

01;04;07

©1994 г.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО KrF-ЭКСИМЕРНОГО ЛАЗЕРА С МАГНИТНЫМ ОБОСТРЕНИЕМ ИМПУЛЬСОВ НАКАЧКИ

*В.А.Бурцев, Ю.Л.Ермолаев, Н.В.Калинин, И.Б.Петров*

Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры  
им. Д.В. Ефремова, 189631, Санкт-Петербург  
(Поступило в Редакцию 1 сентября 1993 г.)

Разработана физическая модель электроразрядного эксимерного KrF-лазера, в котором для обострения импульсов накачки активной среды с целью повышения эффективности системы в целом применены магнитные ключи. В основу модели положено самосогласованное описание интегральных и пространственно-временных характеристик разряда, кинетики плазмохимических процессов в активной среде и переноса излучения. Расчеты проведены применительно к действующим экспериментальным установкам, что позволило сравнить результаты расчетов и экспериментов для проверки адекватности модели. Дан анализ влияния неоднородности предыонизации на пространственно-временные характеристики накачки и генерации.

### Введение

Электроразрядные эксимерные лазеры (ЭРЭЛ) в качестве источников когерентного излучения ближнего УФ спектрального диапазона находят широкое применение в научных исследованиях для накачки лазеров на красителях, инициирования химических реакций, осуществления одно- и многофотонной диссоциации молекул и т.д. [1-4]. Весьма перспективными оказываются ЭРЭЛ и для использования в разработках целого ряда новейших технологий, в частности, в области микроэлектроники [4-7].

В связи с разработками и созданием ЭРЭЛ различных типов и назначения особую актуальность приобретают работы по численному моделированию, позволяющие получать полезную для проектирования и оптимизации информацию как относительно отдельных элементов, так и о лазерной системе в целом.

Наиболее разработаны на сегодняшний день нульмерные модели, основанные на представлении о пространственно-однородном характере протекания физических процессов в активной среде. На сего-

днешний день они являются весьма мощным инструментом для прогнозирования свойств электроразрядной накачки и генерации излучения, а также для исследования влияния параметров системы на ее выходные интегральные характеристики [1]. Но модели этого класса, строго говоря, не являются замкнутыми, так как для их реализации необходима дополнительная информация о характерных размерах областей накачки активной среды и генерации излучения, в пределах которых выполняется предположение о пространственной однородности свойств активной среды. Слабость этих моделей особенно заметна в тех случаях, когда области накачки и генерации (не тождественные, как показывают эксперименты, в общем случае) заметно отличаются. Это может быть обусловлено неоднородностью распределения электрического поля в разрядном промежутке из-за формы электродов, неоднородностью предыонизации активной среды и т.п. В связи с этим становится актуальной проблема численного моделирования пространственно-временной динамики электроразрядной накачки активной среды и генерации излучения. Для решения этой проблемы разрабатываются одно- и двумерные модели, позволяющие согласованно учитывать все отмеченные выше неоднородности свойств активной среды электроразрядного лазера и исследовать их влияние на характеристики импульса генерации.

Кроме вопросов, связанных с кинетическими моделями протекающих в активных средах плазмохимических процессов, которые разрабатываются уже достаточно долго [8-17], но остаются все еще актуальными, одной из основных задач, возникающих при создании одно- и двумерных моделей ЭРЭЛ, является расчет распределения электрического поля в разрядном промежутке. Обычно эта задача решается с использованием либо аналитических выражений, установленных для электродов простейших (например, коаксиальной [18-21]) форм, либо с использованием уже известных решений для электродов ряда хорошо изученных конфигураций. И в том, и в другом случаях не учитывается влияние электроразрядной плазмы. Лишь в последнее время появляются модели, в которых расчет распределения электрического поля в разрядном промежутке проводится с учетом этого влияния.

В настоящей работе описана одномерная модель ЭРЭЛ, позволяющая проводить комплексные самосогласованные расчеты электроразрядных лазеров с электродной системой произвольной конфигурации, что существенно расширяет возможности численных экспериментов по изучению пространственно-временной динамики накачки и генерации. Для проверки адекватности модели проведено сравнение результатов расчета и эксперимента применительно к нескольким действующим установкам, о которых в публикациях имеется информация в достаточном объеме. Причем наиболее подробно рассмотрен случай, соответствующий экспериментам, проводившимся на разработанной в НИИЭФА лазерной системе [6,7].

## Модель электроразрядного эксимерного лазера

1. Разработанная авторами модель электроразрядного эксимерного лазера основана на согласованном описании накачки активной среды и генерации излучения и имеет обычную для такого рода моделей структуру, состоящую из следующих элементов: уравнения Ла-

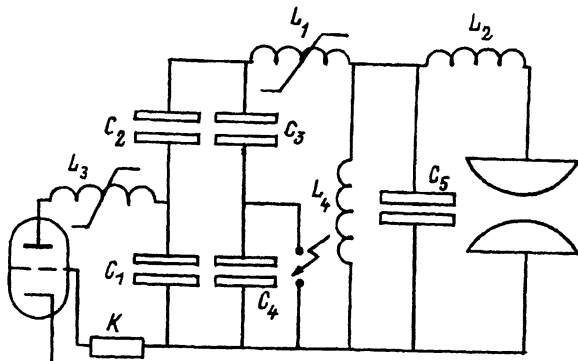


Рис. 1. Принципиальная схема электрической цепи электроразрядного эксимерного лазера.

плаза для расчета распределения электрического поля в разрядном промежутке; системы уравнений, описывающих электрическую цепь лазера; уравнения Больцмана для расчета функции распределения электронов по энергии (ФРЭЭ), с помощью которой вычисляются константы плазмохимических реакций в разряде, средняя энергия электронов и электропроводность электроразрядной плазмы; системы кинетических уравнений для расчета эволюции концентраций компонентов активной среды, в том числе концентраций электронов и внутрирезонаторных фотонов; уравнений баланса энергии активной среды, описывающих изменение температур электронов и газа; уравнения переноса фотонов в активной среде; банка данных по сечениям элементарных процессов и константам скоростей плазмохимических реакций.

2. Распределение электрического поля в разрядном промежутке рассчитывалось в результате решения уравнения Лапласа в двумерном приближении, допускающем рассмотрение произвольной формы электродов; влияние электроразрядной плазмы на распределение электрического поля в разряде не учитывалось. Двумерные расчеты электрического поля дают возможность оценивать характерный размер области накачки, в пределах которой можно считать, что напряженность электрического поля и характеристики разряда остаются однородными.

3. Принципиальная электрическая схема и электродная система лазера приведены на рис. 1 и 2 соответственно. Генератор импульсов накачки выполнен по схеме Фитча-Говелла, в которой в качестве разрядника применен тиратрон, позволяющий осуществлять импульсно-периодический режим работы лазера с высокой частотой следования импульсов. Магнитные ключи дают возможность повысить эффективность накачки путем дополнительного обострения импульсов напряжения на разрядном промежутке и повышения напряжения пробоя среды.

Самосогласованные расчеты физических процессов, протекающих в разряде и электрической цепи, проводились с помощью разработанного авторами пакета прикладных программ (ППП), позволяющего моделировать работу импульсных генераторов любого типа, применяющихся в данной области.

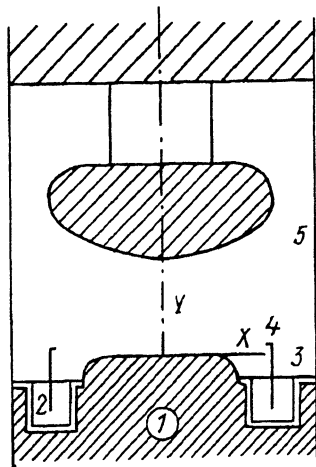


Рис. 2. Электродная система.

1 — заземленный электрод, 2 — изоляционная втулка, 3 — вкладьш, 4 — электрод искрового предыонизатора, 5 — обратный токопровод.

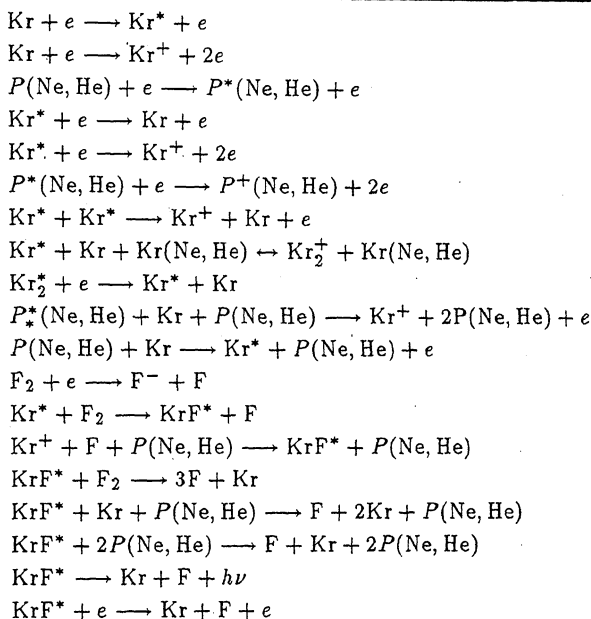
4. В уравнении Больцмана учтены упругие, неупругие, и электрон-электронные столкновения. Решение уравнения Больцмана проводилось с помощью традиционного алгоритма. Оригинальным элементом этой части модели является выбор начального приближения, основанный на разработанном авторами полуаналитическом методе, что позволяет существенно сократить объем вычислений. Банк данных по сечениям элементарных процессов формировался на основании опубликованных материалов [12-17].

5. Для самосогласованного моделирования электрического разряда, учитывающего физические процессы, протекающие в электрической цепи и плазме активной среды, разработаны нуль- и одномерная модели. Не рассматривая здесь их подробно, отметим лишь их основные характеристики.

В рамках этих моделей расчет разряда проводится путем совместного численного решения системы кинетических уравнений, описывающих баланс заряженных и возбужденных частиц в плазме разряда, и системы уравнений электрической цепи питания. Основные учтенные в кинетической модели разряда процессы, протекающие в рассматриваемых в данной работе КгF-смесях, приведены в выводе 1.

В нульмерной модели пространственные распределения характеристик разряда считаются однородными в пределах некоторой области, характерный размер которой рассматривается как варьируемый параметр задачи. Для его определения необходима дополнительная информация, полученная, например, из экспериментов или расчетов распределения электрического поля.

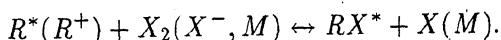
В разработанных нами моделях характерный размер разряда определяется на основании результатов расчета распределения электрического поля в межэлектродной области. Для учета пространственной неоднородности разряда межэлектродная область разбивается на  $N_x \times N_y$  областей, в пределах которых характеристики разряда считаются пространственно однородными. В направлении, перпендикулярном силовым линиям электрического поля (т.е. по оси Y), границами этих областей являются силовые линии электрического поля, разделяющие разрядный промежуток на  $N_y$  слоев. В направлении оси X (т.е. вдоль силовых линий электрического поля) межэлектродная область



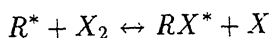
делится на  $N_x$  слоев (рис. 2). Полное сопротивление разряда, через которое осуществляется связь физических процессов, протекающих в генераторе импульсов напряжения и разряде рассчитывается путем интегрирования вычисленной электропроводности плазмы разряда по всему разрядному промежутку.

6. В качестве активных сред рассматривались  $\text{XeCl}$ ,  $\text{KrF}$  и  $\text{ArF}$  смеси с различным процентным содержанием компонентов при варьировании полного давления в диапазоне  $P_0 = 1-5$  атм. Банк данных по константам скоростей плазмохимических реакций формировался на основании опубликованных данных [1,8-18]. В данной публикации рассматриваются формирование активной среды и генерация лишь на  $\text{KrF}$  смесях.

По существующим представлениям [1,17,18] образование эксимерных молекул  $\text{RX}^*$  в электрическом разряде происходит в результате плазмохимических реакций электронно-возбужденного атома инертного газа  $\text{R}^*$  или иона  $\text{R}^+$  с галогеносодержащей молекулой  $\text{X}_2$  или отрицательным ионом  $\text{X}^-$



Образование  $\text{KrF}^*$  молекул в смесях на основе гелия ( $\text{He}$ ) происходит практически равновероятно в реакциях типа гарпунной



и реакциях рекомбинации; в смесях же с неоном ( $\text{Ne}$ ) ион-ионная рекомбинация является определяющей.

1. Реакции нейтральных частиц  
 $P_2(\text{Ne}, \text{He}) + F_2 \longrightarrow F^* + 2P(\text{Ne}, \text{He}) + F$   
 $\text{Kr}^* + \text{Kr} + M \longrightarrow \text{Kr}_2^* + M$
2. Пеннинговская ионизация  
 $\text{Kr}^* + \text{Kr} \longrightarrow \text{Kr}^+ + \text{Kr} + e$   
 $P^*(\text{Ne}, \text{He}) + \text{Kr} \longrightarrow \text{Kr}^+ + P(\text{Ne}, \text{He}) + e$   
 $P_2^*(\text{Ne}, \text{He}) + \text{Kr} \longrightarrow \text{Kr}^+ + P(\text{Ne}, \text{He}) + e$   
 $P^*(\text{Ne}, \text{He}) + \text{Kr} + P(\text{Ne}, \text{He}) \longrightarrow \text{Kr}^+ + 2P(\text{Ne}, \text{He}) + e$
3. Передача заряда  
 $\text{Kr}^+ + \text{Kr} + P(\text{Ne}, \text{He}) \longrightarrow \text{Kr}_2^+ + P(\text{Ne}, \text{He})$   
 $\text{Kr}^+ + 2\text{Kr} \longrightarrow \text{Kr}_2^+ + \text{Kr}$   
 $P^+(\text{Ne}, \text{He}) + 2P(\text{Ne}, \text{He}) \longrightarrow P^+(\text{Ne}, \text{He}) + P(\text{Ne}, \text{He})$
4. Образование  $\text{KrF}^*$   
 $\text{Kr}^* + F_2 \longrightarrow \text{KrF}^* + F$   
 $\text{Kr}^+ + F^- + P(\text{Ne}, \text{He}) \longrightarrow \text{KrF}^* + P(\text{Ne}, \text{He})$   
 $\text{Kr}_2^+ + F + P(\text{Ne}, \text{He}) \longrightarrow \text{KrF}^* + \text{Kr} + P(\text{Ne}, \text{He})$

Основные плазмохимические реакции, определяющие наработку и изменение концентрации эксимерных молекул  $\text{KrF}^*$  в  $\text{KrF}$  смесях, накачиваемых электрическим разрядом, приведены в выводе 2. В кинетической модели активной среды учитываются реакции нейтральных частиц, пеннинговская ионизация, передача заряда и реакции образования  $\text{KrF}^*$ , процессы тушения и фотопоглощение.

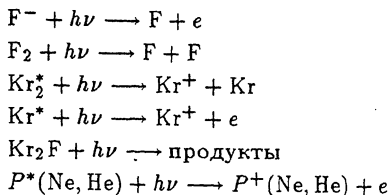
7. Обычно эксимерные молекулы  $RX^*$  первоначально находятся в высоковозбужденных колебательных состояниях, а в генерации участвуют только нижние уровни  $\nu = 0,1$ , поэтому молекулы  $RX^*$  должны колебательно релаксировать на нижние уровни, причем быстрее, чем произойдет радиационный распад или безызлучательное снятие возбуждения [1,15-17].

Описание полной релаксационной кинетики является весьма сложной задачей, для решения которой требуется совместное рассмотрение процессов колебательной релаксации, тушения и обмена колебательным возбуждением между близкими электронными состояниями  $RX$  ( $B, C$ ).

Для проведения расчетов практической направленности разработаны упрощенные модели кинетики релаксации возбуждения, учитывающие следующие процессы: тушение возбуждения в соударениях,  $\nu-T$ -релаксацию, обмен возбуждением, радиационный распад [1,14-17]. В рамках этих моделей выполняются соотношения между константами реакций

$$K_{C,\nu-T}^{\nu'} \cong K_{B,\nu-T}^{\nu'}, \quad K_{C,\nu-T}^{\nu''} \cong K_{B,\nu-T}^{\nu''}, \quad K_{C-B}^{\nu'} \cong K_{C-B}^{\nu'}$$

В так называемом  $\tau$ -приближении, кроме того, скорости релаксации всех колебательных уровней принимаются одинаковыми.



8. Для расчета генерации применялось трехуровневое приближение, в котором учитываются два ансамбля молекул ( $C, B$ ) в возбужденных состояниях и основное состояние ( $X$ ) [1].

9. Для получения высоких выходных характеристик ЭРЭЛ необходимо принимать во внимание наличие линейчатого и широкополосного фотопоглощения в активных средах.

Линейчатое поглощение, возникающее на связанно-связанных переходах, присутствующих в активной среде атомарных и молекулярных газов, а также свободных атомов и радикалов, хотя и может в ряде случаев исказить спектр генерации, не приводит, как правило, к заметному снижению энергии генерации [1].

Широкополосное фотопоглощение обусловлено главным образом связанно-связанными переходами, происходящими в процессах фотодиссоциации, фотоионизации и фотоотлипания. Основные плазмохимические процессы, ответственные, согласно модели, за фотопоглощение в активной среде  $KrF$  лазера, приведены в выводе 3.

Плотность внутррезонаторных фотонов рассчитывалась в предположении однородного усиления и поглощения по длине активной среды. При вычислении мощности генерации каждого слоя учитывалась площадь сечения в плоскости, перпендикулярной оптической оси лазера, разбиение на слои осуществлялось по границам силовых линий электрического поля.

10. Характеристики предыонизации активной среды, т.е. распределения начальной концентрации электронов предыонизации и требуемой для их создания объемной скорости образования электрон-ионных пар определяются из условий, необходимых для формирования в активной среде однородного объемного разряда [1,22]. Так, в  $KrF$  эксимерных лазерах источник предыонизации (УФ или рентгеновской) при  $P = 2-5$  атм должен обеспечивать скорость образования электрон-ионных пар  $Q = 10^{13}-10^{14} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$  и минимальную концентрацию электронов  $N_{CO} \cong 10^7-10^8 \text{ см}^{-3}$ .

Результаты проверки адекватности разработанной модели реальным физическим процессам, определяющим работу ЭРЭЛ, обсуждаются в следующем разделе.

### Адекватность модели. Сравнение результатов расчета и эксперимента

1. Проверка адекватности описанной выше модели электроразрядного эксимерного лазера проводилась путем сравнения результатов расчетов и экспериментов, соответствующих нескольким действу-

ющим экспериментальным установкам, описанным в публикациях достаточно подробно. Эти установки выполнены на базе импульсных генераторов различных типов, численное моделирование которых осуществлялось с помощью разработанного авторами пакета прикладных программ (ППП). В качестве активной среды рассматривались  $\text{XeCl}$ ,  $\text{KrF}$  и  $\text{ArF}$  смеси при изменении полного давления и состава в обычно рассматриваемых диапазонах.

2. Детальный анализ результатов численного моделирования генерации на  $\text{XeCl}$  и  $\text{ArF}$  смесях — тема отдельных публикаций. В то же время целесообразно упомянуть о проведенном нами сравнении результатов расчетов и экспериментов, соответствующих установкам ЭЛИ, работающим на  $\text{XeCl}$  смесях [18,19]. В данном случае эти результаты интересны тем, что применительно к ЭЛИ разработаны физические модели и детально описаны проведенные по ним расчеты, содержащие для нашей работы полезную для сопоставления информацию. Результаты проведенного нами численного моделирования процессов накачки и генерации достаточно хорошо согласуются и с экспериментальными, и с расчетами по моделям [18,19].

Остановимся подробнее на результатах сравнения расчетов и эксперимента, проведенного применительно к работающему  $\text{KrF}$  лазеру, разработанному в НТЦ МИС НИИЭФА им. Д.В. Ефремова [6,7]. На рис. 3-7 приведены результаты экспериментов и численного моделирования характеристик импульсов накачки и генерации.

Расчеты показывают, что при определении характерного размера разряда на основании двумерных расчетов распределения электрического поля даже пространственно-однородная (нульмерная) модель позволяет вполне удовлетворительно прогнозировать интегральные характеристики накачки и генерации. Максимальное отличие результатов расчетов в рамках нульмерной модели и эксперимента составляет 20%, что незначительно превышает погрешность проводившихся измерений. Применение одномерной модели позволяет улучшить согласие расчета и эксперимента даже на поздней стадии разряда после достижения минимального напряжения на разряде, после чего, как свидетельствуют эксперименты, разряд может распадаться на ряд отдельных каналов. Эта модель в целом правильно описывает и пространственно-временную динамику электроразрядной накачки активной среды и генерации излучения, о чем свидетельствуют рассмотренные в следующем разделе результаты.

Таким образом, можно отметить достаточно хорошее согласие экспериментальных и расчетных зависимостей, что свидетельствует в пользу адекватности разработанной модели.

### **Пространственно-временные характеристики накачки. Влияние неоднородностей электрического поля и предыонизации**

1. Однородность распределения мощности излучения по сечению луча — одно из наиболее важных характеристик лазера. Во многих случаях именно эта характеристика определяет возможность его применения в той или иной области. В связи с этим работы по проблеме достижения высокой однородности излучения электроразрядных лазеров находится в центре внимания исследователей уже достаточно



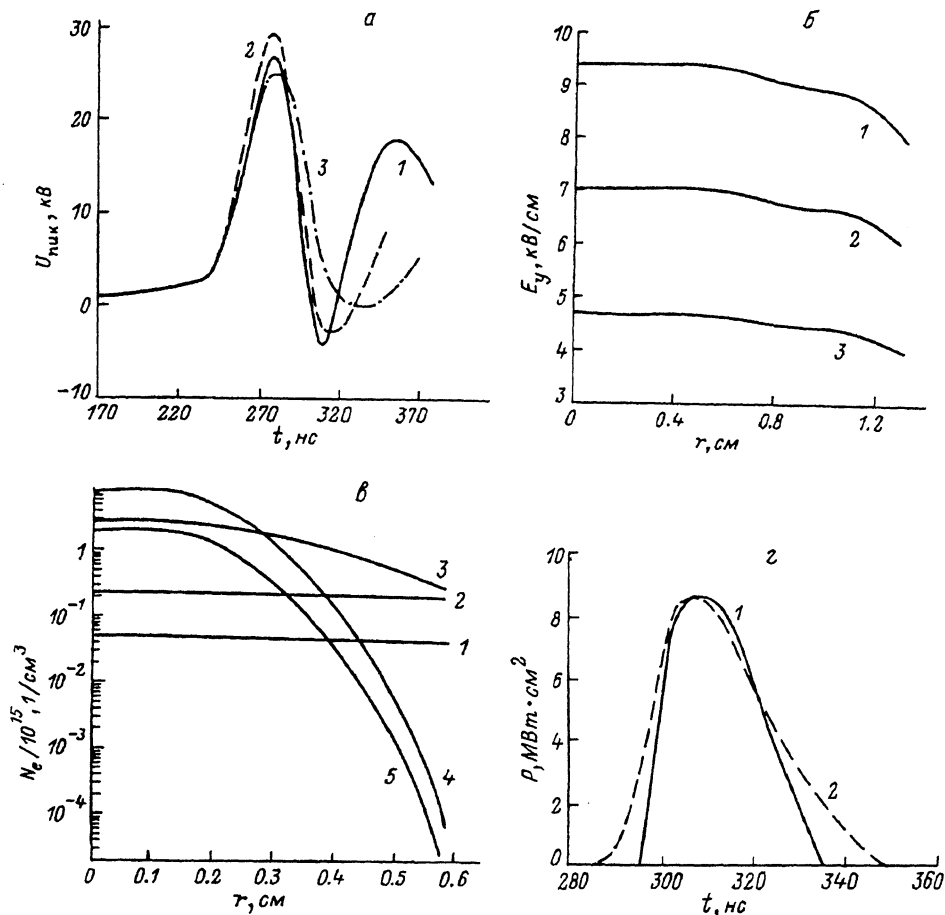


Рис. 3. Результаты численного моделирования накачки и генерации смеси Ne:Kr:F<sub>2</sub> в составе 1090:25:1 при давлении  $P_0 = 4$  атм.

*a* — импульс напряжения на пиковой емкости: 1 — расчет, 2 — эксперимент, 3 — расчет по нульмерной модели; *б* — распределения электрического поля в центре разряда в различные моменты времени: 1 — 266, 2 — 260, 3 — 253 нс; *в* — распределения концентрации электронов в центре разряда, соответствующие различным моментам времени: 1 — 280.3, 2 — 285.27, 3 — 292.71, 4 — 305.11, 5 — 317.52 нс; *г* — импульс генерации: 1 — расчет, 2 — эксперимент.

долго и тем не менее необходимость продолжения этих исследований и сегодня не вызывает сомнений.

Неоднородность распределения мощности излучения электроразрядных лазеров является следствием развития начальных неоднородностей в распределениях электрического поля в разрядном промежутке, концентрации компонентов активной среды и электронов предъюнизации. Эволюция начальных неоднородностей имеет взаимосвязанный характер; неоднородности, как правило, с течением времени усиливаются в большей или меньшей степени [10–15]. Причем априори предсказать пространственно-временную динамику накачки и генерации чрезвычайно сложно, хотя общие закономерности известны. Так, установлено, что увеличение концентрации галогеносодержащего ком-

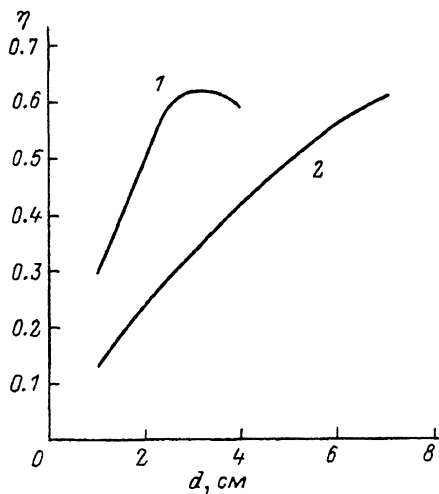


Рис. 4. Зависимость КПД накачки от величины межэлектродного зазора  $\alpha_0$  при различных давлениях активной среды  $P$ .

$U_0 = 24$  кВ;  $P$ , атм: 1 — 4, 2 — 2.

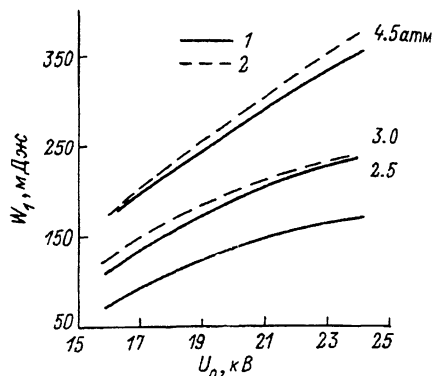


Рис. 5. Зависимость энергии генерации  $W_1$  от зарядного напряжения генератора накачки  $U_0$  при различных давлениях активной среды (1 — расчет, 2 — эксперимент).

понента ( $F_2$ ,  $HC1$  и др.) в активной среде приводит к ухудшению однородности электроразрядной накачки [1,18-21]. В то же время дается неоднозначная оценка роли неоднородности предыонизации.

2. Один из вариантов электродной системы разработанного в НТЦ МИС НИИЭФА им. Д.В. Ефремова электроразрядного эксимерного лазера представлен на рис. 2. Высоковольтный электрод — катод выполнен по профилю Карлсона с рядом незначительных изменений, учитывающих реальную геометрию второго электрода и токоподводов к нему. Катод имеет плоскую часть, заземленный электрод — анод также имеет плоскую часть, а затем скругления, переходящие в плоские полки, на которых расположены искровые УФ предыонизаторы. В рассмотренном варианте электродной системы неоднородность электрического поля не превышает 10% (рис. 3,б). Ниже рассматриваются лишь подобные случаи слабой неоднородности электрического поля в разрядном промежутке.

3. Проведенные нами расчеты в целом подтверждают известные представления о пространственно-временной динамике электроразрядной накачки [18-21]. Численное моделирование эволюции распределений компонент плазмы разряда (рис. 3) показывает, что электрический разряд зажигается там, где напряженность электрического поля максимальная и наиболее интенсивно протекают процессы возбуждения и ступенчатой ионизации метастабилей. Области с меньшей напряженностью электрического поля захватываются процессами горения разряда с запаздыванием, т.е. процесс распространения разряда носит характер волны горения, распространяющейся из области с максимальной напряженностью электрического поля в области с меньшей напряженностью поля. Дальнейшее развитие разряда определяется двумя факторами: уменьшением напряжения на разрядном промежутке, обусловленным реакцией электрической цепи на повышение

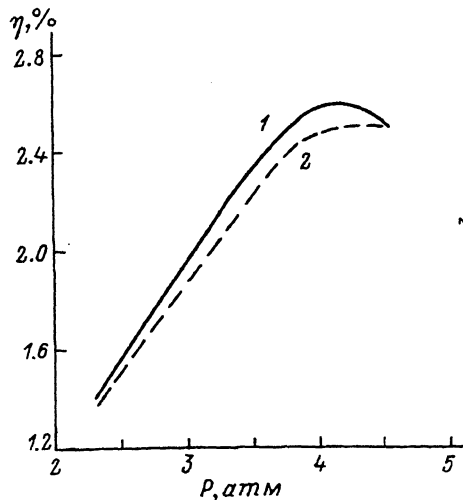


Рис. 6. Зависимость КПД  $\eta_1$  лазера от давления активной среды при разрядном напряжении генератора накачки  $U_0 = 24$  кВ (1 — расчет, 2 — эксперимент).

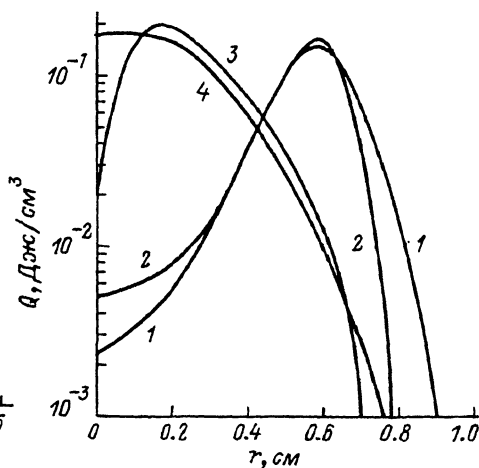


Рис. 7. Распределения удельной энергии накачки при модельном распределении скорости образования электрон-ионных пар.

$U_0 = 24$  кВ,  $P_0 = 4$  атм, Ne:Kr:F = 715 : 25 : 1,  $Q_0 = 10^{15}$  см $^{-3}$  · с $^{-1}$ ;  $\alpha$ , см $^{-1}$ : 1, — 4, 2 — 2, 3 — 0.1, 4 — 0.

электропроводности плазмы разряда и уменьшение полного сопротивления разрядного промежутка, и интенсивной наработкой в областях с повышенной напряженностью электрического поля активного прилипателя, вызывающей резкое нарастание скорости гибели электронов вследствие прилипания. С учетом этих факторов условия горения разряда, т.е. рост концентрации электронов, могут выполняться как в центральной области межэлектродного промежутка, так и на периферии, что будет показано ниже.

4. Как уже отмечалось выше, на однородность энерговклада в активную среду оказывает существенное влияние величина концентрации галогеноносителя. При достаточно больших значениях концентрации галогеноносителя после зажигания разряда в центральной области резко возрастает скорость прилипания электронов. Поэтому большая скорость роста концентрации электронов обеспечивается на периферии электродов. При этом на профилях концентрации электродов и суммарного энерговклада за импульс появляются провалы в центре.

5. При численном исследовании влияния предыонизации на динамику накачки активной среды и генерации распределение скорости образования электрон-ионных пар  $Q$  задавалось по формуле

$$Q = Q_0(1 + \alpha X),$$

которая качественно описывает предыонизацию с помощью применявшейся системы искровых разрядов, расположенных на периферии электродов (рис. 2).

Результаты расчетов распределения энергии накачки эксимерной среды для вариантов, отличающихся начальным распределением мощности предыонизации, приведены на рис. 7. При  $\alpha = 0$  имеем однород-

ное распределение предыонизации. В этом случае разряд зажигается сначала в центральной области, где напряженность электрического поля максимальна, а затем зона горения разряда заполняет значительную часть межэлектродной области, ограниченной плоскими частями электродов. При заметном уменьшении напряжения на разряде происходит поджатие разряда к центру, где напряженность электрического поля оказывается еще достаточной для необходимого воспроизводства электронов и поддержания горения разряда. Распределения концентрации электронов в разряде имеют симметричный (относительно оси  $Y$ ) характер с максимумом в центре. Подобный же вид имеет и кривая распределения суммарного за импульс энерговыклада в активную среду (рис. 7).

Неоднородность предыонизации проявляет себя неоднозначно. При сравнительно слабой подсветке периферии, как и в рассмотренном выше случае однородной предыонизации, происходит сжатие зоны эффективного энерговыклада и генерации к центру. Интенсивная подсветка периферии приводит к развалу разряда на две локализованные на периферии области, в которых осуществляется основное выделение энергии. С другой стороны, интенсивная предыонизация центральной области способствует вытеснению зоны горения разряда на периферию и выравниванию распределения энерговыклада по сечению разряда. Это свидетельствует о принципиальной возможности улучшать однородность выходного излучения электроразрядного лазера путем программирования пространственного распределения предыонизации его активной среды (рис. 7), что уже отмечалось в [21].

### Выходные характеристики лазера

В проводившихся численных экспериментах оптимизировались эффективность электроразрядной накачки и полный КПД лазера путем улучшения согласования генератора импульсов накачки с нелинейной нагрузкой — электрическим разрядом в активной среде лазера. Варьировались состав и полное давление рабочей смеси  $P$ , зарядное напряжение генератора  $U_0$  и величина межэлектродного зазора  $d_0$ . Качественное влияние этих факторов на удельные и интегральные характеристики накачки и генерации изучены достаточно хорошо [1], полученные нами результаты укладываются в существующие представления (рис. 4-7). В частности, установлено, что для увеличения КПД и полной энергии генерации целесообразно увеличивать межэлектродный зазор  $d_0$  и давление рабочей смеси до значений, определяющих условия согласования генератора накачки и сопротивление разряда. Для каждого физически разумного значения  $d_0$  можно найти оптимальное давление рабочей смеси. При близких удельных значениях энергии генерации полная энергия излучения в импульсе  $W_1 \sim d_0$ . Однако при переходе к большим рабочим объемам активной среды кроме проблемы согласования возникает и другая проблема — устойчивость разряда [1], которая в данной работе не рассматривается.

Имея в виду отмеченные выше возможности повышения полной энергии излучения лазера, рассмотрим приведенные на рис. 5,6 результаты расчетов интегральных характеристик генерации для вариантов, отличающихся давлением смеси  $P_0$  и зарядным напряжением генератора  $U_0$  при фиксированной величине межэлектродного зазора

$d_0 = 2$  см. Расчеты показывают, что обострение импульсов накачки с помощью магнитных ключей позволяет достигать высокой эффективности передачи энергии в так называемую пиковую емкость  $\eta_0 \cong 70\%$  и получать достаточно высокий КПД накачки  $\eta_n > 60\%$ , при этом для рассмотренных вариантов максимальное значение полного КПД лазера  $\eta_1 \cong 3\%$  (при  $U_0 = 24$  кВ,  $P_0 = 4.5$  атм,  $W_1 \cong 0.350$  Дж). По данным характеристикам рассмотренный лазер несколько превышает уровень существующих сегодня отечественных установок того же класса. Причем, как показывают результаты расчетов, максимально возможные для этой установки параметры еще не достигнуты. Например, при увеличении расстояния между электродами до 3–3.5 см можно ожидать повышения энергии в импульсе примерно на 30% (дальнейшее увеличение межэлектродного зазора нецелесообразно с точки зрения согласования генератора и разряда).

### Заключение

Разработана модель электроразрядного эксимерного лазера с системой питания, основанной на импульсном генераторе с магнитными ключами. Достаточно хорошее в целом согласие результатов проведенных расчетов и экспериментов, отвечающих нескольким установкам, подтверждает адекватность разработанной модели.

Показано, что даже при слабой пространственно-временной неоднородности электрического поля и достаточно высокой начальной концентрации галогеноносителя в активной среде неоднородность предыонизации активной среды оказывает заметное влияние на пространственно-временные характеристики разряда и генерации излучения. Поэтому для получения генерации с высокой однородностью луча при выполнении хорошо известных требований к фронтам импульса накачки и форме электродов целесообразно использовать смеси с небольшим содержанием галогеноносителя и добиваться высокой однородности ( $\sim 1\%$ ) предыонизации среды.

В заключение авторы благодарят М.А. Василевского, В.М. Водозова, М.Э. Осеевского и других сотрудников лаборатории за экспериментальные материалы (осциллограммы напряжения на пиковой емкости, экспериментальные зависимости напряжения пробоя рабочей смеси от зарядного напряжения генератора накачки и КПД лазера от давления рабочей смеси), предоставленные авторам для сравнения, и ряд полезных замечаний.

### Список литературы

- [1] Баранов В.Ю., Борисов В.М., Степанов Ю.Ю. Электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 216 с.
- [2] Oesterlin P., Basting D. // Phys. World. 1990. Vol. 3. N 7. P. 43–46.
- [3] Muller-Horsche E., Oesterlin P., Basting D. // Laser and Optron. 1990. Vol. 9. N 9. P. 39–40, 42–44.
- [4] Гукетлаев Ю.Х., Васенков А.А., Гарицын А.Г., Федоренко В.В. Лазерная технология интегральных схем. М.: Радио и связь, 1991. 320 с.
- [5] Боков Ю.С., Берестенко М.К., Вьюков Л.А. // Электрон. пром-сть. 1990. № 11. С. 72–77.
- [6] Vasilevsky M.A., Vodovozov V.M. et al. // 1992 Intern. Conf. on Advanced and Laser Technologies. ALT'92. Book of Summaries. Pt 6. Moscow, 1992. P. 59–60.
- [7] Babushkin S.R., Burtsev V.A., Vasilevsky M.A. et al. // 1992 Intern. Conf. on Advanced and Laser Technologies. ALT'92. Book of Summaries. Pt 5. Moscow, 1992. P. 29–31.

- [8] Молчанов А.Г. // Исследования по теории лазеров. Тр. Физического ин-та им. П.Н. Лебедева АН СССР. 1986. Т. 171. С. 54-127.
- [9] Бойченко А.М., Держнев В.И., Жидков А.Г. и др. // Плазменные лазеры видимого и ближнего УФ диапазонов. Тр. Института общей физики АН СССР. 1989. Т. 21. С. 44-115.
- [10] Лакоба И.С., Сыцько Ю.И., Якубуева Е.Д. // Кинетика низкотемпературной плазмы и газовые лазеры. Тр. Физического ин-та им. П.Н. Лебедева АН СССР. 1984. Т. 145. С. 131-145.
- [11] Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Физические процессы в газовых лазерах. М.: Энергоатомиздат, 1985.
- [12] Карнюшин В.Н., Солоухин Р.И. Макроскопические и молекулярные процессы в газовых лазерах. М.: Атомиздат, 1981.
- [13] Kieffer L.J. A Compilation of Electron Collision Cross Section Data for Modeling Gas Discharge. University of Colorado, Boulder, 1979.
- [14] Green A.E., Brau C.A. // IEEE J. Quant. Electron. 1978. Vol. QE-14. N 12. P. 951-957.
- [15] Setser D.W., Brashears H.C., Dreiling T.D. // J. de Physique. 1980. Vol. 41. Coll. N 4. P. C3-195-C3-202.
- [16] Maeda M., Takahashi F., Mizunami T. et al. // Jap. J. Appl. Phys. 1982, Vol. 21. N 8. P. 1161-1169.
- [17] Hozazono H., Midorikawa K., Obara M. et al. // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 56. N 3. P. 680-690.
- [18] Мийдла П.Х., Михельсоо В.Т., Пэст В.Э. и др. // Физика лазеров и лазерная техника. Тр. Института физики АН Эстонии. 1987. Т. 60. С. 15-38.
- [19] Соркина Р.А. Квантовая электрон. 1990. Т. 17. № 8. С. 1001-1005.
- [20] Багинский В.М., Белокрыницкий Н.С., Головинский П.Н. и др. // Квантовая электрон. 1990. Т. 17 № 9. С. 1180-1181.
- [21] Багинский В.М., Белокрыницкий Н.С., Головинский П.Н. и др. // Квантовая электрон. 1990. Т. 17. № 11. С. 1390-1394.
- [22] Бурцев В.А., Ермолаев Ю.Л., Калинин Н.В. и др. Препринт НИИ ЭФА им. Д.В. Ефремова. № П-0920. М.: ЦНИИ Атоминформ, 1993, 29 с.

