

Мощные газоразрядные эксимерные ArF-, KrCl-, KrF- и XeCl-лазеры на двухкомпонентных газовых смесях без буферного газа*

А.М.Ражев, Е.С.Каргапольцев, Д.С.Чуркин

Представлены результаты экспериментального исследования влияния состава газовой смеси (активной среды лазера) на энергию генерации и полный КПД эксимерных газоразрядных лазеров на молекулах ArF (193 нм), KrCl* (222 нм), KrF* (248 нм) и XeCl* (308 нм), работающих без применения буферного газа. Найдены оптимальные (с точки зрения максимальной энергии излучения) соотношения газовых компонентов активной среды эксимерных лазеров, при которых достигается эффективная работа лазерного источника. Экспериментально подтверждено, что для газоразрядных эксимерных лазеров на галогенидах инертных газов присутствие в активной среде буферного газа не является необходимым условием эффективной работы лазерного источника. Впервые в двухкомпонентных газовых смесях импульсно-периодических газоразрядных эксимерных лазеров, работающих на электронных переходах эксимерных молекул ArF*, KrCl*, KrF* и XeCl* при накачке поперечным объемным электрическим разрядом газовой смеси пониженного давления без буферного газа, была достигнута энергия лазерного излучения в импульсе до 170 мДж и высокая (до 24 МВт) импульсная мощность лазерного излучения при длительности на полувывоте импульса KrF-лазера 7 нс. Максимальный полный КПД, полученный в эксперименте для исследуемых двухкомпонентных газовых смесей KrF- и XeCl-лазеров, достиг 0,8 %.*

Ключевые слова: двухкомпонентная газовая смесь, эксимерный лазер, поперечный объемный электрический разряд с УФ предионизацией, газовая смесь без буферного газа, пониженное полное рабочее давление, энергия генерации, полный КПД.

1. Введение

Во всех известных эксимерных лазерах на галогенидах инертных газов с накачкой активной газовой среды поперечным объемным электрическим разрядом (далее – газоразрядные эксимерные лазеры) используется газовая смесь высокого давления (в среднем полное рабочее давление около 2 атм), состоящая как минимум из трех компонентов. Это буферный инертный газ (He, Ne, Ar), рабочий инертный газ (Ar, Kr, Xe) и галогенсодержащий газ, в котором должны быть атомы F, Cl и Br. Буферные газы, входящие в состав газовой смеси типичных коммерческих газоразрядных эксимерных лазеров, являются основными газовыми компонентами – около 90% от общего рабочего давления газовой смеси. Для эффективной (с

точки зрения как энергетика, так и ресурса одного наполнения) работы этих лазеров используется газ высокой степени очистки. Так, типичными буферными газами для коммерческих моделей лазерных систем являются гелий марки 6.0, неон или их сочетание. Стоимость этих газовых компонентов достаточно высока. Во время эксплуатации эксимерного лазера происходит неизбежное изменение состава активной лазерной среды (газовой смеси), обусловленное появлением примесей в результате деградации материалов электродов и материалов разрядной камеры вследствие химической реакции с атомами галогенов, образующихся в разряде. Изменение состава газовой смеси неизбежно приводит к падению энергии генерации во время работы лазера и, как следствие, к необходимости обновления газовой смеси.

Исследователи стараются обеспечить такие условия эксплуатации лазерного источника, при которых расход и стоимость газовых компонентов будут минимальными. С целью снижения затрат на эксплуатацию предлагается исследовать возможность работы эксимерного лазера с применением двухкомпонентных газовых сред, состоящих из рабочего и галогенсодержащего газов. В связи с этим исследование влияния параметров накачки и состава активной газовой среды, находящейся при пониженном рабочем давлении, на эффективность генерации газоразрядных эксимерных лазеров, работающих на газовых смесях без буферного газа, является весьма актуальным.

Следует отметить, что в газоразрядных эксимерных лазерах на моногалогенидах инертных газов возбужденные молекулы образуются как при двухчастичных (гарпунная реакция) так и при трехчастичных столкновениях (ион-ионная рекомбинация). При преимущественном

* Доложена на Пятом российско-китайском симпозиуме по лазерной физике и фотонике (RCWLP&P, Новосибирск, 26–30 августа 2015 г.)

А.М.Ражев. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; Новосибирский государственный технический университет, 630092 Новосибирск, просп. К.Маркса, 20; e-mail: razhev1950@mail.ru

Е.С.Каргапольцев. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: djohn797@mail.ru

Д.С.Чуркин. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: churkin@laser.nsc.ru

Поступила в редакцию 7 декабря 2015 г., после доработки – 15 января 2016 г.

вкладе в образование инверсии гарпунной реакции требование высокого давления активной газовой среды отпадает. Экимерные лазеры на моногалогенидах инертных газов работают при более низких рабочих давлениях, чем эксимерные лазеры на димерах инертных газов. В настоящей работе представлены результаты исследования только импульсно-периодических газоразрядных эксимерных лазеров на моногалогенидах инертных газов с накачкой активной лазерной среды поперечным объемным электрическим разрядом, работающих при пониженном давлении.

Из известных немногочисленных работ, посвященных исследованию газоразрядных эксимерных лазеров без применения буферного газа, следует упомянуть работы [1–4]. В работе [1] были впервые представлены результаты получения генерации на эксимерных молекулах XeCl^* , XeF^* и KrF^* в смесях без буферного газа при накачке поперечным электрическим разрядом. Авторы не приводят результатов измерения энергетических и временных характеристик лазерного излучения. По-видимому, энергия излучения была малой, недостаточной для практического применения разработанных лазерных источников.

В работах [2, 3] сообщалось о получении лазерной генерации при возбуждении двухкомпонентной газовой смеси продольным электрическим разрядом. В результате, как утверждается в работе [2], генерация на электронных переходах эксимерных молекул XeCl^* получена при незначительном содержании буферного газа Не. При рабочем давлении активной газовой среды около 0.06 атм энергия излучения не превышала 0.1 мДж. Отсутствие буферного газа в составе рабочей смеси приводило к падению энергии генерации почти в два раза.

В работе [3] генерация на электронных переходах эксимерных молекул KrF^* получена в отсутствие буферного газа. Энергия генерируемого излучения не превышала 0.08 мДж при рабочем давлении активной газовой среды около 0.4 атм. В работе [4] генерация в двухкомпонентных газовых смесях была получена при оптическом возбуждении активной газовой среды. Лазерное излучение было получено на электронных переходах эксимерных молекул KrCl^* . Энергия генерации составила 0.001 мДж.

Из анализа приведенных в открытой печати экспериментальных данных следует вывод о том, что энергетические характеристики излучения эксимерных лазеров на газовых смесях без буферного газа очень низки, что не позволяет использовать такие лазеры в различных применениях. Поэтому нашей целью является разработка и изучение возможности создания мощных (мегаваттных) импульсных газоразрядных эксимерных лазеров, работающих на двухкомпонентных газовых смесях в качестве лазерных активных сред, в составе которых отсутствует инертный буферный газ, что позволяет осуществлять эффективную абляцию различных материалов и биологических тканей и, следовательно, использовать такие лазеры в медицине, микроэлектронике и других приложениях.

2. Аппаратура и методы измерений

В экспериментах измерялись энергетические и амплитудно-временные характеристики импульсов напряжения и тока электрического разряда и параметры излучения в наносекундном диапазоне. Для измерения энергии излучения использовался пироэлектрический детектор PE50-BB (Ophir Optronics Ltd), форма импульса излу-

чения регистрировалась с помощью коаксиального фотоэлемента ФЭК-22. Амплитудно-временные характеристики измерялись осциллографом Tektronix TDS 220, импульс напряжения исследовался с использованием высоковольтного щупа мод P 6015A (Tektronix). Параметры импульсов тока измерялись низкоиндуктивным омическим шунтом (сопротивление 0.02 Ом). Точность измерений амплитуд напряжения и тока во всех экспериментах составляла 5%.

3. Экспериментальная установка

Для реализации высокой эффективности передачи энергии из запасающего контура в обостряющий и обеспечения высокой интенсивности введения энергии в газовую смесь, необходимо было разработать конструкцию высоковольтной схемы возбуждения с минимальной индуктивностью. Для оптимизации режима работы схемы следовало:

- оптимизировать расположение элементов высоковольтной системы возбуждения лазера (батареи конденсаторов C_1 , C_2 , C_3 , высоковольтного коммутатора);
- снизить индуктивность разрядного контура и ввести дополнительную индуктивность в обратный токопровод для достижения максимальной эффективности передачи энергии из запасаемого контура в разрядный контур, включающий в себя активную среду.

Разработанная и описанная нами ранее [5] высоковольтная электрическая схема возбуждения лазера представлена на рис. 1.

Индуктивность L_2 представляет собой индуктивность контура LC-инвертора, включающую в себя общую индуктивность искровых промежутков УФ предыонизации, а также индуктивности емкостей C_1 и C_2 . Индуктивность L_1C_1 -контура (L_1) определяется в значительной степени индуктивностью высоковольтного коммутатора (ВК) – тиратрона ТПИ1-10к/20; L_4 – зарядная индуктивность. Индуктивность L_5 токоподводящих шин влияет на эффективность передачи энергии из накопительных конденсаторов в обостряющий контур, оказывая определяющее воздействие на эффективность работы схемы (см. [5]). Выбор величины индуктивности L_5 позволяет увеличить напряжение на батарее конденсаторов C_3 и, таким образом, увеличить ток разряда, что приводит к более высокому энерговкладу. Кроме того, увеличение индуктивности L_5 сопровождается затягиванием момента пробоя разрядного промежутка, т. е. возрастанием временной за-

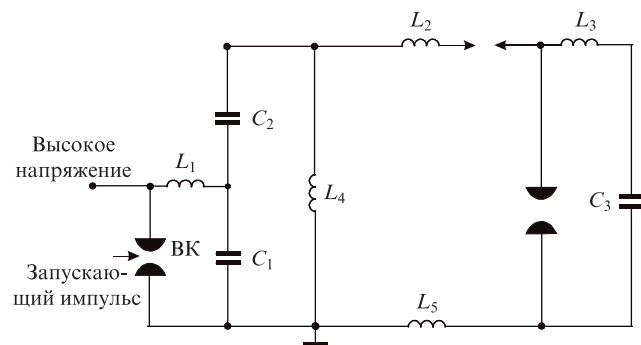


Рис. 1. Электрическая схема накачки лазера типа LC-инвертора: $C_1 = 54$ нФ; $C_2 = 103$ нФ; $C_3 = 35$ нФ; ВК – высоковольтный коммутатор (тиратрон ТПИ1-10к/20); $L_1 = 40\text{--}70$ нГн; $L_2 = 20$ нГн; $L_3 = 3.8$ нГн; $L_4 = 2.5$ мкГн; L_5 – индуктивность токоподводящих шин.

держки t между началом действия УФ предыонизации (пробоем искровых промежутков) и импульсом тока через разряд. Более поздний пробой разрядного промежутка является выгодным с точки зрения повышения однородности предыонизации активной газовой среды, поэтому приближение к диапазону оптимальных значений t (200–300 нс) также приводит к увеличению выходной энергии и КПД лазера.

Емкости C_1 (54 нФ) и C_2 (103 нФ) представляли собой батареи конденсаторов типа TDK UHV-6A (2.7 нФ, 30 кВ), состоящие из 20 и 38 штук соответственно. Таким образом, полная зарядная емкость была равна 157 нФ. После срабатывания высоковольтного коммутатора (тиратрон ТПИ1-10к/20) и смены полярности напряжения на C_1 последовательно включенные емкости C_1 и C_2 перезаряжались на C_3 и их ударная емкость становилась равной 35 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 контура. Емкость C_3 (31 нФ) заряжалась от C_1 и C_2 через 78 дросселей с индуктивностью 1 мкГн каждый, подключенных к искровым зазорам УФ предыонизации для обеспечения их синхронного срабатывания. Полная индуктивность параллельно включенных дросселей была равна 12.8 нГн, зарядная индуктивность L_4 составляла 2.5 мкГн.

Электроды лазера изготавливались из никеля. В экспериментах использовались электроды с радиусами рабочей поверхности 50 см (анод) и 100 см (катод). Расстояние между электродами равнялось 2.1 см, длина активной части составляла 59 см, поэтому активный объем при ширине разряда 0.8 см был равен 100 см³. 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 с каждой стороны высоковольтного электрода, на расстоянии 10 мм от его края, было сделано по 39 искровых промежутков. Камера герметизировалась плоскопараллельными пластинами из CaF₂ (VUV), одна из которых служила выходным зеркалом резонатора. В качестве второго зеркала резонатора использовались внешние диэлектрические зеркала с соответствующим длине волны лазерного излучения максимальным коэффициентом отражения. Длина резонатора составляла 120 см. Через разрядный промежуток с помощью радиального вентилятора осуществлялась поперечная прокачка газовой смеси со скоростью 12 м/с, что обеспечивало возможность работы лазера с частотой следования импульсов 50 Гц и более.

4. Результаты экспериментов

Ниже приведены результаты экспериментального исследования энергетических и временных параметров излучения эксимерных газоразрядных ArF-, KrCl-, KrF- и XeCl-лазеров в зависимости от параметров накачки и состава газовой смеси, находящейся при пониженном рабочем давлении, без применения инертного буферного газа.

4.1. Эксимерный ArF-лазер (193 нм)

Получена экспериментальная зависимость энергии генерации и полного КПД (рис.2) двухкомпонентного (Ar и

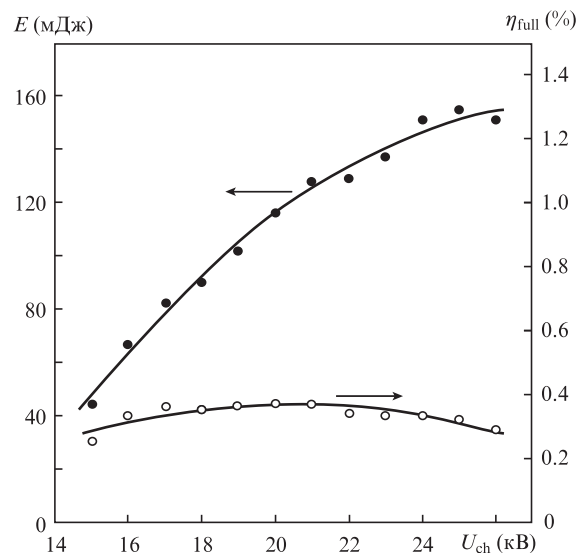


Рис.2. Зависимости выходной энергии лазера E и полного КПД η_{full} двухкомпонентного ArF-лазера от зарядного напряжения U_{ch} при линейном увеличении полного давления газовой смеси от 0.7 до 1.2 атм.

F₂) эксимерного ArF-лазера от зарядного напряжения U_{ch} в диапазоне 15–26 кВ без буферного газа в составе активной газовой среды.

Из приведенной зависимости, следует, что с увеличением зарядного напряжения и, соответственно, рабочего давления газовой смеси (от 0.7 до 1.2 атм) энергия генерации увеличивается от 40 до 160 мДж. Таким образом, без применения буферного газа при накачке газовой смеси при давлении 1.2 атм объемным поперечным электрическим разрядом впервые для ArF-лазера получена энергия генерации 160 мДж при полном КПД около 0.3%. Незначительное изменение значений КПД с ростом накачки свидетельствует об удельной мощности накачки двухкомпонентного ArF-лазера, близкой к оптимальной. При длительности импульса излучения на полувысоте 8 ± 1 нс импульсная мощность достигла 19.5 МВт. В нашей работе под полным КПД лазера понимается отношение энергии генерации лазера к энергии, запасенной в накопительной емкости ($C_1 + C_2$) высоковольтной электрической системы возбуждения (далее просто КПД).

4.2. Эксимерный KrCl-лазер (222 нм)

Получена экспериментальная зависимость энергии генерации и полного КПД (рис.3) двухкомпонентного (Kr и BC₃) эксимерного KrCl-лазера от зарядного напряжения U_{ch} в диапазоне 20–26 кВ без буферного газа в составе активной газовой среды.

Из приведенной зависимости следует, что с увеличением зарядного напряжения и, соответственно, рабочего давления газовой смеси (от 1.1 до 1.3 атм) энергия генерации увеличивалась от 70 до 110 мДж, но, начиная с 25 кВ, из-за ухудшения однородности разряда и неоптимальных условий ввода в активную среду энергии, запасенной в обостряющей емкости, энергия излучения двухкомпонентного KrCl-лазера падает. Таким образом, без применения буферного газа при накачке газовой смеси при давлении 1.2 атм объемным поперечным электрическим разрядом впервые для KrCl-лазера получена энергия генерации 110 мДж при КПД около 0.25%. При длительности

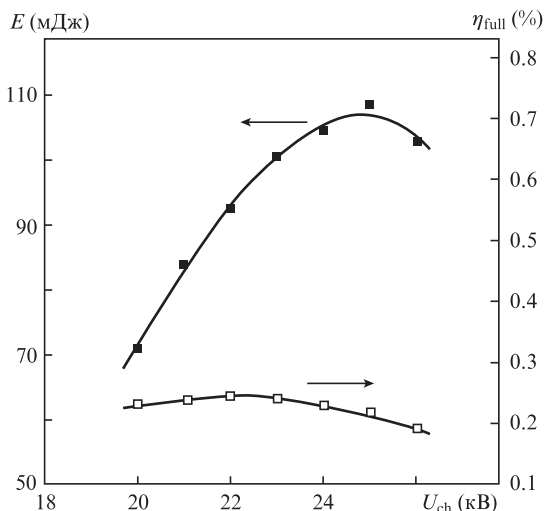


Рис.3. То же, что и на рис.2, для двухкомпонентного KrCl-лазера при увеличении полного давления газовой смеси от 1.1 до 1.3 атм.

импульса излучения на полувысоте 8 ± 1 нс импульсная мощность достигла ~ 14 МВт.

Также получена экспериментальная зависимость энергии генерации двухкомпонентного (Kr и HCl) эксимерного KrF-лазера от зарядного напряжения U_{ch} в диапазоне 20–26 кВ с применением газообразного HCl в качестве галогеносителя. Так, с увеличением зарядного напряжения и, соответственно, рабочего давления газовой смеси (от 0.9 до 1.1 атм) энергия генерации возросла до 90 мДж. При длительности импульса излучения на полувысоте 7 ± 1 нс импульсная мощность достигла ~ 13 МВт.

4.3. Эксимерный KrF-лазер (248 нм)

Получена экспериментальная зависимость энергии генерации и полного КПД (рис.4) двухкомпонентного (Kr и F₂) эксимерного KrF-лазера от зарядного напряжения U_{ch} в диапазоне 10–26 кВ без буферного газа в составе активной газовой среды.

Из приведенной зависимости следует, что с увеличением зарядного напряжения и, соответственно, рабочего

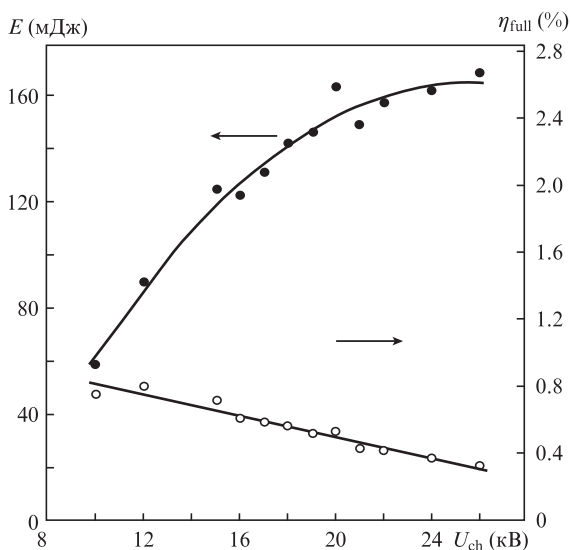


Рис.4. То же, что и на рис.2, для двухкомпонентного KrF-лазера при увеличении полного давления газовой смеси от 0.4 до 1.1 атм.

давления газовой смеси (от 0.4 до 1.1 атм) энергия генерации возрастает от 60 до 170 мДж. Таким образом, при накачке двухкомпонентной газовой смеси KrF-лазера при давлении 1.1 атм объемным поперечным электрическим разрядом без буферного газа впервые получена энергия генерации 170 мДж при КПД 0.3%. При длительности импульса излучения на полувысоте 7 ± 1 нс импульсная мощность достигла 24 МВт. Максимальный КПД был получен при минимальном зарядном напряжении 10 кВ и рабочем давлении 0.4 атм и составил 0.8%. При этом энергия генерации была равна уже 60 мДж в импульсе.

Получена также экспериментальная зависимость энергии генерации двухкомпонентного (Kr и NF₃) эксимерного KrF-лазера от зарядного напряжения U_{ch} в диапазоне 15–26 кВ с газообразным NF₃ в качестве галогеносителя. Так, с увеличением зарядного напряжения и, соответственно, рабочего давления газовой смеси от 0.6 до 0.8 атм энергия генерации увеличивалась до 115 мДж. При длительности импульса излучения на полувысоте 14 ± 1 нс импульсная мощность достигала ~ 8 МВт.

Исследовано влияние накачки на величину активного объема двухкомпонентного KrF-лазера. Показано, что ширина разряда определяет величину активного объема лазера и является переменной величиной, зависящей от зарядного напряжения и состава газовой смеси. В результате исследований было обнаружено, что в эксимерном KrF-лазере в двухкомпонентной газовой смеси при увеличении зарядного напряжения от 10 до 26 кВ происходит увеличение оптимального давления от 0.4 атм до 1.1 атм, ширины разряда от 0.6 до 0.8 см и, как следствие, активного объема среды от 75 до 100 см³.

4.4. Эксимерный XeCl-лазер (308 нм)

Получена экспериментальная зависимость энергии генерации и полного КПД (рис.5) двухкомпонентного (Xe и VCl₃) эксимерного XeCl-лазера от зарядного напряжения U_{ch} в диапазоне 10–26 кВ без буферного газа в составе активной газовой среды.

Из приведенной зависимости следует, что с увеличением зарядного напряжения и, соответственно, рабочего

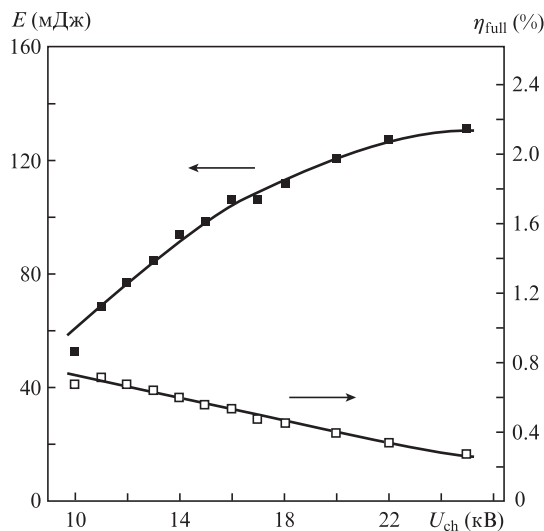


Рис.5. То же, что и на рис.2, для двухкомпонентного XeCl-лазера при увеличении полного давления газовой смеси от 0.45 до 0.65 атм.

давления газовой смеси от 0.45 до 0.65 атм энергия генерации увеличивается от 50 до 130 мДж. Таким образом, без буферного газа при накачке газовой смеси при давлении 0.65 атм объемным поперечным электрическим разрядом впервые для XeCl-лазера получена энергия генерации 130 мДж при КПД около 0.3%. Получена также экспериментальная зависимость энергии генерации двухкомпонентного (Xe и HCl/CCl₄) эксимерного XeCl-лазера от зарядного напряжения U_{ch} с применением газообразных HCl и CCl₄ в качестве галогеноносителя. Так, с увеличением зарядного напряжения и рабочего давления газовой смеси максимальная энергия генерации составило 70 и 50 мДж соответственно. Проведена оценка однородности распределения энергии излучения по сечению выходного лазерного пучка с помощью термочувствительной бумаги. Отпечаток лазерного пучка на ее поверхности демонстрирует хорошую однородность распределения лазерной энергии по сечению – высоте и ширине выходного лазерного пучка.

5. Заключение

Впервые для импульсно-периодических газоразрядных эксимерных лазеров, работающих на электронных переходах эксимерных молекул ArF*, KrCl*, KrF* и XeCl* при накачке объемным электрическим разрядом газовой смеси пониженного давления, не содержащей буферного газа, была получена энергия лазерного излучения в импульсе до 170 мДж с высокой (до 24 МВт) импульсной мощностью лазерного излучения при равномерном распределении энергии по сечению выходного лазерного пучка. Максимальное значение КПД, полученное в экс-

перименте для двухкомпонентных газовых смесей KrF- и XeCl-лазеров, достигало 0.8%.

Энергетические и временные характеристики импульсно-периодических лазеров, разработанных на основе проведенных исследований, позволили обеспечить их эффективное применение. Так, впервые с использованием XeCl-лазера, работающего как на трехкомпонентной активной газовой среде, так и на двухкомпонентных газовых смесях (без буферного газа), разработана и эффективно применяется УФ офтальмологическая система для лечения больных открытоугольной глаукомой [6, 7]. В лазерном излучателе осуществлялась поперечная прокачка газовой смеси с помощью радиального вентилятора, что обеспечивало работу лазера в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов до 50 Гц. Работа в режиме с частотой следования импульсов более 50 Гц не исследовалась в связи с отсутствием необходимости такого режима для медицинской УФ офтальмологической системы.

1. Зубрилин Н.Г., Миланич А.И., Черноморец М.П., Юрчук С.В. *Квантовая электроника*, **12** (3), 643 (1985).
2. Федоров А.И. *Оптика атмосферы и океана*, **7** (1), 96 (1994).
3. De la Rosa J., Eichler H.-J. *Opt. Commun.*, **64** (3), 285 (1987).
4. Басов Н.Г., Зуев В.С., Канаев А.В., Михеев Л.Д. *Квантовая электроника*, **12** (11), 2197 (1985).
5. Ражев А.М., Щедрин А.И., Калюжная А.Г., Рябцев А.В., Жупиков А.А. *Квантовая электроника*, **34** (10), 901 (2004).
6. Chernykh V., Ermakova O., Isakov I., Razhev A., Churkin D., Kargapoltsev E. *Proc. XXXII Cong. Europ. Soc. Cataract and Refractive Surgeons* (London, UK, 2014).
7. Черных В.В., Ермакова О.В., Исаков И.А., Ражев А.М., Чуркин Д.С., Каргапольцев Е.С. *Тезисы Всерос. Научно-практич. конф. «Новые технологии в офтальмологии-2015»*, (Казань: Слово, 2015).