

УДК 621.373.8

Эксимерный XeCl-мини-лазер

С.С. Ануфрик¹, А.П. Володенков¹, К.Ф. Зноско¹, В.Ф. Лосев^{2*}

¹Гродненский государственный университет

230023, г. Гродно, ул. Ожешко, 22, Беларусь

²Институт сильноточной электроники СО РАН

634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3, Россия

Поступила в редакцию 9.03.2022 г.

Описан электроразрядный XeCl-мини-лазер и результаты его экспериментального моделирования. В лазере использована двухступенчатая система магнитного сжатия импульсов тока, полупроводниковые высоковольтные биполярные транзисторы в качестве коммутатора, предионизация рабочей среды излучением барьерного разряда из-под сетчатого электрода. Установлена зависимость выходных параметров мини-лазера от условий его возбуждения и состава активной среды. Получена максимальная энергия в импульсе ~12 мДж на смеси состава 1,5 торр HCl + 15 торр Xe + 4 атм Ne при напряжении на обострительной емкости 20 кВ. Длительность импульсов генерации на полувывоте составляла ~20 нс. КПД XeCl-мини-лазера относительно энергии, запасенной в обострительной емкости, равно ~4%.

Ключевые слова: XeCl-мини-лазер, эксимерный лазер, эксимерная молекула, импульсный разряд, разрядный электрод, обострительная емкость; XeCl mini laser, excimer laser, excimer molecule, pulsed discharge, discharge electrode, peaking capacitance.

Введение

Для ряда практических применений в науке, технике, производстве, медицине необходимы мощные компактные источники когерентного ультрафиолетового (УФ) излучения [1]. УФ-излучение обладает рядом преимуществ по сравнению с излучением в других областях спектра. Во-первых, высокая энергия кванта позволяет воздействовать непосредственно на химические связи веществ. Во-вторых, коэффициент поглощения большинства веществ растет по мере уменьшения длины волны излучения. В-третьих, с уменьшением длины волны повышается степень пространственной локализации излучения.

В настоящее время в УФ-области спектра существует достаточно большое разнообразие источников излучения. Однако среди них наиболее простыми и эффективными остаются электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов [2, 3]. Активная среда, состоящая из смеси галогеноносителя и инертных газов, один из которых является буферным, возбуждается за счет пропускания через нее импульсного электрического тока. Это приводит к формированию в межэлектродном промежутке объемного газового разряда, в плазме которого протекают плазмохимические реакции. В результате этих реакций образуются эксимерные (эксиплексные) молекулы в возбужденном состоянии. При переходе в основное состояние или радиационном распаде

на исходные атомы они излучают в УФ-области спектра.

Возбуждение активной среды эксимерных лазеров поперечным разрядом используется достаточно широко [4–6]. В настоящее время разработано несколько видов излучателей электроразрядных эксимерных лазеров [7, 8]. Выбор конкретной конструкции определяется решаемой задачей. На сегодняшний день актуально повышение эффективности электроразрядных эксимерных лазеров, улучшение их энергетических и временных характеристик.

Для практических применений эксимерных лазеров важное значение имеют такие их характеристики, как энергия, мощность, длительность и форма импульса генерации, расходимость и однородность пространственного распределения энергии [9–12]. Они зависят от целого ряда факторов, однако определяющую роль играет система возбуждения активной среды, обеспечивающая формирование объемной стадии разряда и однородности энерговклада в него [13, 14]. Для этой цели широко применяются различные варианты LC-схем, схемы с инверсией напряжения, магнитное сжатие импульсов, импульсная зарядка и т.д. [2, 3, 15, 16].

Для повышения энергетических характеристик эксимерных лазеров необходимо уменьшить потери энергии в процессе ее ввода в активную среду. В первую очередь необходимо уменьшить потери при коммутации высокого напряжения. Для этого используются многоканальные коммутаторы, параллельное включение коммутаторов с их наносекундной синхронизацией, полупроводниковые сильноточные коммутаторы [17, 18].

Одним из основных условий эффективной работы электроразрядных эксимерных лазеров является

* Славмир Степанович Ануфрик (anufrick@grsu.by); Александр Павлович Володенков (a.volodenkov@grsu.by); Казимир Францевич Зноско (znosko@rambler.ru); Валерий Федорович Лосев (valery.losev@gmail.com).

создание однородной и интенсивной предыонизации рабочей среды в разрядном объеме [19–21]. Опыт разработки эксимерных лазеров показывает, что лучшие результаты получаются при использовании предыонизации излучением дополнительных разрядов из-под сетчатых электродов [4, 8, 15, 16].

Значительный вклад в решение этих задач вносит компьютерное моделирование электрических схем и процесса возбуждения рабочей среды эксимерных лазеров [22–26]. Это позволяет без проведения трудозатратных экспериментов исследовать влияние параметров цепи возбуждения, состава и давления рабочей среды на выходные характеристики лазерного излучения, а также по заданным выходным характеристикам генерации рассчитывать оптимальные режимы возбуждения и параметры электрической цепи.

Несмотря на проведенные исследования и разработки эксимерных лазеров, а также их широкое применение в течение последних десятилетий они до сих пор являются объектом постоянного изучения и совершенствования. Это связано с тем, что эксимерные лазеры стали технологической составляющей ряда производственных процессов. Они встраиваются в производственные линии и разрабатываются под конкретные применения в медицине, промышленном производстве, науке.

Цель настоящей работы — экспериментальное установление оптимальных условий возбуждения электроразрядного эксимерного ХеСl-мини-лазера, обеспечивающих его максимальную эффективность. В работе также уделено внимание конструкции излучателя мини-лазера.

ХеСl-мини-лазер и экспериментальная установка

Для снижения трудо- и материальных затрат при разработке ХеСl-мини-лазера проводилось его компьютерное моделирование с использованием методики, изложенной в [22–26]. В основу конструкции мини-лазера были положены идеи, приведенные в [4, 9, 14, 15]. Цилиндрическая диэлектрическая лазерная камера изготовлена из моноблочного фторопласта. Ее длина составила 240 мм, внешний диаметр — 50 мм, внутренний — 40 мм. В лазерной камере расположены разрядные электроды: металлический анод и пластинчатый перфорированный катод длиной 18 см. Электроды изготовлены из коррозионностойкого сплава с рабочим профилем, формирующим однородное электрическое поле в межэлектродном промежутке. Катод представляет собой пластинку толщиной 0,7 мм, на которой в окне $20 \times 180 \text{ мм}^2$ выполнена перфорация с диаметром отверстий $\sim 1 \text{ мм}$ и общим светопропусканием $\sim 50\%$. Межэлектродный промежуток составил 10 мм, а разрядный объем $\sim 8 \text{ см}^3$.

Предыонизация рабочей среды осуществлялась излучением барьерного разряда из-под перфорированного катода. Электрод предыонизации состоит из кварцевой трубки с внешним диаметром 12 мм и внутренним — 10 мм. Внутри кварцевой трубки

располагался цилиндрический электрод, плотно прилегающий к ее внутренней стенке. Электрод предыонизации располагался под перфорированным катодом на расстоянии 1,5 мм от него. Такая конструкция системы предыонизации позволяет максимально приблизить источник ионизирующего излучения к области основного разряда. Использование барьерного разряда позволяет достичь однородного распределения начальных электродов в межэлектродном промежутке. На торцах разрядной камеры располагались резонаторные узлы с юстируемыми держателями зеркал резонатора.

На рис. 1 представлена схема эксимерного мини-лазера.

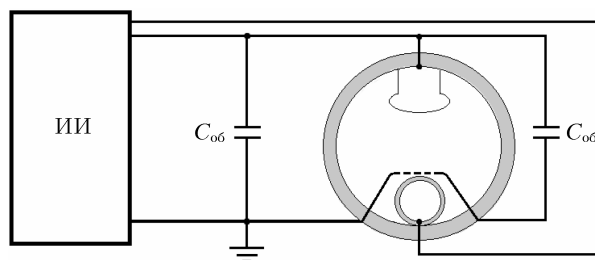


Рис. 1. Схема эксимерного ХеСl-мини-лазера

С внешней стороны лазерной камеры располагались конденсаторы обострительной емкости $C_{об}$, подключенные с минимальной индуктивностью к лазерным электродам. К обострительной емкости полосковыми шинами подключался импульсный источник (ИИ), который за время задержки разряда в основном межэлектродном промежутке заряжал $C_{об}$. В нем использовалась двухступенчатая система магнитного сжатия импульсов и полупроводниковые высоковольтные биполярные транзисторы с изолированным затвором в качестве коммутаторов. Это обеспечивало высокую скорость зарядки $C_{об}$ и снижение потерь энергии в коммутаторе. Предыонизация рабочей среды осуществлялась с опережением импульса разрядного тока на 50–60 нс. Высоковольтный импульс для питания предыонизации формировался отдельным контуром также с полупроводниковой коммутацией.

Энергия генерации в импульсе измерялась с помощью измерителя энергии лазерного излучения Ophir Pulsar 4. Временные характеристики лазерного излучения исследовались с помощью фотозлемента, сигнал с которого подавался на осциллограф DSO C8-46/4. Напряжение на электродах лампы измерялось с помощью резистивно-емкостного делителя напряжения, разрядный ток — с помощью пояса Роговского.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены результаты исследования влияния состава и давления активной среды на выходную энергию ХеСl-мини-лазера в импульсе (E). На рис. 2, а приведены зависимости E от давления галогенонесителя HCl в рабочей среде при разном давлении Хе и давлении буферного газа Ne 4 атм.

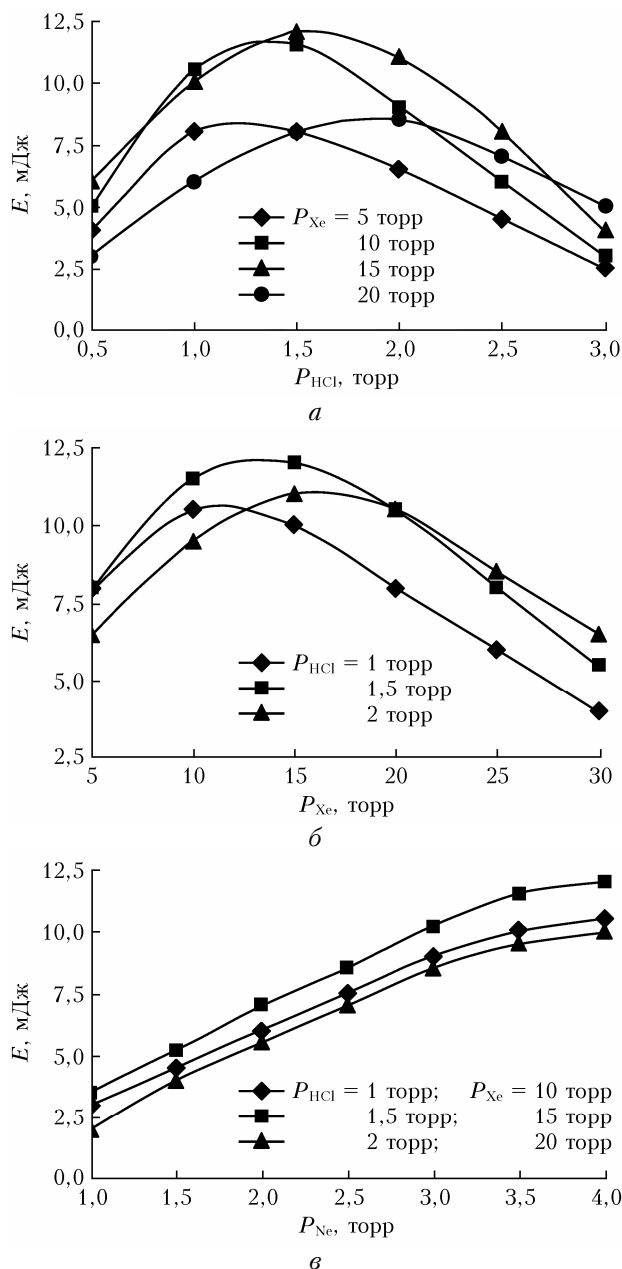


Рис. 2. Зависимости энергии генерации XeCl-мини-лазера от давления HCl (а), Xe (б) и буферного газа Ne (в) в рабочей смеси

Видно, что положение максимума зависимости E от давления HCl в рабочей среде также зависит от давления Xe в ней. Максимальное значение E достигается при $P_{\text{HCl}} \approx 1,5\text{--}1,7$ торр. При малых концентрациях молекул HCl падает скорость образования возбужденных молекул XeCl* как в гарпунных плазмохимических реакциях, так и в реакциях ион-ионной рекомбинации. При больших концентрациях HCl в разряде возрастает значение ионизационных неустойчивостей, что приводит к снижению однородности объемного разряда. Положение максимума зависимости энергии излучения от давления галогенонесителя с ростом давления Xe смещалось в сторону больших давлений.

Зависимости E от давления Xe в рабочей смеси при разном давлении HCl и $P_{\text{Ne}} = 4$ атм представлены на рис. 2, б. Давление Xe существенно влияет на E . Видно, что E максимальна при $P_{\text{Xe}} \sim 12\text{--}15$ торр и зависит от давления HCl. Наличие максимума зависимости E от давления Xe обусловлено тем, что при малых концентрациях атомов Xe уменьшается скорость образования молекул XeCl*, а при больших концентрациях атомов Xe в разряде развиваются неустойчивости вследствие ступенчатой ионизации и начинается контракция разряда. Важно не только давление донорных компонент в рабочей среде, но и их взаимное соотношение. Из проведенных исследований следует, что E максимальна при соотношении Xe : HCl $\sim 8 : 1$.

На рис. 2, в показаны зависимости E от давления буферного газа Ne при разных давлениях HCl и Xe. Видно, что E возрастает практически линейно с ростом давления Ne независимо от давления донорных компонент. При $P_{\text{Ne}} > 3$ атм наблюдается тенденция к выходу E на насыщение.

Участвуя в плазмохимических реакциях, атомы буферного газа передают энергию атомам и ионам Xe и Cl, которые впоследствии образуют возбужденные молекулы XeCl*. Давление буферного газа определяет энергетическую эффективность лазера. С ростом давления буферного газа в образовании возбужденных молекул XeCl* возрастает роль реакции трехчастичной ион-ионной рекомбинации, которая особенно активно идет в присутствии буферного газа неона. Увеличение давления буферного газа снижает напряженность электрического поля E/P и смещает максимум функции распределения электронов по скоростям в сторону меньших значений, которые являются более оптимальными для ионизации атомов рабочей среды. Это, в свою очередь, приводит к росту концентрации возбужденных молекул XeCl* и, следовательно, к росту энергии излучения. При значительном увеличении давления буферного газа E/P снижается и может стать меньше порогового значения. Таким образом, для получения максимальной выходной энергии лазера оптимальным является состав рабочей среды 1,5 торр HCl + 15 торр Xe + 4 атм Ne.

Были проведены исследования зависимости напряжения на электродах мини-лазера, разрядного тока и его излучения от времени. Типичные осциллограммы со взаимной временной привязкой приведены на рис. 3. Значения напряжения, тока и генерации даны в относительных единицах. Осциллограммы напряжения на электродах и разрядного тока имели колебательный характер. Амплитуда разрядного тока слабо зависела от давления и состава рабочей среды и в основном определялась контролем обострительной емкости.

Из рис. 3 следует, что основной энерговклад в разрядную плазму осуществляется во время первой полуволны разрядного тока. Импульс генерации начинается с задержкой ~ 15 нс от начала пробоя межэлектродного промежутка. Он состоит из близкого к колоколообразному импульса, обусловленного основным импульсом разрядного тока, и «хвоста»,

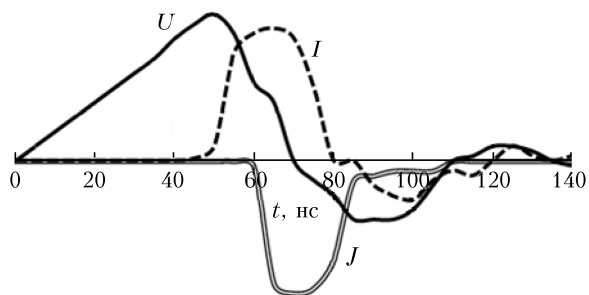


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на электродах U , разрядного тока I и импульса генерации J XeCl-мини-лазера

обусловленного током разряда обострительных емкостей после их перезарядки. Интенсивность основного импульса на порядок больше интенсивности «хвоста». Длительность импульса генерации зависит от параметров разрядного контура и составляет ~ 20 нс по полувысоте. Форма и длительность импульсов излучения коррелируют с импульсами и амплитудой разрядного тока.

На рис. 4 представлены зависимости энергии генерации и КПД XeCl-мини-лазера от напряжения на обострительной емкости $C_{об}$ при разных давлениях донорных компонент рабочей среды и давлении буферного газа 4 атм. Исследования проводились в диапазоне изменения напряжения 10–20 кВ. При напряжении на $C_{об} < 10$ кВ разряд в межэлектродном промежутке нестабилен. На фоне объемного раз-

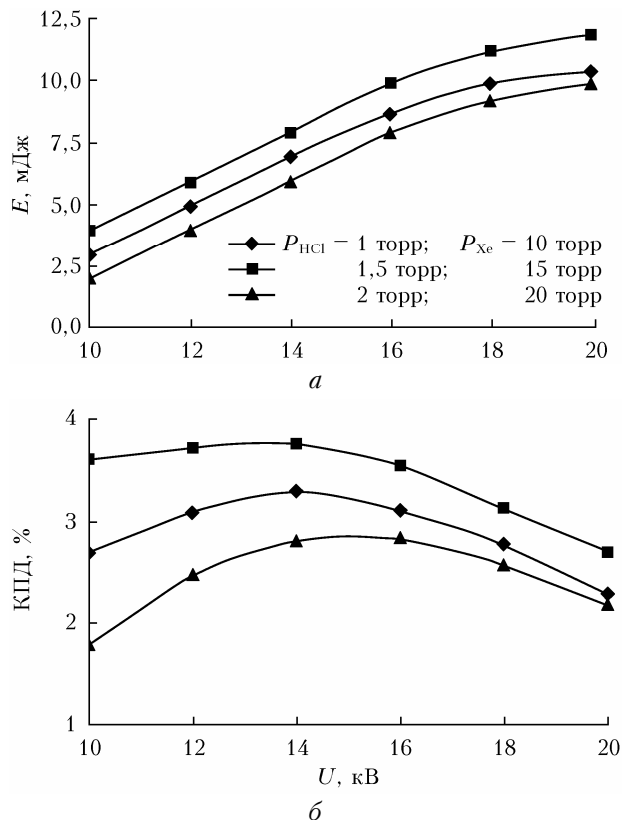


Рис. 4. Зависимости энергии генерации (а) и КПД (б) XeCl-мини-лазера от напряжения на обострительной емкости

ряда наблюдаются искровые каналы, меняющие свое положение от импульса к импульсу. Энергия генерации нестабильная и невысокая. С ростом напряжения разряд становится более диффузным и E растет. При значениях напряжения > 16 кВ наблюдается тенденция к выходу зависимостей E от напряжения на насыщение. Максимальный КПД XeCl-мини-лазера составляет 3,8%. Зависимости КПД XeCl-мини-лазера от напряжения на $C_{об}$ имеют максимумы. При максимальных значениях напряжения на $C_{об}$ КПД лазера в $\sim 1,5$ раз ниже максимального.

Заключение

Создан высокоэффективный компактный электроразрядный XeCl-мини-лазер с возбуждением рабочей смеси импульсным поперечным объемным разрядом. Проведены экспериментальные исследования его амплитудно-временных характеристик. Получена максимальная энергия в импульсе ~ 12 мДж в смеси состава 1,5 торр HCl + 15 торр Xe + 4 атм Ne при напряжении на обострительной емкости 20 кВ. КПД XeCl-мини-лазера относительно энергии, запасенной в обострительной емкости, составил $\sim 3,8\%$. Длительность импульсов генерации на полувысоте составила ~ 20 нс. Смена зеркал лазерного резонатора, а также использование других рабочих сред позволит расширить спектральный диапазон генерируемого лазером излучения

1. Борейшо А.С., Борейшо В.А., Евдокимов И.М., Ивкин С.В. Лазеры: применения и приложения. СПб.: Лань, 2021. 520 с.
2. Месяц Г.А., Осипов В.В., Тарасенко В.Ф. Импульсные газовые лазеры. М.: Наука, 1991. 272 с.
3. Баранов В.Ю., Борисов В.М., Степанов Ю.Ю. Электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 216 с.
4. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. Компактный электроразрядный XeCl-лазер с энергией излучения ~ 1 Дж и длительностью импульса 100–300 нс // Квант. электрон. 1993. Т. 20, № 7. С. 663–664.
5. Борисов В.Н., Дмитриев А.А., Прокофьев А.В., Христофоров О.Б. Об условиях возбуждения широкоапертурного XeCl-лазера со средней мощностью излучения 1 кВт // Квант. электрон. 1995. Т. 22, № 5. С. 433–435.
6. Anufrik S., Volodenkov A., Znosko K. Systems of XeCl lasers excitation on basis of different types of LC-circuits // Proc. Intern. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL). Alushta, Crimea, Ukraine, 2003. V. 1. P. 135–137.
7. Малов А.Н., Ражев А.М. Эксимерный лазер с двумя одновременно возбуждаемыми активными объемами // Квант. электрон. 1985. Т. 12, № 11. С. 2269–2274.
8. Коновалов И.Н., Лосев В.Ф., Панченко Ю.Н., Иванов Н.Г., Сухов М.Ю. Электроразрядный XeCl-лазер с энергией генерации 10 Дж и длительностью импульса излучения 300 нс // Квант. электрон. 2005. Т. 35, № 3. С. 237–240.
9. Верховский В.С., Ломаев М.И., Мельченко С.В., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. Управление энергетическими, временными и пространственными характеристиками излучения XeCl-лазера // Квант. электрон. 1991. Т. 18, № 11. С. 1279–1285.

10. Иванов Н.Г., Лосев В.Ф., Панченко Ю.Н. Формирование лазерных пучков с минимальной расходимостью в УФ-области спектра // Изв. вузов. Физ. 2000. Т. 43, № 5. С. 64–68.
11. Панченко Ю.Н., Иванов Н.Г., Лосев В.Ф. Особенности формирования активной среды в короткоимпульсном электроразрядном ХеСl-лазере // Квант. электрон. 2005. Т. 35, № 9. С. 618–620.
12. Лосев В.Ф., Панченко Ю.Н. Влияние неоднородностей активной среды на расходимость излучения длинноимпульсного электроразрядного ХеСl-лазера // Квант. электрон. 2001. Т. 31, № 4. С. 293–297.
13. Борисов В.М., Брагин И.Е., Виноходов А.Ю., Водич В.А. Об интенсивности накачки электроразрядных эксимерных лазеров // Квант. электрон. 1995. Т. 22, № 6. С. 533–536.
14. Ануфрик С.С., Володенков А.П., Зноско К.Ф. Энергетические характеристики ХеСl-лазера с возбуждением LC-инвертором // Журн. прикл. спектроскоп. 1999. Т. 66, № 5. С. 702–707.
15. Ануфрик С.С., Зноско К.Ф., Курганский А.Д. Влияние параметров LC-контура на энергию генерации ХеСl-лазера // Квант. электрон. 1989. Т. 16, № 11. С. 2228–2231.
16. Anufrik S., Volodenkov A., Znosko K. Simulation of systems of ХеСl laser excitation of different types // Proc. 1st Internat. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL). Alushta, Crimea, Ukraine, 2003. V. 1. P. 146–148.
17. Бычков Ю.И., Винник М.Л., Макаров М.К. Широкоапертурный электроразрядный ХеСl-лазер с энергией генерации 15 Дж, работающий в бескоммутаторном режиме // Квант. электрон. 1992. Т. 19, № 6. С. 542–543.
18. Бычков Ю.И., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е., Ямпольская С.А., Ястремский А.Г. Теоретическое и экспериментальное исследование ХеСl-лазера с использованием полупроводникового прерывателя тока в схеме питания // Квант. электрон. 2007. Т. 37, № 4. С. 319–324.
19. Борисов В.М., Демьянов А.В., Кирюхин Ю.Б. Теоретическое и экспериментальное исследование возникновения крупномасштабной неустойчивости в разряде ХеСl-лазера с УФ-предыонизацией // Квант. электрон. 1997. Т. 24, № 1. С. 25–30.
20. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., Znosko K.F. Influence of the preionization system on the lasing energy of a ХеСl laser // J. Opt. Technol. 2000. V. 67, N 11. P. 961–967.
21. Коновалов И.Н., Коваль Н.Н., Суслов А.И. Влияние степени предыонизации газа на однородность горения объемного разряда и генерацию излучения в широкоапертурном ХеСl-лазере // Квант. электрон. 2002. Т. 32, № 8. С. 663–668.
22. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., Losev V.F., Znosko K.F. Modeling of the active medium based on ХеСl molecules with allowance for the halogen-carrier regeneration process // Russ. Phys. J. 2012. V. 54, N 11. P. 1264–1271.
23. Anufrik S., Volodenkov A., Znosko K. Modeling of emission characteristics of ХеСl excilamps in pulse-periodic mode of work // High Temp. Mater. Process. 2014. V. 18, N 3. P. 181–196.
24. Sorkina R. Theoretical simulation of spatial-time characteristics of a discharge ХеСl excimer laser active medium // J. Phys. D: Appl. Phys. 1990. V. 23. P. 806–812.
25. Демьянов А.В., Кочетов И.В., Напартович А.П., Капителли М., Лонго С. Влияние колебательной кинетики НСl на развитие микронеустойчивостей и характеристики электроразрядного ХеСl-лазера в условиях неоднородной предыонизации // Квант. электрон. 1995. Т. 22, № 7. С. 673–682.
26. Anufrik S., Volodenkov A., Znosko K. Simulation of active medium of ХеСl lasers // Proc. SPIE. 2007. V. 6731. P. 673106.

S.S. Anufrik, A.P. Volodenkov, K.F. Znosko, V.F. Losev. Excimer ХеСl mini laser.

An electric-discharge ХеСl mini laser and the results of its experimental modeling are described. The laser uses a two-stage system of magnetic compression of current pulses, semiconductor high-voltage bipolar transistors as a switch, and preionization of the working medium by barrier discharge radiation from under the grid electrode. The dependence of the output parameters of the mini laser on the conditions of its excitation and the composition of the active medium is established. The maximal pulse energy of ~12 mJ was obtained for a mixture of the composition 1.5 torr HCl + 15 torr Xe + 4 atm Ne at a voltage across the peaking capacitor of 20 kV. The duration of the lasing pulses at half maximum was ~20 ns. The efficiency of the ХеСl mini laser relative to the energy stored in the sharpening capacitor is ~4%.