бл-н (С)/пл	XeCl XeF	He Ar	3,6 см ³	1,2 0,8	0,25 0,1	7	15	—	[61]
2	$C_H/C_{об} + пл$	XeF XeCl KrF	He	0,2	500 750 700	1 1,25 1,54	— — —	— — —	— — 1,5	[63]
3	$C_H/C_{об} + 2пл$	KrF XeF	He	0,5	1750 1000 800	1,75 1 1	20	50	— 0,7 —	[64]
4	$C_H/C_{об} + 2пл$	XeCl XeF	Ar	0,18	80 20	0,4 0,01	20	30	0,44 0,08	[55]
5	$C_H/C_{об} + 2пл$	KrF XeF XeCl	Ar:He	0,18	160 70 110	0,3 0,1 0,2	15	50	0,9 0,4 0,6	[53, 55]
6	Бл-н (С)/пл	XeF	Ar:He	3,6 см ³	$Q_{Ar:He} = 2Q_{He}$		7	15	—	[53]

Выводы

1. Впервые в лазере с плазменными электродами получена генерация на молекулах XeCl^* и KrF^* с буферным газом аргоном и на XeCl^* , XeF^* и KrF^* с буферной средой Ar:He . При этом эффективность лазеров выше по сравнению с буферным газом гелием.

2. Обнаружено и показано, что для быстрого режима возбуждения ($C_n = C_{06}$) наблюдалась квазистационарная стадия напряжения «самоподдерживающийся разряд», стабилизированный излучением плазменных электродов. Для молекул XeCl^* и KrF^* до 30 % энергии излучения обеспечивалось за счет накачки от квазистационарной стадии разряда.

5.3. Квазистационарный режим возбуждения и генерации XeCl -лазера с плазменными электродами и буферными газами гелием, аргоном и смесями He:Ar

Плазменная УФ-предыонизация – это особый случай, т. к. плазма, образовавшаяся на поверхности диэлектриков, является одновременно электродами газового промежутка (см. рис. 1.13), и она зависит как от типа буферного газа, так и от параметров схемы накачки. Расчет параметров такой схемы сложен из-за необходимости учета процесса зарядки дополнительных емкостей диэлектрических пластин (C_n), по поверхности которых распространяется скользящий разряд, а также сопротивление этого разряда (рис. 5.11). Поэтому анализ работы схемы накачки в квазистационарном режиме возбуждения сделан на основании экспериментальных исследований разрядных характеристик излучения XeCl -лазера в зависимости от буферных газов Ar , He и Ne ; от добавок газа к буферным средам; от концентрации Xe:HCl , параметров элементов двухконтурных схем накачки и величины активного объема разрядных камер [53, 55, 65–69, 71, 72, 75, 77, 81, 201].

На рис. 5.12 приведены осциллограммы напряжения на плазме, тока обострительного контура и излучения XeCl -лазера в зависимости от величины накопительной емкости для газовых смесей $(\text{He})\text{Xe:HCl} = 20:1$ (2 торр) для обострительной емкости $C_{06} = 10$ нФ, рабочего давления 1 атм, зарядного напряжения 30 кВ и активного объема $2 \cdot 1,5 \cdot 60 \text{ см}^3$ [53,

55, 201]. С ростом накопительной емкости от 10 до 60 нФ возрастала длительность квазистационарной стадии разряда от 100 до 200 нс как по напряжению, так и по разрядному току.

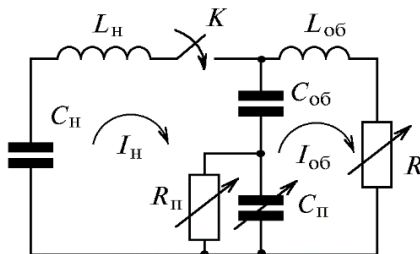


Рис. 5.11. Эквивалентная схема накачки лазера с плазменными электродами: C_n, L_n – емкость и индуктивность накопительного контура; $C_{об}, L_{об}$ – обострительного контура; R_n, C_n – сопротивление и емкость плазменных электродов; R – сопротивление лазерного промежутка

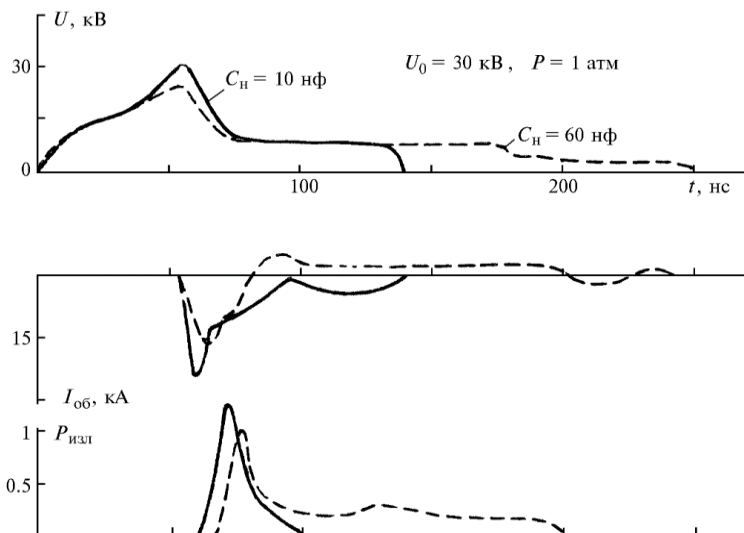


Рис. 5.12. Осциллограммы импульсов напряжения, обострительного тока разряда и излучения ХеСl-лазера с плазменными электродами для переменной накопительной емкости

5. Экимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

Для накопительной емкости 10 нФ длительность импульса излучения по основанию не превышал 40 нс. Для накопительной емкости 60 нс длительность импульса излучения достигала 130 нс. Нами впервые был реализован квазистационарный режим возбуждения и генерации с длительностью импульсов более 130 нс, полный ток разряда через промежутки состоял из тока обострительного и накопительного контура накачки.

На рис. 5.13 показан квазистационарный режим возбуждения и генерации, который зависел как от длительности объемной стадии разряда, так и от мощности накачки, вкладываемой в него [55, 68]. Это осциллограммы импульсов напряжения, обострительного тока разряда и излучения для газовых смесей Хе:НСI = 20:1 в квазистационарном режиме возбуждения и генерации для $C_{об} = 10$ нФ, $C_n = 60$ нФ и активного объема $2 \cdot 1,5 \cdot 60$ см³ в зависимости от напряжения, давления и концентрации НСI.

С ростом давления повышалось напряжение пробоя, а также время его запаздывания почти в 2 раза, а длительность импульса генерации начинала уменьшаться из-за роста неустойчивости разряда (рис. 5.13, а), которая возрастала с увеличением концентрации НСI (рис. 5.13, б, в). Так при концентрации НСI = 4 торр (рис. 5.13, в) наблюдался лишь быстрый режим возбуждения с длительностью генерации не более 50 нс. С ростом зарядного напряжения от 30 до 36 кВ происходил рост как энергии излучения, так и длительности импульсов генерации (рис. 5.13, в).

На рис. 5.14 приведены энергетические параметры излучения ХеСI-лазера в зависимости от давления, зарядного напряжения и концентрации НСI, которые хорошо согласовывались с его разрядными характеристиками. Оптимальное давление для гелиевых смесей соответствовало 2,5 атм.

Максимальная энергия излучения наблюдалась для оптимальной концентрации НСI, равной 2 торр. Максимальная энергия излучения линейно возрастала с увеличением энергии, вкладываемой в разряд, за счет роста зарядного напряжения. Аналогичные результаты наблюдались при добавлении четвертого компонента аргона к гелиевым смесям.

На рис. 5.15 представлены зависимости энергии излучения в газовых смесях Хе:НСI = 20:1 (2 торр) от буферных газов Аг, Не и Не:Аг и давления для зарядного напряжения 36 кВ [55, 163].

Импульсные газовые УФ-лазеры

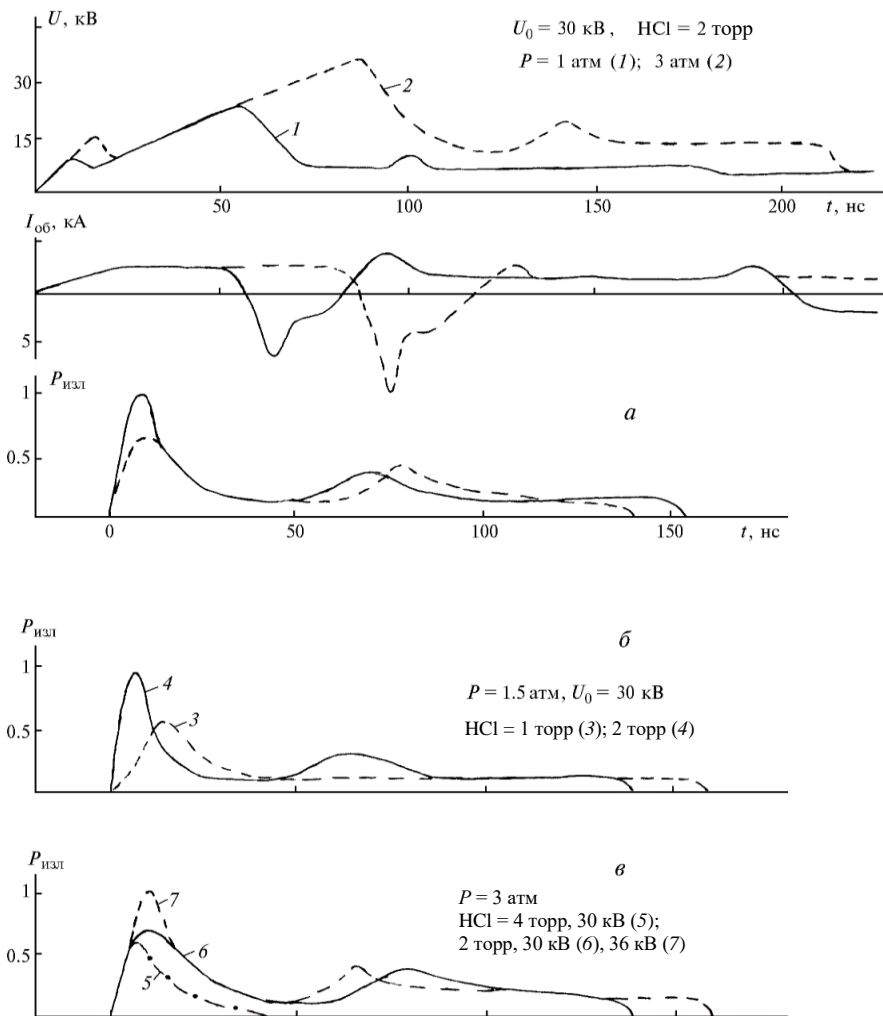


Рис. 5.13. Осциллограммы импульсов напряжения, обострительного тока разряда и излучения для газовых смесей Хе:НCl = 20:1 в квазистационарном режиме возбуждения и генерации для $C_{об} = 10$ нФ, $C_n = 60$ нФ и активного объема $2 \cdot 1,5 \cdot 60$ см³ в зависимости от напряжения, давления и концентрации НCl

5. Экимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

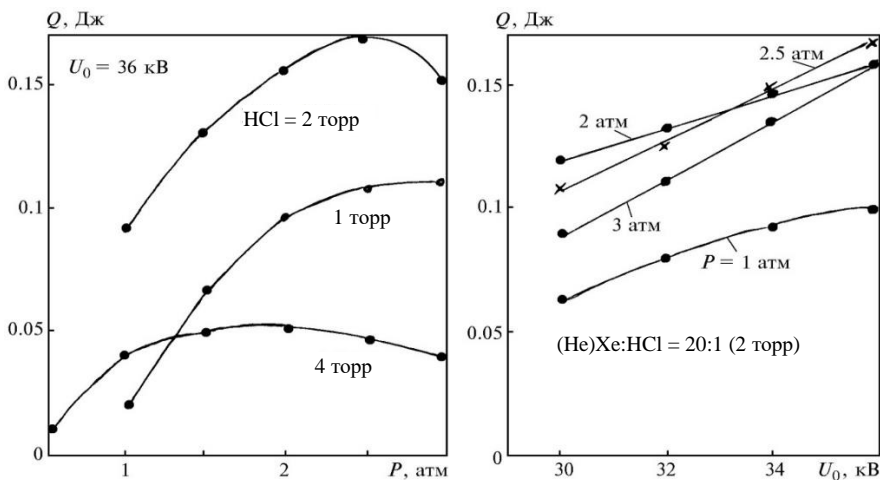


Рис. 5.14. Зависимости энергии излучения XeCl-лазера от давления, зарядного напряжения и концентрации хлоронесителя HCl

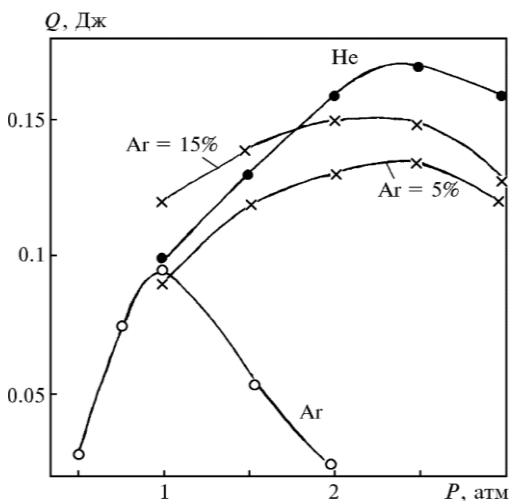


Рис. 5.15. Зависимости энергии излучения XeCl-лазера для газовой смеси Xe:HCl = 20:1 (2 торр) от выбора буферного газа He, Ar и He:Ar и суммарного давления для $U_0 = 36$ кВ

С добавками аргона энергия излучения увеличивалась при низком давлении и была выше, чем с гелием. При давлениях выше 2 атм энергия излучения была максимальной для гелиевых смесей. Эти результаты резко отличались от режима быстрого возбуждения при данных начальных условиях для $C_n = 10$ нФ (см. рис. 5.8, 5.9). Добавки аргона порядка 1 % для быстрого режима возбуждения обеспечивали рост энергии излучения на 20 %, уменьшая время задержки пробоя напряжения на плазме. Для квазистационарного режима возбуждения наблюдалась обратная картина.

На рис. 5.16 приведены осциллограммы напряжения на плазме, обострительного тока и генерации с буферными газами He, Ar в смесях (He)Ar:He:HCl = 20:20:1 (2 торр) для давления 1 атм, зарядного напряжения 30 кВ и $C_n = 60$ нФ, $C_{об} = 10$ нФ.

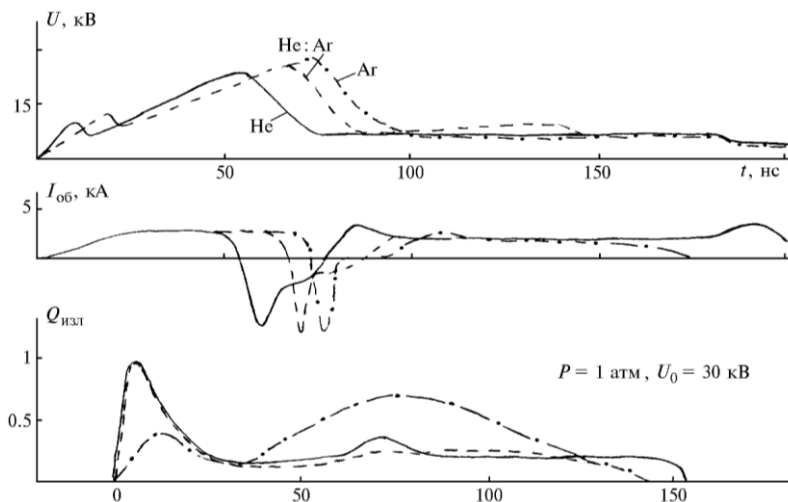


Рис. 5.16. Осциллограммы импульсов напряжения на плазме, обострительного тока разряда и генерации ХеСl-лазера с буферными газами He, Ar и He:Ar

При добавках аргона увеличивалось напряжение пробоя и время его запаздывания до 70 нс, а соответственно, уменьшалась длительность квазистационарного импульса генерации до 140 нс. Особую роль играл

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

аргон как буферный газ для формирования плазменных электродов, объемного разряда и режима возбуждения согласно экспериментальным результатам, приведенным на рис. 5.15, 5.16. Максимальная энергия излучения достигалась при давлении 1 атм. При больших давлениях энергия излучения падала из-за контрагирования разряда.

Впервые при низком давлении наблюдался квазистационарный режим возбуждения и генерации с длительностью импульсов более 140 нс с основным вкладом энергии в газ в квазистационарной стадии разряда. В этом случае импульс генерации возрастал по амплитуде и длительности за счет увеличения мощности накачки в квазистационарной стадии разряда. Следовательно, обострительно-емкостной контур обеспечивал работу плазменных электродов и пороговую генерацию в режиме быстрого разряда, а основной вклад осуществлялся накопительно емкостным контуром, который играл роль генератора тока.

Выводы

1. Впервые обоснован и реализован квазистационарный режим возбуждения и генерации длительностью импульсов 150 нс для ХеСl-лазера с плазменными электродами и буферными газами Не, Аг и Не:Аг. Показано, что данный режим зависел как от длительности объемной стадии разряда, определяемой концентрацией галогеноносителя, так и от мощности накачки, вкладываемой в разряд.

2. Получены импульсы генерации в аргоновых смесях длительностью импульсов до 150 нс с основным вкладом мощности накачки в квазистационарной стадии разряда. Режим отличается тем, что обострительно-емкостной контур обеспечивал лишь формирование плазменных электродов и начальные условия существования объемного разряда в промежутке, а основной вклад энергии в активную среду осуществлялся от накопительно-емкостного контура, который играл роль генератора тока.

5.4. Квазистационарный режим возбуждения и генерации ХеСl-лазера с буферным газом неоном и смесью Не:Не

Как ранее отмечалось в разд. 4, более высокие характеристики излучения ХеСl-лазера с неоном наблюдались с искровой и коронной УФ-

предыонизацией при быстром режиме возбуждения, что определялось как кинетикой образования рабочих молекул, так и характером развития объемного разряда. Интересно было выяснить влияние буферного газа неона на квазистационарный режим возбуждения с плазменными электродами. С учетом того, что для неона характерны более низкие пробивные напряжения, в последующих экспериментах использовались межэлектродные промежутки до 3 см с активным объемом $3 \cdot 1,5 \cdot 60 \text{ см}^3$ и генератор накачки с рабочими емкостями $C_n = 60 \text{ нФ}$, $C_{об} = 10 \text{ нФ}$.

На рис. 5.17 показаны зависимости энергии излучения ХеСl-лазера с буферными газами He, Ne и He:Ne от соотношений Хе:НСl, рабочих давлений и энергии, запаасаемой в накопительной емкости, для концентрации НСl = 2 торр. В неоне и гелии наблюдалось оптимальное соотношение компонентов Хе:НСl = 20:1 независимо от величины межэлектродного промежутка.

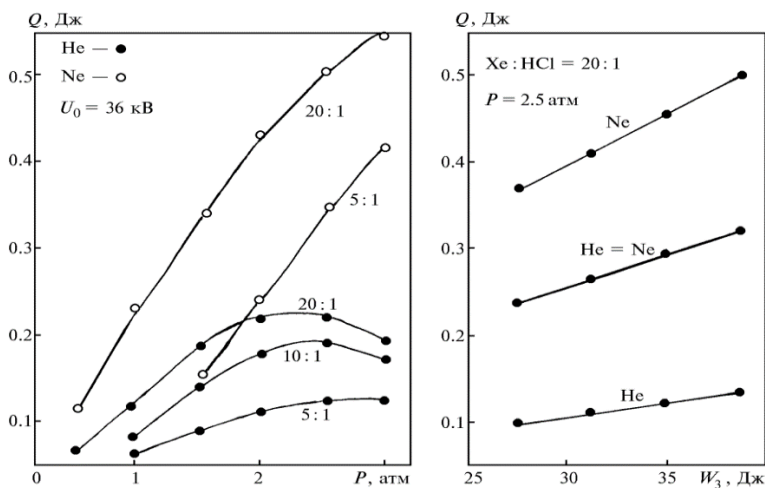


Рис. 5.17. Зависимости энергии излучения от соотношения Хе:НСl, давления и энергии возбуждения для буферных газов He, Ne и He:Ne для концентрации НСl = 2 торр

В неоновых смесях происходил линейный рост энергии излучения с увеличением давления, при этом она была более чем в 2 раза выше

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

по сравнению с буферным газом гелием. При постоянном давлении газовой смеси 2,5 атм с увеличением запасаемой энергии в накопительной емкости энергия излучения с неоном возрастала почти в 4 раза по сравнению с буферным газом гелием.

Этот факт был связан с особенностью работы плазменных электродов с буферным газом неоном, который обеспечивал лучшую однородность объемного разряда, а также с более эффективной кинетикой образования молекул XeCl^* за счет неона [176].

На рис. 5.18 представлены зависимости энергии излучения и ширины лазерного излучения от процентного содержания He:Ne в газовых смесях $\text{Xe:HCl} = 20:1$ (2 торр) при их давлении 2,5 атм и зарядном напряжении 36 кВ [53, 66].

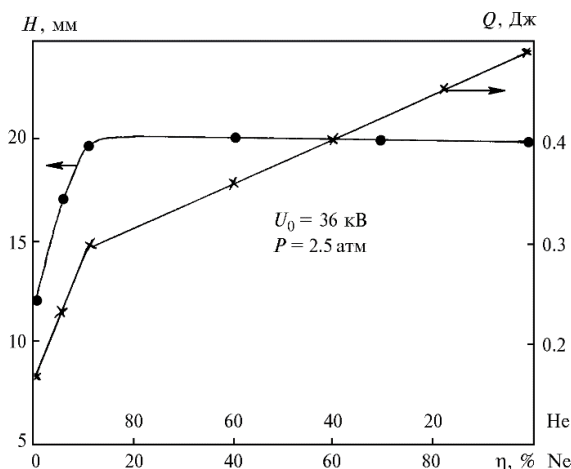


Рис. 5.18. Зависимости энергии излучения (×) и ширины лазерного излучения (·) от процентного соотношения буферных газов He:Ne для газовых смесей $\text{Xe:HCl} = 20:1$ (2 торр)

При ширине плазменного электрода 1,5 см с буферным газом гелием ширина лазерного излучения составляла 1,2 см. С добавками неона до 10 % ширина излучения линейно увеличивалась до 2 см, а далее независимо от концентрации неона оставалась постоянной. При этом энергия излучения линейно росла. Данные результаты хорошо согласо-

вывались с разрядными параметрами плазмы и кинетикой образования рабочих молекул по ионному каналу.

На рис. 5.19 приведены осциллограммы напряжения на плазме, на плазменном электроде (U_{II}), тока обострительного и накопительного контура и излучения в гелии и неоне для газовых смесей Хе:НСl = 20:1 (2 торр) при $P = 3$ атм, $U_0 = 30$ кВ.

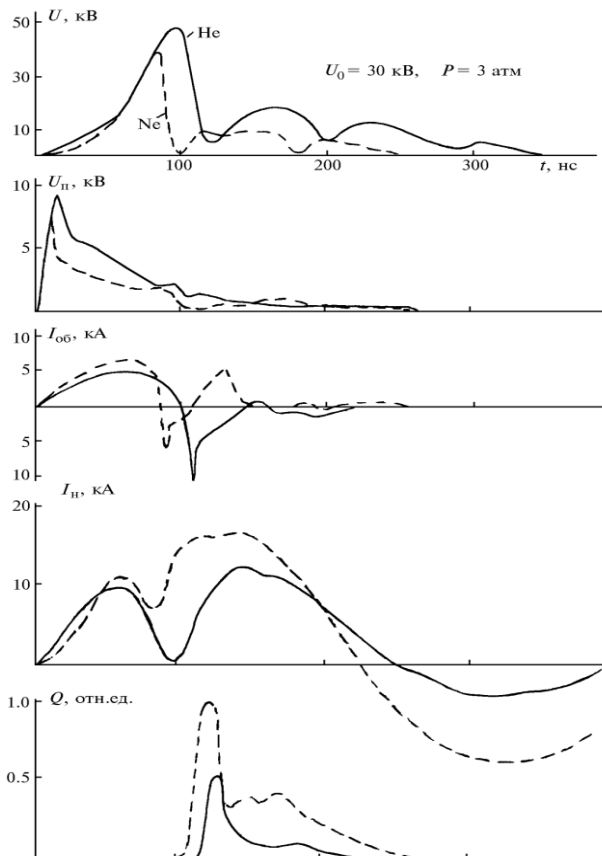


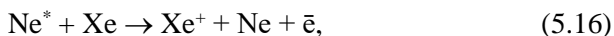
Рис. 5.19. Осциллограммы разрядных характеристик и излучения для ХеСl-лазера с плазменными электродами в газовых смесях He(Ne)Хе:НСl = 20:1 (2 торр)

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

С увеличением давления и межэлектродного промежутка повышалась неустойчивость разряда, что связано, видимо, с более слабым воздействием плазменных электродов на формирование объемного разряда. При этом наблюдался квазистационарный режим накачки и генерации. Для неона напряжение на плазме в квазистационарной стадии было в 2 раза ниже, чем для гелия, а разрядный ток накопительного контура был больше. Вследствие этого с неоном наблюдались более длинные импульсы генерации. С другой стороны, для гелия обострительный ток был больше, чем с неоном, что ограничивало его длительность. Разряд в неооне был более однороден и устойчив. Начальное напряжение на плазменном электроде равнялось ~ 10 кВ в зависимости от давления и выбора буферного газа. После пробоя основного промежутка напряжение на плазменных электродах изменялось от 1 до 2 кВ. Энергия, затрачиваемая на образование плазмы на электродах, зависела от энергии, запасаемой в обострительной емкости и (независимо от буферного газа) составляла ~ 50 %. Квазистационарная стадия разряда достигала 250 нс и зависела от длительности напряжения на плазме и разрядного тока накопительного контура накачки. Следует отметить, что в неоновых смесях время задержки пробоя не зависело от давления, а в гелиевых смесях наблюдалась его жесткая зависимость. Для неоновых смесей основная энергия излучения реализовывалась в квазистационарной стадии возбуждения, а для гелиевых смесей – в быстрой стадии разряда возбуждения.

На рис. 5.20 наглядно показан процесс вложения энергии в разряд возбуждения на примере осциллограмм напряжения на плазме и тока обострительного контура накачки и импульсов излучения для буферных газов гелия, неона и смеси газов He:Ne при давлении 1 атм и зарядном напряжении 30 кВ.

Для гелиевых смесей длительность генерации не превышала 50 нс, а для неоновых смесей она была более 150 нс. Для газовой смеси He:Ne длительность менялась в зависимости от концентрации неона. Это связано с большей эффективностью образования молекул XeCl^* в неоновых смесях [53, 66]. Кроме реакции пеннингговской ионизации [202]:



в образовании ионов ксенона участвует излучение молекул NeCl^* [220]:

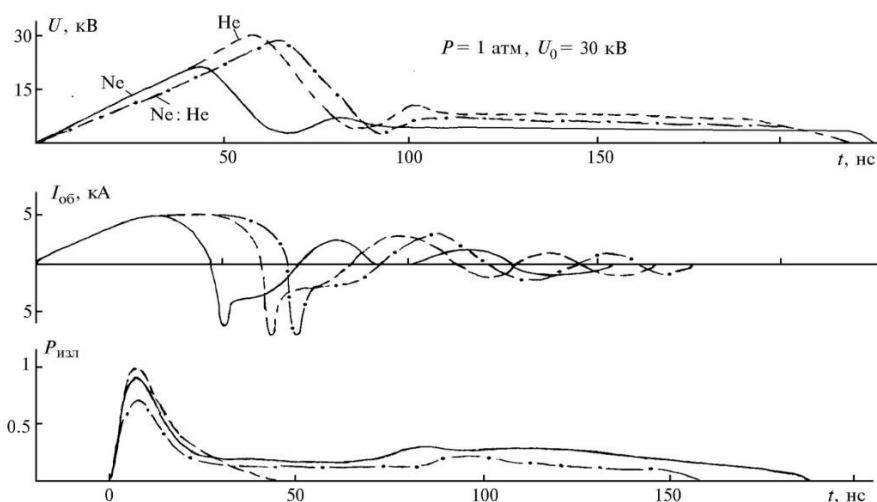
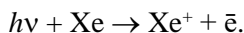
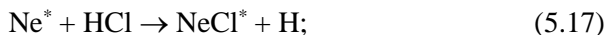


Рис. 5.20. Осциллограммы импульсов напряжения на плазме, тока разряда обострительного контура и излучения для газовых смесей Хе:Нсl = 20:1 (2 торр) с буферными газами Ne, He и Ne:He

В пользу участия NeCl^* в образовании Xe^+ свидетельствовала не только высокая эффективность ХеСl-лазера с неоном, но и наблюдаемое расширение разрядной области. Ионизация Хе излучением NeCl^* приводила к увеличению устойчивости и расширению области разряда, а образовавшиеся Xe^+ участвовали в формировании ХеСl* по ионному каналу. С другой стороны, согласно работе [197], для буферных газов

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

Ne и Ne:Ar наблюдалось эффективное образование XeCl^* по каналу ион-ионной рекомбинации:



Более низкая эффективность образования XeCl^* в смесях с гелием, по-видимому, обусловлена низкими значениями E/N в разрядной плазме. Известно [203], что в этом случае уменьшалась константа прилипания к HCl , а соответственно, и образование Xe^+ . Так для неоновых смесей (см. рис. 5.18) в режиме квазистационарного возбуждения и генерации были получены импульсы излучения до 250 нс с энергией более 0,5 Дж и КПД, равным 1,4 % при $W_{\text{уд}} = 1,25 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$. В данных условиях с неоном плотность разрядного тока равнялась $100 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$, а для гелия – $200 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$. Оказалось, что для гелиевых смесей функция распределения электронов по энергиям при $E/N = 2,5 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$ была сдвинута в сторону более высоких энергий [147]. Следовательно, при более низком поле в неоновых смесях происходит эффективная пеннинговская ионизация. Поэтому большая часть энергии излучения приходилась на квазистационарную стадию накачки и соответствовала ионному каналу образования рабочих XeCl^* . На энергию излучения и длительность генерации влияла как величина обострительной, так и накопительной емкости накачки [53, 66, 67].

На рис. 5.21 представлены зависимости энергии излучения для газовых смесей $\text{Ne}(\text{He})\text{Xe}:\text{HCl} = 20:1$ (2 торр), генератора возбуждения с $C_{\text{об}} = 10 \text{ нФ}$ и зарядного напряжения 30 кВ от рабочего давления и величины накопительной $C_{\text{н}} = 60, 260 \text{ нФ}$. Поведение энергетических характеристик излучения для лазерного промежутка 3 см с буферными газами гелием и неоном было аналогичным рабочему промежутку в 2 см. Увеличение накопителя не приводило к резкому росту энергии излучения. Это объяснялось тем, что не были согласованы индуктивности контура накачки и разрядного промежутка. Оптимальное соотношение емкостей генератора возбуждения равнялось $C_{\text{н}}/C_{\text{об}} = 5$, как для случая с источником коронной УФ-предыонизации [52]. Значительный рост энергии излучения наблюдался за счет повышения зарядного напряжения. При уменьшении в 2 раза обострительной емкости до 5 нФ

длительность импульсов генерации возрастала с неоном до 400 нс, а с гелием – до 200 нс (рис. 5.22). В этом случае увеличивалась индуктивность обострительного контура накачки. Основную роль в квазистационарной стадии разряда играл ток накопительного контура накачки. Особенно ярко эта тенденция проявлялась для неона. Обострительная емкость заряжалась лишь в течение полупериода порядка 50 нс, т. к. объемный разряд был уже сформирован, а ток накопительной емкости обеспечивал основной разряд возбуждения через промежуток. Полупериод протекания накопительного тока достигал более 300 нс.

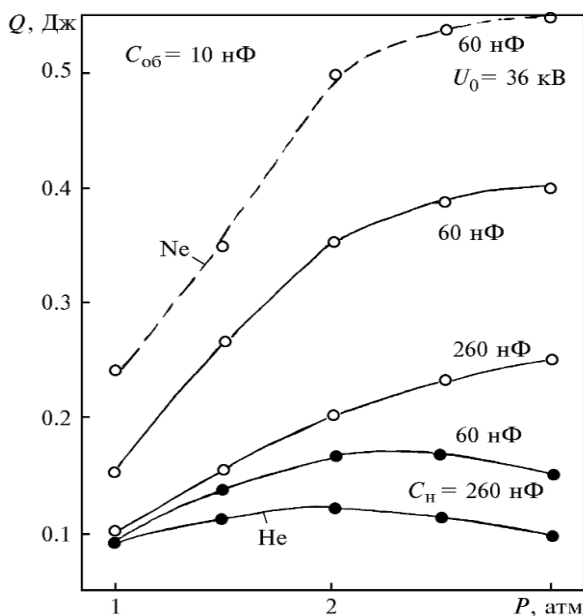


Рис. 5.21. Зависимости энергии излучения для газовых смесей Ne(He)Xe:HCl = 20:1 (2 торр) от давления и величины накопительной емкости для $U_0 = 30$ кВ

Для гелиевых смесей ток накопительной емкости через промежуток начинал протекать лишь после практически полной зарядки обострительной емкости.

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

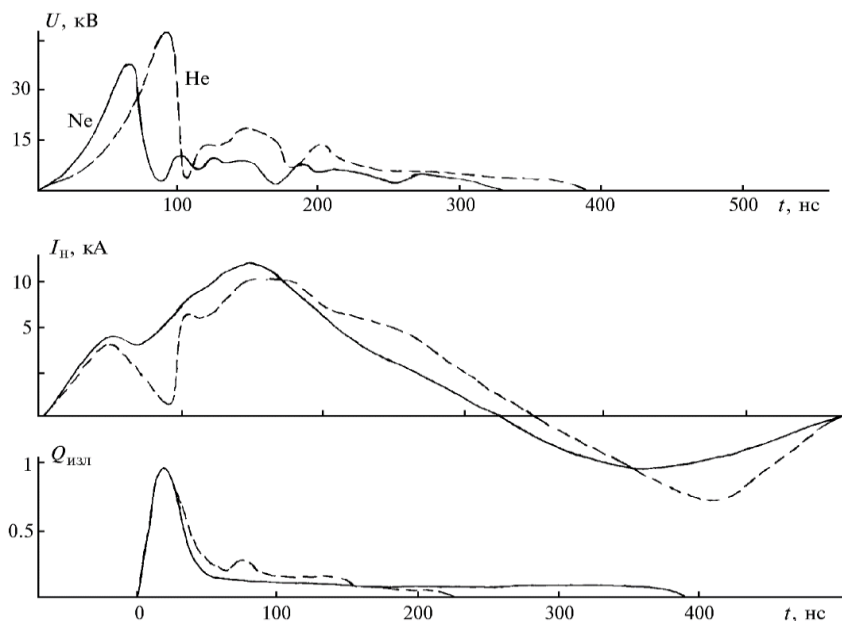


Рис. 5.22. Осциллограммы импульсов напряжения на плазме, разрядного тока накопительной емкости и излучения в газовых смесях $\text{Ne}(\text{He})\text{Xe}:\text{HCl} = 20:1$ (2 торр) при $P = 3$ атм и $U_0 = 30$ кВ, $C_{\text{н}} = 60$ нФ, $C_{\text{ог}} = 5$ нФ

На рис. 5.23 приведены аналогичные результаты исследований для случая, когда обострительная емкостью была увеличена в 2 раза и равнялась 20 нФ [66–68]. С ростом давления увеличивалось напряжение пробоя и время его запаздывания. Эти величины наиболее существенны для гелиевых смесей, поэтому разряд был менее стабилен, а энергия излучения более чем в 2 раза ниже по сравнению с буферным газом неоном. Импульсы генерации для гелия были не более 70 нс, а для неона длительность излучения равнялась 150 нс, т. е. в первом случае осуществлялся быстрый режим возбуждения, а во втором – квазистационарный. Длительность режимов возбуждения была ограничена величиной обострительной емкости, т. к. с ростом давления энергия излучения оставалась постоянной.

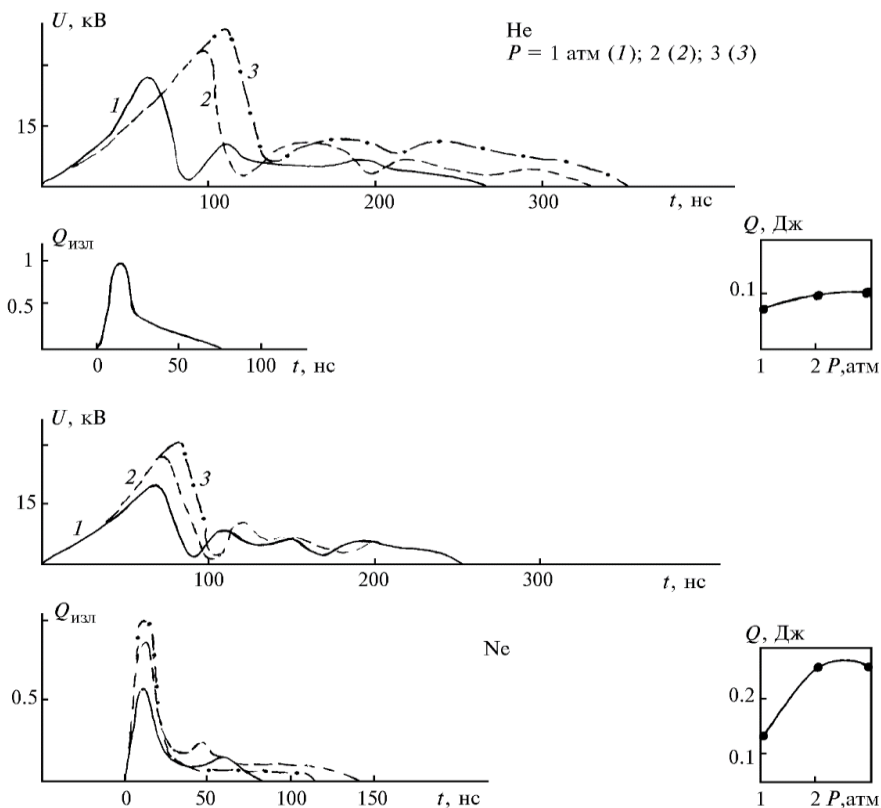


Рис. 5.23. Осциллограммы импульсов напряжения на плазме, генерации и энергии излучения в зависимости от давления, буферного газа Ne(He) в смесях Xe:HCl = 20:1 (2 торр) для $U_0 = 30 \text{ кВ}$, $C_n = 60 \text{ нФ}$, $C_{\text{об}} = 20 \text{ нФ}$

Отметим еще одну особенность буферного газа гелия при работе с плазменными электродами, которая характерна для аргона, как нами было показано ранее. Нами впервые для рабочих емкостей $C_n = 260 \text{ нФ}$ и $C_{\text{об}} = 10 \text{ нФ}$ наблюдался режим «многоимпульсной генерации» в газовых смесях Xe:HCl = 10:1 (3 торр), аналогичный режиму с источником искровой УФ-предыонизации, приведенному в разд. 4.

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

На рис. 5.24 показаны для газовой смеси $(\text{Ne})\text{Xe}:\text{HCl} = 10:1$ (3 торр) осциллограммы импульсов напряжения на плазме, разрядного тока накопителя и излучения при давлении 2 атм и зарядном напряжении 30 кВ. Длительность импульсов излучения достигала 300 нс. В данном случае изменение полярности накопительного тока не играло существенной роли, т. к. оба электрода являлись источниками плазмы. В гелиевых смесях данный режим не наблюдался.

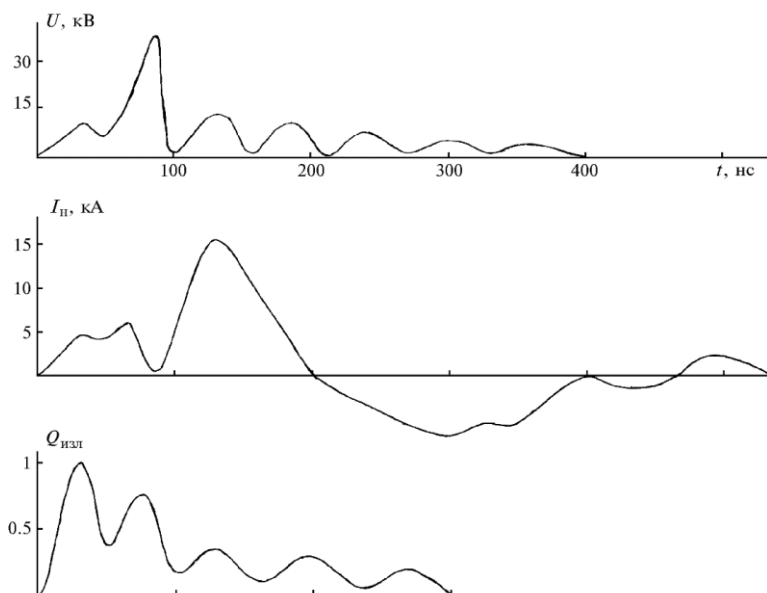


Рис. 5.24. Осциллограммы импульсов напряжения на плазме, тока разряда накопительной емкости и излучения в режиме «многоимпульсной генерации» для газовой смеси $(\text{Ne})\text{Xe}:\text{HCl} = 10:1$ (3 торр)

Следовательно, в зависимости от компонентов газовой смеси, их концентрации и параметров контуров накачки возможно получение квазистационарного режима возбуждения в виде «многоимпульсной генерации». Кроме того, оказалось, что на длительность генерации при постоянных начальных условиях возбуждения влияет как интенсивность источников УФ-предыонизации, так и объем активной лазерной среды.

На рис. 5.25 представлены осциллограммы импульсов напряжения на плазме, тока обострительного контура и излучения для газовой смеси (Ne)Xe:HCl = 20:1 (2 торр) при давлении 1 атм в зависимости от величины активного объема разряда возбуждения $3 \cdot 3 \cdot 60 \text{ см}^3$ и $3 \cdot 1,5 \cdot 60 \text{ см}^3$. Для накачки применялся генератор с рабочими емкостями $C_n = 60 \text{ нФ}$ и $C_{об} = 10 \text{ нФ}$ с зарядным напряжением 30 кВ. В данном случае можно говорить как о мощности, вкладываемой в разряд, так и о плотности разрядного тока. С увеличением ширины плазменного разряда до 3 см возрастало напряжение пробоя и его время запаздывания, а соответственно, напряжение на плазме. В гелиевых смесях наблюдалось «саморегулирование» плазменного разряда, т. е. при ширине плазменного электрода 1,5 см ширина лазерного излучения равнялась 2 см, а при $H = 3 \text{ см}$ ширина излучения соответствовала 1,5 см. С ростом ширины разряда и уменьшением плотности тока в неоновых смесях длительность импульсов излучения увеличивалась до 250 нс.

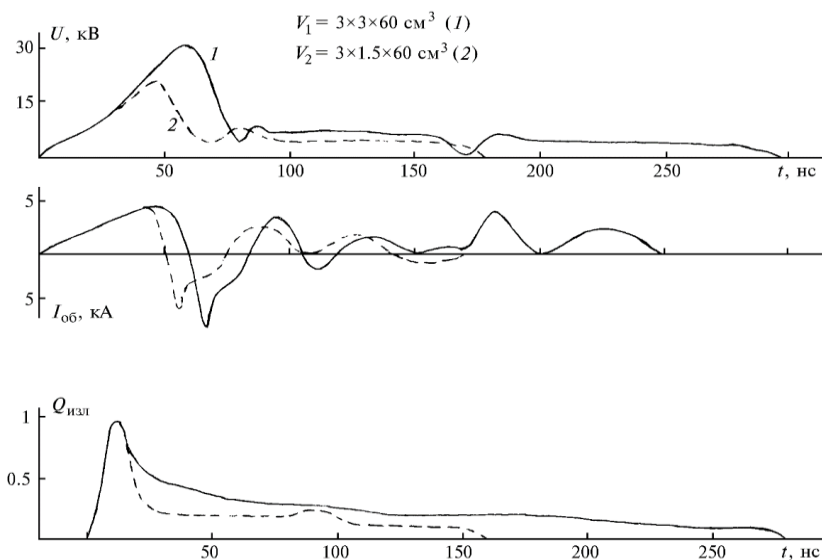


Рис. 5.25. Осциллограммы импульсов напряжения на плазме, обострительного тока разряда и излучения для газовой смеси (Ne)Xe:HCl = 20:1 (2 торр) в зависимости от объема активной среды

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

Плотность мощности накачки в быстрой стадии соответствовала $1 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-3}$, а в квазистационарной стадии возбуждения равнялась $0,2 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-3}$. Для гелиевых смесей наблюдался лишь быстрый режим накачки.

На рис. 5.26 приведены зависимости напряжения пробоя и времени его задержки для газовой смеси $(\text{He})\text{Xe}:\text{HCl} = 20:1$ (1,5 торр) при давлении 2 атм, зарядного напряжения 30 кВ и рабочих емкостей генератора накачки $C_{\text{н}} = 60 \text{ нФ}$ и $C_{\text{об}} = 10 \text{ нФ}$ для активного объема $3H \cdot 60 \text{ см}^3$ от ширины (H) плазменного электрода.

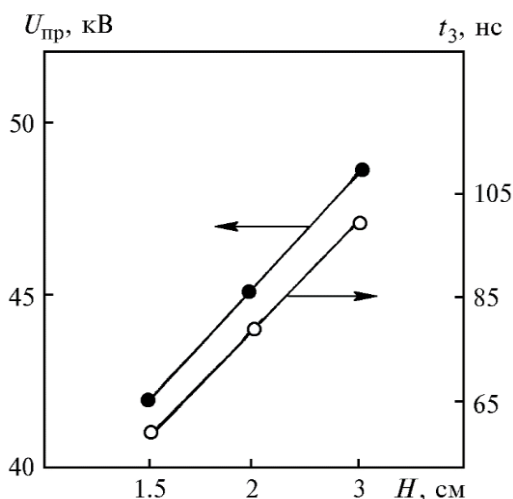


Рис. 5.26. Зависимости напряжения пробоя и времени его задержки от величины объема активной среды $3H \cdot 60 \text{ см}^3$ газовой смеси $(\text{He})\text{Xe}:\text{HCl} = 20:1$ (1,5 торр) при $P = 2 \text{ атм}$, $U_0 = 30 \text{ кВ}$, $C_{\text{н}} = 60 \text{ нФ}$ и $C_{\text{об}} = 10 \text{ нФ}$

С ростом ширины плазменных электродов, т. е. с уменьшением интенсивности УФ-предыонизации, линейно увеличивались напряжение пробоя и время его задержки. С гелием наблюдался более устойчивый разряд возбуждения. Длительность излучения не превышала 50 нс и определялась как мощностью накачки, так плотностью разрядного

тока. Так для ширины плазменного электрода 1,5 см ширина излучения была 1,2 см, а при $H = 3$ см ширина излучения равнялась 1 см. В этом случае мощность накачки в течение 50 нс соответствовала $1,5 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-3}$, а в течение последующих 100 нс – не менее $1 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-3}$. Следовательно, для гелиевых смесей происходило сужение разряда, увеличение плотности разрядного тока и мощности накачки, что ограничивало длительность генерации.

На основании проведенных исследований и работ других авторов в табл. 5.2 приведены основные работы и максимальные параметры излучения ХеСl-лазера с плазменными электродами в квазистационарном режиме возбуждения и генерации. Отметим работы [204, 205], в которых длительность импульсов генерации на полувысоте лишь в два раза меньше, чем по их основанию. Это связано как с параметрами контуров накачки ($C_H/C_{об} \leq 3$), так и с большими активными лазерными объемами (3,5–8,5 л), обеспечивающими выходную энергию излучения от 7,6 до 20 Дж за импульс.

Таблица 5.2

**Основные работы и максимальные параметры излучения
ХеСl-лазера с плазменными электродами
в квазистационарном режиме возбуждения и генерации**

№ п/п	Схема накачки	Буф. газ	ρ , %	V , л	$Q_{изл}$, Дж	$\frac{Q_{уд}}{\text{Дж}}$ л · атм	$\tau_{H/2}$, нс	$\tau_{осн}$, нс	КПД, %	Литер.
1	$C_H/C_{об} + 2\text{пл}$	He He:Ar Ar	10	0,1 0,12 0,18	0,17 0,15 0,1	0,7 0,6 0,6	20 20 80	150 150 180	0,4 0,4 0,25	[55]
2	$C_H/C_{об} + 2\text{пл}$	He He:Ne Ne	8–40	0,2 0,36 0,36	0,23 0,5 0,55	0,6 0,5 0,5	20 20 70	50 150 250	0,6 1,3 1,4	[66, [201]*
3	$C_H/C_{об} + 2\text{пл}$	Ar He:Ar He, Ne	8–40	0,2–0,4	0,55	1,25	70	400	1,4	[53, [67–69]
4	$C_H/C_{об} + 2\text{пл}$ $C_L = 3(C + L)$	He Ne Ar	–	0,1–0,4	Квазистационарный разряд 1 мкс					[65]

№ п/п	Схема накачки	Буф. газ	ρ , %	V, л	$Q_{изл}$, Дж	$\frac{Q_{уд}}{Дж}$, л · атм	$\tau_{h/2}$, нс	$\tau_{осн}$, нс	КПД, %	Литер.
5	$C_H/C_{об} + 2пл$	Не	60	0,12	0,05	0,4	100	1000	0,4	[203]
6	$C_H/PP/C_{об} +$ $+(c-пл)$	Не	10	8,5	20	0,5	100	200	–	[204]
7	$2Бл(c)/C_{об} +$ $+(c-л)$	Не	10	3,5	7,6	0,55	50	100	1,2	[205]
8	$C_H/C_{об} + пл$ $C_H/C_{об} + 2пл$ $C_H/C_{об} + c-пл$	Не Не	–	0,1	Режимы с усилением и без усиления поля					[75]

Выводы

1. Исследованы объемные разряды и их особенности формирования в двухконтурных схемах накачки с плазменными электродами и буферными средами гелием, неоном и смесями Ne:He в зависимости от концентрации HCl, параметров источников накачки и удельных энергокладов в активные среды. Показано, что для квазистационарного режима возбуждения необходима мощность накачки для быстрой стадии разряда ≥ 1 МВт·см⁻³, а для квазистационарной $\geq 0,2$ МВт·см⁻³ при плотности разрядного тока 100 А·см⁻² для неоновых и 200 А·см⁻² для гелиевых смесей.

2. Обнаружено, что в неоновых смесях наблюдалась «саморегуляция» апертуры лазерного излучения за счет изменения ширины разряда плазменных электродов при равных начальных условиях возбуждения.

3. Экспериментально подтверждено, что в неоновых смесях за счет более эффективного образования ХеСl* по ионному каналу обеспечивается рост энергии излучения в 3–4 раза по сравнению с гелиевыми смесями.

4. Показано, что в неоновых смесях реализуется режим многоимпульсной генерации длительностью до 300 нс.

5. Впервые предложен и исследован квазистационарный режим возбуждения и генерации буферными газами неоном и смесями Ne:Ne. Была получена энергия 0,55 Дж при длительности импульсов излучения ≥ 250 нс с КПД лазера 1,4 % и удельной энергией излучения $1,25 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$.

5.5. Особенности формирования объемного самостоятельного разряда в смесях Ne(Ne):Xe:HCl для квазистационарного режима возбуждения

Нами впервые объемные самостоятельные разряды в смесях инертных газов с галогенидами при высоких давлениях детально исследовались с источниками искровой УФ-предыонизации [48], коронной [60], а с X-предыонизацией – авторами работы [148]. Нами были получены объемные разряды длительностью до 400 нс [48, 53]. Авторы работы [206], используя водяную формирующую линию и X-предыонизацию, получили объемные разряды длительностью 200 нс в активном объеме 1 л с энергией 3,2 Дж. Авторы работы [170] наблюдали эффект стабилизации разряда при включении в электрическую цепь последовательно с разрядным промежутком активного сопротивления, которое обеспечивало резистивную стабилизацию разряда. Длительность импульсов излучения достигала 120 нс. При использовании кабельной формирующей линии длительностью 500 нс и резистивную стабилизацию разряда теми же авторами [207] удалось довести длительность объемной стадии разряда до 400 нс.

Нами был открыт и исследован квазистационарный режим возбуждения эксимерных молекул, обеспечивающий длинные оптические импульсы излучения для XeCl-лазера в двухконтурных схемах накачки с плазменной стабилизацией разряда. При длительности импульсов генерации более 250 нс была получена энергия излучения 0,55 Дж с КПД лазера 1,4 % [53, 55, 66–69]. Открытым остался вопрос о возможности получения объемных разрядов микросекундной длительности. Была разработана разрядная камера высокого давления с активным объемом $6 \cdot 2 \cdot 15 \text{ см}^3$, позволяющая исследовать объемные разряды длительностью более 1 мкс с различными типами плазменных электродов [65, 75, 201].

5.5.1. Устойчивость разряда в смесях инертных газов с галогенидами

Рассмотрим в общем виде устойчивость разряда в смеси $R + X_2$, где R – атом инертного газа, X_2 – молекула галогена. Основным процессом рождения электронов является ступенчатая ионизация, а их гибель происходит в результате процесса прилипания. Изменение концентрации электронов и метастабильных состояний во времени можно описать системой уравнений:

$$\partial n / \partial t = k_{ст} \cdot n \cdot R^* - k_{пр} \cdot n \cdot X_2; \quad (5.24)$$

$$\partial R^* / \partial t = k_b \cdot n \cdot R - k_{ст} \cdot n \cdot R^* - k_r \cdot R^* \cdot X. \quad (5.25)$$

Здесь n и R^* – концентрации электронов и метастабильных состояний соответственно; X_2 – концентрация молекул галогена; $k_{ст}$, $k_{пр}$, k_r , k_b – константы скорости ступенчатой ионизации, прилипания, гарпунной реакции и возбуждения соответственно. При нулевых значениях производных $\partial n / \partial t$ и $\partial R^* / \partial t$ получаем стационарные значения $n_{ст}$ и $R^*_{ст}$, при которых скорости рождения и гибели электронов и метастабилей следующие:

$$R^*_{ст} = k_{пр} X_2 / k_{ст}; \quad (5.26)$$

$$n_{ст} = k_r k_{пр} X_2 / [k_{ст}(k_b \cdot R - k_{пр} X_2)]. \quad (5.27)$$

В уравнениях (5.24), (5.25) не учитывалась прямая ионизация электронным ударом, константа скорости которой на два порядка ниже, чем ступенчатой ионизации; не учитывалась также рекомбинация в тройных соударениях, поскольку при типичных концентрациях электронов 10^{14} – 10^{15} см⁻³ скорость реакции рекомбинации много меньше скорости прилипания. Возможно, что для постоянного электрического поля в промежутке разряд оказывался неустойчивым, т. к. любая флуктуация плотности электронов (либо плотность метастабильных состояний) приводила к развитию неустойчивости разряда. Воспользуемся критерием устойчивости Ляпунова [208]. Заменим в уравнениях (5.24), (5.25) n и R^* на

$$n = (n_{ст} + \delta n); \quad R^* = (R^*_{ст} + \delta R^*), \quad (5.28)$$

где δn и δR^* – флуктуации плотности электронов и метастабилей. Подставляя выражения (5.28) в систему (5.24), (5.25) и пренебрегая слагаемыми второго порядка малости, получаем дифференциальное уравнение относительно δn :

$$\delta n'' + \delta n' \{RX_2[1 + X_2k/(k_v \cdot R - k_{пр}X_2)]\} - \delta n(k_{гk_{пр}X_2}) = 0. \quad (5.29)$$

Свободный член соответствующего характеристического уравнения всегда отрицателен, следовательно, решения системы (5.24), (5.25) неустойчивы. То, что стационарные решения системы (5.24), (5.25) неустойчивы, качественно видно из уравнения (5.27). Действительно, в диапазоне $E/N = (1-2)10^{-16}$ В·см² (рабочий диапазон эксимерных лазеров) константы $k_{ст}$, $k_{пр}$ и $k_{г}$ слабо зависят от E/N , в то время как k_v сильно зависит от E/N и функция $k_v(E/N)$ является возрастающей. Отсюда следует, что зависимость $n_{ст} = f(E/N)$ оказывается падающей, следовательно, вольт-амперная характеристика такого разряда падающая. Известно, что для стабилизации разряда с падающей вольт-амперной характеристикой в электрическую цепь последовательно с газовым промежутком необходимо включить активное сопротивление, стабилизирующая роль которого состояла в том, что при увеличении тока в цепи за счет падения напряжения на сопротивлении снижалось напряжение на промежутке [170]. Стабилизирующую роль может выполнять волновое сопротивление электрической линии, питающей газовый разряд [148, 206]. Кроме того, LC-цепь для заданного выбора значений L и C могла играть роль стабилизатора [53, 55].

Таким образом, в эксимерных лазерах в принципе реализуется стационарная стадия разряда. Важно было знать, до каких временных интервалов она могла существовать. Для иллюстрации стабилизирующего влияния активного сопротивления расчет проводился с учетом уравнения, описывающего электрическую цепь: $U = U_0 - U_1$, где U – напряжение на плазме, U_1 – падение напряжения на активном сопротивлении R , которое было выбрано равным 2 Ом [65]. Зависимость дрейфовой скорости ($V_{др}$) от E/N бралась из работ [209, 210] и аппроксимировалась следующими зависимостями:

$$V_{др} = 10^5(E/N)^{0.96} \text{ при } E/N > 4,5 \cdot 10^{-17} \text{ В} \cdot \text{см}^2;$$

$$V_{др} = 3 \cdot 10^5(E/N)^{0.25} \text{ при } E/N < 4,5 \cdot 10^{-17} \text{ В} \cdot \text{см}^2.$$

5. Экимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

Константа ступенчатой ионизации:

$$k_{\text{ст}} = 2,42 \cdot 10^{-8} (E/N)^{0,19} \text{ при } E/N > 3 \cdot 10^{-17} \text{ В} \cdot \text{см}^2;$$

$$k_{\text{ст}} = 2,42 \cdot 10^{-9} (E/N)^{2,29} \text{ при } E/N < 3 \cdot 10^{-17} \text{ В} \cdot \text{см}^2.$$

Константа возбуждения метастабильных состояний криптона $k_{\text{в}} = 3 \cdot 10^{-12} (E/N)^{2,02}$.

На рис. 5.27 показаны результаты численного решения системы (5.24), (5.25) совместно с уравнением электрической цепи.

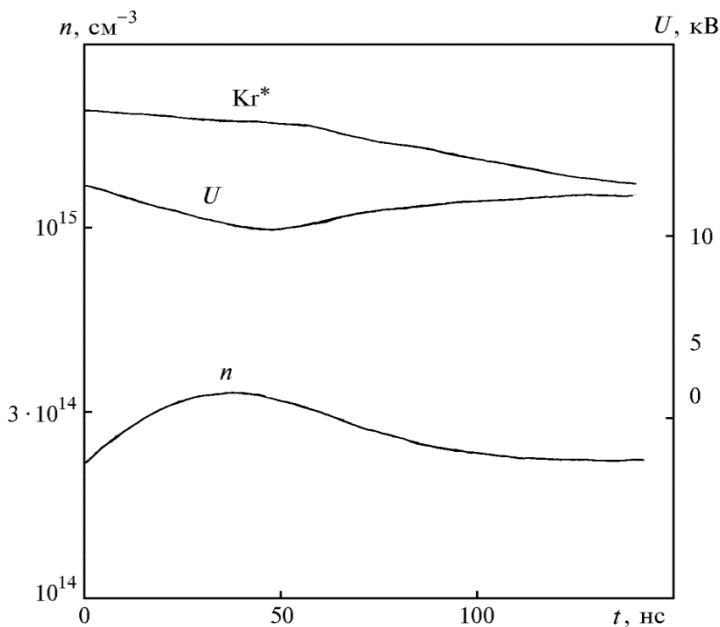


Рис. 5.27. Зависимости концентрации Kr^* , n и напряжения на плазме для $E/N = 1,2 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$, $R = 2 \text{ Ом}$, результаты численного решения [65]

Начальные концентрации: $n_0 = n_{\text{ст}} = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; $\text{Kr}_0^* = 2\text{Kr}_{\text{ст}}^* = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Напряжение на электродах в момент включения равно 12 кВ; газовая смесь $(\text{Ar})\text{Kr}:\text{F}_2 = 10:1$ при давлении 2 атм. При этих

условиях без стабилизирующего сопротивления концентрации электронов и метастабилей неограниченно возрастали бы. Наличие сопротивления оказывает стабилизирующее влияние, т. к. нарастание тока в цепи вызывает спад напряжения на плазме и рост n прекращается уже через 30 нс. Далее концентрация n спадает, и хотя напряжение на плазме восстанавливается, система остается устойчивой, поскольку концентрация Kr^* успевает уменьшиться.

Следовательно, возникшая флуктуация (увеличение концентрации Kr^* в 2 раза) ликвидировалась, и через 200 нс система приходит к своему устойчивому стационарному состоянию. Представленные расчеты [65] показали, что стационарные концентрации электронов и метастабильных состояний достаточно велики, порядка 10^{14} – 10^{15} см $^{-3}$. При этом из (5.26) и (5.27) следует, что Kr^* практически не зависит от электрического поля, в то время как $n_{ст}$ сильно зависит от E/N . Обеспечение больших начальных концентраций, соответствующих стационарным значениям, возможно только с помощью внешнего ионизатора. Так, используя электронный пучок малой длительности с соответствующей энергией и плотностью тока при правильном выборе состава смеси, геометрии разрядного промежутка, стабилизирующего сопротивления и начального напряжения, можно получить устойчивый квазистационарный режим разряда.

Другая ситуация возникает для разряда с УФ-предыонизацией. Все известные способы УФ-предыонизации позволяют получать начальную плотность электронов 10^8 – 10^{11} см $^{-3}$, что на несколько порядков меньше стационарных значений. Следовательно, должна быть некоторая стадия формирования разряда, на которой необходимо начальную концентрацию электронов и метастабильных состояний увеличить на несколько порядков. Это условие реализуется только при установлении на стадии формирования напряженности поля на плазме в несколько раз выше, чем на квазистационарной стадии разряда. Поэтому возникают требования к источнику питания, который должен обеспечивать высокое напряжение на газовом промежутке в течение малого времени (десятки наносекунд), затем спад напряжения и далее поддержание напряжения на уровне, необходимом для квазистационарного горения. При этом основной вклад энергии в газ должен происходить на квазистационарной стадии, а напряжение на плазме должно быть в 2–3 раза меньше, чем на

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

стадии формирования разряда. Было ясно, что одноконтурная *LC*-схема питания не могла обеспечивать этих требований, т. к. при уменьшении напряжения на питающем конденсаторе в 3 раза оставшаяся энергия будет на порядок меньше первоначальной. Требуемую форму импульса накачки обеспечивают 2- и 3-контурные схемы накачки соответствующим выбором их параметров, в этом случае стабилизирующую роль будет выполнять индуктивность накопительного контура (см. рис. 1.18).

Эксперименты по исследованию свойств квазистационарного разряда с плазменными электродами проводились на установках, представленных на рис. 1.13–1.15. Обострительные конденсаторы обеспечивали индуктивность контура не более 10 нГ. Накопительный контур представлял собой *LC*-цепь. При этом в экспериментах применялась как накопительная емкость с распределенными параметрами, так и электрическая линия, состоящая из 2 или 3 звеньев (линия с сосредоточенными параметрами). Коммутаторами служили разрядники РУ-65.

Отметим, что 2-контурные схемы накачки для эксимерных лазеров нашли широкое применение для быстрого режима возбуждения. Они применялись для того, чтобы за время запаздывания развития разряда максимально большую энергию передать из накопительной емкости в обострительную, а поскольку индуктивность обострительного контура мала, это давало возможность формировать мощный импульс накачки малой длительности. В наших экспериментах, в режиме квазистационарного возбуждения, цель другая: обостряющая емкость служила в основном для формирования разряда, а накопительная емкость обеспечивала вкладываемую энергию в течение нескольких сотен наносекунд.

В традиционных схемах накачки индуктивность накопительного контура являлась паразитной. Она ограничивала вкладываемую энергию, и поэтому обычно применялись меры для ее уменьшения. В данном случае нет жестких требований к величине индуктивности, что давало возможность существенно увеличивать вкладываемую энергию. Главное, что индуктивность выполняла новую функциональную роль – стабилизировала объемный разряд $3 \cdot 2 \cdot 15 \text{ см}^3$ в газовых смесях $\text{Ne}(\text{He})\text{Xe}:\text{HCl} = 20:1(1,5 \text{ торр})$ при давлениях до 3 атм.

На рис. 5.28 представлены осциллограммы напряжения на плазме, полного разрядного тока и спонтанного излучения XeCl^* для газовой смеси $(\text{Ne})\text{Xe}:\text{HCl}$ при давлении 2 атм для генератора накачки

с параметрами $U_0 = 20$ кВ, $C_n = 20$ нФ и $C_{об} = 2,2$ нФ [65]. Максимальное напряжение на промежутке соответствовало зарядному напряжению 20 кВ. Это говорило о том, что на образование скользящего разряда на электродах затрачена энергия, соизмеримая с энергией, запасенной в обострительной емкости.

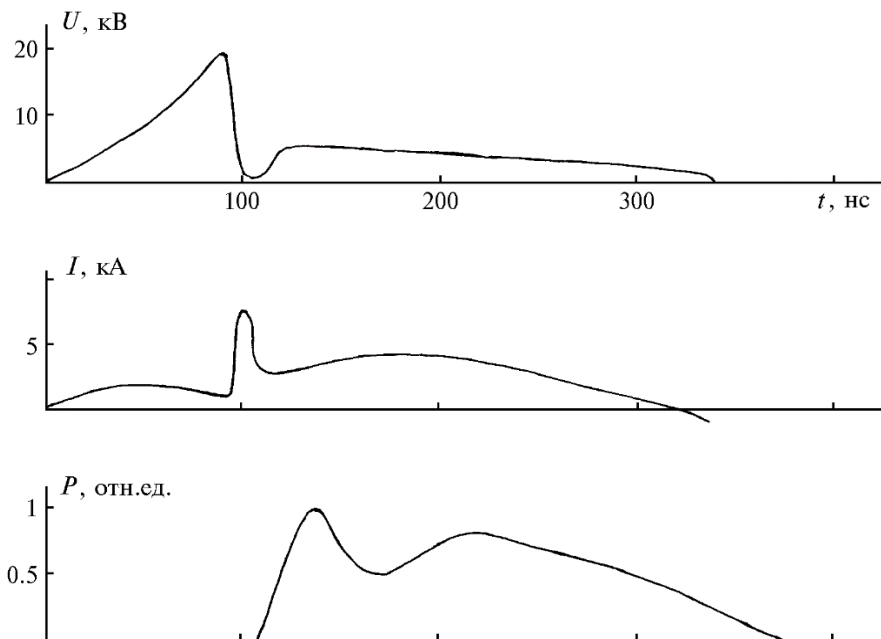


Рис. 5.28. Осциллограммы напряжения на плазме, полного разрядного тока и спонтанного излучения $XeCl^*$ для смеси $(Ne)Xe:HCl = 20:1$ (1,5 торр) при $P = 2$ атм и $U_0 = 20$ кВ, $C_n = 20$ нФ, $C_{об} = 2,2$ нФ

При соотношении емкостей $C_n/C_{об} \sim 9$ энергия, необходимая для образования плазменных электродов, составляла не более 10 % от запасаемой энергии. На осциллограмме импульса тока видно, что за время 100 нс происходит зарядка обострительной емкости, а последующий всплеск тока связан с разрядом обострительной емкости на плазменный промежуток в момент формирования объемного разряда. Резкий спад

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

напряжения на плазме связан как с быстрым ростом проводимости в промежутке, так и с разрядом обострительной емкости. В течение последующих 200 нс наблюдалась квазистационарная стадия разряда, которая поддерживалась за счет разряда накопительной емкости. Спонтанное излучение молекул XeCl^* регистрировалось в течение всей длительности разряда. В данном режиме удельная мощность накачки в стадии формирования разряда достигла $1 \text{ МВт}\cdot\text{см}^{-3}$, а в квазистационарной стадии – $0,2 \text{ МВт}\cdot\text{см}^{-3}$.

Большая пиковая мощность в начальной стадии формирования разряда является благоприятным фактором для быстрого формирования фотонной лавины в резонаторе. Применение электрической линии в качестве накопительного элемента, ограничивающего амплитуду разрядного тока, позволяло увеличивать длительность квазистационарной стадии разряда.

На рис. 5.29 приведены осциллограммы напряжения на плазме, тока накопительных линий ($C_{\text{л}} = 30; 60 \text{ нФ}$) и спонтанного излучения для газовых смесей $\text{Ne}(\text{He})\text{Xe}:\text{HCl} = 20:1(1,5 \text{ торр})$ при давлении 2 атм и $U_0 = 30 \text{ кВ}$, $C_{\text{об}} = 2; 5 \text{ нФ}$. Электрические линии состояли из трех LC-звеньев. Видно, что в этом случае осциллограммы накопительного тока имели плоскую вершину. С ростом емкости накопительной линии увеличивалась квазистационарная стадия напряжения на плазме. Впервые экспериментально была получена длительность квазистационарной стадии разряда в газовых смесях до 1 мкс. При этом на фоне равномерного свечения разряда в промежутке наблюдались отдельные диффузные каналы. Во всех случаях при больших длительностях разряда продолжительность спонтанного излучения не превышала 400 нс. Она, видимо, ограничивалась мощностью накачки (плоская вершина тока разряда). Кроме того, искусственное ограничение разрядного тока влияло на кинетику образования рабочих молекул, а соответственно, на длительность импульса генерации.

Следует отметить, что для неоновых смесей при накопительной линии накачки 30 нФ длительность спонтанного свечения почти соответствовала гелиевым смесям, которые накачивались от накопительной линии с емкостью 60 нФ. Обнаружено, что во всех случаях при прочих равных условиях спонтанное излучение в смесях с неоном было более интенсивным и имело большую длительность по сравнению с гелием.

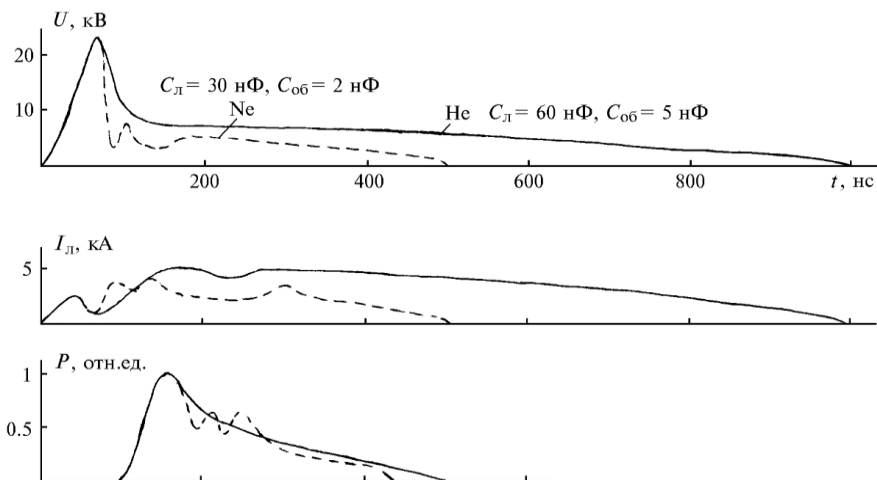


Рис. 5.29. Осциллограммы напряжения на плазме, тока разряда накопительных линий (C_L) и спонтанного излучения для газовой смеси $\text{Ne}(\text{He})\text{Xe}:\text{HCl} = 20:1(1,5 \text{ торр})$ при давлении 2 атм и $U_0 = 30$ кВ

Представленные экспериментальные данные и оценки устойчивости разряда показали, что характеристики плазмы очень сильно зависели от условий разряда и всякое изменение параметров электрической цепи приводило к существенным их изменениям как в стадии формирования, так и квазистационарной стадии разряда. Поэтому в последующих экспериментах отказались от линий с сосредоточенными параметрами. Для двух контурных схем накачки с плазменными электродами существенную роль играло место расположения коммутатора в накопительном контуре. Если на плазменных электродах отсутствовало напряжение (см. рис. 1.13), то данная схема нами была названа «схемой без усиления поля». При наличии малого напряжения на плазменных электродах $U \leq 0,5$ кВ (см. рис. 1.14) такая схема накачки нами была названа «схемой с усилением поля» [75]. Нами впервые были обнаружены отличительные особенности поведения спонтанного излучения в газовых смесях $\text{Ne}(\text{He})\text{Xe}:\text{HCl}$ с «усилением» и «без усиления» поля.

На рис. 5.30 показаны типичные осциллограммы напряжения на плазме, разрядного тока и спонтанного излучения в газовых смесях

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

Ne(He)Xe:HCl = 20:1 (1,5 торр) при $U_0 = 30$ кВ и $C_n = 30$ нФ, $C_{об} = 5$ нФ (с усилением поля – кривая 1, без усиления поля – кривая 2).

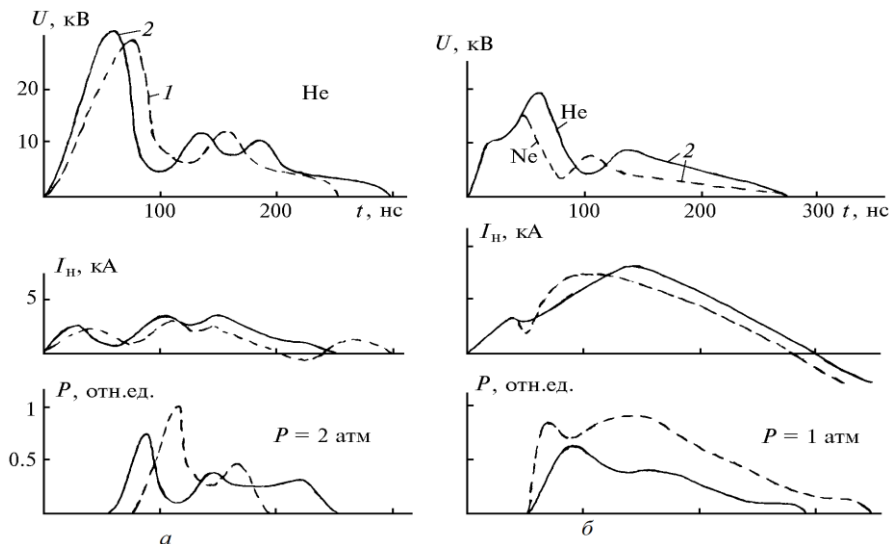


Рис. 5.30. Осциллограммы напряжения на плазме, разрядного тока накопительной емкости и спонтанного излучения в газовых смесях Ne(He)Xe:HCl = 20:1 (1,5 торр) при $U_0 = 30$ кВ:
1 – с усилением поля (а); 2 – без усиления поля (а, б)

С усилением поля наблюдалось увеличение времени запаздывания пробоя основного промежутка на 25 % и уменьшение напряжения пробоя не более чем на 10 %. Соответственно изменялись характеристики разрядного тока. Основная особенность заключалась в амплитудно-временном поведении спонтанного излучения. Для схем с усилением поля (кривая 1) максимальная интенсивность спонтанного излучения в 1,5 раза выше, чем для схем без усиления поля (кривая 2), а длительность спонтанного излучения почти в 2 раза меньше соответственно. Данные результаты можно объяснить следующим образом. Для квазистационарного напряжения на промежутке $\leq 0,5$ кВ электроны, всегда имеющиеся в межэлектродном промежутке, ускорялись

с минимальными потерями на упругие столкновения до энергии $\sim 0,3$ эВ, соответствующей энергии колебательного возбуждения молекул HCl. Следовательно, в промежутке возрастало число молекул HCl(v), к которым скорость прилипания электронов существенно больше, чем к молекулам HCl(o), что приводило, с одной стороны, к более высокой скорости образования молекул на стадии формирования разряда, а с другой стороны, – к снижению устойчивости горения разряда и сокращению длительности свечения эксимерных молекул. Схема, позволяющая поддерживать на промежутке квазипостоянное напряжение до подачи на него высоковольтного импульса (схема с усилением поля), увеличивала эффективность вкладывания энергии от обострительной емкости, что характерно для режима быстрой накачки эксимерных молекул. Для увеличения длительности объемной стадии разряда и, соответственно, спонтанного излучения лучше использовать схемы накачки «без усиления поля».

Поэтому последующие эксперименты проводились в схемах накачки данного типа. На рис. 5.30, б приведены осциллограммы напряжения на плазме, разрядного тока накопителя и спонтанного излучения в газовых смесях Xe:HCl = 20:1 (1,5 торр) без усиления поля в зависимости от буферных газов гелия или неона. Сравнение разрядных характеристик в этих смесях показало, что могут реализоваться условия, когда плотность мощности накачки в неоновых смесях значительно ниже, чем в гелиевых. Ширина разряда в неоновых смесях была в 1,5 раза больше, чем в гелиевых. При этом ток разряда имел лишь нарастающую и спадающую характеристику. В результате этого плотность мощности накачки в неоновых смесях была более чем в 2 раза ниже по сравнению с гелиевыми смесями. Однако интенсивность и длительность спонтанного излучения в неоновых смесях была существенно больше, чем для гелиевых смесей. Это говорило о более высокой эффективности преобразования электрической энергии в лазерное излучение в неоновых смесях [211]. Кроме этого, видимо, разницей в плотности мощности накачки объяснялись различия в эффективности применения буферного газа неона по сравнению с гелием [53]. Если активная среда на быстрой стадии разряда была перевозбуждена для гелиевых смесей, то для неоновых она могла достигать оптимальной плотности мощности накачки помимо ее известных преимуществ, согласно работе [211]. Наоборот, при слишком малой плотности накачки в гелиевых смесях неоновая смесь могла не дать увеличения эффективности образова-

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

ния эксимерных молекул. Например, при использовании импульсов возбуждения большой длительности с малой мощностью накачки необходимо было подобрать конфигурацию электродов с быстрым спадом электрического поля от центра к краям, чтобы не допускать расширения разряда в неоновых смесях. Кроме того, на длительность спонтанного излучения влияла величина накопительной емкости.

На рис. 5.31 показаны осциллограммы напряжения на плазме, разрядного тока накопителя, спонтанного излучения и фотография свечения плазмы разряда в смесях (He)Xe:HCl = 20:1 (1,5 торр) при давлении 2 атм, $U_0 = 30$ кВ, $C_{об} = 2,2$ нФ в зависимости от величины накопительной емкости 10; 15; 30 нФ.

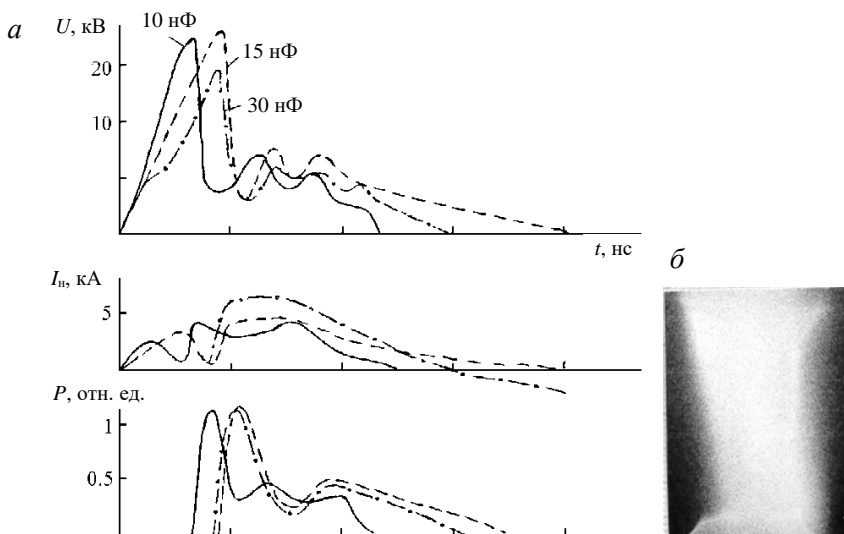


Рис. 5.31. Осциллограммы напряжения на плазме, разрядного тока накопительной емкости, спонтанного излучения (а) и фотография свечения плазмы разряда в газовой смеси (He)Xe:HCl = 20:1 (1,5 торр) (б) в зависимости от C_n

На фотографии интегрального свечения в промежутке видно, что разряд имеет равномерный характер. С ростом накопительной емкости увеличивалась длительность квазистационарной стадии разряда,

а соответственно, возрастали ток накопителя и спонтанное излучение до оптимального значения для данной системы накачки. Аналогичные эксперименты были проведены в схеме «без усиления поля» с одним плазменным электродом.

На рис. 5.32, *а* представлены осциллограммы напряжения на плазме, полного тока разряда, спонтанного излучения и фотографии его свечения с гелием и неоном в газовой смеси $\text{Xe:HCl} = 20:1$ (1,5 торр) для схемы без усиления поля с плазменным электродом, а на рис. 5.32, *б* показана графическая картина развития этого разряда при давлении 2 атм и $U_0 = 30$ кВ, $C_{об} = 5$ нФ в зависимости от величины накопительной емкости.

Известно [63, 64], что плазменные электроды при работе в частном режиме обладают относительно малым ресурсом, если они изготовлены из фольгированного текстолита. Поэтому были проведены эксперименты по снижению нагрузки на плазменные электроды, в частности, когда один из них металлический. Оказалось, что в этом случае формируется разряд с резко отличающейся пространственной однородностью. На поверхности металлического электрода видны катодные пятна, на которые замыкался основной объемный разряд. Данный тип электродов можно четко зафиксировать на осциллограммах напряжения на плазме тем, что напряжение спадало почти до нуля или ниже после срабатывания обострительной емкости независимо от буферного газа или величины накопительной емкости. Далее устанавливался квазистационарный режим разряда.

На рис. 5.32, *б* приведена качественная картина разряда в неоновых и гелиевых смесях. С неоном объемный разряд занимал площадь плазменного электрода до 75 %, а с гелием – не более 50 %. Роль накопительной емкости для квазистационарного разряда наглядно показана в гелиевых смесях. Ее увеличение до 60 нФ обеспечивало длительность разряда ~ 800 нс. При этом амплитуда обострительного тока не превышала амплитуды полного тока. Спонтанное излучение достигало не менее 300 нс. Следовательно, с одним плазменным электродом также реализовался квазистационарный режим разряда. Дальнейшее уменьшение нагрузки основного разряда на плазменный электрод достигалось за счет применения сетчатого электрода, экранирующего плазменный. В работах [212, 213] для CO_2 -лазера подчеркивалось влияние быстрых электронов в устройствах с дополнительным источником ионизации за сетчатым электродом.

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

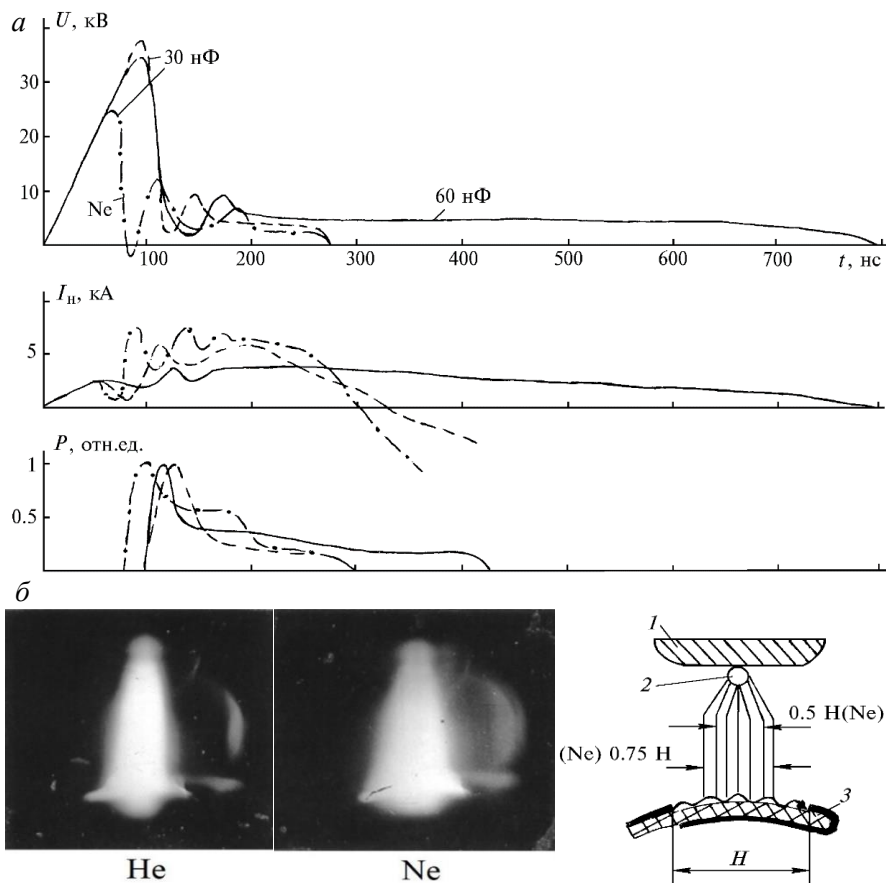


Рис. 5.32. Осциллограммы напряжения на плазме, полного тока разряда, спонтанного излучения и фотографии его свечения с He(Ne) в смеси Xe:HCl = 20:1 (1,5 торр) в схеме без усиления поля для плазменного электрода (а); графическая картина развития этого разряда (б):

1 – металлический электрод; 2 – катодное пятно; 3 – плазменный электрод

Нами была разработана электродная конфигурация, состоящая из металлического анода, сетчатого и плазменного электродов с двумя независимыми источниками питания (см. рис. 1.15) [75]. Промежуток между

металлическим анодом и сеткой составлял 3 см, а расстояние между плазменным и сетчатым электродами изменялось от 0,5 до 0,7 см. Активный объем разряда соответствовал $3 \cdot 1,5 \cdot 15 \text{ см}^3$. Оба источника срабатывали синхронно с заданной временной задержкой от 50 до 250 нс.

Оптимальная задержка между УФ-предыонизацией и основным разрядом составляла 200 нс. Параметры плазменного источника УФ-предыонизации соответствовали: $C_{н1} = 5 \text{ нФ}$; 10 нФ , $C_{о61} = 2 \text{ нФ}$, $U_{01} = -15 \text{ кВ}$, а параметры источника основного разряда составляли: $C_{н2} = 20 \text{ нФ}$, $C_{о62} = 2 \text{ нФ}$, $L_{н} = 300 \text{ нГ}$, $U_{0\text{max}} = 30 \text{ кВ}$.

На рис. 5.33 показаны осциллограммы напряжения на плазме, разрядного тока накопителя, спонтанного излучения (рис. 5.33, *а*, *б*) и фотографии свечения разряда (рис. 5.33, *в*) в газовых смесях $\text{Ne}(\text{He})\text{Xe}:\text{HCl} = 20:1(1,5 \text{ торр})$ с плазменными электродами при давлении 2 атм, $U_{02} = 25 \text{ кВ}$ и зависимости спонтанного излучения от энергии, затрачиваемой на плазменную УФ-предыонизацию (рис. 5.33, *б*), при $C_{н1} = 5$; 10 нФ . Так же как и для случая с металлическим электродом, наблюдался резкий спад напряжения до нуля с последующей квазистационарной стадией разряда независимо от буферного газа и параметров контуров накачки. Разряд оставался однородным в течение 300 нс, а время запаздывания пробоя уменьшалось почти в два раза. При увеличении энергии в два раза на источник УФ-предыонизации (рис. 5.33, *б*) возрастала амплитуда разрядного тока, но при этом сокращалась длительность спонтанного излучения.

Это говорило о том, что простое увеличение энергии УФ-предыонизации без изменений параметров схемы накачки не приводило к улучшению однородности и длительности объемной стадии разряда. На фотографиях ширина свечения плазмы разряда в неоновых смесях была больше, чем в гелиевых (рис. 5.33, *в*).

На рис. 5.34 представлены типичные осциллограммы напряжения на плазме, спонтанного излучения в газовых смесях $(\text{He})\text{Xe}:\text{HCl} = 20:1(1,5 \text{ торр})$ при давлении 2 атм, $U_0 = 30 \text{ кВ}$ (рис. 5.34, *а*) и напряжения пробоя промежутка от давления (рис. 5.34, *б*) для их различных конфигураций. Это промежутки: (пл) – анод и плазменный электрод; (2пл) – два плазменных электрода; (с-пл) – анод, сетчатый и плазменный электроды. Отметим резкое отличие напряжения на плазме для трех разных промежутков, а соответственно, и разную интенсивность излучения источников УФ-предыонизации.

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

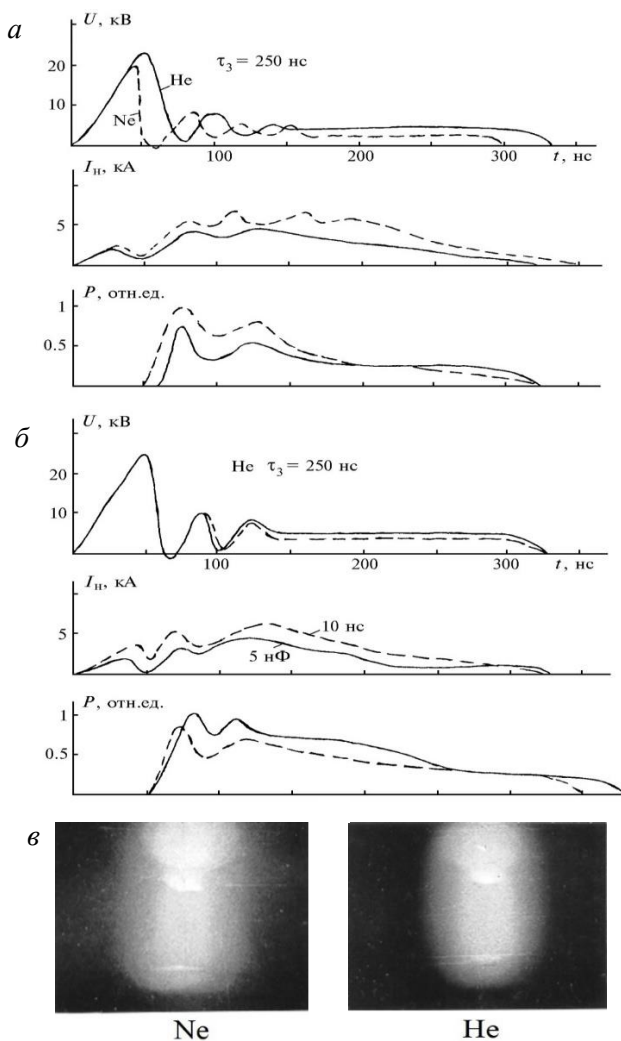


Рис. 5.33. Осциллограммы напряжения на плазме, разрядного тока накопительной емкости, спонтанного излучения (а, б) и фотографии свечения разряда (в) в газовых смесях $\text{Ne}(\text{He})\text{Xe}:\text{HCl} = 20:1$ (1,5 торр) при $P = 2$ атм, $U_{02} = 25$ кВ с двумя независимыми источниками питания для $C_n = 5; 10$ нФ

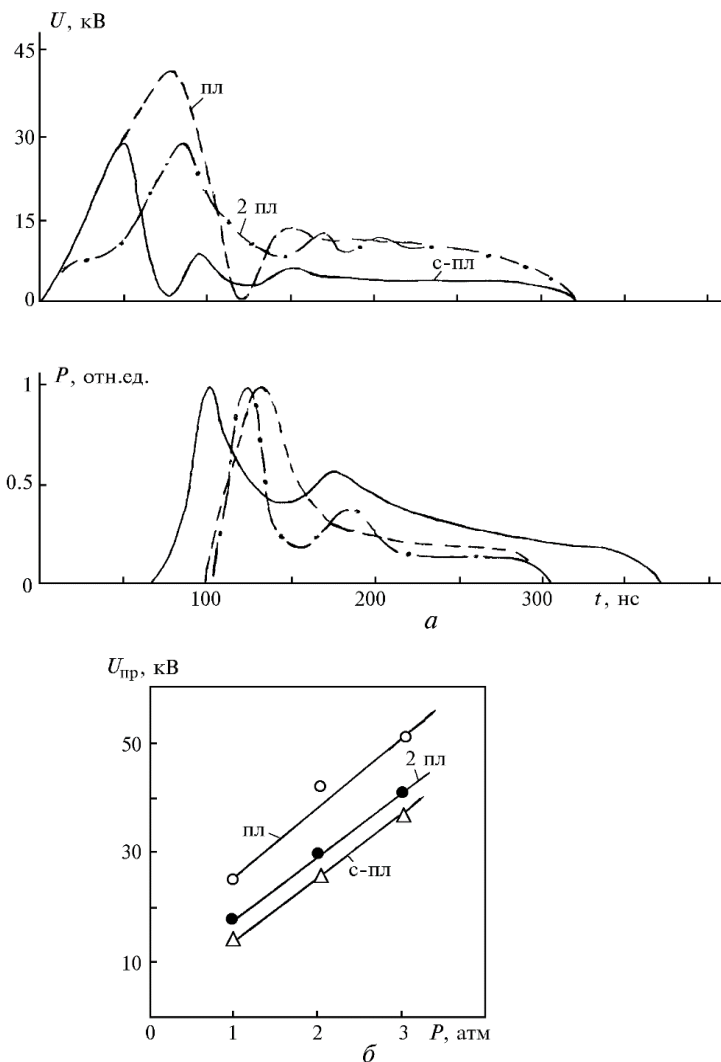


Рис. 5.34. Осциллограммы напряжения на плазме, спонтанного излучения в газовой смеси $(\text{He})\text{Xe}:\text{HCl} = 20:1$ (1,5 торр) при давлении 2 атм, $U_0 = 30$ кВ (а) и напряжения пробоя от давления для трех типов разрядных промежутков (б)

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

Если для одного или двух плазменных электродов зависимости закономерны, то для третьего случая результаты оказались неожиданными. На наш взгляд, это объяснялось тем, что применялось два независимых источника питания с разной полярностью. Поэтому вся электродная конфигурация играла роль триода с сеткой в качестве ускоряющего поля [59]. В промежутке плазменный электрод – сетка формировался дополнительный пучок «убегающих» электронов, который существенно улучшал однородность плазменной УФ-предыонизации. Эти электроны получали дополнительное ускорение в промежутке сетка – анод. В сильно ионизированной плазме режим «убегающих» электронов реализуется при полях $E > E_{кр}$, определяющихся условием Дрейсера [214]:

$$E_{кр} \sim 0,2e \cdot L_e / r_d^2; \quad r_d = \sqrt{T_e / 4\pi n_e e^2};$$

$$L_e = 23 + 2/3 \ln T_e - 1/2 \ln n_e,$$

где r_d – дебаевский радиус; e – заряд электрона; L_e – кулоновский логарифм. При параметрах разряда, типичных для сильноточной стадии разряда $T_e \sim 2$ эВ, $n_e \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$, получали значение $E_{кр} \sim 6 \cdot 10^5 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$. При подаче импульса напряжения амплитудой 15 кВ на потенциальный электрод скользящего поверхностного разряда, расположенного от сетки на 0,5 см, получаем $E \sim 3 \cdot 10^4 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$. Поэтому эффект «убегания» мог проявляться для электронов, имеющих энергию в 20 раз больше средней энергии. Если даже доля таких электронов составляет порядка 0,01 % [147], то их концентрация равнялась $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$, что соответствовало наилучшим выходным параметрам ХеСl-лазера [178]. Таким образом, рассматриваемая электродная конфигурация могла обеспечивать однородную УФ-предыонизацию при значительно большем ресурсе работы плазменного электрода. Следовательно, при одинаковых L_n и $C_n/C_{об}$ для трех межэлектродных промежутков интенсивность вспомогательного источника УФ-предыонизации газовой смеси определяла напряжение пробоя промежутка: (пл) – $U_{пр} \sim 3U_{ст}$; (2пл; с-пл) – $U_{пр} \sim 2U_{ст}$. Кроме того, для всех электродных конфигураций обеспечивался режим квазистационарного горения разряда. При наличии металлического электрода напряжение на плазме в быстрой стадии спадало до нуля. Максимальная длительность спонтанного свечения наблюдалась для сетчато-плазменной конфигурации электродов.

На основании проведенных исследований разрядных характеристик эксимерных активных сред нами был разработан плазменно-сетчатый электрод с заданным профилем для широко апертурных лазеров [77] и соответственно лазерная система [81]. На рис. 1.17 приведена электрическая двухконтурная схема накачки лазерной установки с двойным плазменно-сетчатым электродом. Активный объем лазера составлял $3 \cdot 3 \cdot 60 \text{ см}^3$. Обострительная емкость изменялась от 24 до 48 нФ, а накопительная емкость – от 100 до 200 нФ. В качестве коммутатора использовался серийный управляемый разрядник РУ-65. Была применена новая система питания УФ-предыонизатора за счет падения напряжения на дополнительных индуктивностях L_2' и L_2'' при зарядке обострительных емкостей C_1' , C_1'' и C_1''' . В данном случае обеспечивалась УФ-предыонизация газового объема, и как факт в этом случае осуществлялся лишь быстрый режим накачки и генерации независимо от буферного газа и параметров элементов электрической цепи. Нами были детально рассмотрены потери энергии в элементах схемы.

На рис. 5.35 показаны осциллограммы напряжения на плазме, тока накопительной емкости, разрядного тока и излучения для газовых смесей (Ar, He, Ne)Xe:HCl = 10:1 в зависимости от их компонентов и параметров генератора накачки с двойным плазменно-сетчатым электродом для рабочего объема $3 \cdot 3 \cdot 60 \text{ см}^3$. Это режимы работы генератора накачки при зарядном напряжении 30 кВ для обострительных и накопительных емкостей: 1 – $C_{об} = 24 \text{ нФ}$, $C_n = 100 \text{ нФ}$ с буферным газом неоном (3 атм); 2 – $C_{об} = 48 \text{ нФ}$, $C_n = 100 \text{ нФ}$ с буферным газом неоном (3 атм); 3 – $C_{об} = 24 \text{ нФ}$, $C_n = 200 \text{ нФ}$ с буферным газом гелием (2 атм) [81].

Из осциллограмм напряжения на плазме следовало, что для системы накачки с источником быстрой УФ-предыонизации не наблюдалась квазистационарная стадия разряда, поэтому основной вклад энергии в разряд от накопительной емкости не влиял на длительность импульса излучения. Она зависела от энергии обострительной емкости, что наглядно демонстрировал полный ток разряда. Ширина разряда изменялась от 1,6 до 2 см благодаря интенсивности УФ-предыонизации. При этом ширина лазерного излучения была меньше и соответствовала 1–1,6 см в зависимости от типа буферного газа. Средняя плотность разрядного тока составляла порядка $150 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$. Нами были проведены исследования быстрого режима возбуждения от соотношения и концентрации газовых компонентов.

5. Экимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

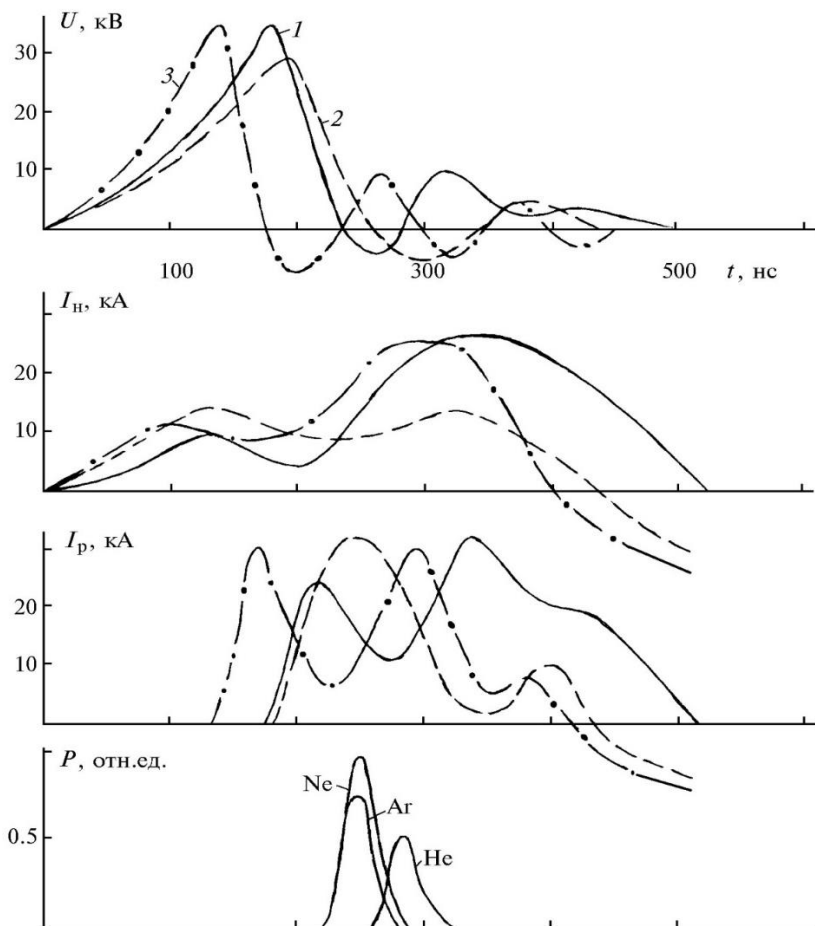


Рис. 5.35. Осциллограммы напряжения на плазме, тока накопительной емкости, разрядного тока и излучения для газовых смесей (Ar, He, Ne)Xe:HCl = 10:1 в зависимости от давления и C_n , $C_{об}$ при $U_0 = 30$ кВ

На рис. 5.36 представлены зависимости энергии излучения для смесей Xe:HCl = 10:1 с буферными газами Ar, He и Ne от давления, обострительной емкости (рис. 5.36, а) и концентрации HCl (рис. 5.36, б) для зарядного напряжения 30 кВ. Для быстрого режима накачки в данной

конфигурации электродов с интенсивным источником УФ-предыонизации оптимальное соотношение газовых компонентов соответствовало $\text{Xe}:\text{HCl} = 10:1$.

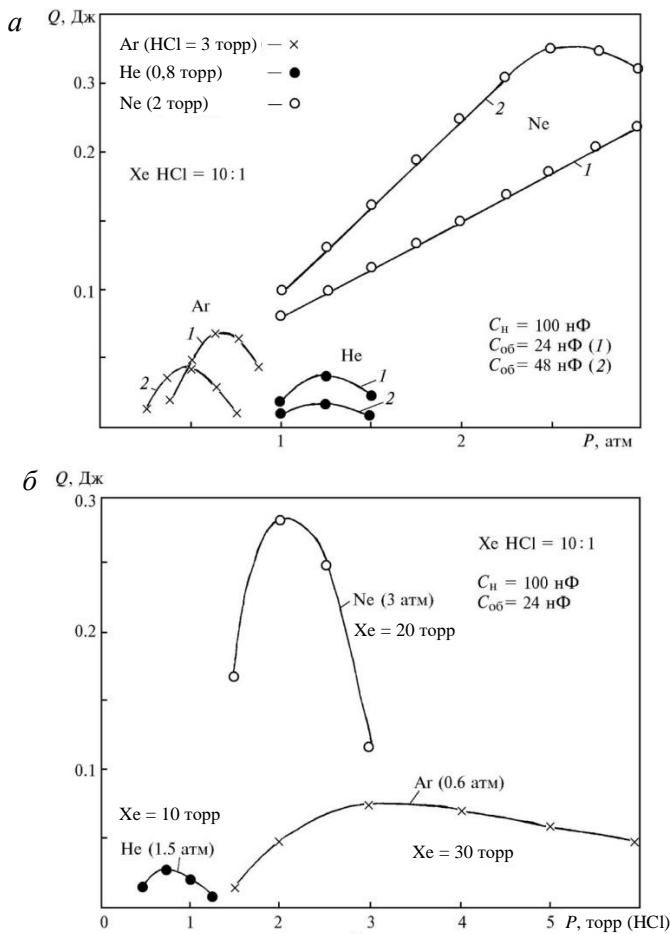


Рис. 5.36. Зависимости энергии излучения для газовых смесей $\text{Xe}:\text{HCl} = 10:1$ с буферными газами Ar, He и Ne от давления и C_{06} (а) и концентрации HCl (б) при $U_0 = 30$ кВ

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

Максимальная энергия излучения наблюдалась с буферным газом неоном. Для неона оптимальным было рабочее давление 2,5 атм, которому соответствовала энергия излучения 0,35 Дж. Для буферного газа аргона энергия излучения равнялась 0,07 Дж и соответствовала оптимальному давлению 0,7 атм. Для буферного газа гелия энергия излучения составляла 0,03 Дж при оптимальном давлении 1,2 атм. Простое увеличение обострительной емкости не приводило к росту энергии излучения из-за короткой длительности импульса УФ-предыонизации. Основное отличие быстрого режима возбуждения определялось концентрацией HCl, которая была разной для каждого буферного газа (рис. 5.36, б).

В аргоновой смеси она равнялась 3 торр, в гелиевой смеси – 0,8 торр и неоновой смеси – 2 торр. Концентрация HCl была критической для буферных газов неона и гелия. В аргоновых смесях она практически слабо влияла на энергию излучения, начиная с концентрации 3 торр. Были определены потери запасаемой энергии в элементах схемы накачки (табл. 5.3) в зависимости от емкостей $C_{об}$ и C_n , где L_k – индуктивность коммутатора, $W_{сн}$ – энергия, оставшаяся в C_n , W_p – энергия, оставшаяся в индуктивности разряда, W_r – энергия вкладываемая в разряд, $W_{сх}$ – остаток энергии в элементах схемы. Оказалось, что при короткой УФ-предыонизации в разряд вкладывалось не более 40 % энергии, запасаемой в накопительной емкости.

Таблица 5.3

Вкладываемая энергия и её потери в элементах схемы питания для плазменно-сетчатого электрода ХеСl-лазера с быстрым режимом возбуждения

№ п/п	Параметры элем. схемы	Ед. измерен.	Эксперименты		
			1	2	3
1	C_n	нФ	100	100	200
2	$C_{об}$	нФ	24	42	24
3	U_0	кВ	30	30	24
4	$W_{сн}$	Дж	45	45	57,5
5	W_r	Дж	13	18	16,5

№ п/п	Параметры элем. схемы	Ед. измерен.	Эксперименты		
			1	2	3
6	КПД (энергия разряда)	%	29	40	29
7	$W_{пл}$	Дж	2	3	2
8	W_k (PY-65)	Дж	3	6,5	2
9	W_{ex}	Дж	27	17,5	37
10	$W_{Lk} + W_{Ln}$	Дж	4	6,5	6,5
	W_{Lp}	Дж	3	4	1,5
	$W_{сн}$	Дж	20	7	29

Потери энергии были незначительны в коммутаторе и в плазменном электроде. Основная часть энергии, вкладываемой в разряд, оставалась в накопительной емкости. Оптимальным был режим (2) с минимальными потерями энергии в элементах схемы накачки при соотношении емкостей $C_n/C_{об} = 2$.

Выводы

1. Экспериментально показано, что в электродных конфигурациях (где один из электродов является источником УФ-предыонизации) при формировании изначально неоднородного разряда в смесях инертных газов с галогенами сопротивление плазмы в момент перехода от стадии формирования к квазистационарной может быть значительно ниже сопротивления плазмы однородного разряда.

2. Плазменный или два плазменных электрода могут быть стабилизирующими элементами самостоятельного разряда и обеспечивают квазистационарный режим его поддержания.

3. Сетчато-плазменный электрод обеспечивал интенсивную УФ-предыонизацию разрядного объема за счет формирования дополнительного пучка быстрых электронов в основном промежутке.

4. Впервые обнаружено, что схемы питания с «усилением поля» наиболее эффективны для образования эксимерных молекул на стадии

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

формирования разряда, а «без усиления поля» – в квазистационарной стадии разряда.

5. Показана возможность индуктивно-плазменной стабилизации объемных длинных разрядов за счет двухконтурных схем накачки с накопительно-распределенной емкостью или электрической линии с сосредоточенными параметрами в виде LC -звеньев.

6. Впервые экспериментально получены квазистационарные разряды для XeCl -лазера длительностью 1 мкс.

5.5.2. Самоподдерживающийся разряд в эксимерных смесях

Импульсные тлеющие разряды являются самостоятельными, когда образование электронов, обусловленное ударной ионизацией, уравновешивает исчезновение электронов вследствие их прилипания и рекомбинации. В большинстве случаев электроны являются также основными носителями тока, поскольку их подвижность значительно выше подвижности положительных и отрицательных ионов. Следовательно, электроны играют основную роль в разряде, поэтому теоретическое предсказание их транспортных свойств достаточно для того, чтобы описать поведение разряда. Для многих газовых смесей одноступенчатая ионизация и диссоциативное прилипание являются основными процессами для образования и исчезновения электронов соответственно. Уравнение непрерывности для электронов разряда можно записать в виде

$$\partial n_e / \partial t + \partial / \partial x (n_e W) = \alpha W n_e - a W n_e, \quad (5.30)$$

где n_e – плотность электронов; t – время; x – расстояние от катода, измеряемое в направлении приложенного однородного электрического поля; W – скорость дрейфа электронов; α и a – соответственно коэффициенты ионизации и прилипания электронов. В уравнении (5.30) предполагалось, что n_e пространственно-однородно в направлении, перпендикулярном приложенному электрическому полю. Из уравнения следует, что пространственно-однородный стационарный разряд может существовать для смесей $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ при $\alpha = a$ [27]. Экспериментально было обнаружено, что отношение напряженности электрического поля в разряде к плотности частиц E/N не зависит от плотности тока разряда. Действу-

ющее значение E/N было получено теоретически, путем численного решения уравнения Больцмана и нахождения распределения электронов по энергиям. Аналогичные зависимости были получены для лазерных эксимерных смесей в работе [17]. Следовательно, для каждой смеси имелось соотношение $(E/N)^*$, равное величине E/N , при котором $\alpha = a$.

На рис. 5.37 приведены расчетные коэффициенты ударной ионизации α/N и прилипания a/N в зависимости от E/N для газовых смесей CO_2 - и XeF -лазеров из работы [27].

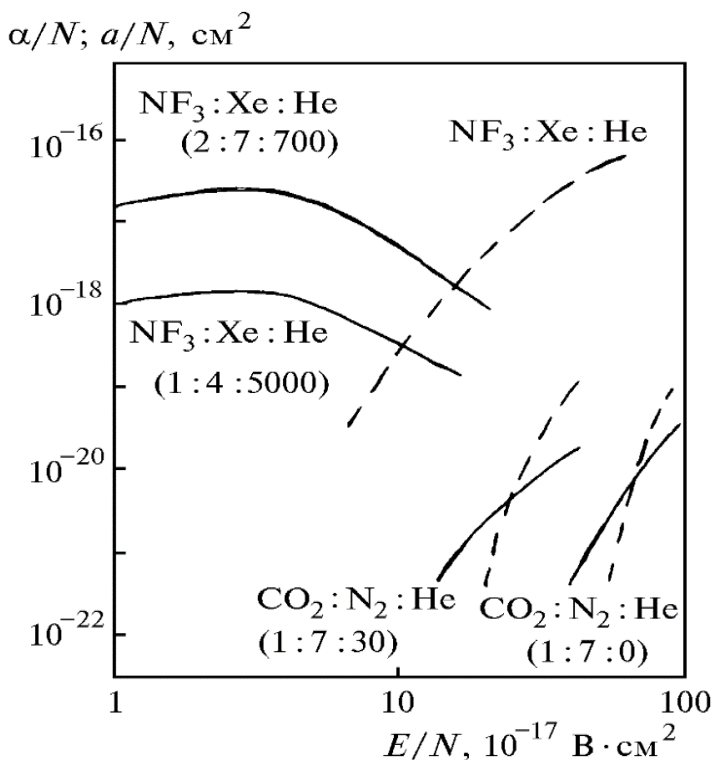


Рис. 5.37. Расчетные коэффициенты ударной ионизации α/N (штриховые линии) и прилипания a/N (сплошные линии) в зависимости от E/N для смесей CO_2 - и XeF -лазеров [27]

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

Коэффициенты для эксимерных смесей резко отличались от смесей CO_2 -лазера из-за электроотрицательного донора NF_3 . Кроме этого, авторы провели измерения и расчеты E/N в разряде от плотности разрядного тока для CO_2 - и XeF -лазеров (рис. 5.38). Для смесей CO_2 -лазера, действительно, $(E/N)^*$ не зависели от плотности разрядного тока, т. е. стационарное напряжение на плазме определялось лишь физическими процессами образования и гибели электронов в тлеющем разряде. Поэтому для CO_2 -лазера реализуется стационарный режим горения самостоятельного разряда длительностью до 10 мкс. Для него были характерны как постоянный ток разряда, так и концентрация электронов. Авторы считали также, что данный режим возможен для эксимерных молекул, в частности для XeF -лазера, т. е. постоянное напряжение на плазме не зависело от плотности тока разряда. Хотя при высокой плотности тока $100 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ наблюдалось отклонение $(E/N)^*$ на величину 10 %.

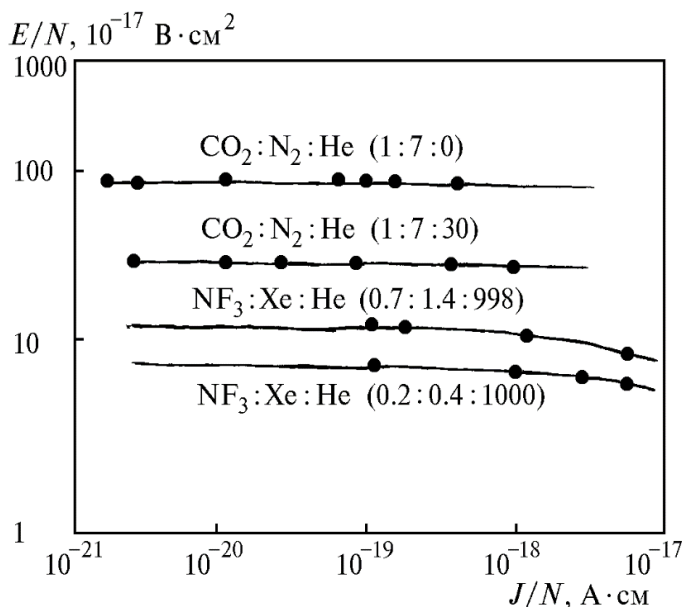


Рис. 5.38. Измеренные и расчетные вольт-амперные характеристики для CO_2 - и XeF -лазеров [27]

Авторы объясняли это тем, что в уравнении (5.30) не учитывалось два физических процесса, которые могут влиять на величину $(E/N)^*$ в газовых смесях $\text{NF}_3\text{:Xe:He}$. Первое – это выгорание NF_3 , а второе – двухступенчатая ионизация атомов Xe.

Если их учитывать, то теоретическое значение $(E/N)^*$ будет уменьшаться как при возрастании плотности тока, так и со временем в течение импульса разряда. Действительно, длинные объемные разряды до 1 мкс возможны в эксимерных смесях за счет использования электрических линий с LC -звеньями, стабилизирующих разрядный ток, которые нами ранее были получены в работе [65]. Однако следует учитывать принципиальное отличие в получении объемного разряда при квазистационарном напряжении на плазме и разрядным током от квазистационарного режима возбуждения и генерации, впервые нами полученного в работах [55, 66]. При квазистационарном режиме возбуждения разрядный ток имел нарастающий или апериодический характер, что обусловлено как кинетикой образования рабочих молекул по ионному каналу за счет буферных газов аргона или неона, так и электроотрицательностью донора HCl . В частном случае возможен квазистационарный импульс тока разряда, но тогда уменьшалась длительность импульса генерации, которая зависела от мощности накачки [215].

На рис. 5.39 даны общие характеристики напряжения на плазме, разрядного тока, плотности электронов и импульса генерации в зависимости от времени для самоподдерживающегося самостоятельного разряда в эксимерных смесях, где I – стадия формирования разряда, II – квазистационарная стадия разряда, III – окончание разряда, ρ – коэффициент отражения выходного зеркала. Образование искры в разряде возможно как в стадии его формирования (режим быстрой накачки), так и в квазистационарной стадии (квазистационарный режим накачки). Следовательно, для квазистационарного режима разряда должно выполняться условие $(E/N)^* \neq f(J)$. Для квазистационарного режима возбуждения, кроме данного условия, должно выполняться второе условие: разрядный ток должен быть нарастающим или апериодическим, а это возможно лишь при условии роста концентрации электронов за счет УФ-предыонизации.

5. Экимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

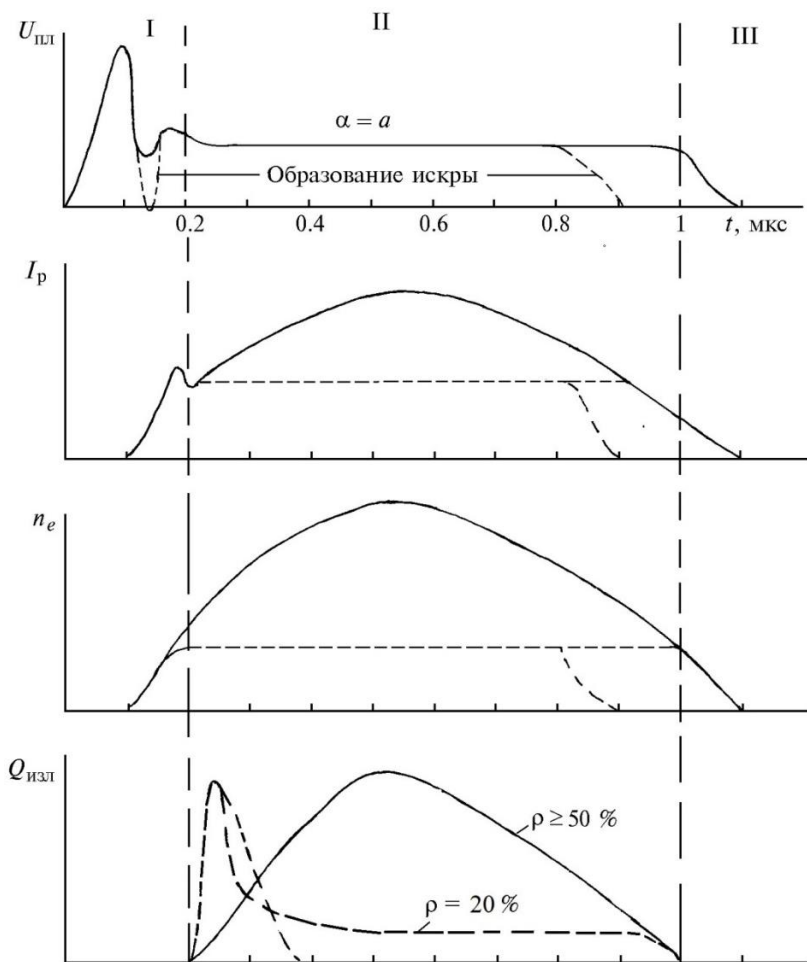


Рис. 5.39. Общие характеристики напряжения на плазме, разрядного тока, плотности электронов и импульса генерации в зависимости от времени существования самоподдерживающегося самостоятельного разряда в эксимерных смесях

Автоматически данные условия могут выполняться в 2- и 3-контурных схемах накачки [65, 53] или в независимых 2-контурных схемах

[37, 155, 182], когда второй контур играл роль генератора тока для постоянного напряжения на плазме. Для 2-контурных схем накачки могут существовать условия, при которых ток разряда контролировался концентрацией электронов от автоматического источника УФ-предыонизации за счет выбора параметров схемы. Поэтому данный способ реализации квазистационарного режима возбуждения эксимерных молекул можно назвать как «самоподдерживающийся самостоятельный разряд» возбуждения. На рис. 5.39 приведены три возможных длительности импульсов генерации: 1 – быстрый режим возбуждения при излучении не более 100 нс, 2 – квазистационарный режим возбуждения и генерации при $\rho \leq 20\%$, 3 – квазистационарный режим возбуждения при $\rho \geq 50\%$. Таким образом, для квазистационарного режима возбуждения должно выполняться основное условие – постоянное напряжение на плазме, не зависящее от плотности разрядного тока. В научной литературе используется неоднозначная терминология квазистационарного режима возбуждения и генерации. Так, ряд авторов называют его как «режим длинных оптических импульсов» [155], «эффективная накачка с предимпульсом» [37], «нестационарный режим накачки» [203] или «электроразрядный XeCl-лазер с импульсом генерации длительностью 500 нс» [181]. Поэтому ниже приведена временная эволюция развития данного режима возбуждения независимо от источников УФ-предыонизации и схем накачки для XeCl-лазера.

5.6. Историческая справка

В 1977 г. нами впервые наблюдались объемные разряды в смесях He:Xe:CCl₄ длительностью до 200 нс с квазистационарной стадией напряжения на промежутке в трехконтурной схеме накачки с искровой УФ-предыонизацией [47].

В 1978 г. в данной схеме возбуждения нами детально исследовался объемный разряд в смесях Ar(He):Xe:CCl₄ в зависимости от концентрации буферного газа и CCl₄ [48]. В аргоновых смесях объемный разряд достигал 200 нс, а в гелиевых – до 400 нс. Авторы работы [146], используя в KrF-лазере X-предыонизацию длительностью 1,5 мкс для возбуждения формирующей водяной линии, впервые наблюдали объемный

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

разряд до 100 нс. Они отмечали непонятный факт самоподдерживающегося разряда в эксимерных смесях.

В 1979 г. нами были исследованы параметры двухконтурной схемы накачки с коронной УФ-предыонизацией для ХеСl-лазера [52]. Были определены оптимальные соотношения газовых компонентов для газовых смесей (Не)Хе:ССl₄ = 10:1 и удельные энергии, вкладываемые в газовые смеси $W_r = 100 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ при соотношении $C_H/C_{об} = 5$. На основании анализа осциллограмм разрядного тока и напряжения на промежутке были обнаружены две характерных стадии разряда: 1 – быстрая стадия, 2 – квазистационарная. Оказалось, что длительность квазистационарной стадии разряда зависела от величины накопительной емкости.

В 1980 г. авторы работы [176] в активном объеме 0,3 л в газовых смесях Не(Не):Хе:НСl при возбуждении водяной линии с искровой УФ-предыонизацией наблюдали квазистационарные импульсы напряжения на плазме и импульсы излучения длительностью 80 нс. Авторы работы [170], используя резистивную стабилизацию разряда, в газовых смесях Не:Хе:НСl наблюдали квазистационарные импульсы генерации длительностью 120 нс.

В 1981 г. нами впервые был обоснован и реализован квазистационарный режим возбуждения и генерации в газовых смесях Не(Не):Хе:НСl с плазменной УФ-предыонизацией. Была получена энергия излучения 0,5 Дж с КПД лазера 1,4 % и длительностью импульса излучения более 250 нс [55, 66]. Авторы работы [206], используя водяную формирующую линию с Х-предыонизацией, получили для активного объема 1 л с буферным газом неоном энергию излучения 3,2 Дж с импульсом генерации длительностью 200 нс для вкладываемых энергий от 100 до 400 $\text{Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$. Авторы работы [207], применяя кабельную формирующую линию длительностью 500 нс с резистивной стабилизацией разряда, при мощности накачки 270 $\text{кВт} \cdot \text{см}^{-3}$ получили импульсы генерации до 400 нс с энергией 0,01 Дж. В данном случае наблюдалось как квазистационарное напряжение на плазме, так и квазистационарный ток разряда для $\rho = 96 \%$.

В 1982 г. нами были детально исследованы как квазистационарный режим получения объемного разряда, так и квазистационарный режим возбуждения и генерации в зависимости от буферных газов аргона,

неона, гелия и их смесей He:Ar, He:Ne и параметров элементов двухконтурных схем накачки, а также от величины активного объема и типа накопителя энергии (емкостные накопители или искусственные электрические линии в виде LC -звеньев) [53, 65]. На основании этих исследований, во-первых, была предложена качественная модель электрического разряда в галогенидах благородных газов (ГБГ) на основе процессов ступенчатой ионизации атомов благородных газов и прилипания электронов к молекулам галогенов; во-вторых, показана стабилизирующая роль индуктивности накопительного контура; в-третьих, при использовании многозвенных LC -линий возбуждения были получены объемные квазистационарные разряды длительностью до 1 мкс.

Авторы работы [150], используя двухконтурную схему накачки при соотношении $C_{\text{н}}/C_{\text{об}} = 10$ и уменьшив плотность тока разряда (за счет увеличения ширины электродов и ввода дополнительных индуктивностей в цепь основного разряда) с автоматической коронной УФ-предыонизацией, получили импульсы генерации до 120 нс. Квазистационарный режим возбуждения они назвали «длинноимпульсный лазер с индуктивной стабилизацией».

Авторы работы [27], анализируя самостоятельный разряд в CO_2 и эксимерных лазерах, пришли к выводу о возможности получения стационарных разрядов в эксимерных смесях на основе теоретических расчетов, соответственно более коротких, чем для CO_2 -лазеров. Оставался лишь открытым вопрос их длительности, т. е. квазистационарности стадии разряда. Для CO_2 -лазеров были получены длительности импульсов генерации в стационарной стадии разряда до 10 мкс. Нами для эксимерных смесей впервые были получены объемные разряды длительностью до 1 мкс. Режим был назван нами «квазистационарный», при этом ток разряда мог быть квазистационарным (ограниченным) или нарастающим.

Авторы работы [216] получили энергию излучения 5 Дж с длительностью импульса генерации 100 нс в активном объеме $5 \cdot 4,5 \cdot 50 \text{ см}^3$, используя водяную линию возбуждения с искровой УФ-предыонизацией в газовых смесях Ne:Xe:HCl. Измерения усиления лазерного излучения в гелиевых смесях показали, что поглощение в гелиевых смесях в 10 раз выше, чем в неоновых. Авторы встали перед проблемой дальнейшего увеличения энергии и длительности импульсов излучения, т. к. временной предел водяных линий возбуждения ограничен длительностью

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

200 нс из-за технических трудностей их реализации [206], поэтому они перешли на линии из керамических конденсаторов с использованием обострительного контура возбуждения, т. е. к реализации квазистационарного режима накачки.

В 1983 г. авторы работы [37], используя впервые два независимых контура возбуждения на водяных линиях (2НК) и Х-предыонизацию в газовой смеси $\text{Ne}:\text{Xe}:\text{HCl}$ с активным объемом 1,2 л, получили квазистационарный режим возбуждения с энергией излучения 4,2 Дж и длительностью импульса генерации 200 нс. Авторы работы [203] в двухконтурной схеме возбуждения с плазменными электродами реализовали квазистационарный режим генерации длительностью 1 мкс с энергией 0,05 Дж.

В 1984 г. нами в работе [152] и авторами работы [153] была предложена схема накачки 2НК, в которой роль основного разрядника выполнял магнитный ключ (MSC). В нашем случае искровые источники обеспечивали УФ-предыонизацию, во втором случае использовался в качестве источника УФ-предыонизации KrF -лазер. Авторы назвали схему накачки как «магнитно-индуцируемое импульсно-лазерное возбуждение» (MIPLE). Авторы работы [179] в двухконтурной схеме накачки с искровой УФ-предыонизацией при $C_n \cong C_{\text{об}}$ реализовали как быстрый режим возбуждения с энергией излучения 0,68 Дж, КПД = 1,8 % при длительности импульса генерации 40 нс, так и квазистационарный с энергией 0,28 Дж, КПД = 2,9 % и длительностью импульса генерации 80 нс. Указывалось, что высокий КПД лазера обеспечивался за счет второго квазистационарного импульса генерации, на который приходилось 25 % энергии излучения.

В 1985 г. авторы работы [217] в схеме 2НК/MSC при использовании накопительной емкости до 6 мкФ и источник УФ-предыонизации от KrF -лазера в газовых смесях $\text{Ne}:\text{Xe}:\text{HCl}$ с выходными зеркалами отражения $\rho = 66; 90; 99$ % получили длительности генерации 1,5; 1,6; 2 мкс с энергией излучения 0,4; 0,1 Дж; 5 мДж соответственно. Авторы работы [218], применяя в качестве накопительной емкости водяную формирующую линию длительностью 390 нс, а в качестве обострительной передающую водяную линию с Х-предыонизацией, получили импульсы генерации длительностью 300 нс с энергией 1 Дж. Аналогичные результаты были получены авторами [73] с Х-предыонизацией и формирующей линией на конденсаторах.

В 1986 г. нами были получены импульсы генерации длительно-стью 170 нс с энергией 0,5 Дж и КПД, равным 1,6 %, в газовых смесях Ne:Xe:HCl за счет индуктивно-искровой стабилизации разряда [56, 57].

В 1987 г. авторы работы [219], используя в качестве накопитель-ной емкости двойной водяной генератор Блюмляйна и обострительной водяную передающую линию с X-предыонизацией в активном объеме 22 л, получили энергию излучения 66 Дж с длительностью импульса генерации 250 нс. Было показано, что скорость нарастания разрядного тока зависела от индуктивностей обострительной емкости, разряда и лазерной камеры.

В 1988 г. авторы работы [155], применяя 2НК/МСС и коронную УФ-предыонизацию с накопительной емкостью 500 нФ или формиру-ющей емкостной линией в газовых смесях Ne:Xe:HCl с $\rho = 75\text{--}90\%$, получили энергию излучения 0,1–0,5 Дж с длительностью импульса ге-нерации от 0,8 до 1,4 мкс при КПД лазера от 0,4 до 1,5 %.

В 1989 г. нами в работе [75] был исследован квазистационарный разряд в зависимости от типа плазменной УФ-предыонизации в режи-мах с «усилением» и «без усиления» поля. Обнаружено, что в режиме «без усиления» поля независимо от типа источника плазменной УФ-предыонизации реализовался квазистационарный режим разряда. Ав-торы работы [182], используя 2НК/МСС с искровой УФ-предыони-зацией в активном объеме $3 \cdot 3 \cdot 60 \text{ см}^3$ в газовых смесях Ne:Xe:HCl при $C_n = 450 \text{ нФ}$, получили импульсы генерации длительно-стью 275 нс с энергией 1 Дж и КПД лазера 2,2 %. Авторы утверждали, что второй контур возбуждения играет роль генератора тока.

Следовательно, во всех перечисленных работах был показан ква-зистационарный режим возбуждения и генерации независимо от при-меняемых схем накачки и типов источников УФ-предыонизации. По-лучена максимальная энергия излучения 66 Дж с длительностью им-пульса генерации 2 мкс и КПД 2,2 %. Для наглядности основные работы по квазистационарному режиму возбуждения с различными ис-точниками предыонизации и схемами накачки приведены в табл. 5.4. Максимальные параметры излучения в таблице: энергия излучения – 66 Дж для $V = 22 \text{ л}$ [219]; $Q_{\text{уд}} - 1,25 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ [53, 67–69]; $\tau - 2 \text{ мкс}$ [217] и КПД лазера – 2,2 % [182].

Таблица 5.4

Квазистационарный режим возбуждения ХеСl-лазера
с разными источниками УФ-предыонизации

№ п/п	Схемы накачки	УФ _{пр}	ρ, %	V, л	$Q_{изл},$ Дж	$Q_{уд},$ $\frac{Дж}{л \cdot атм}$	$\tau_{h2},$ нс	$\tau_{осн},$ нс	КПД, %	Литер.
1	C ₁ /C ₂ /C ₃ + УФ	Искр.	10	0,3	0,02	0,06	40	170	–	[47]
2					$\tau_p = 200$ нс (Ar) $\tau_p = 400$ нс (He)				–	[48]
3	2PFL/PP	X	–	–	2	–	–	100	–	[146]
4	C _н /C _{о6} /УФ	Кор.	8	0,01	0,008	0,46	20	50	0,4	[52]
5	B _н /C _{о6} + R _{ст}	Искр.	90	0,06	0,015	0,1	60	120	–	[170]
6	C _н /C _{о6} + 2пл	Пл.	8–40	0,1–0,4	0,55	0,7	70	250	1,4	[55, 66]
7	PFL/PP	X	17	1	3,2	1	150	200	–	[206]
8	PFL + R _{ст}	Искр.	96	0,02	0,01	0,14	250	400	–	[207]
9	C _н ; C _н /C _{о6} + 2пл	Пл.	–	0,1	Квазистационарный разряд 1 мкс				–	[65]
10	C _н /C _{о6} + УФ	Кор. Искр. Пл.	8–40	0,4	0,55	1,25	70	400	1,4	[53, 67–69]
11	C _н /C _{о6} /L _{ст}	Кор.	60	0,003	0,0017	0,25	60	120	0,6	[150]
12	PFL/PP/УФ	Искр.	Теоретическое обоснование стационарного разряда							[26]
13	PFL/PP	Искр.	30–50	1	5	1	70	100	–	[216]
14	2НК/PP	X	–	1,2	4,2	0,9	120	200	–	[37]

Импульсные газовые УФ-лазеры

Окончание табл. 5.4

№ п/п	Схемы накачки	УФ _{пр}	ρ, %	V, л	$Q_{изл},$ Дж	$Q_{уд},$ $\frac{Дж}{л \cdot атм}$	$\tau_{h2},$ нс	$\tau_{осн},$ нс	КПД, %	Литер.	
15	$C_{н}/C_{о6} + 2пл$	пл	60	0,12	0,05	0,4	100	1000	0,4	[203]	
16	2НК/MSC	Искр. К _г F	Магнитный ключ								[152, 153]
17	$C_{н} + УФ/C_{о6}$ $C_{н} = C_{о6}$	Искр.	10	0,12	0,28 0,68	0,6 1	20 20	80 40	2,9 1,8	[179]	
18	2НК/MSC	К _г F	66 99	0,26	0,4 0,005	0,38 0,02	400 1500	1500 2000	–	[217]	
19	PFL/PP/PTL	X	8 80	1	1 0,3	0,3 0,1	250 265	300 300	–	[218]	
20	PFL(c)/PP/ PTL(c)	X	7	0,72	1,75	0,8	160	300	–	[73]	
21	$C_{н} + УФ/C_{о6} + L_{ст}$	Искр.	10	0,18	0,5	0,75	15	170	1,6	[56, 57]	
22	2Б _н /PP/PTL	X	10	22	66	0,6	180	250	–	[219]	
23	2НК/MSC	Кор.	75 90	0,5	0,5 0,1	0,3 0,1	500 1000	800 1400	1,5 0,4	[155]	
24	2НК/MSC	Искр.	–	0,5	1	–	200	275	2,2	[182]	
25	$C_{н}/C_{о6} + пл$	с-пл 2пл	–	0,1	Режимы с усилением и без усиления поля					[75]	

5. Эксимерные лазеры с плазменными источниками УФ-предыонизации

Таким образом, можно сформулировать общие требования, необходимые для реализации квазистационарного режима возбуждения ХеСl-лазера (* – дополнительные условия, увеличивающие эффективность данного режима накачки) [221]:

1. Формирование 2- и 3-кратного перенапряжения на разрядном промежутке за времена ≤ 100 нс.

2. Формирование быстрой стадии разряда за времена ≤ 100 нс при плотности мощности накачки $P_n \geq 1$ МВт·см⁻³.

3. Поддержание квазистационарной стадии разряда длительно-стью более 100 нс при плотности мощности накачки $P_n \leq 0,2$ МВт·см⁻³.

4. Плотность разрядного тока должна быть ≤ 200 А·см⁻² в зависимости от выбора буферного газа.

5*. Желательно обеспечивать апериодический характер разрядного тока.

6*. Желательно иметь равномерную УФ-предыонизацию длительно-стью не менее длительности, ожидаемой квазистационарной стадией разряда.

7*. Желательно обеспечивать коэффициент отражения выходного зеркала ≥ 50 %.

Выводы

1. Сделан анализ работ по квазистационарному режиму возбуждения (независимо от типов источников накачки и источников УФ-предыонизации), обеспечивающему длинные оптические импульсы генерации для ХеСl-лазера.

2. Сформированы общие требования для ХеСl-лазера, позволяющие получать длинные оптические импульсы генерации независимо от буферной среды, источников накачки и УФ-предыонизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии приведены результаты исследований особенностей формирования объемных самостоятельных разрядов большой длительности для активных лазерных сред высокого давления с различными буферными газами, а также их режимы ввода энергии накачки для азотных и эксимерных лазеров с источниками УФ-предыонизации (коронной, искровой и плазменной), которые позволили получить новые физические результаты.

1. Проведены исследования самостоятельных разрядов с автоматической УФ-предыонизацией (коронной, искровой и плазменной) для ХеСl-лазера с галогенидами CCl_4 , CHCl_3 , HCl и буферными газами Ar , He , Ne и Ar:He , Ne:He , позволившие определить удельные энергоклады и временные условия существования объемных разрядов:

- в лазерах с коронной УФ-предыонизацией длительность разрядов достигала 100 нс в гелиевых смесях при давлениях ≤ 4 атм с удельной энергией до $200 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$, а в аргоновых смесях – при давлениях ≤ 2 атм с удельной энергией до $300 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$;

- в лазерах с искровой УФ-предыонизацией длительность разрядов в гелиевых смесях увеличивалась до 400 нс, в аргоновых смесях – до 200 нс и в неоновых смесях – до 300 нс;

- в лазерах с плазменной УФ-предыонизацией была получена длительность разрядов в гелиевых смесях до 1 мкс, в аргоновых смесях – до 300 нс и в неоновых смесях – до 500 нс.

2. Обнаружен и исследован новый способ формирования объемного разряда в чистых газах Ar , Xe , Kr и смесях Ar:Xe:HCl между металлическим электродом и электродом, образованным поверхностной плазмой, служившим источником УФ-излучения. Разработан и реализован плазменный электрод с коронным разрядом для ХеСl- и ХеF-лазеров, с использованием которого при замене буферного газа гелия на аргон или Ar:He энергия излучения повышалась в 1,5 и 2 раза соответственно.

3. Предложен и реализован плазменный способ стабилизации объемного разряда за счет двухконтурных схем питания с накопителем в виде распределенной емкости или электрической линии с сосредоточенными параметрами в виде LC -звеньев. Электрическая линия с сосре-

доточенными параметрами позволила получить квазистационарные разряды с длительностью импульсов возбуждения до 1 мкс.

4. В ХеСl-лазере замена буферного газа гелия на аргон при оптимизации условий накачки позволила увеличить энергию излучения этого лазера в 1,5 раза и получить одновременную генерацию на УФ- и ИК-переходах молекул ХеСl* и атомов Хе. Вклад ИК-излучения в полную энергию генерации составлял до 30 %. Увеличение энергии излучения вследствие замены буферного газа аргоном можно объяснить более эффективным образованием эксимерных молекул по ионному каналу.

5. Проведены исследования параметров излучения ХеСl-, ХеF- и КгF-лазеров с автоматической УФ-предыонизацией и буферными газами Ar, He, Ne и Ar:He при использовании быстрого режима возбуждения с длительностью импульсов накачки до 50 нс. С плазменной УФ-предыонизацией добавка аргона порядка 1 % в буферный газ гелий для перечисленных лазеров обеспечивала увеличение энергии их излучения на 20 % по сравнению с активными средами на основе буферного газа гелия.

6. Проведены исследования параметров излучения ХеСl-лазера с автоматической УФ-предыонизацией и буферными газами Ar, He, Ne и Ar:He, Ne:He для квазистационарного режима возбуждения с длительностью импульсов накачки до 500 нс:

– предложен и экспериментально исследован квазистационарный режим возбуждения и генерации для ХеСl-лазера самоподдерживающимся самостоятельным разрядом. Показано, что данный режим зависит как от длительности объемной стадии разряда, определяемой концентрацией галогенсодержащего газа и сорта буферного газа, так и от мощности накачки активной среды. В быстрой стадии разряда мощность накачки должна быть ≥ 1 МВт/см³, а в квазистационарной $\leq 0,2$ МВт/см³ при плотностях разрядного тока для буферного газа неона ≤ 100 А/см², а для гелия ≤ 200 А/см²;

– исследовано влияние длительности и интенсивности УФ-предыонизации в эксимерных лазерах. Показано, что лучшие результаты достигаются в условиях, когда предыонизация действует в течение всего времени существования разряда. В схемах возбуждения вне зависимости от того, куда включен источник УФ-предыонизации: в предимпульсный или основной контур питания, реализуется как быстрый, так

и квазистационарный режим возбуждения активной среды. При этом длительность возбуждения зависит от длительности УФ-предыонизации и параметров накачки;

– сформулированы общие требования для получения квазистационарного режима возбуждения и генерации ХеСl-лазера для любого буферного газа и различных схем возбуждения и типов УФ-предыонизации;

– впервые в ХеСl-лазере с плазменной УФ-предыонизацией получена генерация с энергией 0,5 Дж, длительностью импульсов более 250 нс и удельной энергией излучения 1,25 Дж/л·атм при КПД 1,4 %. В лазере с искровой УФ-предыонизацией при энергии генерации 0,5 Дж длительность импульсов достигала 170 нс с удельной энергией излучения 0,75 Дж/л·атм и КПД 1,6 %;

– максимальная длительность импульсов генерации ХеСl-лазера была получена при использовании буферного газа аргона – 150 нс, гелия – 220 нс и неона – 400 нс.

7. Проведены исследования параметров излучения ХеСl-лазера с буферными газами Ar, He и Ne при возбуждении продольным разрядом с искровой УФ-предыонизацией. Впервые получена генерация в активной среде Хе:НСl без буферного газа с удельной энергией излучения 1,5 Дж/л·атм. При добавлении буферных газов Ne, Ar, He удельная генерация составляла 0,9, 1,1 и 1,8 Дж/л·атм соответственно.

8. Предложен и экспериментально реализован способ управления параметрами импульсов излучения азотных лазеров за счет применения квазистационарного режима возбуждения активной среды.

9. По результатам исследований создана серия азотных эксимерных лазеров с различным уровнем мощности и энергии излучения.

10. Разработаны малогабаритные и миниатюрные источники УФ-излучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Heard, H.G.* Nature / H.G. Heard. – London, 1963. – V. 200. – P. 667.
2. *Golde, M.F.* Vacuum UV emission from reactions of metastable inert gas atoms: chemiluminescence of ArO and ArCl / M.F. Golde, B.A. Thrush // Chem. Phys. Lett. – 1974. – V. 29. – № 4. – P. 486–490.
3. *Velazco, J.E.* Bound-free emission spectra of diatomic xenon halides / J.E. Velazco, D.W. Setser // J. Chem. Phys. – 1975. – V. 62. – № 5. – P. 1990–1991.
4. *Searles, S.K.* Stimulated emission at 281.8 nm from XeBr / S.K. Searles, G.A. Hart // Appl. Phys. Lett. – 1975. – V. 27. – № 4. – P. 243–245.
5. *Ewing, J.J.* Emission spectrum of XeI in electron-beam-excited Xe/I₂ mixtures / J.J. Ewing, C.A. Brau // Phys. Rev. A. – 1975. – V. 12. – № 1. – P. 129–132.
6. *Brau, C.A.* Emission spectra of XeBr, XeCl, XeF and KrF / C.A. Brau, Ewing J.J. // J. Chem. Phys. 1975. V. 63. N 11. P. 4640–4647.
7. *Burnham, R.* Xenon fluoride excitation by transverse electric discharge / R. Burnham, N.W. Harris, N. Djeu // Appl. Phys. Lett. – 1976. – V. 28. – № 2. – P. 86–87.
8. *Burnham, R.* Ultraviolet-preionized discharge pumped lasers in XeF, KrF and ArF / R. Burnham, N. Djeu // Appl. Phys. Lett. – 1976. – V. 29. – № 11. – P. 707–709.
9. *Ищенко, В.Н.* Мощная сверхсвечимость эксимеров ArF, KrF, XeF в электрическом разряде / В.Н. Ищенко, В.Н. Лисицын, А.М. Ражев // Письма в ЖТФ. – 1976. – Т. 2. – В. 18. – С. 839–842.
10. *Wang, C.P.* Fast discharge initiated XeF laser / C.P. Wang, H. Mirels, D.G. Sutton // Appl. Phys. Lett. – 1976. – V. 28. – № 6. – P. 326–328.
11. *Godard, B.* Compact efficient discharge lasers in XeF, KrF and fluorine / B. Godard, M. Vanniere // Opt. Commun. – 1976. – V. 18. – № 2. – P. 206–207.
12. *Кудрявцев, Ю.А.* Эксимерные ультрафиолетовые газоразрядные XeF-, XeCl-, KrF-лазеры / Ю.А. Кудрявцев, Н.П. Кузьмина // Квантовая электроника. – 1977. – Т. 4. – № 1. – С. 220–222.
13. *Ishchenko, V.N.* Efficient discharge pumping XeCl laser / V.N. Ishchenko, V.N. Lisitsyn, A.M. Razhev // Opt. Commun. – 1977. – V. 21. – № 1. – P. 30–32.
14. *Bartlett, N.* The chemistry of krypton, xenon and carbon in comprehensive inorganic chemistry / N. Bartlett, F.U. Sladky // Ed. by J. Bailar. – London : Pergamon, 1975.

15. *Елецкий, А.В.* Экимерные лазеры / А.В. Елецкий // УФН. – 1978. – Т. 125. – В. 2. – С. 279–314.
16. *Rothe, D.E.* Analysis of spark-preionized large volume XeF and KrF discharge laser / D.E. Rothe, R.A. Gibson // Opt. Commun. – 1977. – V. 22. – № 3. – P. 265–268.
17. *Greene, A.E.* Theoretical studies of UV-preionized transverse discharge KrF and ArF lasers / A.E. Greene, Ch.A. Brau // IEEE J. Quant. Electr. – 1978. – V. QE-14. – № 12. – P. 951–957.
18. *Кудрявцев, Ю.А.* Экимерные лазеры / Ю.А. Кудрявцев // Зарубежная радиоэлектроника. – 1978. № 4. – С. 106–122.
19. *Watanabe, S.* Small signal gain measurement of KrF and XeF laser amplifiers / S. Watanabe, T. Sato, H. Kashinagi // Opt. Commun. – 1977. – V. 22. – № 2. – P. 143–146.
20. *Sze, R.C.* Intense lasing in discharge excited noble-gas monochords / R.C. Sze, P.B. Scott // Appl. Phys. Lett. – 1978. – V. 33. – № 5. – P. 419–421.
21. *Леб, Л.* Основные процессы электрических разрядов в газах : пер. с англ. / Л. Леб. – Москва : Гостехиздат, 1950. – 485 с.
22. *Вуд, О.Р.* Импульсные молекулярные лазеры высокого давления / О.Р. Вуд // ТИИЭР. – 1974. – Т. 62. – № 3. – С. 83–134.
23. *Von Bergmann, H.M.* Pulsed corona excitation of high-power UV nitrogen lasers at pressures of 0–3 bar / H.M. Von Bergmann, V. Hasson, D. Preussler // Appl. Phys. Lett. – 1975. – V. 27. – P. 553.
24. *Елецкий, А.В.* Оптимальные характеристики лазера на парах металлов высокого давления / А.В. Елецкий, Ю.К. Земцов, А.В. Родин // ДАН СССР. – 1975. – Т. 220. – № 2. – С. 318–321.
25. *Sze, R.S.* 0.25 J discharge pumped KrF laser / R.S. Sze, P.B. Scott // Rev. Sci. Instrum. – 1978. – V. 49. – № 6. – P. 772–774.
26. *Роудз, Ч.* Экимерные лазеры / Ч. Роудз. – Москва : Мир, 1981. – 287 с.
27. *Мак-Даниэль, И.* Газовые лазеры / И. Мак-Даниэль, У. Нигэн. – Москва : Мир, 1986. – 548 с.
28. *Баранов, В.Ю.* Электроразрядные экимерные лазеры на галогенидах инертных газов / В.Ю. Баранов, В.М. Борисов, Ю.Ю. Степанов. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 216 с.
29. *Месяц, Г.А.* Импульсные газовые лазеры / Г.А. Месяц, В.В. Осипов, В.Ф. Тарасенко. – Москва : Наука, 1991. – 272 с.
30. *Godard, B.* A simple high-power large-efficiency N₂ ultraviolet laser / B. Godard // IEEE J. Quantum Electron. – 1974. – V. QE-10. – № 2. – P. 147–152.

Библиографический список

31. *Leonard, D.A.* Saturation of the molecular nitrogen second positive laser transition / D.A. Leonard // Appl. Phys. Lett. – 1965. – V. 7. – P. 4–6.
32. *Burnham, R.* Efficient electric discharge lasers in XeF and KrF / R. Burnham, F.X. Powell, N. Djeu // Appl. Phys. Lett. – 1976. – V. 29. – № 1. – P. 30–32.
33. *Характеристики мощного азотного лазера* / В.Ф. Тарасенко, Ю.И. Бычков, В.Ф. Лосев, А.И. Федоров // Квантовая электроника. – 1973. – № 3 (15). – С. 103–105.
34. *Ванг, Ч.П.* Лазеры на галогенидах благородных газов / Ч.П. Ванг // Квантовая электроника. – 1978. – Т. 5. – № 8. – С. 1771–1774.
35. *Сидоров, Ю.Л.* Схема питания и динамические характеристики разряда в азотном лазере / Ю.Л. Сидоров, А.Н. Суханов // Квантовая электроника. – 1978. – Т. 5. – № 3. – С. 580–589.
36. *Тарасенко, В.Ф.* Влияние геометрии лазерной камеры на мощность излучения лазера на азоте / В.Ф. Тарасенко, А.И. Федоров // Квант. электр. – 1974. – Т. 1. – № 1. – С. 200–203.
37. *Long, W.H.* Efficient discharge pumping of XeCl laser using a high-voltage prepulse / W.H. Long, M.J. Plummer, E.A. Stappaerts // Appl. Phys. Lett. – 1983. – V. 43. – № 8. – P. 735–737.
38. *Geller, M.* Some considerations in the design of a high power, pulsed N₂ laser / M. Geller, D.E. Altman, T.A. Detemple // Appl. Optics. – 1968. – V. 7. – № 11. – P. 2232–2237.
39. *Oliveira B. dos Santos.* A 3% efficiency N₂ laser / B. dos Santos Oliveira, C.E. Fellows, J.B. Oliveira // Appl. Phys. B. – 1986. – V. 41. – P. 241–244.
40. *Тарасенко, В.Ф.* Мощный азотный лазер / В.Ф. Тарасенко, А.И. Федоров, Ю.И. Бычков // Квантовая электроника. – 1974. – Т. 1. – № 5. – С. 1226–1227.
41. *Азотный импульсный лазер АИЛ-1* / Ю.И. Бычков, Ф.Я. Загулов, А.Ф. Кутелев [и др.] // Квантовая электроника. – 1974. – Т. 1. – № 9. – С. 2102.
42. *Лосев, В.Ф.* Генератор накачки для лазеров с поперечным возбуждением / В.Ф. Лосев, В.Ф. Тарасенко, А.И. Федоров // ПТЭ. – 1976. – № 5. – С. 213–214.
43. *Возбуждение генерации на органических молекулах излучением эксимерных лазеров* / Т.Н. Копылова, В.В. Грузинский, В.И. Данилова [и др.] // ЖПС. – 1979. – Т. XXX. – В. 5. – С. 803–811.
44. *Электроразрядные эксимерные лазеры* / Ю.И. Бычков, М.Н. Костин, В.Ф. Тарасенко, А.И. Федоров // Квантовая электроника. – 1978. – Т. 5. – № 5. – С. 1164–1166.

45. *Костин, М.Н.* Системы возбуждения электроразрядных эксимерных лазеров / М.Н. Костин, В.Ф. Тарасенко, А.И. Федоров // ПТЭ. – 1980. – № 1. – С. 218–219.
46. *Лазеры на галогенидах благородных газов* / Ю.И. Бычков, И.Н. Коналов, В.Ф. Лосев [и др.] // Лазерные системы. – Новосибирск : Наука, 1980. – С. 29–47.
47. *Федоров, А.И.* Электроразрядный лазер на смеси $\text{Ar}:\text{Xe}:\text{CCl}_4$ / А.И. Федоров, В.Ф. Тарасенко, Ю.И. Бычков // Письма в ЖТФ. – 1978. – Т. 4. – В. 3. – С. 132–135.
48. *Тарасенко, В.Ф.* ХеСl-лазер, возбуждаемый разрядом с интенсивной предионизацией / В.Ф. Тарасенко, В.А. Тельнов, А.И. Федоров // Известия вузов. Физика. – 1979. – № 6. – С. 91–93.
49. *Мощный лазер на смеси $\text{Ar}:\text{Xe}:\text{CCl}_4$* / Ю.И. Бычков, Г.А. Месяц, В.Ф. Тарасенко, А.И. Федоров // Тез. докл. 9-й Всесоюзной конференции по когерентной и нелинейной оптике (КиНо-78). Ч. 1. – Ленинград, 1978. – С. 22–23.
50. *Характеристики мощного ХеСl-лазера* / Ю.И. Бычков, Г.А. Месяц, В.Ф. Тарасенко, А.И. Федоров // Тез. докл. 8-й Международная конференции по квантовой и нелинейной оптике. – Познань, 1978. – С. 154–157.
51. *Бычков, Ю.И.* Эффективность электроразрядного ХеСl-лазера / Ю.И. Бычков, В.Ф. Тарасенко, А.И. Федоров // Материалы 9-й конференции по квантовой электронике и нелинейной оптике. – Познань, 1980. – А-171. – С. 407–408.
52. *Тарасенко, В.Ф.* Характеристики электроразрядного ХеСl-лазера / В.Ф. Тарасенко, А.И. Федоров // Известия вузов. Физика. – 1981. – № 2. – С. 15–19.
53. *Федоров, А.И.* Эксимерные лазеры на молекулах XeCl^* и XeF^* , возбуждаемые самостоятельным разрядом : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Федоров Анатолий Игнатьевич. – Томск : ИСЭ СО АН СССР, 1982. – 143 с.
54. *Электроразрядный ХеСl-лазер* / В.Ф. Тарасенко, В.С. Верховский, А.И. Федоров, Е.Н. Тельминов // Квантовая электроника. – 1980. – Т. 7–9. – С. 2039–2041.
55. *Характеристики плазмы в электроразрядных эксимерных лазерах* / Ю.И. Бычков, С.В. Мельченко, В.Ф. Тарасенко, А.И. Федоров // Тез. докл. X Сибирского совещания по спектроскопии. – Томск, 1981. – С. 18.
56. *Федоров, А.И.* ХеСl-лазер с искровой предионизацией / А.И. Федоров, С.А. Бричков // Оптика атмосферы. – 1989. – Т. 2. – № 7. – С. 772–775.

57. *Fedorov, A.I.* Possibilities for control of duration and shape of XeCl-laser radiation pulse excited by self-maintained discharge / A.I. Fedorov, S.A. Brichkov, V.S. Verhovskiy // *Revue Romaine De Physique*. – 1989. – V. 34. – № 7–9. – P. 707–712.
58. *Федоров, А.И.* Импульсный CO₂-лазер / А.И. Федоров, С.И. Тихомиров, Б.А. Жунусов // *Оптика атмосферы*. – 1989. – Т. 2. – № 9. – С. 1003–1005.
59. *Верховский, В.С.* Генерация на молекулах ArF*, KrCl*, KrF*, XeCl* и XeF* при возбуждении быстрым разрядом / В.С. Верховский, С.В. Мельченко, В.Ф. Тарасенко // *Квантовая электроника*. – 1981. – Т. 8. – № 2. – С. 417–419.
60. *Костин, М.Н.* Объемный разряд с поверхности диэлектрика в Ar и смесях Ar с Xe и CCl₄ / М.Н. Костин, В.Ф. Тарасенко, А.И. Федоров // *ЖТФ*. – 1980. – Т. 50. – В. 6. – С. 1227–1229.
61. *Эксимерные лазеры на молекулах XeF* и XeCl** / Ю.И. Бычков, И.Н. Коновалов, Г.А. Месяц [и др.] // *Известия АН СССР. Серия: Физика*. – 1978. – Т. 42. – № 12. – С. 2493–2498.
62. *Генерация фенилбензоксазола и его замещенных при накачке излучением электроразрядного XeCl*-лазера с плазменным катодом* / В.Ф. Тарасенко, А.И. Федоров, В.В. Грузинский [и др.] // *Известия вузов. Физика*. – 1980. – № 8. – С. 121–122.
63. *Использование разряда по поверхности диэлектрика для предыонизации в эксимерных лазерах* / В.Ю. Баринов, В.М. Борисов, А.М. Давидовский, О.Б. Христофоров // *Квантовая электроника*. – 1981. – Т. 8. – № 1. – С. 77–82.
64. *Эксимерный электроразрядный лазер с плазменными электродами* / В.Ю. Баранов, В.М. Борисов, О.Б. Христофоров // *Квантовая электроника*. – 1981. – Т. 8. – № 1. – С. 165–167.
65. *Квазистационарный режим возбуждения электроразрядных эксимерных лазеров* / Ю.И. Бычков, С.В. Мельченко, Г.А. Месяц [и др.] // *Квантовая электроника*. – 1982. – Т. 9. – № 12. – С. 2423–2431.
66. *Квазистационарная генерация в смеси Ne:Xe:HCl при возбуждении разрядом* / Ю.И. Бычков, С.В. Мельченко, Г.А. Месяц [и др.] // *Лазеры-81 : тез. докл. IV Международной конференции*. – Новый Орлеан, 1981. – С. 9.
67. *Квазистационарная генерация в смеси Ne:Xe:HCl при возбуждении разрядом* / Ю.И. Бычков, С.В. Мельченко, В.Ф. Тарасенко, А.И. Федоров // *Оптика лазеров : тезисы докл. III Всесоюзной конференции*. – Ленинград, 1982. – С. 108.
68. *Возбуждение эксимерных лазеров электрическим разрядом в квазистационарном режиме накачки* / Ю.И. Бычков, С.В. Мельченко, А.И. Сулов

[и др.] // Тезисы докл. XI Всесоюзной конференции по когерентной и нелинейной оптике. – Ереван, 1982. – С. 7.

69. *Квазистационарная генерация* в смеси Ne:Xe:HCl при возбуждении электрическим разрядом / Ю.И. Бычков, С.В. Мельченко, В.Ф. Тарасенко, А.И. Федоров // Квантовая электроника. – 1982. – Т. 9. – № 7. – С. 1481–1483.

70. *УФ-азотный лазер* с плазменными электродами / Б.О. Зикрин, Г.П. Кузьмин, С.И. Тихомиров, А.И. Федоров // Оптика лазеров : тезисы докл. VI Всесоюзной конференции. – Ленинград, 1990. – С. 414.

71. *А. с. № 1353254А*. Электродный элемент электроразрядного лазера / Федоров А.И. 1985.

72. *А. с. № 1477203 А 2*. Электродный элемент электроразрядного лазера / Верховский В.С., Федоров А.И. 1987.

73. *Характеристики генерации ХеСl-лазера* с рентгеновской предыонизацией в квазистационарном режиме возбуждения / Ю.И. Бычков, М.Л. Винник, С.Е. Коваленко, В.Ф. Лосев // Квантовая электроника. – 1985. – Т. 12. – № 10. – С. 2174–2176.

74. *А. с. № 1521146А*. Высоковольтный конденсатор / Федоров А.И. 1987.

75. *Федоров, А.И.* Некоторые особенности формирования объемного самостоятельного разряда в смесях Ne(Ne)-Xe-HCl / А.И. Федоров, С.В. Мельченко // ЖТФ. – 1990. – Т. 60. – В. 4. – С. 105–110.

76. *Федоров, А.И.* Импульсные малогабаритные УФ-лазеры и их применение / А.И. Федоров // Лазеры на парах металлов и их применение : тезисы докл. IX Всесоюзного семинара. – Ростов-на-Дону, 1991. – С. 6.

77. *А. с. № 1635852 А 2*. Электродный элемент электроразрядного лазера / Федоров А.И., Тихомиров С.И., Жунусов Б.А. 1988.

78. *Федоров, А.И.* Возможности увеличения эффективности N₂-лазера, возбуждаемого электрическим разрядом / А.И. Федоров // ОАО. – 1995. – Т. 8. – № 11. – С. 1664–1668.

79. *Федоров, А.И.* Новые перспективы развития малогабаритных N₂-лазеров / А.И. Федоров // Оптика атмосферы и океана. – 1988. – Т. 11. – № 2–3. – С. 135–140.

80. *Федоров, А.И.* Импульсные малогабаритные УФ-лазеры / А.И. Федоров, В.Г. Лизогуб, С.И. Тихомиров // Метрология лазерных измерительных систем : тезисы докл. Всесоюзного науч. семинара. – Волгоград, 1991. – Ч. I. – С. 28.

81. *Федоров, А.И.* Импульсный источник УФ-излучения с плазменным электродом / А.И. Федоров, С.И. Тихомиров // Отчет по НИР. ИОА СО РАН. – Томск, 1989. – 22 с.

82. Михайлов, А.А. Эксимерный электроразрядный лазер с изменяемым временным профилем импульса излучения / А.А. Михайлов, С.И. Тихомиров, А.И. Федоров // Спектроскопия активных сред газоразрядных лазеров : тезисы докл. Всесоюзного семинара. – Таллин, 1990. – С. 1.
83. Пономаренко А.Г. Исследование и разработка мощных CO_2 -лазеров с предельными энергетическими характеристиками и регулируемой формой импульса для плазменных экспериментов : диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. – Новосибирск, 1981. – 464 с.
84. Верховский, В.С. Импульсно-периодический эксимерный лазер / В.С. Верховский, А.А. Михайлов, С.И. Тихомиров // Инверсная заселенность и генерация на переходах атомов и молекул : тезисы докл. Всесоюзного совещания. – Томск : Изд-во ТГУ, 1986. – Ч. I. – С. 185.
85. Федоров, А.И. Миниатюрный XeCl -лазер с продольным разрядом и УФ-предионизацией / А.И. Федоров // Оптика лазеров-93 : тезисы докл. Международной конференции. – Санкт-Петербург, 1993. – Ч. I. – С. 187.
86. Федоров, А.И. XeCl -лазер низкого давления с продольным разрядом / А.И. Федоров // ОАО. – 1994. – Т. 7. – № 1. – С. 96–101.
87. Федоров, А.И. Азотный лазер с продольным разрядом и УФ-предионизацией / А.И. Федоров // ОАО. – 1996. – Т. 9. – № 2. – С. 163–165.
88. Головин, Ю.Ф. Электроразрядный азотный лазер со стандартным коммутатором / Ю.Ф. Головин, Ю.И. Дымшиц, Л.С. Ершов // ОМП. – 1984. – № 2. – С. 35–38.
89. Фольрат, К. Законы искрового разряда / К. Фольрат // Физика быстротекущих процессов / пер. под общ. ред. Н.А. Златина. – Москва : Мир, 1971. – Т. 1. – С. 107–116.
90. Shipman, J.D. Traveling wave excitation of high power gas lasers / J.D. Shipman // Appl. Phys. Lett. – 1967. – V. 10. – P. 3–4.
91. Тарасенко, В.Ф. Импульсный ОКГ на азоте с длиной волны излучения 3371 / В.Ф. Тарасенко, Ю.А. Курбатов, Ю.И. Бычков // Квантовая электроника. – 1972. – № 8. – С. 84–85.
92. Woodward, B.W. A reliable, repetitively pulsed, high-power nitrogen laser / B.W. Woodward, V.J. Ehlers // Rev. Sci. Instrum. – 1973. – V. 44. – № 7. – P. 882–887.
93. Ищенко, В.Н. Импульсный ультрафиолетовый лазер на азоте / В.Н. Ищенко, В.Н. Лисицын, В.Н. Старинский // ОМП. – 1974. – № 3. – С. 32–34.
94. Hasson, V. Ultraminiature high-power gas discharge lasers / V. Hasson, H.M. von Bergmann // Rev. Sci. Instrum. – 1979. – V. 50. – № 1. – P. 59–63.

95. *Gerry, E.T.* Pulsed-molecular-nitrogen laser theory / E.T. Gerry // Appl. Phys. Lett. – 1965. – V. 7. – P. 6–8.
96. *Targ, R.* Pulse nitrogen laser at high repetition rate / R. Targ // IEEE J. of OE. – 1972. – V. QE-8. – P. 726–728.
97. *Wang, C.P.* Simple fast discharge device for high-power pulsed lasers / C.P. Wang // Rev. Sci. Instrum. – 1976. – V. 47. – № 1. – P. 92–95.
98. *Basting, D.* A simple high power nitrogen laser / D. Basting, P.F. Schäfer, B. Steyer // Opto-Electronics. – 1972. – V. 4. – P. 43–49.
99. *Hasson, V.* Transverse double-discharge high-pressure glow excitation of UV lasing action in molecular nitrogen / V. Hasson, D. Preussler, J. Klimek // Appl. Phys. Lett. – 1974. – V. 25. – № 11. – P. 654–656.
100. *Levatter, J.I.* High-power generation from a parallel-plates-driven pulsed nitrogen laser / J.I. Levatter, Shao-Chi Lin // Appl. Phys. Lett. – 1974. – V. 25. – № 12. – P. 703–705.
101. *Rothem, A.* A simple high-power TEA laser operating in the UV, visible and IR / A. Rothem, S. Rosenwaks // Opt. Commun. – 1979. – V. 30. – № 2. – P. 227–230.
102. *Rebhan, U.* A high power N₂-laser of long pulse duration / U. Rebhan, J. Hildebrandt, G. Skopp // Appl. Phys. Lett. – 1980. – V. 23. – P. 341–344.
103. *Armandillo, E.* High-power nitrogen laser / Armandillo E. // Appl. Phys. Lett. – 1982. – V. 41. – № 7. – P. 611–613.
104. *Stankov, K.A.* High-energy output a short-channel laser / K.A. Stankov, S.Z. Kurtev, I.Y. Mibev // Opt. Commun. – 1987. – V. 62. – № 1. – P. 32–34.
105. *Королев, Ю.Д.* Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде / Ю.Д. Королев, Г.А. Месяц. – Новосибирск : Наука, 1982. – 253 с.
106. *Knyazev, I.M.* TEA N₂ UV laser with reduced spectra / I.M. Knyazev, V.S. Letokhov, V.G. Movshev // Optics Commun. – 1972. – V. 6. – P. 250–252.
107. *Дашук, П.Н.* Накачка газового лазера электронным пучком, формируемым в плазме наносекундного скользящего разряда / П.Н. Дашук, С.Л. Кулаков // Письма в ЖТФ. – 1981. – Т. 7. – Вып. 21. – С. 1307–1311.
108. *Брынзалов, П.П.* УФ-лазер на молекуле азота, возбуждаемый силовым, скользящим по поверхности диэлектрика разрядом / П.П. Брынзалов, Б.О. Зикрин, Н.В. Карлов // Письма в ЖТФ. – 1988. – Т. 14. – Вып. 10. – С. 946–949.
109. *Совместная генерация* на длинах волны 10,6 мкм и 0,337 нм в лазере на смеси СО-N₂-He с плазменным катодом / П.П. Брынзалов, Б.О. Зикрин, Н.В. Карлов, Г.П. Кузьмин // Письма в ЖТФ. – 1988. – Т. 14. – Вып. 22. – С. 2033–2036.

110. *Hasson, V.* Effective glow discharge excitation of nitrogen lasers at gas pressure ranging from 0 to 5 bar / V. Hasson, H.M. von Bergmann, D. Preussler // *Appl. Phys. Lett.* – 1976. – V. 28. – № 1. – P. 17–18.
111. *Bojara, A.* Simple highly nitrogen laser with preionization / A. Bojara, W. Gawlik, R. Grabski // *Rev. Sci. Instrum.* – 1984. – V. 55. – № 2. – P. 166–168.
112. *Stankov, K.* Reliable and efficient TEA N₂-laser / K. Stankov, S. Kurtev // *Opt. Commun.* – 1985. – V. 56. – № 1. – P. 36–38.
113. *Efthimiopoulos, T.* Characteristics of an ultraviolet preionized high power / T. Efthimiopoulos, Ch. Bacharides // *Optical Engineering.* – 1986. – V. 25. – № 9. – P. 1055–1057.
114. *Rickwood, K.R.* Semiconductively preionized nitrogen lasers / K.R. Rickwood, A.A. Serafetinides, A.D. Papadopoulos // *Electro-Opt. and Laser : Conf. Proc. Brighton.* – UK, 1986.
115. *Serbezhov, V.* Nitrogen laser with high pulse and average power / V. Serbezov, P.A. Atanasov // *Meas. Sci. Technol.* – 1990. – V. 1. – P. 601–604.
116. *Houtman, H.* Miniature TEA N₂ laser with automatically timed UV preionization / H. Houtman, J. Meyer // *Rev. Sci. Instrum.* – 1983. – V. 54. – № 12. – P. 1629–1630.
117. *Федоров, А.И.* Возможности повышения эффективности отпаянного азотного лазера / А.И. Федоров // *Письма в ЖТФ.* – 2005. – Т. 31. – Вып. 10. – С. 88–94.
118. *Girardeau-Mountaunt, J.P.* / J.P. Girardeau-Mountaunt // *Nouv. Rev. Optique.* – 1974. – V. 25. – P. 341.
119. *Федоров, А.И.* Возможности увеличения и управления длительностью импульсов излучения газоразрядных лазеров / А.И. Федоров // *Письма в ЖТФ.* – 2001. – Т. 27. – Вып. 24. – С. 52–56.
120. *Seki, H.* / H. Seki, S. Takemori, T. Sato // *IEEE J. Selec. Top. in Quant. Electronics.* – 1995. – V.1. – № 3. – P. 825–829.
121. *Аполлонов, В.В.* Еще раз об эффективности азотного лазера / В.В. Аполлонов, В.А. Ямщиков // *Квантовая электроника.* – 2002. – Т. 32. – № 2. – С. 183–184.
122. *Козлов, Б.А.* Газоразрядные модули для эффективной накачки TEA-N₂ и TEA-Xe-лазеров на частотах повторения импульсов свыше 1 кГц / Б.А. Козлов, Р.И. Ашурков, М.А. Акинин // *Известия акад. наук. Сер. Физическая.* – 2002. – Т. 66. – № 8. – С. 1172–1175.
123. *Атежеев, В.В.* Азотный лазер с частотой повторения импульсов 11 кГц и расходимостью 0.5 мрад / В.В. Атежеев, С.К. Вартапетов, А.К. Жигалгин // *Квантовая электроника.* – 2004. – Т. 34. – № 9. – С. 790–794.

124. *Федоров, А.И.* Влияние буферного газа аргона и УФ-предъюнизации на параметры излучения электроразрядного ХеСl-лазера / А.И. Федоров // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26. – Вып. 14. – С. 71–77.
125. *Furuhashi, H.* Longitudinal discharge N₂-laser with automatic preionization using an LC inversion circuit / H. Furuhashi, T. Goto // Rev. Sci. Instrum. – 1988. – V. 59. – № 12. – P. 2552–2556.
126. *Тарасенко, В.Ф.* ОКГ на азоте с продольным разрядом и высокой удельной мощностью / В.Ф. Тарасенко, Ю.А. Курбатов // ПТЭ. – 1973. – № 1. – С. 182–183.
127. *Furuhashi, H.* Longitudinal discharge N₂-laser with rectangular cross section / H. Furuhashi, M. Shimizu, T. Goto // Meas. Sci. Technol. – 1990. – V. 1. – P. 401–405.
128. *Iwasaki, C.* An investigation of the effects of the discharge parameters on the performance of TEA N₂ laser / C. Iwasaki, T. Jitsung // IEEE J. QE. – 1982. – QE-18. – P. 423–427.
129. *Bergmann, H.M.* Miniature atmospheric pressure nitrogen laser / H.M. Bergmann, A.J. Penderis // J. Phys. E. – 1977. – V. 10. – P. 602–604.
130. *Brito Crus, C.H.* Characteristics of a wire preionized nitrogen laser with Helium as buffer gas / C.H. Brito Crus, V. Loureiro, A.D. Tavares // Appl. Phys. B. – 1984. – V. 35. – P. 131–133.
131. *Горлов, А.И.* Исследование импульсно-периодического азотного лазера с продольным разрядом / А.И. Горлов, В.В. Кюн, В.С. Скоз // Квантовая электроника. – 1989. – Т. 16. – № 9. – С. 1781–1784.
132. *Bergmann, H.M.* Sealed-off, miniature, high-power nitrogen laser / H.M. Bergmann // J. Phys. E. – 1977. – V. 10. – P. 1210–1212.
133. *Fahlen, T.S.* High pulse rate 10-W KrF laser / T.S. Fahlen // J. Appl. Phys. – 1978. – V. 49. – № 1. – P. 455–456.
134. *Fast discharge initiated KrF laser* / D.G. Sutton, S.N. Suchard, O.L. Gibb, C.P. Wang // Appl. Phys. Lett. – 1976. – V. 28. – № 9. – P. 522–523.
135. *Andrews, A.J.* A KrF fast discharge laser in mixtures containing NF₃, N₂ F₄ or SF₆ / A.J. Andrews, A.J. Kearsley, C.E. Webb // Opt. Commun. 1977. – V. 20. – № 2. – P. 265–268.
136. *Lacher, J.R.* The near ultraviolet absorption spectra of some fluorinated derivatives of methane and ethylene / J.R. Lacher, L.E. Humel, E.F. Bohmfalk // J. American Chemical Society. – 1950. – V. 72. – № 12. – P. 5486–5489.
137. *Burnham, R.* Improved performance of the discharge-pumped XeCl-laser / R. Burnham // Opt. Commun. – 1978. – V. 24. – № 2. – P. 161–163.

Библиографический список

138. *Ищенко, В.Н.* Импульсные газовые лазеры высокого давления : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – Новосибирск, 1977. – 107 с.
139. *Басов, Н.Г.* Накачка мощных газовых лазеров самоподдерживающимся электрофотоионизационным разрядом / Н.Г. Басов, Е.П. Глотов, В.А. Данилычев // Письма в ЖТФ. – 1979. – Т. 5. – Вып. 8. – С. 449–453.
140. *Rokni, M.* Rare gas fluoride lasers / M. Rokni, J.A. Mangano, J.M. Jacob // IEEE J. QE. – 1978. – V. QE-14. – № 7. – P. 464–481.
141. *Sarjeant, W.J.* Parametric study of a constant E/N pumped high-power KrF* laser / W.J. Sarjeant, A.J. Alcock, K.E. Leopold // IEEE J. of QE. – 1978. – V. QE-14. – № 3. – P. 177–184.
142. *Sze, R.C.* Improved lasing performance of XeCl using Ar and Ne diluents / R.C. Sze // J. Appl. Phys. – 1979. – V. 50. – № 7. – P. 4596–4598.
143. *Fahlen, T.S.* Efficient quarter joule KrF laser with corona preionization / T.S. Fahlen // IEEE J. of QE. – 1979. – V. QE-15. – № 5. – P. 311–313.
144. *Wang, C.P.* Multiple-circuit pulse generator for high repetition rate rare gas halide lasers / C.P. Wang // Rev. Sci. Instrum. – 1978. – V. 49. – № 10. – P. 1399–1400.
145. *Wang, C.P.* 2-kHz repetition rate XeF laser / C.P. Wang, O.L. Gibb // IEEE J. of QE. – 1979. – V. QE-15. – № 5. – P. 318–321.
146. *Lin, S.C.* X-ray preionization for electric discharge lasers / S.C. Lin, J.I. Levatter // Appl. Phys. Lett. – 1979. – V. 34. – № 8. – P. 505–508.
147. *Sze, R.C.* Rare-gas halide avalanche discharge lasers / R.C. Sze // IEEE of QE. – 1979. – V. QE-15. – № 12. – P. 1338–1347.
148. *Levatter, J.I.* Necessary conditions for the homogeneous formation of pulsed avalanche discharges high gas pressures / J.I. Levatter, S.C. Lin // J. Appl. Phys. – 1980. – V. 51. – № 1. – P. 210–222.
149. *Андреев, С.И.* / С.И. Андреев, М.П. Ванюков // ЖТФ. – 1962. – Т. 33. – С. 738.
150. *Sze, R.C.* Inductively stabilized rare-gas halide minilaser for long-pulsed operation / R.C. Sze // J. Appl. Phys. – 1983. – V. 54. – № 3. – P. 1224–1227.
151. *Sze, R.C.* Inductively stabilized excimer lasers / R.C. Sze // Proc. Int. Conf. Lasers'83. – San Francisco, 1983. – P. 512–517.
152. *Верховский, В.С.* Эксиммерный электроразрядный лазер : заявка № 3714780/25 от 10.01.1984 г. / В.С. Верховский, А.И. Федоров.
153. *Taylor, R.S.* Magnetically induced pulse laser excitation / R.S. Taylor, K.E. Leopold // Appl. Phys. Lett. – 1985. – V. 46. – № 4. – P. 335–337.

154. *Shimada, T.* An all solid-state magnetic switching exciter for pumping excimer lasers / T. Shimada, M. Obara, A. Noguchi // *Rev. Sci. Instrum.* – 1985. – V. 56. – № 11. – P. 2018–2020.
155. *Taylor, R.S.* Ultralong optical-pulse corona preionized XeCl laser / R.S. Taylor, K.E. Leopold // *J. Appl. Phys.* – 1989. – V. 65. – № 1. – P. 22–29.
156. *Ефимовский, С.В.* Длинноимпульсный (0,4 мкс) эксимерный XeCl-лазер с КПД = 1 % / С.В. Ефимовский, А.К. Жигалкин, Ю.И. Карев // *Письма в ЖТФ.* – 1991. – Т. 17. – Вып. 15. – С. 23–27.
157. *Ernst, G.J.* Output characteristics of a corona-preionized XeCl laser / G.J. Ernst, A.B.M. Nieuwenhuis, K.M. Abramski // *IEEE J. of QE.* – 1985. – V. QE-21. – № 8. – P. 1127–1130.
158. *Sugii, M.* High-efficiency XeCl discharge laser with high-brightness SrTiO₃ corona preionized / M. Sugii, H. Hara // *IEEE Photonics Technology Lett.* – 1989. – V. 1. – № 7. – P. 166–167.
159. *Мельченко, С.В.* Электроразрядный KrCl*-лазер с энергией излучения 0,6 Дж / С.В. Мельченко, А.Н. Панченко, В.Ф. Тарасенко // *Письма в ЖТФ.* – 1986. – Т. 12. – Вып. 3. – С. 171–175.
160. *Павловский, А.И.* Электроразрядный XeCl-лазер с высоким удельным энергоусвоением и КПД / А.И. Павловский, С.Н. Буранов, В.В. Горохов // *Известия АН СССР. Сер. Физ.* – 1990. – Т. 54. – Вып. 10. – С. 2032–2035.
161. *Сорокин, А.Р.* Исследование лазеров высокого давления на переходах атомов (Ar, Kr, Xe) и молекул (N₂, CO₂) : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – Новосибирск : ИТ СО АН СССР, 1981. – 181 с.
162. *Zheng, C.E.* Performance improvement of an X-ray preionized XeCl laser of very small discharge volume / C.E. Zheng, D. Lo, S.C. Lin // *Appl. Phys. B.* – 1986. – V. 41. – P. 31–37.
163. *Lisin, A.V.* A simple excimer laser producing long pulse at 308 nm / A.V. Lisin, M.A. Rozhdestvensky, L.D. Roitman // *International J. of Optoelectronics.* – 1989. – V. 4. – № 6. – P. 541–544.
164. *Fedorov A.I.* Discharge excimer lasers with automatic spark preionization / A.I. Fedorov // *Proc. II International Symposium on “Modern problems of laser physics”.* July 28– August 2. – Novosibirsk, 1997. P. 48–49.
165. *Федоров, А.И.* Эксимерные электроразрядные лазеры с автоматической искровой предыонизацией / А.И. Федоров // *Оптика атмосферы и океана.* – 1997. – Т. 10. – № 11. – С. 1274–1284.
166. *Баранов, В.Ю.* Эксимерный импульсно-периодический лазер / В.Ю. Баранов, Г.С. Баронов, В.М. Борисов // *Квантовая электроника.* – 1980. – Т. 7. – № 4. – С. 896–898.

167. *Week, R.W.* Industrial level gas optic lifetime for commercial KrF excimer laser systems / R.W. Week, M. Donaldson, T.J. McKee // *Proc. of CLEO'86*. – 1986. – P. 144.
168. *Сугин, М.* Получение высокоэффективной генерации в режиме длинных импульсов лазера на XeCl с перезарядкой емкостных накопителей при использовании схемы автоматической предыонизации и уменьшение спектральной ширины линии лазера / М. Сугин // *Рэдза Кэнкю*. – 1987. – Т. 15. – Вып. 7. – С. 541–550.
169. *Hotta, K.* High efficiency high repetition-rate KrF excimer laser / K. Hotta, M. Arai, S. Ito // *NEC Res. and Develop.* – 1989. – № 93. – P. 1–9.
170. *Hogan, D.C.* A resistively stabilized XeCl-laser for discharge excited / D.C. Hogan, A.J. Kearsley, C.E. Webb // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1980. – V. 13. – P. 225–228.
171. *Sugii, M.* Simple long-pulse XeCl laser with narrow-line output / M. Sugii, M. Ando, K. Sasaki // *IEEE J. of QE.* – 1987. – V. QE-23. – № 9. – P. 1458–1460.
172. *Kearsley, A.J.* A novel free-ionization technique for discharge excited rare gas halide lasers / A.J. Kearsley, A.J. Andrews, C.E. Webb // *Opt. Commun.* – 1979. – V. 31. – № 2. – P. 181–184.
173. *Peet, V.E.* Diagnostics of a compact discharge-pumped XeCl-laser with BCl₃ halogen donor / V.E. Peet, A.B. Treshchlov, E.V. Slivinskij // *Appl. Phys. B.* – 1991. – V. 52. – P. 234–243.
174. *McKee, T.J.* Operating and beam characteristics, including spectral narrowing of a TEA rare-gas halide excimer laser / T.J. McKee, J. Banic, A. Jares // *IEEE J. of QE.* – 1979. – V. QE-15. – № 5. – P. 332–334.
175. *Chen, J.* Efficient operation of Blumlein-discharge excited XeCl laser / J. Chen, S. Fu, M. Liu // *Appl. Phys. Lett.* – 1980. – V. 37. – № 10. – P. 883–885.
176. *Watanabe, S.* Spatially resolved gain measurements in UV preionized homogenous discharge XeCl and KrF lasers / S. Watanabe, A.J. Alcock, K.E. Leopold // *Appl. Phys. Lett.* – 1981. – V. 38. – № 1. – P. 3–6.
177. *Wadt, W.R.* Theoretical absorption spectra for Ne₂⁺, Ar₂⁺, Kr₂⁺ and Xe₂⁺ in the near ultraviolet / W.R. Wadt, D.C. Cartwright, J.S. Cohen // *Appl. Phys. Lett.* – 1977. – V. 31. – P. 672–674.
178. *Taylor, R.S.* Preionization and discharge stability study of long optical pulse duration UV-preionized XeCl lasers / R.S. Taylor // *Appl. Phys. B.* – 1986. – V. 41. – P. 1–24.

179. *Miyzaki, K.* Efficient and compact discharge XeCl laser with automatic UV preionization / K. Miyzaki, Y. Toda, T. Hasama // *Rev. Sci. Instrum.* – 1985. – V. 56. – № 2. – P. 201–204.
180. *Миэко, О.* Повышение КПД электроразрядного ХеСl-лазера с переносом заряда / О. Миэко, О. Минору, Н. Акира // *Рэдза Кэнкю.* – 1986. – Т. 14. – Вып. 1. – С. 25–33.
181. *Артемьев, М.Ю.* Электроразрядный ХеСl-лазер с импульсом генерации длительностью 500 нс / М.Ю. Артемьев, А.З. Грасюк, В.М. Нестеров // *Квантовая электроника.* – 1989. – Т. 16. – № 12. – С. 2374–2378.
182. *McKee, T.J.* A high power long pulse excimer laser / T.J. McKee, G. Boyd, T.A. Znotins // *IEEE Photonics Technology Lett.* – 1989. – V. 1. – № 3. – P. 59–61.
183. *Борисов, В.М.* Об интенсивности накачки электроразрядных эксимерных лазеров / В.М. Борисов, И.Е. Брагин, А.Ю. Виноходов // *Квантовая электроника.* – 1995. – Т. 22. – № 6. – С. 533–536.
184. *Sze, R.C.* Operating characteristics of a high repetition rate miniature rare-gas halide laser / R.C. Sze, E. Seegmiller // *IEEE of QE.* – 1981. – V. QE-17. – № 1. – P. 81–91.
185. *Yamada, K.* 1-ns high power high-repetitive excimer laser oscillator / K. Yamada, K. Miyzaki, T. Hasama // *IEEE of QE.* – 1988. – V. 24. – № 2. – P. 177–182.
186. *Исаков, И.М.* Возбуждение ХеF-лазера с помощью продольного электрического разряда / И.М. Исаков, А.Г. Леонов, В.Е. Оглуздин // *Письма в ЖТФ.* – 1977. – Т. 3. – Вып. 18. – С. 965–968.
187. *Newman, A.* XeF* and KrF* waveguide lasers excited by a capacitive coupled discharge / A. Newman // *Appl. Phys. Lett.* – 1978. – V. 33. – № 6. – P. 501–503.
188. *Zhou, Z.* XeCl excimer laser excited by longitudinal discharge / Z. Zhou, Y. Zeng, M. Qiu // *Appl. Phys. Lett.* – 1983. – V. 4-3. – № 4. – P. 347–349.
189. *Eichler, H.J.* KrF laser with longitudinal discharge excitation / H.J. Eichler, J. Hamisch, B. Nagel // *Appl. Phys. Lett.* – 1985. – V. 46. – № 10. – P. 911–913.
190. *Зубрилин, Н.Г.* Генерация эксимерных молекул ХеСl, ХеF и KrF в двухкомпонентных смесях / Н.Г. Зубрилин, А.И. Миланич, М.П. Черноморец // *Квантовая электроника.* – 1985. – Т. 12. – № 3. – С. 643–644.
191. *De la Rosa, J.* KrF laser without buffer gas excited in a capacitive coupled discharge tube / J. De la Rosa, H.J. Eichler // *Opt. Commun.* – 1987. – V. 64. – № 3. – P. 285–287.

192. *Furuhashi, H.* Longitudinal discharge XeCl excimer laser with automatic UV preionization / H. Furuhashi, M. Hiramatsu, T. Goto // *Appl. Phys. Lett.* – 1987. – V. 50. – № 14. – P. 883–885.
193. *Ефимовский, С.В.* О разрядных и энергетических характеристиках электроразрядного XeCl-лазера с литровым активным объемом / С.В. Ефимовский, А.К. Жигалкин, Ю.Л. Сидоров // *Письма в ЖТФ.* – 1979. – Т. 5. – Вып. 11. – С. 664–668.
194. *Long, W.H.* Electron kinetics in the KrF laser / W.H. Long // *Appl. Phys. Lett.* – 1977. – V. 31. – № 6. – P. 391–393.
195. *Barker, D.L.* Improved beam quality in double discharge excimer laser / D.L. Barker, T.R. Loree // *Appl. Optics.* – 1977. – V. 16. – № 17. – P. 1792–1793.
196. *Sze, R.C.* Experimental studies of a KrF and ArF discharge laser / R.C. Sze, T.R. Loree // *IEEE J. of QE.* – 1978. – V. QE-4. – № 12. – P. 944–950.
197. *Hiramatsu, M.* An account of excitation mechanism of discharge-pumped XeCl laser using Ne/Ar diluent / M. Hiramatsu, T. Goto // *The Review of laser engineering.* – 1988. – V. 16. – № 7. – P. 26–33.
198. *Малов, А.М.* Электроразрядный XeCl-лазер с высокой пространственной однородностью и плотностью излучения / А.М. Малов, А.М. Ражев // *Квантовая электроника.* – 1984. – Т. 11. – № 2. – С.287–291.
199. *Андреев, С.И.* Плазмостойкой CO₂-лазер / С.И. Андреев, И.М. Белоусов, П.Н. Дащук // *Квантовая электроника.* – 1976. – Т. 3. – № 8. – С. 1721–1726.
200. *Кузьмин, Г.П.* Импульсные CO₂-лазеры с плазменными электродами : диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. – Москва : ИОФ РАН, 1989. – 344 с.
201. *Исследование возможности увеличения активного объема электроразрядных лазеров на галогенидах благородных газов / Ю.И. Бычков, С.В. Мельченко, В.Ф. Тарасенко, А.И. Федоров* // *Отчет по НИР ИСЭ СО РАН.* – Томск, 1981. – 14 с.
202. *Jianwen, Ch.* Efficient operation of Blumlein-discharge-excited XeCl laser / Ch. Jianwen, F. Shufen, L. Miaohong // *Appl. Phys. Lett.* – 1980. – V. 37. – № 10. – P. 883–885.
203. *Мельченко, С.В.* Электроразрядный XeCl-лазер с длительностью импульса излучения 1мкс / С.В. Мельченко, А.Н. Панченко, В.Ф. Тарасенко // *Квантовая электроника.* 1984. – Т. 11. – № 7. – С.1490–1491.
204. *Баранов, В.Ю.* Широкоапертурный электроразрядный XeCl-лазер с УФ-предыонизацией и энергией генерации 20 Дж / В.Ю. Баранов,

В.М. Борисов, Д.Н. Молчанов // Квантовая электроника. – 1987. – Т. 14. – № 8. – С. 1542–1551.

205. *Борисов, В.М.* Простой компактный десятиджоулевый XeCl-лазер с двойной формирующей линией Блюмляйна / В.М. Борисов, Д.Н. Молчанов, Е.А. Морозов // Квантовая электроника. – 1989. – Т. 16. – № 11. – С. 2170–2172.

206. *Levatter, J.I.* Long pulse behavior of the avalanche self-sustained discharge pumped XeCl laser / J.I. Levatter, K.L. Robertson, S.C. Lin // Appl. Phys. Lett. – 1981. – V. 39. – № 1. – P. 297–299.

207. *Hogan, D.C.* Long pulse operation of discharge-excited XeCl lasers / D.C. Hogan, R. Bruzzese, A.J. Kearsley // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1981. – V. 14. – P. 157–161.

208. *Корн, Г.* Справочник по математике для научных сотрудников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – Москва : Наука, 1974. – 831 с.

209. *Judd, O.J.* / O.J. Judd // Appl. Phys. – 1976. – V. 47. – P. 5299–209к.

210. *Елецкий, А.В.* Явления переноса в слабоионизованной плазме / А.В. Елецкий, Л.А. Палкина, Б.М. Смирнов. – Москва : Атомиздат, 1975. – 333 с.

211. *Watanabe, S.* Wide aperture self-sustained discharge KrF and XeCl lasers / S. Watanabe, A. Endoh // Appl. Phys. Lett. – 1982. – V. 41. – № 9. – P. 799–801.

212. *Павловский, А.И.* Электроразрядный ОКГ с ионизированием в активном объеме / А.И. Павловский, В.С. Босамыкин, В.И. Карелин // Квантовая электроника. – 1976. – Т. 3. – №3. – С. 601–604.

213. *Аполлонов, В.В.* Формирование объемного самостоятельного лазера в плотных газах при больших межэлектродных расстояниях / В.В. Аполлонов, Г.Г. Байцур, А.М. Прохоров // Письма в ЖТФ. – 1985. – Т. 11. – Вып. 20. – С. 1262–1666.

214. *Голант, В.Е.* Основы физики плазмы / В.Е. Голант, А.П. Жилинский, И.Е. Сахаров. – Москва : Атомиздат, 1977. – 384 с.

215. *Lo, D.* Electrical characteristics of a small active volume (1 cm³) discharge-pumped XeCl laser / D. Lo // Optical and Quantum Electronics. – 1988. – V. 20. – P. 257–262.

216. *Taylor, R.S.* Time-dependent gain and absorption in a 5J UV preionized XeCl laser / R.S. Taylor, P.B. Corkum, S. Watanabe // IEEE J. of QE. – 1983. – V. QE-19. – № 3. – P. 416–425.

Библиографический список

217. *Taylor, R.S.* Microsecond duration optical pulses from a UV-preionized XeCl laser / R.S. Taylor, K.E. Leopold // *Appl. Phys. Lett.* – 1985. – V. 47. – № 2. – P. 81–83.

218. *Osborne, M.R.* Long pulse operation and premature termination of a high-power discharge-pumped XeCl laser / M.R. Osborne, H.R. Hutchinson // *J. Appl. Phys.* – 1986. – V. 59. – № 3. – P. 711–715.

219. *Champage, L.F.* Current rise-time limitation of the large volume X-ray preionized discharge-pumped XeCl laser / L.F. Champage, A.J. Dudas, N.W. Harris // *J. Appl. Phys.* – 1987. – V. 62. – № 5. – P. 1576–1584.

220. *Бычков, Ю.И.* Кинетика ХеСl-лазера в смеси Ne:Хе:ССl₄, возбуждаемая электронным пучком / Ю.И. Бычков, В.Ф. Лосев, В.В. Рыжов // *Известия вузов. Физика.* – 1980. – № 7. – С. 123–125.

221. *Федоров, А.И.* Импульсные газовые лазеры, возбуждаемые самостоятельным разрядом с автоматической УФ-предыонизацией : диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Федоров Анатолий Игнатьевич. – Новосибирск, 2002. – 224 с.

Научное издание

Федоров Анатолий Игнатьевич

ИМПУЛЬСНЫЕ ГАЗОВЫЕ УФ-ЛАЗЕРЫ,
ВОЗБУЖДАЕМЫЕ САМОСТОЯТЕЛЬНЫМ РАЗРЯДОМ
С УФ-ПРЕДЫОНИЗАЦИЕЙ

Подписано в печать 16.01.2023.

Формат 60×84/16. Бумага офсет. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 13,72. Уч.-изд. л. 12,42.

Тираж 500 экз. Первый завод 45 экз.

Изд-во ТГАСУ, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Отпечатано с оригинал-макета в ООО «Интегральный переплет».

634040, г. Томск, ул. Высоцкого, 28, стр. 1.