

УДК 621.373.826.038.823

С.Н. Багаев, А.А. Жупиков, А.М. Ражев

УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСИМЕРНЫХ ArF- и KrF-ЛАЗЕРОВ НА ОСНОВЕ БУФЕРНОГО ГАЗА Ne

Представлены результаты экспериментальных исследований энергетических и временных характеристик накачки и излучения импульсных газоразрядных эксимерных ArF- (193 нм) и KrF- (248 нм) лазеров на основе буферного газа Ne. С использованием искрового разрядника РУ-65 разработана конструкция и оптимизированы параметры модифицированной высоковольтной схемы возбуждения типа $L - C$ -инвертор с АПИ.

В газовой активной среде Ne:Ar:F₂ – 79,7:20:0,3 при полном давлении 2,2 атм получен кпд от запасенной энергии 1,5% при энергии излучения 360 мДж. Максимальная энергия генерации ArF-лазера была достигнута 550 мДж с кпд 1,4% при длительности импульса на полувысоте 12 нс и плотности энергии 4 Дж/л. Для KrF-лазера в газовой активной среде Ne:Kr:F₂ – 89,8:10:0,2 при полном давлении 2,5 атм получен полный кпд 2,4% при энергии излучения 570 мДж. Максимальная энергия генерации KrF-лазера 820 мДж была достигнута с кпд 2,0% при длительности импульса на полувысоте 24 нс и плотности энергии 5,9 Дж/л.

Введение

В настоящее время одним из наиболее интересных и перспективных применений электроразрядных эксимерных ArF- и KrF-лазеров является медицина (офтальмология, кардиохирургия, стоматология, нейрохирургия, дерматология), где УФ-излучение используется для абляции субмикронных слоев биологических тканей без их термического повреждения.

Для эксимерных лазеров, предназначенных для медицинских применений, существует ряд требований к параметрам генерации: 1) энергия излучения должна иметь величину не менее 0,5 Дж в связи с необходимостью получения плотности энергии до 5–6 Дж/см² на поверхности ткани; 2) длительность импульсов должна быть по возможности минимальной (обычно менее 30 нс); 3) частота следования импульсов не должна превышать 20 Гц, чтобы минимизировать термический эффект. Важную роль играют однородность распределения энергии по сечению пучка, а также ресурс активной газовой среды лазера, простота и надежность электрической схемы возбуждения.

Впервые о получении генерации на переходах $B-X$ -эксимерных молекул ArF (193 нм) и KrF (248 нм) сообщалось в [1–3]. В [1] было получено лазерное излучение на этих длинах волн в смесях Ne:(Ar)Kr:SF₆, возбуждаемых двойным поперечным электрическим разрядом с предыонизацией поперечным разрядом через диэлектрик. В [4] впервые была продемонстрирована возможность работы KrF-лазера в импульсно-периодическом режиме с частотой следования до 100 Гц. Позднее авторами [5] было показано, что для достижения высоких кпд и энергии эксимерных лазеров более перспективной является предыонизация активной среды УФ-излучением искр, а более эффективным донором фтора является F₂.

В [2, 3] была использована высоковольтная схема возбуждения типа $L - C$ -инвертор без обостряющей емкости (схема Блюмлейна), которая имеет ряд преимуществ по сравнению со схемой с перезарядкой емкости [6]. К таким преимуществам относятся: 1) возможность увеличения напряжения на разрядном промежутке, способствующего улучшению однородности объемного разряда и повышению эффективности энерговклада в активную среду при небольших зарядных напряжениях; 2) снижение нагрузки на высоковольтный коммутатор и, как следствие, повышение его срока службы, так как высоковольтный коммутатор не включается в цепь последовательно и через него проходит только часть запасаемой энергии.

Обычно при реализации схемы $L - C$ -инвертор с целью повышения мощности накачки в цепь включается обостряющая емкость для создания низкоиндуктивного разрядного контура и уменьшения длительности фронта импульсов напряжения и тока разряда. При этом в ряде случаев в высоковольтных схемах возбуждения используются дополнительные нелинейные магнитные дроссели для сжатия импульсов и отделения обостряющей емкости и разрядного промежутка от $L - C$ -инвертора на время изменения полярности напряжения на одной из емкостей инвертора [7].

В [8] описан эксимерный лазер на основе буферных газов как Ne, так и He, где были достигнуты энергия генерации 280 (ArF) и 500 мДж (KrF) с кпд 0,6 и 1,1%, причем заметного различия в энергии для каждого из буферных газов не наблюдалось. Плотность энергии излучения составила 2,4 Дж/л. Накачка осуществлялась при зарядных напряжениях 40–45 кВ в схеме с перезарядкой емкости. Максимальные энергии генерации ArF-лазера 2 Дж и KrF-лазера 5 Дж с буферным газом Ne были получены в [9, 10] и 4,5 Дж для KrF-лазера в смесях с He [10]. Лазеры

возбуждались в схеме с 2-ступенчатым генератором Маркса при зарядных напряжениях 190–220 кВ. Кпд обоих лазеров не превышал 0,5%.

В [11] были достигнуты КПД 2,1 и 3,9% с энергией 270 (ArF) и 500 мДж (KrF), а в [12] получены энергии излучения 500 (ArF) и 810 мДж (KrF) с КПД 1 и 2,6% соответственно. Эти результаты были получены на смесях с буферным газом Ne с использованием высоковольтной схемы возбуждения с перезарядкой емкости и автоматической предыонизацией УФ-излучением искр (АПИ).

Как следует из приведенных литературных данных по газоразрядным ArF- и KrF-лазерам, результатов по получению генерации с КПД более 1,1% на смесях с буферным газом Ne не имеется. Учитывая тот факт, что в наших исследованиях лазеры разрабатываются для медицинских применений, а следовательно, большое значение имеет стоимость работы лазера, связанная со сменой газовой среды, задача по увеличению эффективности этого лазера на Ne-смесях является актуальной. Успешное решение этой задачи позволит увеличить ресурс не только газовой смеси, но и элементов схемы возбуждения разрядной камеры (электродов), улучшить однородность распределения лазерного излучения по сечению пучка.

В данной статье представлены результаты экспериментального исследования энергетических и временных характеристик накачки и излучения газоразрядных ArF- и KrF-лазеров на смесях с буферным газом Ne, изучение конструктивных особенностей разрядной камеры, профиля электродов и оптимизация высоковольтной схемы возбуждения типа $L - C$ -инвертор с обостряющей емкостью и автоматической УФ-предыонизацией для достижения минимальной индуктивности схемы возбуждения и, следовательно, высокой мощности накачки, обеспечивающей максимальные значения КПД и энергии при минимальной длительности импульсов и небольших зарядных напряжениях в условиях отсутствия магнитных насыщающихся дросселей.

Аппаратура и методы измерений

Проведение экспериментов было связано с измерением энергетических и амплитудно-временных характеристик импульсов напряжения, тока и излучения в наносекундном диапазоне времени. Для измерения энергии излучения использовался калориметр ИМО-3Н, форма импульса излучения регистрировалась с использованием коаксиального фотоэлемента ФЭК-22. Амплитудно-временные характеристики измерялись осциллографами С1-75, С8-12 и измерителем наносекундных временных интервалов И2-7. Импульсы напряжения исследовались с использованием емкостных и омических калиброванных делителей с точностью 2%. Для измерения импульсов тока использовался низкоиндуктивный омический шунт сопротивлением 0,02 Ом, на котором

измерялось падение напряжения и затем пересчитывалось на величину тока. Точность измерений амплитуд напряжения и тока во всех экспериментах составляла 5%.

Экспериментальная установка

Основные электроды разрядной камеры были изготовлены из никеля и в поперечном сечении имели профиль Чанга с шириной по основанию 30 мм. В экспериментах были использованы электроды с различными радиусами рабочей и боковой поверхностей. Наилучшие результаты были получены для электродов с радиусами рабочей поверхности 100 мм и боковой 13 мм. Расстояние между электродами было 22 мм, длина активной части составляла 640 мм, поэтому активный объем при ширине разряда 10 мм был равен 140 см³. Автоматическая УФ-предыонизация осуществлялась двумя рядами искровых промежутков с зазорами 2 мм. Было сделано по 39 искровых промежутков с каждой стороны высоковольтного электрода. В экспериментах расстояние искровых промежутков от края электрода изменялось в пределах от 20 до 5 мм. Анализировались ширина и однородность разряда, распределение энергии по сечению пучка, полный КПД лазера. Оптимальным оказалось расстояние 10 мм. Окна лазера были сделаны из MgF₂, одно из которых служило выходным зеркалом резонатора без отражающего диэлектрического покрытия. Вторым зеркалом резонатора было внешнее диэлектрическое зеркало с коэффициентами отражения 95% на 193 нм и 99% на 248 нм. Длина резонатора составила 120 см.

Высоковольтная схема возбуждения лазера (рис. 1) состояла из запасаемых емкостей $2C_1$ и $2C_2$ и обостряющей емкости $2C_3$. В качестве высоковольтного коммутатора был использован стандартный искровой газонаполненный разрядник типа РУ-65. Емкости $2C_1$ и $2C_2$ представляли собой батареи конденсаторов типа КВИ-3 680 пФ, состоящие из 66 и 132 шт. соответственно, и имели величину 45 и 90 нФ. Поэтому полная зарядная емкость была равна 135 нФ. После срабатывания разрядника и изменения полярности напряжения на $2C_1$ емкости $2C_1$ и $2C_2$ включались последовательно, и разрядная емкость оказывалась равной 30 нФ. Значения $2C_1$ и $2C_2$ были получены по результатам оптимизации энергии и КПД лазера. Емкости C_3 состояли из конденсаторов КВИ-3 1000 пФ, которые располагались с двух сторон непосредственно на разрядной камере, вдоль нее, для достижения минимальной индуктивности разрядного контура. Величина емкости $2C_3$ в ходе экспериментов изменялась от 20 до 45 нФ с целью достижения максимальной эффективности передачи энергии из зарядной емкости в обостряющую. Оптимальное значение $2C_3$, соответствующее значениям энергии излучения и КПД лазера, составляло 34 нФ. Емкость $2C_3$ заряжалась от $2C_1$ и $2C_2$ через 78 дрос-

селей, имевших индуктивность 1 мкГн каждая и подключенных к искровым зазорам УФ-предыонизации для обеспечения их синхронного срабатывания. Полная индуктивность параллельно включенных дросселей была равна 12,8 нГн. Зарядная индуктивность L_1 имела величину 2,5 мкГн.

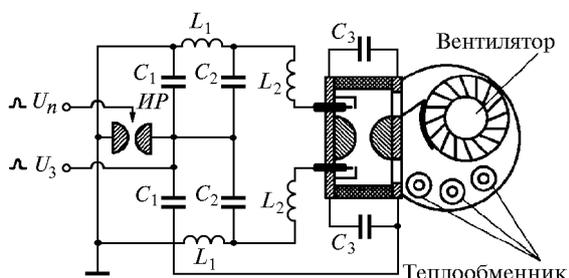


Рис. 1. Электрическая схема и поперечное сечение лазера. ИР – искровой разрядник РУ-65; $C_1 = 22,5$ нФ; $C_2 = 45$ нФ; $C_3 = 17$ нФ; $L_1 = 2,1$ мкГн; $L_2 = 39$ шт. по 1 мкГн

Для того чтобы осуществить высокую эффективность передачи энергии из $2C_1$ и $2C_2$ в $2C_3$ и обеспечить высокую интенсивность введения энергии в газовую смесь на основе буферного газа Не в отсутствие магнитного насыщающегося дросселя, необходимо было разработать конструкцию высоковольтной схемы возбуждения, имеющую предельно минимальную индуктивность. Полная индуктивность схемы в нашем случае складывалась из индуктивностей C_1 , C_2 , C_3 , разрядника РУ-65, подводящих шин и обратных токопроводов. Индуктивностями емкостей C_1 , C_2 , и C_3 мы пренебрегали, так как каждая из этих емкостей состояла из большого количества параллельно включенных конденсаторов КВИ-3 с собственной индуктивностью около 1 нГн. Индуктивность разрядника РУ-65 оценивалась нами примерно 10 нГн и не могла быть изменена. Эта индуктивность влияла в основном на скорость изменения полярности напряжения на емкостях C_1 . Поэтому оптимизация режима работы схемы была связана с подбором расположения конденсаторов, образующих C_1 и C_2 вблизи разрядной камеры, и правильной организацией обратного токопровода, чтобы добиться максимальной эффективности передачи энергии из $2C_1$ и $2C_2$ в $2C_3$ и сократить время введения энергии в активную среду.

В результате была разработана конструкция схемы возбуждения, которая была выполнена в виде двух параллельных контуров, образованных разрядником и емкостями C_1 и C_2 (см. рис. 1).

Результаты и их обсуждение

В экспериментах оптимизировались состав активной газовой смеси на основе буферного газа Не и полное давление в зависимости от зарядного напряжения. Оптимальное соотношение компонентов смеси, которое измерялось по максимальной энергии генерации, было для ArF-лазера Не:Ar:F₂ –

79,7:20:0,3, а для KrF – Не:Kr:F₂ – 89,8:10:0,2. Оптимальное полное давление зависело от зарядного напряжения и изменялось от 2,2 до 2,8 атм при изменении напряжения от 19 до 25 кВ.

На рис. 2 представлены осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке U , тока разряда J и импульсов генерации I_1 (ArF) и I_2 (KrF). Получено, что задержка между началом импульса УФ-предыонизации и началом тока разряда равна 175 нс. Импульс тока достаточно короткий и составил величину 25 ± 1 нс на полувысоте. При этом, как видно из осциллограмм напряжения U и тока J , импульс напряжения на разряде достаточно близок к аperiodическому, что обеспечило высокий кпд ArF- и KrF-лазеров на гелиевых смесях. Импульс генерации имеет длительность на полувысоте 12 ± 1 нс для ArF-лазера и 24 ± 1 нс для KrF-лазера.

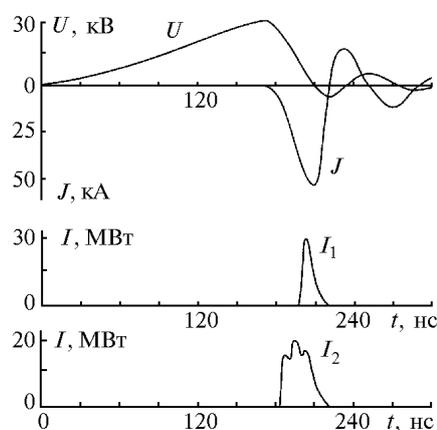


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке U , тока разряда J и лазерного излучения I_1 (ArF) и I_2 (KrF); $U_0 = 19$ кВ

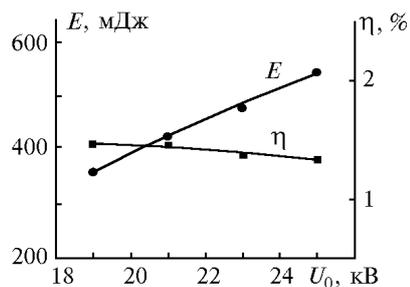


Рис. 3. Зависимость энергии излучения E и кпд η ArF-лазера от зарядного напряжения U_0 в смеси Не:Ar:F₂ – 79,7:20:0,3

На рис. 3 показана зависимость энергии излучения E и полного кпд η ArF-лазера от зарядного напряжения U_0 . Полученные результаты показывают, что максимальный полный кпд ArF-лазера 1,5% достигается при малом зарядном напряжении 19 кВ и энергии генерации 360 мДж. При увеличении зарядного напряжения до 25 кВ кпд лазера медленно уменьшается до 1,4%, что позволяет достичь рекордного для гелиевых смесей значения энергии генерации 550 мДж. Отсюда следует, что импульсная мощность излучения

ArF-лазера равна 46 МВт, а удельная плотность энергии – 4,0 Дж/л.

Исследовано влияние состава буферного газа на эффективность ArF- и KrF-лазеров. В результате проведенных экспериментов по измерению энергии и КПД лазера для различных соотношений He и Ne было получено, что добавление Ne в качестве буферного газа к He до 50% не изменяло амплитуды импульсов накачки, показанных на рис. 2. Энергия генерации в ArF-лазере не изменялась в этих условиях, а в KrF-лазере (рис. 4) при зарядном напряжении 19 кВ увеличивалась от 570 до 700 мДж, а КПД – от 2,4 до 2,9%. При максимальном зарядном напряжении 25 кВ была достигнута энергия излучения 920 мДж с КПД 2,2%. Увеличение содержания Ne в смеси свыше 50% и переход к чистому буферному газу Ne приводили к снижению энергии и КПД ArF- и KrF-лазеров на 20%.

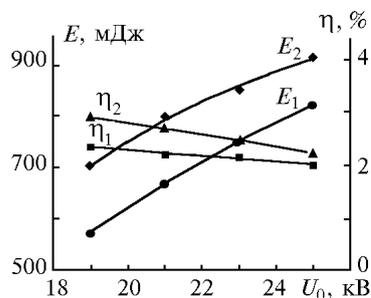


Рис. 4. Зависимости энергии излучения и КПД KrF-лазера от зарядного напряжения U_0 . He:Kr:F₂ – 89,8:10:0,2 (E_1 , η_1); He:Ne:Kr:F₂ – 49,9:49,9:10:0,2 (E_2 , η_2)

Проведенные исследования позволили разработать конструкцию схемы возбуждения ArF- и KrF-лазера с высокой мощностью накачки. Были проведены расчеты средней W_{cp} и пиковой W_n мощностей накачки. Пиковая мощность накачки W_n была получена путем интегрирования осциллограмм тока разряда J и напряжения на нем U_R , которое было равно разности напряжений U и индуктивной составляющей U_L , т.е. $U_R = U - U_L = U - L(dJ/dt)$, где L – индуктивность разрядного контура, которая составляла 2,7 нГн. Средняя мощность накачки вычислялась как

$W_{cp} = E/V\tau$, где E – энергия, запасенная в $2C_3$; V – активный объем; τ – длительность тока разряда. В результате было показано, что при минимальном зарядном напряжении 19 кВ средняя и пиковая мощности накачки были равны для KrF 1,8 и 2,2 МВт/см³, а для ArF – 1,9 и 2,4 МВт/см³ соответственно. При увеличении зарядного напряжения средняя и пиковая мощности увеличивались и при 25 кВ достигали значений 3,0 и 5,6 МВт/см³ для ArF и 2,5 и 3,8 МВт/см³ для KrF, а КПД лазеров, полученный от энергии, вложенной в газ, равен 3,1 и 3,6% соответственно.

Заключение

В результате проведенных исследований созданы высокоэффективные ArF- и KrF-лазеры на основе буферного газа He. Достигнуты высокие средняя и пиковая мощности накачки для ArF-лазера 3,0 и 5,6 МВт/см³ и для KrF-лазера 2,5 и 3,8 МВт/см³ соответственно. Впервые для ArF- и KrF-лазеров с буферным газом He получены КПД 1,5 (360 мДж) и 2,4% (570 мДж) и энергия излучения 550 и 820 мДж с КПД 1,3 и 2% соответственно. Достигнута удельная плотность энергии излучения 4 (ArF) и 5,9 Дж/л (KrF).

1. Иценко В.Н., Лисицын В.Н., Ражев А.М. // Письма ЖТФ. 1976. Т. 2. Вып. 18. С. 839–842.
2. Sutton D.G., Suchard S.N., Gibb O.L. // Appl. Phys. Lett. 1976. V. 28. N 9. P. 522–523.
3. Burnham R., Powell F.X., Djeu N. // Appl. Phys. Lett. 1976. V. 29. N 1. P. 30–32.
4. Иценко В.Н., Лисицын В.Н., Ражев А.М. // Письма ЖТФ. 1976. Т. 3. Вып. 14. С. 690–693.
5. Burnham R., Djeu N. // Appl. Phys. Lett. 1976. V. 29. N 11. P. 707–709.
6. Sze R.C. // J. Quant. Electron. 1979. V. QE-15. N 12. P. 1338–1347.
7. Агеев В.П., Атежеев В.В., Букреев В.С. и др. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 7. С. 1387–1389.
8. Armandillo E., Bonanni F., Grasso G. // Opt. Commun. 1982. V. 42. N 1. P. 63–66.
9. Andrew J., Dyer P., Roebuck P. // Opt. Commun. 1984. V. 49. N 3. P. 189–194.
10. Watanabe S., Endoh A. // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 41. N 9. P. 799–801.
11. Борисов В.М., Брагин И.Е., Виноходов А.Ю. и др. // Квантовая электроника. 1995. Т. 22. N 6. С. 533–536.
12. Борисов В.М., Борисов А.В., Брагин И.Е., и др. // Квантовая электроника. 1995. Т. 22. N 5. С. 446–450.

Институт лазерной физики СО РАН,
Новосибирск

Поступила в редакцию
7 октября 1997 г.

S.N. Bagaev, A.A. Zhupikov, A.M. Razhev. Increase of Efficiency of Excimer ArF- and KrF-lasers Based on He as a Buffer Gas.

Experimental investigations of the energy and temporal characteristics of gas – discharge excimer ArF- and KrF-lasers with gaseous mixtures containing He as the buffer gas are presented. The parameters of high-voltage excitation circuit of the LC inverter type with RU-65 spark gap and automatic UV preionisation were optimized.

In gas mixture He:Ar:F₂ – 79,7:20:0,3 at total pressure of 2,2 atm, the total efficiency 1,5% with energy of radiation 360 mJ was achieved. The maximum energy ArF laser emission equal to 550 mJ with total efficiency 1,4% at pulse duration (FWHM) 12 ns and energy density of 4 J/l was obtained. In gas mixture He:Kr:F₂ – 89,8:10:0,2 at total pressure of 2,5 atm, the total efficiency 2,4% with energy of radiation 570 mJ was achieved for KrF-laser. The maximum energy of KrF-laser emission equal to 0.82 J with total efficiency 2.0% at pulse duration (FWHM) 24 ns and density of energy 5.9 J/l was obtained.