

Влияние параметров возбуждения и активной среды на эффективность эксимерного электроразрядного ArF-лазера

А.М.Ражев, А.И.Щедрин, А.Г.Калюжная, А.А.Жупиков

Разработана кинетическая модель процессов, протекающих в плазме электроразрядного эксимерного ArF-лазера ($\lambda = 193$ нм) на смесях с буферными газами He и Ne. Проведены теоретическое и экспериментальное исследования влияния параметров возбуждения и активной среды на энергию генерации и полный КПД эксимерного электроразрядного ArF-лазера. Показано, что для достижения максимальной энергии генерации при максимальном КПД в ArF-лазере на смеси He–Ar–F₂ необходима удельная мощность накачки $\sim 4.5 - 5.0$ МВт/см³. Впервые для ArF-лазера на смесях с буферным газом гелием при удельной мощности накачки 5.0 МВт/см³ получена энергия в импульсе 1.3 Дж при КПД 2.0 %.

Ключевые слова: эксимерный ArF-лазер, буферный газ, параметры возбуждения.

1. Введение

В настоящее время импульсный эксимерный электроразрядный ArF-лазер ($\lambda = 193$ нм) находит широкое применение в фотолитографии, микроэлектронике, медицине и научных исследованиях. Для большинства применений наиболее важными параметрами лазера являются максимально достижимая энергия излучения в импульсе при высоком КПД, надежность и эффективность схемы возбуждения лазера, а также стоимость его эксплуатации, которая в основном определяется стоимостью газовой смеси. Известно, что использование гелия вместо неона в качестве буферного газа позволяет значительно снизить стоимость эксплуатации лазера. В связи с этим создание мощного высокоэффективного лазера, работающего на недорогих газовых смесях с буферным газом гелием, является актуальной задачей. Для оптимизации параметров лазера важно понимание физических процессов, протекающих в плазме газового разряда.

Одним из наиболее существенных параметров, обеспечивающих получение высоких значений энергии излучения и полного КПД лазера, является интенсивность накачки активной среды. Для каждой активной среды (с буферным газом He и Ne) существуют оптимальные интенсивности накачки, при которых достигается максимальная энергия генерации при максимальном полном КПД лазера. Под интенсивностью накачки здесь следует понимать удельную мощность накачки активной среды W , которая определялась как $W = E/(V\tau)$, где E – энергия, запасенная в обостряющей емкости; V – активный объем; τ – длительность по основанию первого полупериода тока разряда. Полный КПД лазера в данной работе опреде-

лялся как отношение энергии излучения лазера к энергии, запасенной в накопительной емкости системы возбуждения.

В работе [1] было показано, что для получения высоких значений энергии излучения и КПД ArF-лазера на смесях с буферным газом неоном необходима интенсивность накачки 1.8–2.5 МВт/см³. При такой интенсивности накачки в лазере с системой возбуждения, собранной по схеме с перезарядкой емкости и автоматической УФ предыонизацией, был получен максимальный для электроразрядного ArF-лазера КПД 2.1 % при энергии излучения 270 мДж. При этом объем активной среды в зависимости от условий эксперимента был равен $75 \times (0.6 - 1.0) \times (2.6 - 3.2)$ см. В работе [2] в лазере, аналогичном описанному в [1], была достигнута энергия излучения 500 мДж при КПД 1.0 %.

Подобные результаты были получены в работе [3], где использовалась система возбуждения, аналогичная рассмотренной в [1, 2]. В смеси Ne–He–Ar–F₂, занимающей объем 116 см³, достигнут максимальный КПД 1.3 % при энергии излучения 300 мДж, а максимальная энергия излучения 420 мДж получена при КПД 1.1 %. При этом интенсивность накачки, по оценкам, составила примерно 2.0 МВт/см³. При исследовании роли буферных газов He и Ne в разработанной конструкции лазера было показано, что замена неона гелием приводит к снижению энергии излучения и КПД примерно в 2.5 раза, а при зарядных напряжениях ниже 30 кВ – к прекращению генерации.

Максимальная энергия излучения для ArF-лазера на гелиевой смеси получена в [4]. Возбуждение лазера с активным объемом 500 см³ осуществлялось в схеме с двухступенчатым генератором Маркса и автоматической УФ предыонизацией. В экспериментах была получена энергия 1.7 Дж при напряжении на накопительной емкости 70 кВ и давлении активной среды 5 атм, но КПД лазера не превышал 0.44 %. При уменьшении напряжения до 40 кВ и давления до 4 атм полный КПД увеличивался до 0.67 %. Однако из-за отсутствия в этой работе данных о напряжении на разрядном промежутке и длительности тока разряда невозможно было оценить интенсивность накачки.

А.М.Ражев, А.А.Жупиков. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: razhev@laser.nsc.ru, azh@laser.nsc.ru, web-site: www.laser.nsc.ru
А.И.Щедрин, А.Г.Калюжная. Институт физики НАНУ, Украина, 03650 Киев, просп. Науки, 46; e-mail: ashched@iop.kiev.ua, web-site: www.iop.kiev.ua

Поступила в редакцию 8 июня 2005 г.

При проведении теоретических исследований влияния буферного газа на эффективность и энергию излучения ArF-лазера авторами работ [5, 6] было показано, что использование неона вместо гелия не дает заметного преимущества и что для эффективного возбуждения активной среды на основе буферного газа Ne требуется более высокая интенсивность накачки, чем в случае He.

Результаты, представленные в [7], несколько отличаются от результатов расчетов, приведенных в [5], и свидетельствуют о том, что ArF-лазер на смеси с буферным газом Ne с точки зрения получения более высоких значений энергии и КПД предпочтительнее, чем аналогичный лазер на смеси с He. Предельный КПД газоразрядного ArF-лазера для условий, рассмотренных в [7], должен составлять не менее 4.0 %.

В нашей работе [8] был исследован ArF-лазер на смеси He–Ar–F₂, где интенсивность накачки была увеличена до 3.0 МВт/см³. Это позволило в активной среде объемом 130 см³ получить энергию излучения 550 мДж при КПД 1.3 %. Максимальный КПД составил 1.5 % при энергии излучения 350 мДж. Дальнейшее увеличение интенсивности накачки ограничивалось техническими возможностями данной системы возбуждения.

Из приведенного обзора литературы следует, что в настоящее время не существует единого мнения относительно эффективности использования гелия или неона в качестве буферного газа. Наибольшая энергия генерации при максимальном КПД ArF-лазера была получена на смесях с буферным газом Ne при оптимальной интенсивности накачки ~2.0 МВт/см³. Применение гелия в качестве буферного газа вместо неона предполагало увеличение интенсивности накачки. Однако ее конкретное значение, обеспечивающее максимальную энергию излучения при максимальном КПД, является неизвестным.

Цель настоящей работы – теоретическое и экспериментальное исследование влияния параметров возбуждения и активной среды на параметры излучения эксимерного газоразрядного ArF-лазера, работающего на смесях с буферными газами гелием и неоном. В связи с отсутствием данных в литературе решалась задача нахождения оптимальной интенсивности накачки, при которой одновременно достигаются максимальные КПД и энергии ArF-лазера на смеси с буферным газом гелием.

2. Экспериментальная установка

В экспериментах измерялись энергетические и амплитудно-временные характеристики импульсов напряжения, тока и излучения в наносекундном диапазоне времени. Аппаратура и методы измерений описаны в работе [9].

Экспериментальная установка, использованная в настоящей работе, подробно описана нами в [10]. Напомним только, что в качестве системы возбуждения была выбрана схема LC-инвертора с искровым разрядником, автоматической УФ предыонизацией и низкоиндуктивным разрядным контуром. По аналогии с работой [10] для увеличения интенсивности накачки в применяемой системе возбуждения индуктивность основного контура LC-инвертора была увеличена до 100 нГн за счет увеличения индуктивности на участке цепи между LC-инвертором и низкоиндуктивным разрядным контуром. Влияние этой индуктивности на интенсивность накачки подробно описано в [10]. Использование данного метода управления параметрами накачки позволило нам изменять

интенсивность накачки в широком диапазоне (до 6.0 МВт/см³).

Расстояние между основными электродами в разрядной камере лазера составляло 2.7 см. Длина активной части была равна 59 см. Следует отметить, что ширина разряда представляла собой переменную величину, зависящую от параметров как активной среды (состава и давления), так и накачки (зарядного напряжения). Ширина разряда определялась по размерам каверны, образованной при абляции полимерных материалов. Минимальная ширина разряда (0.7 см) получена в смесях с буферным газом гелием при минимальных уровнях накачки, а максимальная (1.2 см) – при максимальной накачке газовых смесей с буферным газом неоном. Таким образом, объем активной среды в зависимости от типа буферного газа и уровня накачки изменялся от 120 до 190 см³. Этот факт является важным для правильной оценки интенсивности накачки.

3. Теоретическая модель

В данной статье разработана теоретическая модель системы накачки и построена кинетическая модель процессов, происходящих в плазме разряда ArF-лазера на смесях He(Ne)–Ar–F₂. Результаты теоретического анализа сравнивались с результатами экспериментов.

При численном моделировании динамики разряда и излучения решались кинетические уравнения для компонент смеси совместно с уравнением, описывающим процессы в цепи питания лазера, и уравнением Больцмана для функции распределения электронов по энергиям в электрическом поле [11]. Схема кинетических процессов, использованная при моделировании плазменной кинетики в газовых смесях He–Ar–F₂ и Ne–Ar–F₂, включала в себя 94 реакции (табл.1). Скорости процессов (1)–(17) рассчитывались с помощью уравнения Больцмана. Сечения упругих и неупругих столкновений электронов с атомами Ne взяты из [12–14], с атомами Ne – из [13, 15–17]. Сечения процессов взаимодействия электронов с атомами аргона приведены в [12, 13, 17–19], с молекулами F₂ – в [20]. Теоретическая модель процессов, происходящих в системе возбуждения, разработана нами ранее и подробно описана в [10].

4. Результаты и их обсуждение

В расчетах и экспериментах по достижению максимальной энергии генерации оптимизировались состав активной газовой среды на основе буферного газа Ne и ее полное давление в зависимости от зарядного напряжения. В результате было установлено, что расчетный состав компонентов газовой смеси хорошо совпадал с полученным в экспериментах составом Ne : Ar : F₂ = 79.7 : 20 : 0.3 [8], а ее оптимальное давление увеличивалось от 1.7 до 2.5 атм с ростом зарядного напряжения от 20 до 32 кВ. При замене гелия неоном оптимальное давление при повышении зарядного напряжения газовой смеси изменялось от 1.8 до 2.6 атм.

Для определения влияния типа буферного газа на параметры возбуждения и излучения ArF-лазера было проведено исследование кинетики разряда в смесях на основе гелия и неона. На рис.1,а приведены функции распределения электронов по энергиям, рассчитанные для различных напряженностей электрического поля в смесях He –

Табл.1.

Номер реакции	Реакция	Константа скорости	Литература
1	$\text{He} + e \rightarrow \text{He}^* + e$	Рассчитана из уравнения Больцмана	
2	$\text{He} + e \rightarrow \text{He}^+ + e + e$	"-	
3	$\text{Ne} + e \rightarrow \text{Ne}^* + e$	"-	
4	$\text{Ne} + e \rightarrow \text{Ne}^+ + e + e$	"-	
5	$\text{Ne}^* + e \rightarrow \text{Ne}^+ + e + e$	"-	
6	$\text{Ar} + e \rightarrow \text{Ar}^* + e$	"-	
7	$\text{Ar} + e \rightarrow \text{Ar}^{**} + e$	"-	
8	$\text{Ar} + e \rightarrow \text{Ar}^+ + e + e$	"-	
9	$\text{Ar}^* + e \rightarrow \text{Ar}^+ + e + e$	"-	
10	$\text{Ar}^{**} + e \rightarrow \text{Ar}^+ + e + e$	"-	
11	$\text{Ar}^* + e \rightarrow \text{Ar}^{**} + e$	"-	
12	$\text{Ar}^{**} + e \rightarrow \text{Ar}^* + e$	"-	
13	$\text{F}_2 + e \rightarrow \text{F}_2(v) + e$	"-	
14	$\text{F}_2 + e \rightarrow \text{F}_2^* + e$	"-	
15	$\text{F}_2 + e \rightarrow \text{F}_2^+ + e$	"-	
16	$\text{F}_2 + e \rightarrow \text{F} + \text{F}^-$	"-	
17	$\text{F}_2 + e \rightarrow \text{F} + \text{F} + e$	"-	
18	$\text{Ar}^+ + 2\text{He} \rightarrow \text{HeAr}^+ + \text{He}$	$1.0 \times 10^{-32} \text{ см}^6/\text{с}$	[21]
19	$\text{Ar}^+ + 2\text{Ne} \rightarrow \text{ArNe}^+ + \text{Ne}$	$1.0 \times 10^{-32} \text{ см}^6/\text{с}$	[21]
20	$\text{Ar}^+ + \text{Ar} + \text{He} \rightarrow \text{HeAr}^+ + \text{He}$	$8.0 \times 10^{-32} \text{ см}^6/\text{с}$	[22]
21	$\text{Ar}^+ + \text{Ar} + \text{He} \rightarrow \text{Ar}_2^+ + \text{He}$	$8.0 \times 10^{-32} \text{ см}^6/\text{с}$	[22]
22	$\text{Ar}^+ + \text{Ar} + \text{Ne} \rightarrow \text{Ar}_2^+ + \text{Ne}$	$2.5 \times 10^{-31} \text{ см}^6/\text{с}$	[22]
23	$\text{Ar}^+ + \text{Ar} + \text{Ne} \rightarrow \text{ArNe}^+ + \text{Ar}$	$2.5 \times 10^{-31} \text{ см}^6/\text{с}$	[22]
24	$\text{Ar}^+ + \text{Ar} + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}_2^+ + \text{Ar}$	$3.0 \times 10^{-31} \text{ см}^6/\text{с}$	[22]
25	$\text{He}^+ + \text{He} + \text{He} \rightarrow \text{He}_2^+ + \text{He}$	$1.0 \times 10^{-31} \text{ см}^6/\text{с}$	[21]
26	$\text{Ne}^+ + 2\text{Ne} \rightarrow \text{Ne}_2^+ + \text{Ne}$	$3.0 \times 10^{-31} \text{ см}^6/\text{с}$	[22]
27	$\text{He}^+ + \text{He} + \text{Ar} \rightarrow \text{He}_2^+ + \text{Ar}$	$8.0 \times 10^{-32} \text{ см}^6/\text{с}$	[21]
28	$\text{He}^+ + \text{He} + \text{Ar} \rightarrow \text{HeAr}^+ + \text{He}$	$8.0 \times 10^{-32} \text{ см}^6/\text{с}$	[21]
29	$\text{He}^+ + 2\text{Ar} \rightarrow \text{HeAr}^+ + \text{Ar}$	$8.0 \times 10^{-32} \text{ см}^6/\text{с}$	[21]
30	$\text{HeAr}^+ + \text{He} \rightarrow \text{Ar}^+ + 2\text{He}$	$1.3 \times 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$	[21]
31	$\text{HeAr}^+ + \text{He} \rightarrow \text{He}^+ + \text{He} + \text{Ar}$	$5.0 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$	[23]
32	$\text{HeAr}^+ + \text{He} \rightarrow \text{He}_2^+ + \text{Ar}$	$5.0 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$	[23]
33	$\text{HeAr}^+ + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{He} + \text{Ar}$	$5.0 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$	[23]
34	$\text{HeAr}^+ + \text{Ar} \rightarrow \text{He}^+ + 2\text{Ar}$	$5.0 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$	[23]
35	$\text{HeAr}^+ + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}_2^+ + \text{He}$	$3.6 \times 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$	[21]
36	$\text{ArNe}^+ + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{Ar} + \text{Ne}$	$5.0 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$	[23]
37	$\text{ArNe}^+ + \text{Ne} \rightarrow \text{Ar}^+ + 2\text{Ne}$	$5.0 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$	[23]
38	$\text{ArNe}^+ + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}_2^+ + \text{Ne}$	$5.0 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$	[23]
39	$\text{He}^* + \text{He} + \text{He} \rightarrow \text{He}_2^* + \text{He}$	$4.3 \times 10^{-32} \text{ см}^6/\text{с}$	[11]
40	$\text{Ne}^* + 2\text{Ne} \rightarrow \text{Ne}_2^* + \text{Ne}$	$4.1 \times 10^{-34} \text{ см}^6/\text{с}$	[24]
41	$\text{Ar}^* + \text{Ar} + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}_2^* + \text{Ar}$	$1.0 \times 10^{-32} \text{ см}^6/\text{с}$	[25]
42	$\text{Ar}^{**} + \text{Ar} + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}_2^* + \text{Ar}$	$5.0 \times 10^{-32} \text{ см}^6/\text{с}$	[26]
43	$\text{Ar}^* + \text{Ar} + \text{He} \rightarrow \text{Ar}_2^* + \text{He}$	$1.0 \times 10^{-32} \text{ см}^6/\text{с}$	[21]
44	$\text{Ar}^{**} + \text{Ar} + \text{He} \rightarrow \text{Ar}_2^* + \text{He}$	$1.0 \times 10^{-32} \text{ см}^6/\text{с}$	[21]
45	$\text{He}_2^* + e \rightarrow 2\text{He} + e$	$3.8 \times 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$	[27]
46	$\text{He}^* + e \rightarrow \text{He} + e$	$2.6 \times 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$	[27]
47	$\text{He}_2^* \rightarrow 2\text{He}$	$3.6 \times 10^8 \text{ с}^{-1}$	[27]
48	$\text{Ne}^* + \text{Ne}^* \rightarrow \text{Ne}^+ + \text{Ne} + e$	$2.5 \times 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$	[28]
49	$\text{Ne}^* + \text{F}_2 \rightarrow \text{NeF}^* + \text{F}$	$5.3 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$	[28]
50	$\text{Ar}^* + \text{Ar}^* \rightarrow \text{Ar}_2^+ + e$	$5.0 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$	[26]
51	$\text{Ar}^{**} + \text{Ar}^{**} \rightarrow \text{Ar}_2^+ + e$	$5.0 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$	[26]
52	$\text{Ar}^* + \text{Ar}^* \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{Ar} + e$	$5.0 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$	[26]
53	$\text{Ar}^{**} + \text{Ar}^{**} \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{Ar} + e$	$5.0 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$	[26]
54	$\text{Ar}_2^* + e \rightarrow 2\text{Ar} + e$	$1.0 \times 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$	[30]
55	$\text{Ar}_2^* \rightarrow 2\text{Ar}$	$3.12 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$	[25]
56	$\text{Ne}_2^* \rightarrow 2\text{Ne}$	$6.0 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$	[25]
57	$\text{Ar} + \text{He}^* \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{He} + e$	$7.0 \times 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$	[31]
58	$\text{Ne}^+ + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{Ne}$	$6.0 \times 10^{-15} \text{ см}^3/\text{с}$	[29]
59	$\text{Ne}_2^+ + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}^+ + 2\text{Ne}$	$5.0 \times 10^{-14} \text{ см}^3/\text{с}$	[25]
60	$\text{F} + \text{He} + e \rightarrow \text{F}^{--} + \text{He}$	$6.6 \times 10^{-34} \text{ см}^6/\text{с}$	[27]

Продолжение табл.1

Номер реакции	Реакция	Константа скорости	Литература
61	$\text{Ar}^* + \text{F}_2 \rightarrow \text{ArF}^* + \text{F}$	$5.4 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$	[25]
62	$\text{Ar}^{**} + \text{F}_2 \rightarrow \text{ArF}^* + \text{F}$	$5.4 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$	[25]
63	$\text{Ar}_2^* + \text{F}_2 \rightarrow \text{ArF}^* + \text{Ar} + \text{F}$	$3.0 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$	[25]
64	$\text{He}_2^+ + e \rightarrow \text{He}^* + \text{He}$	$5.0 \times 10^{-10} (0.026/T_e) \text{ см}^3/\text{с}$	[23]
65	$\text{Ar}_2^+ + e \rightarrow \text{Ar}^* + \text{Ar}$	$8.5 \times 10^{-7} (0.026/T_e)^{0.67} \text{ см}^3/\text{с}$	[23]
66	$\text{Ne}_2^+ + e \rightarrow \text{Ne}^* + \text{Ne}$	$1.7 \times 10^{-7} (0.026/T_e)^{0.43} \text{ см}^3/\text{с}$	[23]
67	$\text{F}_2^+ + \text{F} \rightarrow \text{F}_2 + \text{F}$	$10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$	[27]
68	$\text{Ar}^+ + \text{F}^- + \text{M} \rightarrow \text{ArF}^* + \text{M}$	Рассчитана по формулам Фланнери	[34]
69	$\text{Ar}_2^+ + \text{F}^- + \text{M} \rightarrow \text{Ar}_2\text{F}^* + \text{M}$	"-	[34]
70	$\text{He}^+ + \text{F}^- + \text{M} \rightarrow \text{He}^* + \text{F} + \text{M}$	"-	[34]
71	$\text{He}_2^+ + \text{F}^- + \text{M} \rightarrow 2\text{He} + \text{F} + \text{M}$	"-	[34]
72	$\text{Ne}^+ + \text{F}^- + \text{M} \rightarrow \text{NeF}^* + \text{M}$	"-	[34]
73	$\text{ArF}^* + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar} + \text{Ar} + \text{F}$	$9.0 \times 10^{-12} \text{ см}^3/\text{с}$	[32]
74	$\text{ArF}^* + \text{He} \rightarrow \text{Ar} + \text{He} + \text{F}$	$1.0 \times 10^{-12} \text{ см}^3/\text{с}$	[32]
75	$\text{ArF}^* + \text{Ne} \rightarrow \text{Ar} + \text{Ne} + \text{F}$	$1.6 \times 10^{-12} \text{ см}^3/\text{с}$	[32]
76	$\text{ArF}^* + \text{F}_2 \rightarrow \text{Ar} + 3\text{F}$	$1.9 \times 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$	[32]
77	$\text{ArF}^* + 2\text{Ar} \rightarrow \text{Ar}_2\text{F}^* + \text{Ar}$	$5.2 \times 10^{-31} \text{ см}^6/\text{с}$	[25]
78	$\text{ArF}^* + \text{Ar} + \text{He} \rightarrow \text{Ar}_2\text{F}^* + \text{He}$	$1.0 \times 10^{-31} \text{ см}^6/\text{с}$	[32]
79	$\text{ArF}^* + \text{Ar} + \text{Ne} \rightarrow \text{Ar}_2\text{F}^* + \text{Ne}$	$3.5 \times 10^{-31} \text{ см}^6/\text{с}$	[32]
80	$\text{ArF}^* + 2\text{Ne} \rightarrow \text{Ar} + \text{F} + 2\text{Ne}$	$1.0 \times 10^{-32} \text{ см}^6/\text{с}$	[32]
81	$\text{ArF}^* + e \rightarrow \text{Ar} + \text{F} + e$	$2.0 \times 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$	[32]
82	$\text{Ar}_2\text{F}^* + \text{He} \rightarrow \text{ArF}^* + \text{Ar} + \text{He}$	$1.0 \times 10^{-12} \text{ см}^3/\text{с}$	[11]
83	$h\nu + \text{Ne}^* \rightarrow \text{Ne}^+ + e$	$1.2 \times 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}$	[33]
84	$h\nu + \text{Ar}^* \rightarrow \text{Ar}^+ + e$	$3.0 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$	[33]
85	$h\nu + \text{Ar}^{**} \rightarrow \text{Ar}^+ + e$	$9.0 \times 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}$	[33]
86	$h\nu + \text{F}^- \rightarrow \text{F} + e$	$2.8 \times 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$	[25]
87	$h\nu + \text{He}_2^* \rightarrow \text{He}_2^+ + e$	$5.7 \times 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}$	[11]
88	$h\nu + \text{Ne}_2^* \rightarrow \text{Ne}_2^+ + e$	$3.0 \times 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}$	[32]
89	$h\nu + \text{Ar}_2^* \rightarrow \text{Ar}_2^+ + e$	$3.0 \times 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}$	[11]
90	$h\nu + \text{Ar}_2\text{F}^* \rightarrow \text{ArF}^* + \text{Ar}$	$3.0 \times 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}$	[11]
91	$h\nu + \text{ArF}^* \rightarrow \text{ArF}(X) + 2h\nu$	$9.0 \times 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$	[11]
92	$h\nu + \text{ArF}(X) \rightarrow \text{ArF}^*$	$9.0 \times 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$	[11]
93	$\text{ArF}^* \rightarrow \text{ArF}(X) + h\nu$	$2.4 \times 10^8 \text{ с}^{-1}$	[25]
94	$\text{ArF}(X) \rightarrow \text{Ar} + \text{F}$	10^9 с^{-1}	[11]

Примечание: М – буферный газ; X – основное состояние эксимерной молекулы; T_e – температура электронов в кельвинах.

$\text{Ar}-\text{F}_2$ и $\text{Ne}-\text{Ar}-\text{F}_2$ при давлении 2.5 атм и одинаковом содержании аргона (20 %) и фтора (0.3 %).

Как следует из рис.1, в присутствии неона в разряде существенно повышается доля электронов с энергиями в интервале $\sim 10 - 15$ эВ, которые могут возбуждать и ионизировать атомы аргона (порог их возбуждения составляет 11.5 эВ, а потенциал ионизации – 15.7 эВ). Изменение функции распределения электронов по энергиям при замене гелия неона обусловлено различием транспортных сечений рассеяния электронов на атомах этих газов (рис.1,б). При низких энергиях упругое рассеяние электронов на атомах неона гораздо слабее, поэтому электроны с энергиями менее 20 эВ, образовавшиеся в результате возбуждения и ионизации атомов аргона, в смеси с неонам накапливаются в зоне разряда. В смеси на основе гелия такие электроны эффективно рассеиваются и уходят в область малых энергий. Поэтому, поскольку присутствие неона в рабочей смеси увеличивает число электронов, которые могут эффективно возбуждать и ионизировать атомы рабочего инертного газа, пробой разрядного промежутка в такой среде происходит несколько раньше, чем в среде с буферным газом гелием.

На рис.2 приведены временные зависимости напряжения пробоя разрядного промежутка в смесях состава $\text{He}(\text{Ne}): \text{Ar}: \text{F}_2 = 79.7:20:0.3$, рассчитанные при давлении 1.9 атм и зарядном напряжении 22 кВ. В смеси с буферным газом гелием напряжение пробоя составило 36 кВ, в смеси на основе неона – 31 кВ. При этом время между началом УФ предыонизации и моментом пробоя разрядного промежутка уменьшилось со 140 до 120 нс, что может отрицательно влиять на однородность объемного разряда [35, 36].

Кроме того, было отмечено, что при замене гелия неона уменьшается и время введения энергии в разряд, т. е. при прочих равных условиях длительность первого полупериода тока разряда уменьшилась с 40 до 35 нс. Таким образом, замена гелия неона в смеси ArF -лазера приводит к снижению энерговыклада. Результаты расчетов подтверждены экспериментально и соответствуют результатам работ [5, 6].

Теоретически и экспериментально была получена зависимость напряжения на разрядном промежутке U и тока через него J от зарядного напряжения U_1 (рис.3) для смеси $\text{He}-\text{Ar}-\text{F}_2$. Из рис.3 видно, что при увеличении за-

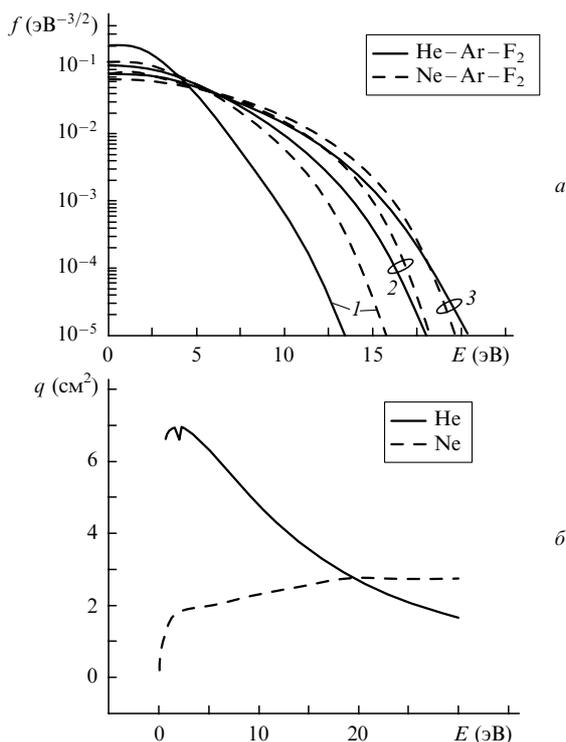


Рис.1. Функции распределения электронов по энергиям в смесях состава He(Ne): Ar : F₂ = 79.7 : 20 : 0.3 при давлении $p = 2.5$ атм, напряженностях электрического поля 4 (1), 8 (2) и 12 кВ/см (3) (а), а также транспортные сечения рассеяния q электронов на атомах гелия и неона (б).

рядного напряжения от 20 до 32 кВ напряжение на разрядном промежутке растет от 35 до 50 кВ, а ток через него – от 76 до 100 кА. При этом оптимальное давление газовой смеси при повышении зарядного напряжения увеличивалось от 1.7 до 2.5 атм.

При замене гелия неона характер этих зависимостей не меняется, однако напряжение на разрядном промежутке ниже и изменяется от 32 до 44 кВ, а оптимальное давление газовой смеси приблизительно то же и при повышении зарядного напряжения увеличивается от 1.8 до 2.6 атм. В то же время разрядный ток в обоих случаях практически не изменялся, что согласуется с результатами расчетов. Как было отмечено выше, при повышении зарядного напряжения увеличивалась и ширина разряда, причем в гелиевых смесях – от 0.7 до 1.1 см, а в неоновых –

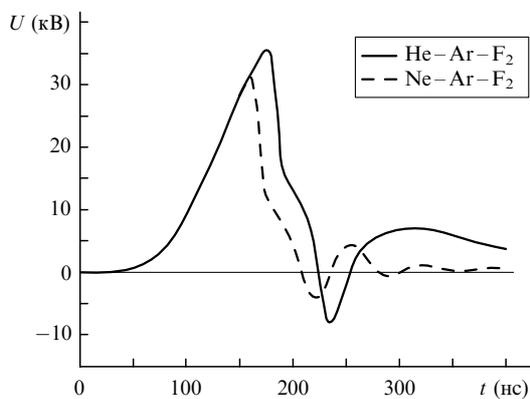


Рис.2. Временные зависимости напряжения U на разрядном промежутке в смесях состава He(Ne): Ar : F₂ = 79.7 : 20 : 0.3 при давлении 1.9 атм и зарядном напряжении 22 кВ.

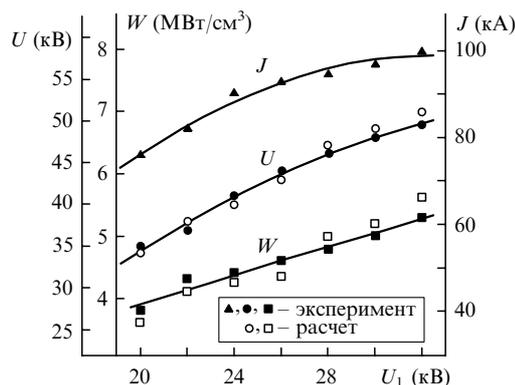


Рис.3. Расчетные и экспериментальные зависимости напряжения на разрядном промежутке U , разрядного тока J и интенсивности накачки W от зарядного напряжения U_1 для смеси He – Ar – F₂.

от 0.8 до 1.2 см. Это обстоятельство учитывалось нами при проведении теоретического анализа, что приводило к увеличению активного объема при увеличении энергии, вводимой в активную среду. При таком подходе мы получили хорошее совпадение результатов расчетов с результатами, полученными в экспериментальных исследованиях.

Были проведены аналогично [1, 10] оценки интенсивности накачки для смеси He – Ar – F₂. Установлено, что при увеличении зарядного напряжения U_1 от 20 до 32 кВ, объема активной среды лазера от 120 до 180 см³ и неизменной длительности (по основанию) первого полупериода тока разряда $\tau \approx 40$ нс интенсивность накачки W растет от 3.8 до 5.3 МВт/см³ (рис.3). При подобных оценках, проведенных для смесей на основе неона, было получено, что при изменении объема активной среды лазера от 145 до 190 см³ и $\tau = 35$ нс интенсивность накачки W изменяется от 3.0 до 4.4 МВт/см³.

Было показано, что увеличение полного давления и объема активной среды с ростом зарядного напряжения, а также достижение высокой интенсивности накачки W приводят к получению рекордных значений энергии генерации и КПД ArF-лазера с активной средой на основе буферного газа He. На рис.4 представлена зависимость энергии излучения E_{out} и полного КПД η ArF-лазера от зарядного напряжения U_1 для смесей состава He(Ne) : Ar : F₂ = 79.7 : 20 : 0.3. Видно, что при увеличении зарядного напряжения энергия излучения лазера на гелиевых смесях увеличивается от 0.4 до 1.35 Дж, а КПД достигает мак-

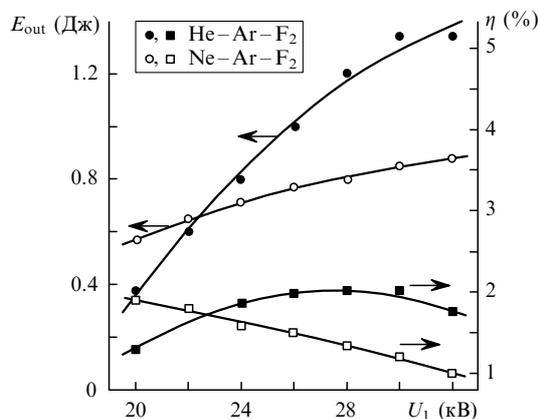


Рис.4. Экспериментальные зависимости энергии излучения E_{out} и полного КПД η ArF-лазера от зарядного напряжения U_1 для активных сред He – Ar – F₂ и Ne – Ar – F₂.

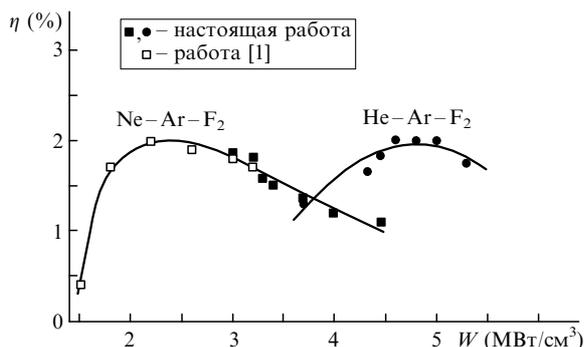


Рис.5. Зависимость полного КПД η ArF-лазера от интенсивности накачки W для активных сред He-Ar-F₂ и Ne-Ar-F₂.

симула. Таким образом, для ArF-лазера на смеси состава He : Ar : F₂ = 79.7 : 20 : 0.3 объемом 175 см³ при давлении 2.4 атм и интенсивности накачки 5.0 МВт/см² впервые получена энергия генерации 1.3 Дж при КПД 2.0 %.

В активной среде ArF-лазера на основе буферного газа неона при увеличении зарядного напряжения наблюдался более медленный по сравнению с газовыми смесями на основе гелия рост энергии излучения (от 0.5 до 0.88 Дж). При этом максимальный КПД достигался при минимальном зарядном напряжении и монотонно снижался от 1.9 % до 1.1 %.

Результаты, полученные для ArF-лазера на смесях с буферным газом неона (рис.4), можно объяснить с точки зрения достижения оптимальной интенсивности накачки. Зависимость полного КПД η ArF-лазера для активных сред на основе буферного газа He или Ne от интенсивности накачки W показана на рис.5. Как следует из результатов работы [1], для смеси Ne-Ar-F₂ оптимальная интенсивность накачки составляла 1.8–2.5 МВт/см² (рис.5). В настоящей работе использовалась интенсивность накачки свыше 3.0 МВт/см², т.е. мы фактически продолжили зависимость $\eta(W)$ в область более высоких значений интенсивности накачки и получили хорошее совпадение с результатами работы [1]. Данные теоретического расчета показали, что снижение полного КПД при интенсивности накачки выше оптимальной связано со снижением энергии генерации за счет более интенсивного тушения молекул ArF* электронами разряда.

Результаты исследований позволили найти диапазон оптимальных интенсивностей накачки ArF-лазера на смеси He-Ar-F₂, для которого достигаются максимальные значения полного КПД. Из рис.5 видно, что для данных условий возбуждения оптимальный диапазон интенсивностей накачки составляет 4.5–5.0 МВт/см². Следует отметить, что полный КПД примерно одинаков для обеих активных сред, как с Ne, так и с He, но достигается он при разных интенсивностях накачки – 2.0 и 5.0 МВт/см² соответственно.

5. Заключение

Проведены теоретическое и экспериментальное исследование влияния параметров возбуждения и активной

среды на энергию излучения и КПД эксимерного электроразрядного ArF-лазера ($\lambda = 193$ нм) на смеси He(Ne)-Ar-F₂. Показано, что для достижения максимальной энергии излучения при максимальном КПД лазера необходима оптимальная интенсивность накачки активной среды. Установлено, что для ArF-лазера на смеси He-Ar-F₂ она составляет 4.5–5.0 МВт/см², что заметно превышает аналогичный параметр для этого лазера на смеси Ne-Ar-F₂. При интенсивности накачки 5.0 МВт/см² в активной среде состава He : Ar : F₂ = 79.7 : 20 : 0.3 объемом 175 см³ при давлении 2.4 атм впервые получена энергия генерации 1.3 Дж при КПД 2.0 %.

1. Борисов В.М., Брагин И.Е., Виноходов А.Ю., Водчиц В.А. *Квантовая электроника*, **22** (6), 533 (1995).
2. Борисов В.М., Борисов А.В., Брагин И.Е. *Квантовая электроника*, **22** (5), 446 (1995).
3. Miyazaki K., Hasama T., Yamada K., et al. *J. Appl. Phys.*, **60** (8), 2721 (1986).
4. Andrew I., Dyer P., Roebuck P. *Opt. Commun.*, **49**, 189 (1984).
5. Ohwa M., Obara M. *J. Appl. Phys.*, **63** (5), 1306 (1988).
6. Nagai S., Furuhashi H., Uchida Y., et al. *J. Appl. Phys.*, **77** (7), 2906 (1995).
7. Бойченко А.М., Держиев В.И., Жидков А.Г., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **19** (5), 486 (1992).
8. Ражев А.М., Жупики А.А. *Квантовая электроника*, **24** (8), 683 (1997).
9. Ражев А.М., Жупики А.А., Каргапольцев Е.С. *Квантовая электроника*, **34** (2), 95 (2004).
10. Ражев А.М., Щедрин А.И., Калюжная А.Г., Рябцев А.В., Жупики А.А. *Квантовая электроника*, **34** (10), 901 (2004).
11. Lo D., Shchedrin A.I., Ryabtsev A.V. *J. Phys. D*, **29**, 43 (1996).
12. <http://www.kinema.com/signalib.dat>.
13. Rejoub R., Lindsay B.G., Stebbings R.F. *Phys. Rev. A*, **65**, 042713 (2002).
14. Saha H.P. *Phys. Rev. A*, **40**, 2977 (1989).
15. Saha H.P. *Phys. Rev. A*, **39**, 5048 (1989).
16. Tachibana K., Phelps A.V. *Phys. Rev. A*, **36**, 999 (1987).
17. Hyman H.A. *Phys. Rev. A*, **20**, 855 (1979).
18. Dasgupta A., Blaha M., Giuliani J.L. *Phys. Rev. A*, **61**, 012703 (2000).
19. Hyman H.A. *Phys. Rev. A*, **18**, 441 (1978).
20. Hayashi M., Nimura T. *J. Appl. Phys.*, **54**, 4879 (1983).
21. Бабичев Д.Н., Карелин А.В., Симакова О.В. *Квантовая электроника*, **31**, 209 (2001).
22. Dickinson A.S., Roberts R.E., Bernstein R.B. *J. Phys. B*, **5**, 355 (1972).
23. Иванов В.А. *УФН*, **162**, 35 (1992).
24. Hokazono H., Midorikawa K., Obara M., et al. *J. Appl. Phys.*, **56**, 680 (1982).
25. *Эксимерные лазеры*. Под ред. Ч.Родза. (М.: Мир, 1981).
26. Lam S.K., Zheng C.E., Lo D., Dem'yanov A., Napartovich A.P. *J. Phys. D*, **33**, 242 (2000).
27. Артеев М.С., Бункин Ф.В., Держиев В.И. и др. *Квантовая электроника*, **13**, 2191 (1986).
28. Richeboeuf L., Pasquiers S., Legentil M., Puech V. *J. Phys. D*, **31**, 373 (1998).
29. Anicich V.G. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **22**, 1469 (1993).
30. Takahashi A., Okada T. *Jap. J. Appl. Phys.*, **37** (4A), L390 (1998).
31. Bourene M., Dutuit O., Le Calve J. *J. Chem. Phys.*, **63**, 1668 (1975).
32. Бойченко А.М. *Квантовая электроника*, **19**, 486 (1992).
33. Duzy C., Hyman H.A. *Phys. Rev. A*, **22**, 1878 (1980).
34. Flannery M.R., Yang T.P. *Appl. Phys. Lett.*, **32**, 327 (1978).
35. Hsia J. *Appl. Phys. Lett.*, **30**, 101 (1977).
36. Luches A., Nassisi V., Perrone M.R. *J. Phys. E*, **20**, 1015 (1987).