

С.Н. Багаев, А.М. Ражев, В.А. Чекавинский, А.А. Жупиков, Е.С. Каргапольцев

## Влияние параметров накачки и состава активной среды на энергию излучения и кпд электроразрядных ArF- и KrF-лазеров

*Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск*

Поступила в редакцию 7.10.2001 г.

Исследованы зависимость энергии и кпд электроразрядных эксимерных ArF- (193 нм) и KrF- (248 нм) лазеров от геометрии активной среды и параметров высоковольтной схемы возбуждения. Разработана конструкция и оптимизированы параметры разрядной камеры и высоковольтной схемы возбуждения типа L-C-инвертор с автоматической УФ-предыонизацией, позволяющие достичь удельной мощности накачки до 3,5 МВт/см<sup>3</sup>. В газовой активной среде Ne:Ar:F<sub>2</sub> – 79,7:20:0,3 при полном давлении 2,2 атм впервые достигнута энергия генерации 850 мДж с кпд от запасенной энергии 1,7% при длительности импульса на полувысоте (15±1) нс. Для KrF-лазера в газовой активной среде Ne:Ne:Kr:F<sub>2</sub> – 44,9:44,9:10:0,2 при полном давлении 2,8 атм получен полный кпд 2,5% при энергии излучения 840 мДж. Была достигнута максимальная энергия генерации KrF-лазера 1,15 Дж с кпд 2,2% при длительности импульса на полувысоте (24±1) нс и импульсной мощности 48 МВт.

### Введение

В настоящее время эксимерные электроразрядные ArF- (193 нм) и KrF- (248 нм) лазеры находят широкое применение в микроэлектронике, фотолитографии и медицине. Для большинства технологических применений важными параметрами лазера являются максимально достижимая энергия излучения в импульсе при высоком кпд от запасаемой энергии, надежность и эффективность схемы возбуждения лазера, а также стоимость его эксплуатации, в основном связанная со стоимостью газовой смеси. Стоимость эксплуатации в основном зависит от состава активной среды лазера. В данной статье предлагается использование активных сред эксимерных лазеров на основе буферного газа Ne, что требует проведения исследований влияния параметров активной среды и накачки на энергию и кпд ArF- и KrF-лазеров.

Обычно для достижения значений энергии излучения свыше 0,5 Дж для электроразрядных ArF- и KrF-лазеров используются достаточно сложные схемы возбуждения, работающие на высоких зарядных напряжениях, при этом в качестве буферного газа в активных средах чаще используется Ne [1–6].

В [1] описан эксимерный лазер на основе буферных газов Ne и Ne. В результате экспериментов была достигнута энергия генерации 280 мДж (ArF) и 500 мДж (KrF) с кпд 0,6 и 1,1%. Плотность энергии в этих экспериментах составила 2,4 Дж/л, накачка активной среды объемом 220 см<sup>3</sup> осуществлялась при зарядных напряжениях 40–45 кВ в схеме с перезарядкой емкости. Максимальная энергия излучения 2 Дж для ArF-лазера была получена в работе [2], а

для KrF-лазера 5 Дж в [3]. В обоих случаях в качестве активной среды лазеров использовался буферный газ Ne. Среда возбуждалась по схеме с 2-ступенчатым генератором Маркса при зарядных напряжениях 190–220 кВ. Коэффициент полезного действия обоих лазеров не превышал 0,5%.

В работе [4] авторам удалось получить кпд ArF-лазера 1,3% при энергии генерации 295 мДж и максимальную энергию генерации 420 мДж с кпд 1,1% в газовой смеси Ne:Ne:Ar:F<sub>2</sub>–59,4:35,6:4,9:0,1 при давлении 4 атм и зарядных напряжениях 28 и 36 кВ соответственно. Для KrF-лазера в газовой смеси Ne:Kr:F<sub>2</sub> – 98,6:1,3:0,09 были достигнуты максимальная энергия излучения 600 мДж (кпд 1,3%) при давлении 6 атм и кпд 2,8% (с энергией 300 мДж) в газовой смеси Ne:Kr:F<sub>2</sub> – 98,2:1,2:0,1 при давлении 4 атм. Лазер с активным объемом 116 см<sup>3</sup> возбуждался по схеме с перезарядкой емкости и автоматической УФ-предыонизацией при зарядных напряжениях до 36 кВ. При исследовании роли буферных газов Ne и Ne в разработанной конструкции лазера было показано, что для зарядных напряжений 30 кВ и ниже генерация в смеси на основе буферного газа только Ne вообще не наблюдалась.

В работе [5] в Ne-смесях были достигнуты кпд 2,1 и 3,9% с энергией 270 мДж (ArF) и 500 мДж (KrF), а в работе [6] получены энергии излучения 500 мДж (ArF) и 810 мДж (KrF) с кпд 1 и 2,6% соответственно. В этих работах использовалась высоковольтная схема возбуждения с перезарядкой емкости и автоматической УФ-предыонизацией. В качестве коммутатора использовался тиратрон ТГИ 1000/25 или ТГИ 2500/50.

Максимальные значения кпд и энергии излучения в гелийсодержащей активной среде для ArF- и KrF-лазеров были достигнуты в наших предыдущих работах [7, 8]. В [7] были получены: для ArF-лазера максимальное значение кпд 1,5% (с энергией 360 мДж) и максимальное значение энергии излучения 550 мДж (с кпд 1,3%), для KrF-лазера максимальное значение кпд 2,4% (с энергией 570 мДж) и максимальное значение энергии излучения 820 мДж (с кпд 2,0%). Для накачки активного объема 140 см<sup>3</sup> в качестве схемы возбуждения использовалась схема L-C-инвертор на основе стандартного искрового разрядника РУ-65 с автоматической предыонизацией среды.

Из полученных в [7, 8] результатов видно, что максимальная энергия излучения достигается при минимальном кпд и, наоборот, максимальный кпд достигается при минимальной энергии излучения. Данная работа является продолжением наших исследований по достижению максимальных значений энергии генерации и кпд эксимерных электроразрядных ArF- и KrF-лазеров в активных средах на основе буферного газа He. Поэтому целью работы было экспериментальное исследование энергетических и временных характеристик накачки и излучения газоразрядных ArF- и KrF-лазеров, изучение конструктивных особенностей разрядной камеры и оптимизация высоковольтной схемы возбуждения типа L-C-инвертор с обостряющей емкостью и автоматической УФ-предыонизацией для достижения высокой мощности накачки, обеспечивающей максимальные значения кпд и энергии излучения.

## Аппаратура и методы измерений

В экспериментах измерялись энергетические и амплитудно-временные характеристики 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 осциллографом Tektronix TDS 210. Импульсы напряжения исследовались с использованием емкостных и омических делителей с точностью 2%. Для измерения параметров импульсов тока был разработан и изготовлен низкоиндуктивный омический шунт сопротивлением 0,02 Ом. Точность измерений амплитуд напряжения и тока во всех экспериментах составляла 5%.

## Экспериментальная установка

Разрядная камера лазера была изготовлена из капролона, электроды лазера из никеля в поперечном сечении имели профиль, близкий к профилю Чанга с шириной по основанию 30 мм и радиусами рабочей и боковой поверхностей 100 и 13 мм. Расстояние между электродами 27 мм, длина активной части 590 мм, поэтому активный объем при ширине разряда 11 мм

составлял 175 см<sup>3</sup>. Автоматическая УФ-предыонизация осуществлялась двумя рядами искровых промежутков с зазорами 2 мм. Для улучшения однородности УФ-предыонизации разрядного промежутка и снижения индуктивности высоковольтной схемы возбуждения было сделано по 39 искровых промежутков с каждой стороны высоковольтного электрода на расстоянии 10 мм от края электрода. Камера герметизировалась плоскопараллельными пластинами из MgF<sub>2</sub>, одна из которых служила выходным зеркалом резонатора. Вторым зеркалом резонатора было внешнее диэлектрическое зеркало с коэффициентом отражения 97% (193 нм) и 99% (248 нм). Длина резонатора составила 120 см. Через разрядный промежуток осуществлялась поперечная прокачка газовой смеси с помощью радиального вентилятора со скоростью 12 м/с, что обеспечивало возможность работы лазера с частотой следования импульсов до 50 Гц и более. Полный объем разрядной камеры с вентилятором был равен примерно 40 л.

Для того чтобы осуществить высокую эффективность передачи энергии из запасающего контура в обостряющий и обеспечить высокую интенсивность введения энергии в газовую смесь, необходимо было разработать конструкцию высоковольтной схемы возбуждения, имеющую предельно минимальную индуктивность. Оптимизация режима работы схемы была связана с подбором расположения конденсаторов, образующих емкости  $C_1$  и  $C_2$  вблизи разрядной камеры для достижения максимальной эффективности передачи энергии. Разработанная высоковольтная схема возбуждения лазера (рис. 1) состояла из запасаемых  $C_1$  и  $2C_2$  и обостряющих  $2C_3$  емкостей. В качестве высоковольтного коммутатора использовался

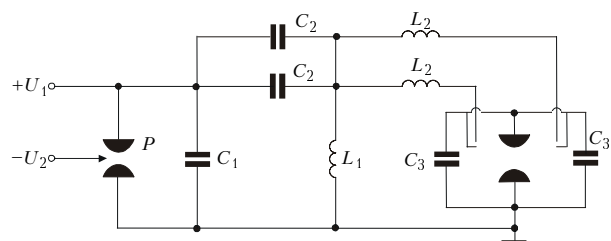


Рис. 1. Электрическая схема лазера:  $P$  – искровой разрядник РУ-65;  $C_1 = 48$ ;  $C_2 = 51$ ;  $C_3 = 15$  нФ;  $L_1 = 2,5$  мкГн;  $L_2$  – 39 шт. по 1 мкГн

стандартный искровой газонаполненный разрядник типа РУ-65. Емкости  $C_1$  и  $2C_2$  представляли собой батареи конденсаторов типа TDK UHV-6A (2,7 нФ, 30 кВ), состоящие из 18 и 38 шт. соответственно, и имели величину 48 и 102 нФ, поэтому полная зарядная емкость составила 150 нФ. После срабатывания разрядника и смены полярности напряжения на  $C_1$  включались последовательно емкости  $C_1$  и  $2C_2$  и зарядная емкость равнялась 33 нФ. Емкости  $C_3$  набирались из конденсаторов TDK UHV-8A (1,3 нФ, 40 кВ), которые располагались с двух сторон непосредственно на разрядной камере, вдоль нее, для достижения минимальной индуктивности разрядного кон-

тура. Индуктивность разрядного контура составляла 3,1 нГн, величина емкости  $2C_3$  30 нФ. Емкость  $2C_3$  заряжалась от  $C_1$  и  $2C_2$  через 78 дросселей, имевших (каждый) индуктивность 1 мкГн и подключенных к искровым зазорам УФ-предыонизации для обеспечения их синхронного срабатывания. Полная индуктивность параллельно включенных дросселей составляла 12,8 нГн, зарядная индуктивность  $L_1$  2,5 мкГн.

## Результаты и их обсуждение

### ArF-лазер

В экспериментах оптимизировались состав и полное давление активной газовой смеси на основе буферного газа Не в зависимости от зарядного напряжения. Оптимальное соотношение компонентов смеси, которое измерялось по максимальной энергии генерации, Не:Ar:F<sub>2</sub> было 79,7:20:0,3. Оптимальное полное давление зависело от зарядного напряжения и росло от 1,5 до 2,2 атм при изменении напряжения от 19 до 26 кВ.

На рис. 2 представлены осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке  $U$ , тока разряда  $J$  и импульса генерации  $I_1$  для ArF-лазера

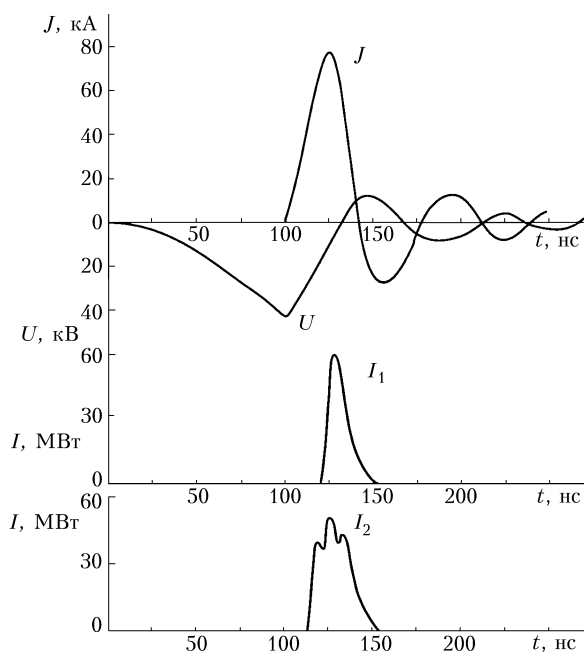


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке  $U$ , тока разряда  $J$  и лазерного излучения  $I_1$  (ArF) и  $I_2$  (KrF);  $U_0 = 26$  кВ

при зарядном напряжении 26 кВ. Измерения показали, что задержка начала тока основного разряда относительно начала импульса УФ-предыонизации равна 100 нс. Длительность импульса тока на полувысоте составила  $(25 \pm 1)$  нс. При этом, как видно из осциллограмм напряжения  $U$  и тока  $J$ , потери энергии в результате колебательного процесса в разрядном контуре невелики. Импульс генерации  $I_1$  задержан

относительно начала импульса тока на 20 нс и равен  $(15 \pm 1)$  нс на полувысоте.

На рис. 3 показана зависимость напряжения на разрядном промежутке  $U$  и тока разряда  $J$  от зарядного напряжения  $U_0$ . При увеличении зарядного

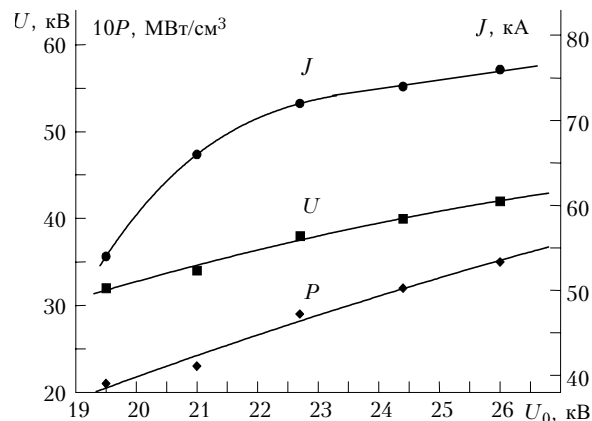


Рис. 3. Зависимость напряжения на разрядном промежутке  $U$ , тока разряда  $J$  и средней мощности накачки  $P$  от зарядного напряжения  $U_0$  в смеси Не:Ar:F<sub>2</sub> – 79,7:20:0,3

напряжения  $U_0$  напряжение на электродах  $U$  увеличивается от 32 до 42 кВ, при этом ток разряда  $J$  растет от 54 до 78 кА. Для оценки уровня энерговклада в разряд были проведены расчеты средней мощности накачки, аналогично выполненным в [5]. Для этого была разработана программа, позволяющая из осциллограмм напряжения и тока на разрядном промежутке рассчитывать среднюю мощность накачки с учетом индуктивной составляющей напряжения на разрядном промежутке. Зависимость средней мощности накачки  $P$  от зарядного напряжения  $U_0$  показана на рис. 3. В результате было получено, что в активной среде с буферным газом Не при минимальном зарядном напряжении 19 кВ средняя мощность накачки равна 2,1 МВт/см<sup>3</sup>. При увеличении зарядного напряжения средняя мощность увеличивалась и при 26 кВ достигала 3,5 МВт/см<sup>3</sup>.

Исследовалась зависимость энергии излучения  $E_1$  и полного кпд  $\eta_1$  ArF-лазера на смеси Не:Ar:F<sub>2</sub> – 79,7:20:0,3 от зарядного напряжения  $U_0$ . Результаты исследований показаны на рис. 4. Важным обстоятельством является тот факт, что энергия излучения и кпд увеличиваются с ростом зарядного напряжения и достигают максимальных значений 850 мДж с кпд 1,7% при максимальном зарядном напряжении 26 кВ. При длительности импульса  $(15 \pm 1)$  нс мощность излучения составила 57 МВт. Форма светового пучка на выходе лазера была прямоугольной размером  $27 \times 11$  мм.

Изучалось также влияние состава буферного газа на эффективность ArF-лазера. Проведенные эксперименты по измерению энергии и кпд ArF-лазера для различных соотношений Не и Не показали, что добавление Не в качестве буферного газа к Не до 50% не изменяло выходные параметры генерации, а также осциллограммы импульсов, показанных на рис. 2.

Увеличение содержания Ne в смеси свыше 50% и переход к чистому буферному газу Ne приводили к снижению энергии и кпд ArF-лазера в 1,3 раза для зарядного напряжения 26 кВ.

### КrF-лазер

На экспериментальной установке, описанной выше, были проведены исследования энергетических и временных характеристик накачки и излучения КrF-лазера. Как и в случае с ArF-лазером, в экспериментах первоначально оптимизировались состав и полное давление газовой смеси в зависимости от зарядного напряжения. Оптимальное соотношение компонентов смеси измерялось по максимальной энергии генерации. В отличие от ArF-лазера добавка Ne в активную среду лазера приводила к увеличению энергии излучения при одинаковых условиях накачки. В результате оптимальное соотношение компонентов смеси было He:Ne:Kr:F<sub>2</sub> – 44,9:44,9:10:0,2. Оптимальное полное давление зависело от зарядного напряжения и изменялось от 2,6 до 3,1 атм при изменении напряжения от 19 до 26 кВ. Увеличение содержания Ne в смеси свыше 50% и переход к чистому буферному газу Ne приводили к незначительному снижению энергии и кпд.

Для КrF-лазера осциллограммы импульсов и зависимости напряжения на разрядном промежутке, тока разряда и средней мощности накачки от зарядного напряжения аналогичны осциллограммам для ArF-лазера и отличаются только величиной. При увеличении зарядного напряжения от 18 до 26 кВ напряжение на разрядном промежутке растет от 28 до 40 кВ, ток разряда – от 51 до 78 кА, при этом средняя мощность накачки увеличивается от 1,6 до 3,2 МВт/см<sup>3</sup>.

Импульс генерации I<sub>2</sub> КrF-лазера (см. рис. 2) задержан относительно начала импульса тока на 16 нс и имеет длительность (24±1) нс на полувысоте. Кроме того, импульс генерации имеет структуру, состоящую из трех максимумов, совпадающих по времени с тремя обходами излучением резонатора и связанных с изменением коэффициента усиления среды, несовпадающим с изменением импульса накачки.

На рис. 4 показана зависимость энергии излучения E<sub>2</sub> и полного кпд η<sub>2</sub> КrF-лазера на смеси He:Ne:Kr:F<sub>2</sub> – 44,9:44,9:10:0,2 от зарядного напряжения U<sub>0</sub>. Видно, что с ростом зарядного напряжения кпд растет до максимального значения 2,5% при зарядном напряжении 21 кВ. При этом энергия генерации составила 840 мДж. При увеличении зарядного напряжения до 26 кВ кпд медленно уменьшается до 2,2%, что позволяет достичь значения энергии генерации 1,15 Дж. Этому значению соответствует импульсная мощность излучения 48 МВт.

Уменьшение полного кпд при увеличении зарядного напряжения связано, согласно работам [5, 9], с превышением оптимального для КrF-лазера значения интенсивности накачки порядка 2,5 МВт/см<sup>3</sup>. Сравнивая результаты данной работы и нашей предыдущей [8], можно сделать предположение, что дальнейшее уве-

личение энергии генерации при высоком значении кпд газоразрядного КrF-лазера может быть достигнуто при увеличении активного объема лазера и сохранении мощности накачки на уровне 2,5 МВт/см<sup>3</sup>.

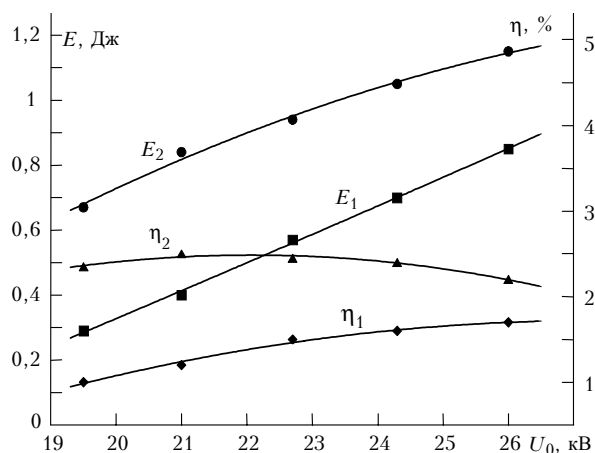


Рис. 4. Зависимость энергии излучения и кпд от зарядного напряжения U<sub>0</sub>; (E<sub>1</sub>, η<sub>1</sub>) – ArF-лазер (He:Ar:F<sub>2</sub> – 79,7:20:0,3); (E<sub>2</sub>, η<sub>2</sub>) – КrF-лазер (He:Ne:Kr:F<sub>2</sub> – 49,9:49,9:10:0,2)

### Заключение

Исследованы зависимость энергии и кпд электроразрядных эксимерных ArF- и КrF-лазеров от геометрии активной среды и параметров высоковольтной схемы возбуждения. Показано, что для достижения высоких значений энергии излучения и кпд необходимо достижение высокой удельной мощности накачки. Разработана конструкция и оптимизированы параметры разрядной камеры и высоковольтной схемы возбуждения типа L–C-инвертор с автоматической УФ-предыонизацией, позволяющие достичь удельной мощности накачки до 3,5 МВт/см<sup>3</sup>.

Впервые для ArF-лазера с буферным газом Ne достигнуты значения энергии излучения 850 мДж при кпд 1,7%. Длительность импульса на полувысоте составила (15±1) нс, при этом импульсная мощность составила 57 МВт.

Для КrF-лазера в газовой активной среде He:Ne:Kr:F<sub>2</sub> – 44,9:44,9:10:0,2 при полном давлении 2,8 атм получен полный кпд 2,5% при энергии излучения 840 мДж. Максимальная энергия генерации КrF-лазера достигла 1,15 Дж с кпд 2,2% при длительности импульса на полувысоте (24±1) нс и импульсной мощности 48 МВт.

1. Armandillo E., Bonanni F., Grasso G. Compact, simple, high-energy, discharge-pumped rare gas halide laser // Opt. Commun. 1982. V. 42. № 1. P. 63–66.
2. Andrew I.E., Dyer P.E., Roebuck P.I. Improved energy output from discharge pumped ArF and KrCl lasers // Opt. Commun. 1984. V. 49. № 3. P. 189–194.
3. Watanabe S., Endoh A. Wide aperture self-sustained discharge KrF and XeCl lasers // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 41. № 9. P. 799–801.
4. Miyazaki K., Hasama T., Yamada K., Fukatsu T., Eura T., Sato T. Efficiency of a capacitor-transfer-type

- discharge excimer laser with automatic preionisation // J. Appl. Phys. 1986. V. 60. № 8. P. 2721–2728.
5. *Борисов В.М., Брагин И.Е., Виноходов А.Ю., Водчиц В.А.* Об интенсивности накачки электроразрядных эксимерных лазеров // Квант. электрон. 1995. Т. 22. № 6. С. 533–536.
  6. *Борисов В.М., Борисов А.В., Брагин И.Е., Виноходов А.Ю.* Эффекты ограничения средней мощности в компактных импульсно-периодических KrF-лазерах // Квант. электрон. 1995. Т. 22. № 5. С. 446–450.
  7. *Жутиков А.А., Ражев А.М.* Эксимерный ArF-лазер с энергией 0,5 Дж на основе буферного газа He // Квант. электрон. 1997. Т. 24. № 8. С. 683–687.
  8. *Жутиков А.А., Ражев А.М.* Эксимерный KrF-лазер на основе буферного газа He с энергией 0,8 Дж и кпд 2% // Квант. электрон. 1998. Т. 25. № 8. С. 687–689.
  9. *Борисов В.М., Высикайло Ф.И., Иванова Е.Г., Христофоров О.Б.* Закономерности флуоресценции эксимерных молекул KrF\*, XeF\* в объемном разряде // Квант. электрон. 1985. Т. 12. № 6. С. 1196–1203.

*S.N. Bagayev, A.M. Razhev, V.A. Chekavinsky, A.A. Zhupikov, E.S. Kargapoltsev.* **Dependence of the energy and efficiency of electric-discharge of the ArF and KrF lasers on the pumping parameters and active media composition.**

The dependence of the output radiation energy and efficiency of an electric-discharge ArF (193 nm) and KrF (248 nm) excimer lasers on an active volume geometry and parameters of a high voltage excitation circuit are investigated. The construction and parameters of the discharge chamber and high-voltage excitation circuit of LC-inverter type with automatic preionisation (API) providing high specific pump power up to 3.5 MW/cm<sup>3</sup> are created and optimized. For the first time, in a gas mixture He: Ar: F<sub>2</sub> – 79.7:20:0.3 at a total pressure of 2.2 atm, the output energy of ArF laser up to 850 mJ with total efficiency of 1.7% at pulse duration (FWHM) 15±1 ns was obtained. For KrF laser in a gas mixture He:Ne:Kr: F<sub>2</sub> – 44.9:44.9:10:0.2 at a total pressure of 2.8 atm, the overall efficiency up to 2.5% with output radiation energy of 840 mJ was achieved. The maximum output energy of KrF laser up to 1.15 J with total efficiency of 2.2 % at pulse duration (FWHM) 24±1 and pulse power up to 48 MW was obtained.