

Влияние интенсивности накачки на эффективность эксимерного электроразрядного KrF-лазера на смеси He – Kr – F₂

А.М.Ражев, А.И.Щедрин, А.Г.Каложная, А.В.Рябцев, А.А.Жупиков

Исследовано влияние параметров накачки на эффективность работы газоразрядного эксимерного KrF-лазера на смеси He – Kr – F₂. Разработана теоретическая модель системы возбуждения и кинетических процессов в плазме такого лазера. Создана система накачки на основе LC-инвертора с искровым разрядником в качестве высоковольтного коммутатора, автоматической УФ предьонизацией и низкоиндуктивным разрядным контуром. Для увеличения КПД и энергии излучения KrF-лазера на смеси He – Kr – F₂ предложено увеличить интенсивность накачки до 4 МВт/см³ путем увеличения индуктивности между LC-инвертором и разрядным контуром до 100 нГн. Впервые в KrF-лазере на смеси He – Kr – F₂ получена энергия генерации 1 Дж с КПД 2 %.

Ключевые слова: эксимерный KrF-лазер, энергия излучения, интенсивность накачки, буферный газ.

1. Введение

Эксимерный газоразрядный KrF-лазер ($\lambda = 248$ нм) в настоящее время находит широкое применение в микроэлектронике, фотолитографии и медицине. С практической точки зрения наиболее важными его параметрами являются энергия излучения и полный КПД η . Большое значение имеют эффективность и надежность системы накачки лазера, сорт буферного газа в активной среде, определяющий стоимость газовой смеси, величина разрядного напряжения. В данной работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния интенсивности накачки на эффективность генерации газоразрядного эксимерного KrF-лазера на смеси He – Kr – F₂, возбуждаемого поперечным разрядом. Интенсивностью накачки мы называем 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.

В работе [1] описан эксимерный KrF-лазер на смеси Ne – Kr – F₂ с системой накачки, собранной по схеме с перезарядкой емкости и автоматической УФ предьонизацией. При разрядном напряжении 36 кВ была получена энергия излучения 600 мДж с $\eta = 1.6$ %; максимальный КПД (2.8 %) был достигнут при энергии 300 мДж. В работе [2] с использованием аналогичного лазера с такой же системой накачки были получены энергия излучения 500 мДж и полный КПД 3.9 %. В [3] в лазере, аналогичном описанному в [2], была достигнута энергия излучения 810 мДж, а КПД – 2.6%. В работах [2, 3] показано, что для

получения высокой энергии излучения и КПД KrF-лазера на смесях с буферным газом неоном необходима интенсивность накачки в диапазоне 1.8 – 2.5 МВт/см³.

В работе [4] возбуждение KrF-лазера на смеси He – Kr – F₂ осуществлялось с помощью системы накачки, подобной описанной в [1, 2]. При разрядном напряжении 45 кВ была получена энергия генерации 500 мДж с КПД 1.1 %. Наибольшая энергия газоразрядного KrF-лазера, достигнутая в работе [5], составила 5 Дж в смеси с буферным газом неоном и 4.5 Дж в смеси с буферным газом гелием. Для этого была разработана сложная система накачки, собранная по схеме с двухступенчатым генератором Маркса, которая функционировала при разрядных напряжениях 190 – 220 кВ. КПД такого KrF-лазера, вычисленный от запасенной в конденсаторах энергии, не превышал соответственно 0.53 % и 0.47 %. В работе [6] эти же авторы, заменили генератор Маркса системой возбуждения типа LC-инвертора с магнитными звеньями сжатия для возбуждения активного объема $6.5 \times 5.0 \times 80$ см, что позволило снизить разрядное напряжение со 192 до 65 кВ. Энергия излучения в активной среде Ne – Kr – F₂ при этом снизилась с 5.0 до 2.5 Дж, а полный КПД увеличился до 2.5 %. В данных условиях интенсивность накачки составила 0.6 МВт/см³. Однако поскольку при такой низкой интенсивности накачки использование He в качестве буферного газа не позволило авторам [6] получить высокие энергии излучения и КПД KrF-лазера, о них ничего не сообщается.

В работе [7] для получения эффективной генерации KrF-лазера на смеси He – Kr – F₂ мы увеличили интенсивность накачки до 3.0 МВт/см³, что позволило увеличить энергию излучения до 800 мДж при полном КПД 2.0 %.

Из рассмотренных работ следует, что наибольшие значения КПД и энергии генерации KrF-лазера были получены на смеси Ne – Kr – F₂ при удельной интенсивности накачки около 2 МВт/см³. Использование в качестве буферного газа гелия (вместо неона) требовало увеличения интенсивности накачки до 3 МВт/см³.

Цель настоящей работы – теоретическое и экспериментальное исследование влияния интенсивности накачки

А.М.Ражев, А.А.Жупиков. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск-90, просп. акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: razhev@laser.nsc.ru, www.laser.nsc.ru

А.И.Щедрин, А.Г.Каложная, А.В.Рябцев. Институт физики НАНУ, Украина, 03650 Киев, просп. Науки, 46; e-mail: ashched@iop.kiev.ua, www.iop.kiev.ua

Поступила в редакцию 25 марта 2004 г., после доработки – 30 июня 2004 г.

ки на энергию генерации и КПД газоразрядного КгF-лазера на смеси He–Кг–F₂, а также изучение методов управления параметрами и разработка высокоэффективной системы накачки.

2. Экспериментальная установка

В экспериментах измерялись энергетические и амплитудно-временные характеристики импульсов напряжения, тока и излучения в наносекундном диапазоне. Аппаратура и методы измерений описаны в работе [8].

Эквивалентная электрическая схема системы накачки эксимерного КгF-лазера (рис.1) состояла из накопительных конденсаторов C_1 и C_2 , соединенных по схеме LC-инвертора с искровым разрядником R_1 в качестве высоковольтного коммутатора. Система накачки включала в себя устройство для автоматической УФ предыонизации и низкоиндуктивный разрядный контур, образованный конденсатором C_3 и активной средой с сопротивлением R_3 , которое изменялось от бесконечности до ~ 0.2 Ом. Таким образом, вся система накачки состояла из двух контуров: LC-инвертора с высоковольтным коммутатором и автоматической УФ предыонизацией (индуктивность L_2) и низкоиндуктивного разрядного контура (индуктивность L_3).

Основная задача данной работы заключалась в нахождении параметров системы накачки, обеспечивающих, с одной стороны, максимальную эффективность передачи энергии из накопительных конденсаторов C_1 и C_2 в конденсатор C_3 низкоиндуктивного контура, а с другой – максимальную эффективность передачи энергии из C_3 в активную газовую среду, ограничивая потери этой энергии, связанные с ее частичным возвратом в C_1 и C_2 . Учитывалось, что определенная часть энергии может теряться в коммутаторе вследствие относительно больших значений его сопротивления и индуктивности. В связи с этим в данной работе в качестве высоковольтного коммутатора использовался специально разработанный газонаполненный искровой разрядник с меньшими сопротивлением и собственной индуктивностью по сравнению со стандартным искровым разрядником РУ-65 [7].

В разрядной камере расстояние между основными электродами было равно 2.7 см, длина активной части – 59 см, а ширина разряда определялась по световому пятну и составляла около 1.0 см. Таким образом, активный объем был равен 160 см³. Автоматическая УФ предыонизация осуществлялась двумя рядами искровых промежутков, расположенных сбоку от одного из основных электродов. Разрядная камера герметизировалась пло-

скопараллельными пластинами из MgF₂, одна из которых служила выходным зеркалом резонатора. Вторым зеркалом резонатора было внешнее диэлектрическое зеркало с коэффициентом отражения 99 % на длине волны излучения 248 нм. Оптическая длина резонатора была равна 120 см.

3. Результаты

Для определения оптимальных значений интенсивности накачки КгF-лазера на смеси He–Кг–F₂ в данной работе была разработана теоретическая модель системы накачки и построена кинетическая модель процессов, происходящих в активной среде этого лазера. Результаты теоретического анализа сравнивались с результатами проведенных экспериментов.

При численном моделировании динамики разряда и излучения кинетические уравнения для компонентов смеси решались совместно с уравнением для цепи питания лазера и уравнением Больцмана для функции распределения электронов по энергиям в электрическом поле [9]. Схема кинетических процессов, использованная при моделировании, включала в себя 74 плазмохимические реакции (табл.1). Скоростные константы процессов взаимодействия компонентов газовой смеси (He, Кг и F₂) с электронами рассчитывались из уравнения Больцмана. Сечения упругих и неупругих столкновений электронов с атомами He взяты из [17–19], с атомами Кг – из [18, 20–23]. Значения сечений процессов взаимодействия электронов с молекулами F₂ заимствованы из [24].

Система накачки рассчитывалась для схемы LC-инвертора с автоматической УФ предыонизацией и низкоиндуктивным разрядным контуром (рис.1). В настоящей работе индуктивность основного контура системы накачки увеличивалась путем введения дополнительной индуктивности L_5 , которая устанавливалась на участке цепи между LC-инвертором и низкоиндуктивным разрядным контуром, так, как это показано на рис.1. По сути этот участок цепи является обратным токопроводом. В этом случае полная индуктивность LC-инвертора будет определяться величиной $L = L_2 + L_5$. Такой метод согласования параметров LC-инвертора с параметрами разрядного контура уже был опробован нами ранее при исследованиях КгF-лазера в работе [7]. Однако вследствие недостаточности данных о влиянии дополнительной индуктивности L_5 на эффективность генерации этого лазера подробное описание работы системы накачки с L_5 в работе [7] не проводилось.

Для теоретического анализа системы накачки осуществлялись предварительные расчеты оптимального по энергии генерации состава, а также полного давления активной газовой среды. Результаты расчетов показали, что соотношение компонентов смеси He:Кг:F₂ = 89.8:10:0.2 является оптимальным и хорошо совпадает с экспериментальными результатами, полученными в [7]. Полное давление зависело от зарядного напряжения и в диапазоне 18–26 кВ увеличивалось от 2.1 до 2.9 атм. Вычисленные для таких параметров активной среды временные зависимости импульсов напряжения на конденсаторах C_1 , C_2 и C_3 , а также тока через них при различных зарядных напряжениях с точностью 10 % совпали с экспериментально полученными на этих конденсаторах осциллограммами токов и напряжений. Таким образом, теоретическая модель работы КгF-лазера на смеси He–

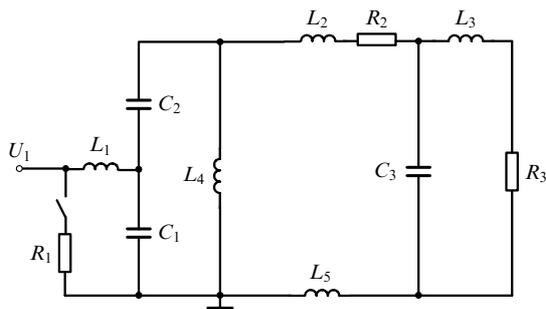


Рис.1. Эквивалентная электрическая схема лазера ($R_1 \sim 0.1$ Ом, $R_2 \sim 0.1$ Ом, $R_3 \sim 0.2$ Ом; $C_1 = 50$ нФ, $C_2 = 100$ нФ, $C_3 = 30$ нФ; $L_1 = 40$ нГн, $L_2 = 20$ нГн, $L_3 = 3.8$ нГн, $L_4 = 2.5$ мкГн, $L_5 = 30 - 100$ нГн).

Табл.1.

Номер реакции	Реакция	Константа скорости (см ³ /с; см ⁶ /с)	Литература
1	He + e → He* + e	Рассчитано из уравнения Больцмана	
2	He + e → He ⁺ + e + e	– " –	
3	Kr + e → Kr* + e	– " –	
4	Kr + e → Kr** + e	– " –	
5	Kr + e → Kr ⁺ + e + e	– " –	
6	Kr* + e → Kr ⁺ + e + e	– " –	
7	Kr** + e → Kr ⁺ + e + e	– " –	
8	Kr* + e → Kr** + e	– " –	
9	Kr** + e → Kr* + e	– " –	
10	F ₂ + e → F ₂ (v) + e	– " –	
11	F ₂ + e → F ₂ * + e	– " –	
12	F ₂ + e → F ₂ ⁺ + 2e	– " –	
13	F ₂ + e → F + F ⁻	– " –	
14	F ₂ + e → F + F + e	– " –	
15	Kr ⁺ + Kr + He → Kr ₂ ⁺ + He	10 ⁻³² T ^{-0.75}	[10]
16	Kr ⁺ + Kr + Kr → Kr ₂ ⁺ + Kr	1.5 × 10 ⁻³² T ^{-0.75}	[10]
17	Kr* + Kr + He → Kr ₂ * + He	10 ⁻³³ T ^{-0.75}	[10]
18	Kr** + Kr + He → Kr ₂ ** + He	10 ⁻³³ T ^{-0.75}	[10]
19	Kr* + Kr + Kr → Kr ₂ * + Kr	3 × 10 ⁻³³ T ^{-0.75}	[10]
20	Kr** + Kr + Kr → Kr ₂ ** + Kr	3 × 10 ⁻³³ T ^{-0.75}	[10]
21	He ⁺ + He + He → He ₂ ⁺ + He	1.1 × 10 ⁻³¹	[9]
22	He* + He + He → He ₂ * + He	0.43 × 10 ⁻³³	[9]
23	Kr + He* → Kr ⁺ + He + e	2 × 10 ⁻¹⁰	[10]
24	Kr + He ⁺ → Kr ⁺ + He	10 ⁻¹¹	[10]
25	Kr + He ₂ * → Kr ⁺ + 2He + e	3.7 × 10 ⁻¹⁰	[10]
26	Kr + He ₂ ⁺ → Kr ⁺ + 2He	2 × 10 ⁻¹¹	[10]
27	Kr* + Kr* → Kr ₂ ⁺ + e	10 ⁻⁹	[11]
28	Kr** + Kr** → Kr ₂ ⁺ + e	10 ⁻⁹	[11]
29	Kr* + F ₂ → KrF* + F	10 ⁻⁹	[11]
30	Kr** + F ₂ → KrF* + F	10 ⁻⁹	[11]
31	Kr* + F ⁻ → KrF* + e	5.4 × 10 ⁻⁹	[11]
32	Kr** + F ⁻ → KrF* + e	5.4 × 10 ⁻⁹	[11]
33	Kr ₂ * + F ₂ → Kr ₂ F* + F	2.1 × 10 ⁻¹⁰	[10]
34	Kr ₂ * + F ⁻ → Kr ₂ F* + e	3 × 10 ⁻⁹	[10]
35	Kr ₂ ⁺ + F ⁻ → KrF* + Kr	4 × 10 ⁻⁹ T ^{-1.5}	[10]
36	F + He + e → F ⁻ + He	6.6 × 10 ⁻³⁴ T _e ^{-1.5}	[10]
37	KrF* + Kr → Kr + Kr + F	8.6 × 10 ⁻¹²	[10]
38	KrF* + F ₂ → Kr + 3F	5 × 10 ⁻¹⁰	[10]
39	KrF* + 2Kr → Kr ₂ F* + Kr	4 × 10 ⁻³² T _e ^{-0.75}	[10]
40	KrF* + Kr + He → Kr ₂ F* + He	2 × 10 ⁻³² T _e ^{-0.75}	[10]
41	KrF* + Kr + He → F + 2Kr + He	5 × 10 ⁻³¹	[11]
42	KrF* + 2He → F + Kr + 2He	5 × 10 ⁻³²	[11]
43	KrF* + F ⁻ → Kr + 2F + e	2 × 10 ⁻⁹	[10]
44	KrF* + e → Kr + F + e	2 × 10 ⁻⁷	[10]
45	KrF* + e → Kr ⁺ + F + 2e	4 × 10 ⁻⁵ T _e ⁻³ exp(-9/T _e)	[10]
46	Kr ₂ F* + Kr → KrF* + 2Kr	3.5 × 10 ⁻³ T _e ^{0.75} exp(-0.49/T)	[10]
47	Kr ₂ F* + He → KrF* + Kr + He	1.7 × 10 ⁻³ T _e ^{0.75} exp(-0.49/T)	[10]
48	Kr ₂ F* + F ₂ → 2Kr + 3F	2 × 10 ⁻¹⁰	[10]
49	Kr ₂ F* + F ⁻ → 2Kr + 2F + e	2.4 × 10 ⁻⁹	[10]
50	Kr ₂ F* + e → 2Kr + F + e	2.3 × 10 ⁻⁷	[10]
51	Kr ₂ F* + e → Kr ₂ ⁺ + F + 2e	4 × 10 ⁻⁵ T _e ⁻³ exp(-8.5/T _e)	[10]
52	F ₂ ⁺ + F ⁻ → F ₂ + F	10 ⁻⁶	[10]
53	Kr ⁺ + F ⁻ + M → KrF* + M	Рассчитано по формулам Фланнери	[13]
54	Kr ₂ ⁺ + F ⁻ + M → Kr ₂ F* + M	– " –	[13]
55	He ⁺ + F ⁻ + M → He* + F + M	– " –	[14]
56	He ₂ ⁺ + F ⁻ + M → 2He + F + M	– " –	[14]
57	Kr ₂ * + e → 2Kr + e	3 × 10 ⁻⁸	[10]
58	He ₂ * + e → 2He + e	3.8 × 10 ⁻⁹	[10]
59	Kr ₂ * + e → Kr* + Kr	10 ⁻⁷	[11]

Продолжение табл.1 см. на след. стр.

Номер реакции	Реакция	Константа скорости (см ³ /с; см ⁶ /с)	Литература
60	He ₂ ⁺ + e → 2He	0.2 × 10 ⁻⁷ (T/T _e) ^{0.5}	[9]
61	Kr* + e → Kr + e	2 × 10 ⁻⁸	[10]
62	Kr** + e → Kr + e	2 × 10 ⁻⁸	[10]
63	He* + e → He + e	2.6 × 10 ⁻⁹	[10]
64	Kr** → Kr* + hv'	3.4 × 10 ⁷	[15]
65	Kr* + hv → Kr ⁺ + e	1.3 × 10 ⁻¹⁹ с	[16]
66	Kr** + hv → Kr ⁺ + e	4.5 × 10 ⁻¹⁸ с	[16]
67	hv + F ⁻ → F + e	5.6 × 10 ⁻¹⁸ с	[12]
68	hv + F ₂ → 2F + e	1.5 × 10 ⁻²⁰	[12]
69	hv + Kr ₂ ⁺ → Kr ⁺ + Kr*	1.6 × 10 ⁻¹⁸ см ²	[12]
70	hv + Kr ₂ F* → Kr + F + Kr ⁺ + e	1.6 × 10 ⁻¹⁸ с	[12]
71	hv + KrF* → KrF(X) + 2hv	2.53 × 10 ⁻¹⁶ с	[12]
72	KrF* → KrF(X) + hv	1/(7 × 10 ⁻⁹)	[10]
73	KrF(X) → Kr + F	1/(2 × 10 ⁻⁹)	[10]
74	hv + KrF(X) → KrF*	2.53 × 10 ⁻¹⁶ с	[10]

Примечание: М – буферный газ; (X) – основное состояние эксимерной молекулы; T, T_e измеряются в кельвинах.

Kr – F₂ правильно описывала экспериментальные результаты исследований параметров накачки и лазерного излучения.

С использованием разработанной модели было проведено теоретическое исследование влияния индуктивности L₅ на энергию генерации KrF-лазера. Результаты исследований (рис.2) свидетельствуют о том, что величина L₅ сильно влияет на выходную энергию, но имеет вполне определенный узкий диапазон значений (80–100 нГн). Теоретический анализ показал, что индуктивность L₅ влияет на напряжение U, при котором происходит пробой разрядного промежутка, а также на полный ток J через активную среду. Кроме того, с увеличением L₅ увеличивается задержка Δt между началом импульса УФ предьонизации и началом импульса тока J через газовую смесь, что положительно влияет на однородность объемного разряда и эффективность энерговклада в активную среду. Результаты теоретического анализа были подтверждены экспериментально. В отсутствие дополнительной индуктивности L₅ собственная индуктивность контура LC-инвертора составляла около 30 нГн. Эта индуктивность первоначально делалась минимальной (к чему обычно стремятся разработчики систем накачки эксимерных лазеров) и была получена в результате специальной компоновки накопителей C₁, C₂ и коммутатора R₁ вокруг низкоиндуктивного контура, образованного разрядной камерой и накопителем C₃.

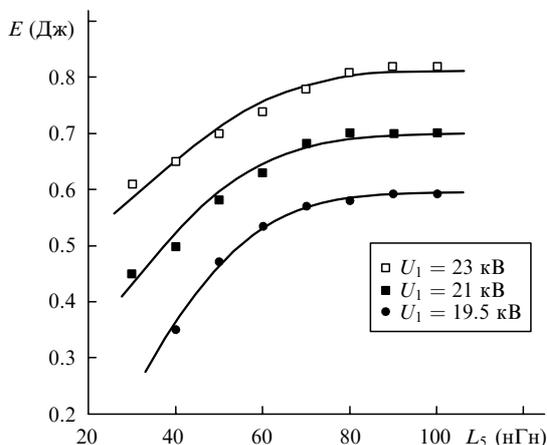


Рис.2. Расчетные зависимости энергии излучения E от величины индуктивности L₅ при различных зарядных напряжениях U₁.

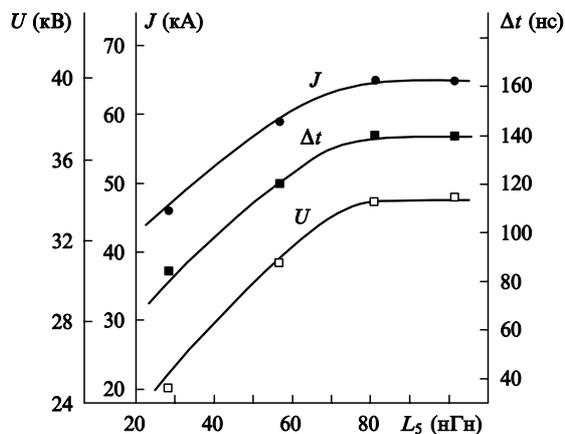


Рис.3. Зависимости напряжения на разрядном промежутке U, тока разряда J и времени задержки между началом УФ предьонизации и пробоем разрядного промежутка Δt от индуктивности L₅ при зарядном напряжении U₁ = 21 кВ.

На рис.3 показаны экспериментально полученные зависимости напряжения на разрядном промежутке U, полного тока через него J и задержки Δt от дополнительно введенной индуктивности L₅. Видно, что при увеличении L₅ до 80 нГн происходит значительное увеличение всех перечисленных параметров. С дальнейшим увеличением L₅ от 80 до 100 нГн этот рост прекращается. Измерения выходной энергии генерации E дали аналогичную зависимость от величины L₅. При L₅, равных 100 нГн и более, снижались как энергия генерации, так и полный КПД лазера. Таким образом, оптимальное значение L₅ составляет 80–100 нГн. При проведении дальнейших исследований использовалась индуктивность L₅ = 80 нГн.

В этих условиях экспериментально была получена практически линейная зависимость напряжения на разрядном промежутке U и тока через него J от зарядного напряжения U₁ (рис. 4). Этому соответствовала линейная зависимость интенсивности накачки W от зарядного напряжения U₁. При этом в случае минимального зарядного напряжения U₁ = 18 кВ интенсивность накачки W была равна 1.9 МВт/см³, а при U₁ = 26 кВ она составляла 4 МВт/см³.

На рис.5 представлены зависимости энергии излучения и полного КПД η KrF-лазера на смеси He – Kr – F₂ от

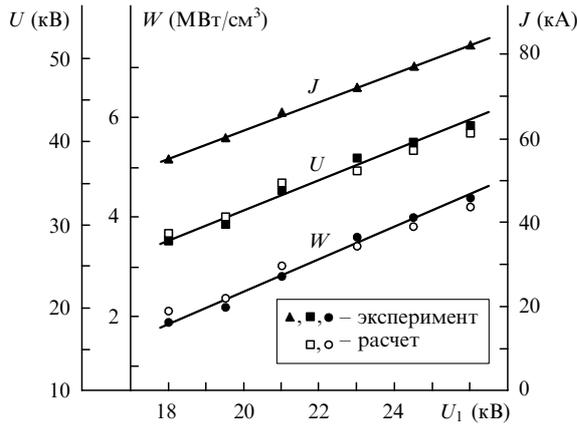


Рис.4. Расчетные и экспериментальные зависимости напряжения на разрядном промежутке U , разрядного тока J и интенсивности накачки W от зарядного напряжения U_1 при $L_5 = 80$ нГн.

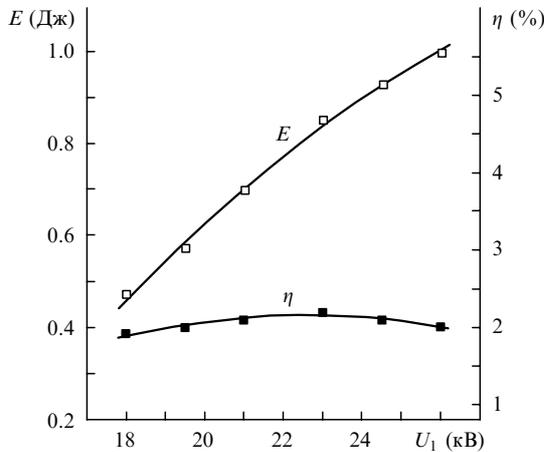


Рис.5. Экспериментальные зависимости энергии излучения E и полного КПД η KrF-лазера от зарядного напряжения U_1 для активной среды состава He:Kr:F₂ = 89.8:10:0.2 при $L_5 = 80$ нГн.

зарядного напряжения U_1 . Видно, что при изменении зарядного напряжения от 18 до 26 кВ энергия излучения увеличивается от 0.47 до 1.0 Дж; КПД при этом изменяется очень медленно – от 1.9 % до 2 %.

При $\eta = 2\%$ максимальная энергия генерации составила 1 Дж. Результаты исследований позволили определить оптимальные значения интенсивности накачки KrF-лазера на смеси He–Kr–F₂. Зависимость полного КПД η этого лазера от интенсивности накачки W показана на рис.6. Видно, что для достижения максимальных КПД при данных условиях возбуждения необходима интенсивность накачки 3–4 МВт/см³, что превышает оптимальные значения, полученные в работах [4, 5].

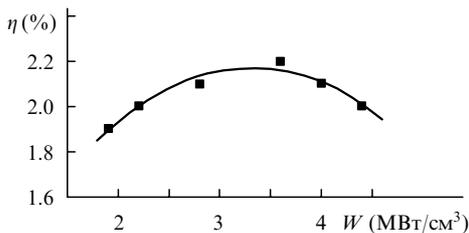


Рис.6. Зависимость полного КПД η KrF-лазера от интенсивности накачки W для активной среды состава He:Kr:F₂ = 89.8:10:0.2 при $L_5 = 80$ нГн.

4. Обсуждение результатов

В данной работе для достижения высоких значений КПД и энергии генерации KrF-лазера на смеси He–Kr–F₂ было предложено увеличить интенсивность накачки до 4.0 МВт/см³, что и было реализовано путем увеличения индуктивности основного контура в системе накачки через добавление в контур дополнительной индуктивности L_5 (см. рис.1).

Влияние дополнительной индуктивности L_5 на энергию и КПД KrF-лазера на смеси He–Kr–F₂, по нашему мнению, заключалось в следующем. После включения коммутатора в LC-инверторе и смены полярности на конденсаторе C_1 энергия из конденсаторов C_1 и C_2 передается в конденсатор C_3 низкоиндуктивного контура. Очевидно, что параметром, определяющим эффективность работы системы накачки, является эффективность передачи энергии из C_1 и C_2 контура LC-инвертора в C_3 низкоиндуктивного контура. Эта эффективность зависит от величины L_2 . При этом ясно, что чем ниже эта индуктивность, тем быстрее и с меньшими потерями происходит перезарядка конденсаторов. Однако в дальнейшем, когда емкость C_3 заряжается до напряжения пробоя промежутка между основными электродами, после пробоя она начинает разряжаться и энергия от нее передается как в активную среду, так и назад в LC-инвертор, что приводит к потерям энергии, вкладываемой в разряд. Снизить такие потери и позволяет увеличение индуктивности основного разрядного контура путем добавления индуктивности L_5 , которая в сумме с L_2 ограничивает ток из C_3 назад, в конденсаторы LC-инвертора C_1 и C_2 . Очевидно, что индуктивность L_5 не может быть большой, т. к. это будет снижать эффективность передачи энергии из C_1 и C_2 в C_3 . Однако она не должна быть меньше определенного значения, в данном случае 80 нГн, чтобы препятствовать обратному процессу. Теоретический анализ импульсов тока через эти конденсаторы и напряжений на них при разных значениях L_5 в момент разряда емкости C_3 подтверждает этот вывод. В результате увеличиваются как напряжение на разрядном промежутке, так и ток через него и, следовательно, энергия, вкладываемая в активную среду. Вследствие этого увеличиваются энергия и КПД KrF-лазера на смеси He–Kr–F₂.

При росте индуктивности L_5 до 80 нГн задержка начала пробоя разрядного промежутка относительно начала импульса УФ предыонизации увеличивается от 90 до 140 нс, что обязательно сказывается на однородности объемного разряда. В работах [25, 26] было показано, что при изменении задержки начала основного разряда относительно начала УФ предыонизации от нуля до 4000 нс максимальная энергия генерации эксимерных лазеров достигается при $\Delta t = 200 - 300$ нс; это объясняется сочетанием необходимой интенсивности и однородности предыонизации, определяющей однородность объемного разряда при высоких давлениях. Таким образом, приближение к этому диапазону оптимальных значений задержки также должно приводить к увеличению энергии и КПД лазера.

5. Заключение

В результате проведенных исследований разработана теоретическая модель эксимерного газоразрядного KrF-лазера на смеси He–Kr–F₂. Создана система накачки на

основе LC -инвертора с автоматической УФ предыонизацией и дополнительной индуктивностью. Теоретически и экспериментально исследовано влияние параметров возбуждения на энергетические характеристики генерации KrF -лазера на смеси $He-Kr-F_2$, для повышения энергии и КПД которого предложено увеличить интенсивность накачки путем использования в схеме LC -инвертора дополнительной индуктивности ~ 80 нГн. Показано, что максимальные значения энергии и генерации достигаются при удельной интенсивности накачки около 4.0 МВт/см³. При зарядном напряжении 26 кВ максимальная энергия генерации на смеси $He-Kr-F_2$ составила 1.0 Дж, что при длительности импульсов на полувьсоте 24 нс соответствовало импульсной мощности более 40 МВт.

1. Miyazaki K., Hasama T., Yamada K., et al. *J. Appl. Phys.*, **60**, 2721 (1986).
2. Борисов В.М., Брагин И.Е., Виноходов А.Ю., Водчиц В.А. *Квантовая электроника*, **22** (6), 533 (1995).
3. Борисов В.М., Борисов А.В., Брагин И.Е. *Квантовая электроника*, **22** (5), 446 (1995).
4. Armandillo E., Bonanni F., Grasso G. *Opt. Commun.*, **42** (1), 63 (1982).
5. Watanabe S., Endoh A. *Appl. Phys. Lett.*, **41** (9), 799 (1982).
6. Nodomi R., Oeda Y., Sajiki K., Nakajima S., Watanabe M., Watanabe S. *IEEE J. Quantum Electron.*, **27** (3), 441 (1991).
7. Жупиков А.А., Ражев А.М. *Квантовая электроника*, **25** (8), 687 (1998).
8. Ражев А.М., Жупиков А.А., Каргапольцев Е.С. *Квантовая электроника*, **34** (2), 95 (2004).
9. Lo D., Shchedrin A.I., Ryabtsev A.V. *J. Phys. D*, **29**, 43 (1996).
10. Артемов М.С., Бункин Ф.В. и др. *Квантовая электроника*, **13**, 2191 (1986).
11. Борисов В.М., Высикайло Ф.И. и др. *Квантовая электроника*, **12**, 1196 (1985).
12. *Газовые лазеры*. Под ред И.Мак-Даниэля и У.Нигэна (М.: Мир, 1986).
13. Flannery M.R., Yang T.P. *Appl. Phys. Lett.*, **33**, 574 (1978).
14. Flannery M.R., Yang T.P. *Appl. Phys. Lett.*, **32**, 327 (1978).
15. Dzierzega K., Volz U., Nave G., et al. *Phys. Rev. A*, **62**, 022505 (2000).
16. Hyman H.A. *Appl. Phys. Lett.*, **31**, 14 (1977).
17. <http://www.kinema.com/sigmalib.dat>.
18. Rejoub R., Lindsay B.G., Stebbings R.F. *Phys. Rev. A*, **65**, 042713 (2002).
19. Saha H.P. *Phys. Rev. A*, **40**, 2977 (1989).
20. Dasgupta A., Bartschat K., Vaid D., et al. *Phys. Rev. A*, **64**, 052710 (2001).
21. Chilton J.E., Stewart M.D., Lin C.C. *Phys. Rev. A*, **62**, 032714 (2000).
22. Hyman H.A. *Phys. Rev. A*, **20**, 855 (1979).
23. Hyman H.A. *Phys. Rev. A*, **18**, 441 (1978).
24. Hayashi M., Nimura T. *J. Appl. Phys.*, **54**, 4879 (1983).
25. Hsia J. *Appl. Phys. Lett.*, **30** (2), 101 (1977).
26. Luches A., Nassisi V., Perrone M.R. *J. Phys. E: Scientific Instruments*, **20** (8), 1015 (1987).