

# Электроразрядный эксимерный ХеС1 мини лазер

С. С. Ануфрик, А. П. Володенков, К. Ф. Зноско

*Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь;  
e-mail: znosko@rambler.ru*

Представлена конструкция ХеС1 мини лазера и результаты его экспериментального исследования. Его особенностью является простота конструкции излучателя, использование двухступенчатой системы магнитного сжатия импульсов тока и полупроводниковых высоковольтных биполярных транзисторов с изолированным затвором в качестве коммутатора. Экспериментально установлена зависимость выходных параметров мини лазера от условий его возбуждения и состава активной среды. Показано, что оптимальной является рабочая смесь состава: 1,5 Торр НС1 + 15 Торр Хе + 4 атм. Не при напряжении на обострительных емкостях ~20 кВ. При использовании оптимальной рабочей смеси получена максимальная выходная энергия в импульсе 12 мДж. Длительность импульсов генерации составила ~20 нс. Эффективность ХеС1 мини лазера относительно энергии, запасенной в обострительной емкости, составляет ~4 %.

**Ключевые слова:** эксимерный лазер, импульсный разряд, разрядные электроды, газоразрядная плазма, система возбуждения электрического разряда.

## Введение

В настоящее время в ультрафиолетовой области спектра наиболее надежными и эффективными источниками излучения являются эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов [1, 2]. Возбуждение активной среды, расположенной в разрядной камере и состоящей из смеси инертных газов и галогеноносителя, осуществляется поперечным импульсным электрическим разрядом [3–5]. В плазме разряда происходит возбуждение и ионизация атомов рабочей смеси, между которыми протекают плазмо-химические реакции. В результате этих реакций нарабатываются эксимерные (эксиплексные) молекулы, находящиеся в возбужденном состоянии и возникает инверсная заселенность верхнего лазерного уровня [6, 7].

Важным условием эффективной работы электроразрядного эксимерного лазера является создание однородной и интенсивной предыонизации рабочей смеси в межэлектродном промежутке [8, 9]. Проведенное моделирование и экспериментальные исследования показывают, что лучшие генерационные характеристики получаются при использовании предыонизации излучением дополнительных разрядов из-под сетчатых электродов [2, 3, 8, 9]. Немаловажной составляющей эффективной работы эксимерного лазера является систем возбуждения разряда. Для этой цели широко применяются различные варианты LC-контура [3, 4, 9], схемы с инверсией напряжения [5, 10], импульсная зарядка и магнитное сжатие импульсов и т. д. [1, 2, 10]. Именно система возбуждения формирует объемный разряд, осуществляет энергоклад в него, обеспечивает необходимую динамику приведенной напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке. Для успешной работы эксимерных лазеров также важен состав и давление рабочей смеси, чистота используемых газов [11, 12]. Относительное содержание инертных газов и галогеноносителя определяет направление протекания и кинетику плазмо-химических реакций в разрядной плазме.

Несмотря на выполненные разработки конструкций эксимерных лазеров и систем их возбуждения, проведенные многочисленные их исследования, а также широкое применение в различных производственных процессах они до сих пор являются объектом исследования 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 науке, технике, медицине, промышленном производстве.

## Конструкция мини лазера

В основу конструкции эксимерного ХеС1 мини лазера положены наработки описанные в работах [3, 5, 9]. Диэлектрическая лазерная камера имеет цилиндрическую форму и изготовлена из моноблочного фторопласта. Она имеет длину 240 мм и внешний диаметр 50 мм. В лазерной камере расположены цельнометаллический профилированный анод и пластинчатый перфорированный катод. Электроды изготавливались из нержавеющей стали. Им придавался профиль, позволяющий сформировать однородное электрическое поле в межэлектродном промежутке. Катод представлял собой пластинку толщиной 0,7 мм, на которой в окне 20x180 мм<sup>2</sup> осуществлена перфорация с диаметром отверстий около 1 мм (всего ~1500 отверстий).

Система возбуждения объемного разряда выполнена на основе систем возбуждения описанных в [3, 5, 9]. С внешней стороны лазерной камеры располагались конденсаторы обострительной емкости, подключенные с минимальной индуктивностью к лазерным электродам. К обострительной емкости полосковыми шинами подключалась система возбуждения. Ее особенностью является использование двухступенчатой системы магнитного сжатия импульсов и полупроводниковых высоковольтных биполярных транзисторов с изолированным затвором в качестве коммутатора. Это обеспечивало высокую скорость нарастания напряжения на разрядном промежутке и снижению потерь энергии.

Предыонизация рабочей смеси осуществлялась из-под перфорированного катода излучением барьерного разряда аналогично [3, 5, 8]. Электрод предыонизации состоял из кварцевой трубки внешним диаметром 12 мм, внутри которой располагался цилиндрический электрод, плотно прилегающий к ее стенке. Электрод предыонизации располагался под катодом на расстоянии в 1,5 мм от него. Такое выполнение системы предыонизации позволило максимально приблизить источник ионизирующего излучения к области основного разряда и достичь высокой степени однородности в распределении начальных электродов в межэлектродном промежутке. Электродная система имела длину 18 см. Межэлектродный промежуток составлял 10 мм. Объем активной среды занимаемый разрядом составлял порядка 8 см<sup>3</sup>.

На торцах разрядной камеры располагались резонаторные узлы. На концах лазерной камеры, нарезаны резьбы М50х1,5 длиной 20 мм, на которые навинчивались направляющие фланцы, к которым вакуумноплотно крепились упорные фланцы с держателями зеркал резонатора, позволяющие осуществлять их юстировку. На рисунке 1 представлена фотография излучателя эксимерного мини лазера.

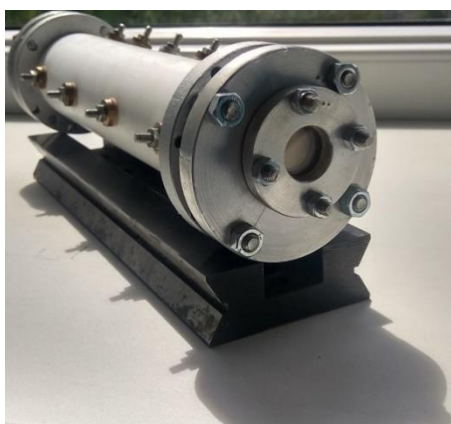


Рис. 1. – Фотография излучателя эксимерного ХеС1 мини лазера

Энергия генерации измерялась измерителем энергии лазерного излучения Ophir Pulsar 4. Временные характеристики исследовались с помощью фотоэлемента, делителя напряжения и пояса Роговского сигналы с которых подавались на осциллограф DSO C8-46/4 и отображались на мониторе компьютера. В экспериментах использовались трехкомпонентные смеси типа НС1:Хе:Не. Галогеноносителем являлся НС1. В качестве буферного газа использовался неон, так как он обладает низким порогом электрического пробоя, который примерно в два раза ниже, чем у гелия. Это приводит к тому, что разряд в рабочих смесях с буферным газом неоном горит значительно более стабильно.

## Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 представлены зависимости энергии генерации ХеС1 мини лазера от давления галогеноносителя НС1 в разрядной камере. Видно, что положение максимума зависимости энергия генерации от давления НС1 зависит также от давления Хе в смеси. Максимальное значение энергия генерации принимала при давлении НС1 1,5 Торр. При низких концентрациях молекул НС1 падет скорость образования возбужденных ХеС1\* молекул по обоим каналам (гарпунном и рекомбинационном). При высоких концентрациях НС1 в разрядной плазме снижается концентрация электронов из за их диссоциативного прилипания к НС1 и снижению однородности объемного разряда. Положение максимума зависимости энергии генерации от давления галогеноносителя с ростом давления Хе смещалось в сторону больших его давлений.

Зависимости энергии генерации ХеС1 мини лазера от давления Хе в рабочей смеси представлена на рис. 3. Давление Хе существенно влияет на значение энергии генерации лазера. Видно, что давление Хе при которой она максимальна составляет ~15 Торр и также зависит от давления НС1. При малых концентрациях атомов Хе уменьшается скорость образования ХеС1\* молекул (атомов Хе просто не хватает). При больших концентрациях атомов Хе в разряде развиваются неустойчивости вследствие возникающей ступенчатой ионизации, что приводит к визуально наблюдаемой контракции разряда и падению энергии генерации.

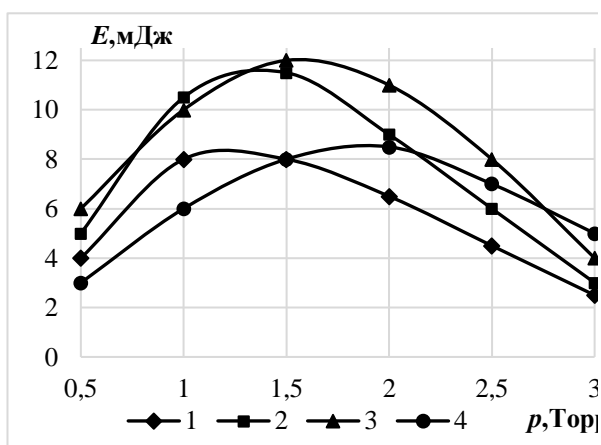


Рис. 2. – Зависимости энергии генерации ХеС1 мини лазера от давления НС1. Давление Хе 4 атм. Давление Хе 5 (1), 10 (2), 15 (3) и 25 (4) Торр.

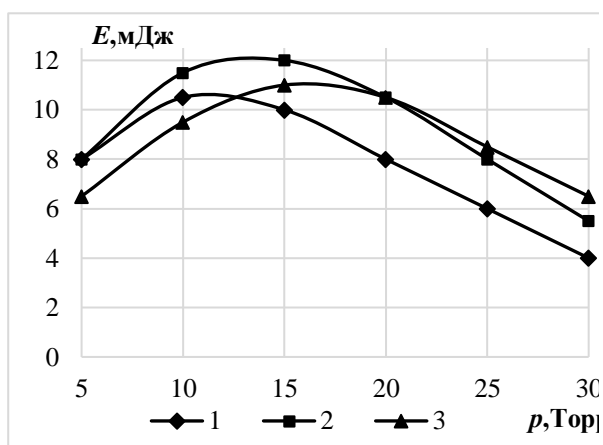


Рис. 3. – Зависимости энергии генерации ХеС1 мини лазера от давления Хе. Давление Хе 4 атм. Давление НС1 1,0 (1) 1,5 (2) и 2,0 (3) Торр.

На рис. 4 представлены зависимости энергии генерации ХеС1 мини лазера от давления буферного газа Не в рабочей смеси. Видно, что энергия генерации растет практически линейно с ростом давления Не, хотя наблюдается тенденция к ее выходу на насыщение. Атомы буферного газа возбуждаются и ионизируются в разряде. Участвуя в плазмо-химических реакциях они передают энергию атомам Хе и С1, которые в дальнейшем образуют возбужденные ХеС1\* молекулы. Давление буферного газа определяет энергетическую эффективность мини лазера. Также с ростом давления буферного газа в образовании возбужденных ХеС1\* молекул возрастает роль трехчастичной ион-ионной рекомбинации.

На рис. 5 представлены зависимости энергии генерации ХеС1 мини лазера от значения напряжения на обострительной емкости. При напряжении на ней меньшем 10 кВ разряд был нестабильным энергия генерации также нестабильной и низкой. На фоне объемного разряда наблюдались искровые каналы, которые изменяли локализацию в межэлектродном промежутке от импульса к импульсу. С ростом напряжения разряд становился более объемным и наблюдался рост энергии генерации. При значениях напряжения  $> 16$  кВ наблюдается тенденция к выходу зависимостей на насыщение.

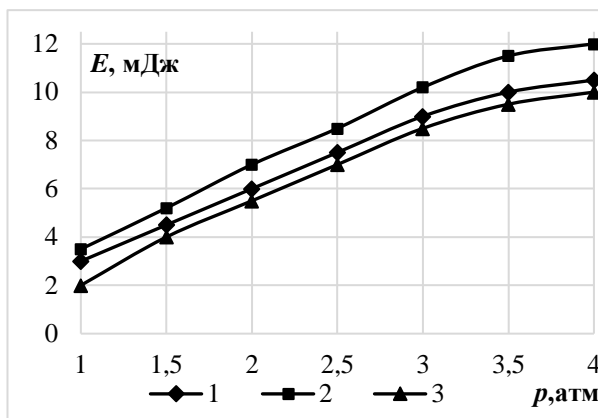


Рис. 4. – Зависимости энергии генерации ХеС1 мини лазера от давления буферного газа Ne. Давление HCl – 1,0 Хе – 10 (1); HCl – 1,5 Хе – 15 (2); HCl – 2,0 Хе – 20 (3) Торр.

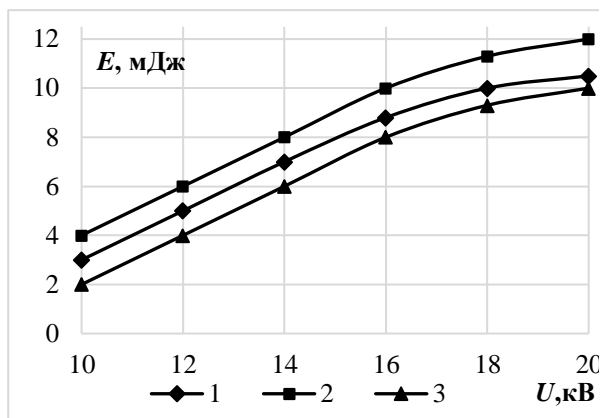


Рис. 5. – Зависимости энергии генерации ХеС1 мини лазера от напряжения на обострительной емкости. Давление Ne 4 атм. Давление HCl – 1,0 Хе – 10 (1); HCl – 1,5 Хе – 15 (2); HCl – 2,0 Хе – 20 (3) Торр.

На рис. 6. приведены осциллограммы напряжения  $U$  на электродах мини лазера, разрядного тока  $I$  и его излучения  $J$ . Значения  $U$ ,  $I$  и  $J$  приведены в относительных единицах. Осциллограммы напряжения на электродах и разрядного тока имели осциллирующий вид. Это обусловлено тем, что сопротивление разрядной плазмы является нелинейной величиной. За время разряда накопительной емкости оно уменьшается от МОм до долей Ома. Это не позволяет согласовать импеданс системы возбуждения, который является постоянной величиной, с сопротивлением разрядной плазмы. Амплитуда разрядного тока слабо зависела от давления и состава рабочей смеси и в основном определялась импедансом генератора возбуждения.

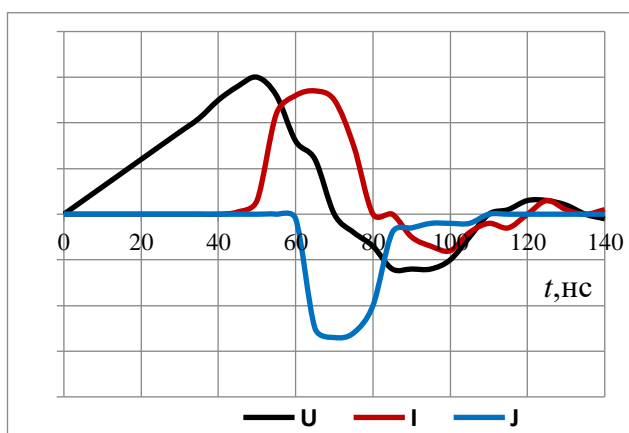


Рис. 6. – Осциллограммы напряжения на электродах  $U$ , разрядного тока  $I$  и импульса генерации  $J$  ХеС1 мини лазера.

Импульс генерации начинается с запозданием в  $\sim 15$  нс от начала пробоя межэлектродного промежутка. Он состоял из импульса, обусловленного основным импульсом разрядного тока и «хвоста», обусловленного током разряда обострительных емкостей после их перезарядки. Длительность импульса генерации зависела от параметров разрядного контура и находилась в диапазоне 15–25 нс по полувысоте. Форма и длительность импульсов излучения коррелируют с импульсами разрядного тока.

### Заключение

Разработан высокоэффективный компактный электроразрядный ХеС1 мини лазер с возбуждением рабочей смеси импульсным поперечным объемным разрядом. Проведены экспериментальные исследования его генерационных характеристик. Максимальная энергия генерации при напряжении на обострительной емкости 20 кВ составила 12 мДж на смеси состава 1,5 Торр HCl, 15 Торр Хе и 4 атм Ne. Энергетическая эффективность ХеС1 мини лазера относительно энергии в обострительной емкости составила около 4 %. Длительность импульсов генерации на полувысоте составила порядка 20 нс. Смена зеркал лазерного резонатора и состава активной среды позволит получать когерентное излучение на других длинах волн.

## Литература

1. Месяц Г.А., Осипов В.В., Тарасенко В.Ф. Импульсные газовые лазеры. М., 1991.
2. Баранов В.Ю., Борисов В.М., Степанов Ю.Ю. Электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов. М., 1988 г.
3. Ануфрик С.С., Зноско К.Ф., Курганский А.Д. Влияние параметров LC-контура на энергию генерации ХеСl-лазера. Квантовая электроника. 1989. Т. 16, № 11. С. 2228–2231.
4. Верховский В.С., Ломаев М.И., Мельченко С.В., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. Управление энергетическими, временными и пространственными характеристиками излучения ХеСl-лазера. Квантовая электроника. 1991. Т.18, № 11. С. 1279–1285.
5. Ануфрик С.С., Володенков А.П., Зноско К.Ф. Энергетические характеристики ХеСl-лазера с возбуждением LC-инвертором. Журнал прикладной спектроскопии. 1999. Т. 66, № 5. С. 702–707.
6. Anufrik S., Volodenkov A., Znosko K., Simulation of active medium of ХеСl lasers., Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2007. Vol. 6731, P. 673106,
7. 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. Russian Physics Journal. 2012. Vol. 54. P. 1264–1271.
8. Anufrik, S.S., Volodenkov, A.P., Znosko, K.F. Influence of the preionization system on the lasing energy of a ХеСl laser. Journal of Optical Technology (*A Translation of Opticheskii Zhurnal*). 2000. Vol. 67, No. 11. P. 961–967.
9. Anufrik S., Volodenkov A., Znosko K. Systems of ХеСl-lasers excitation on basis of different types of LC-circuits. Proceedings of the International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL 2003. 2003. Vol. 1, P. 135–137.
10. Anufrik S., Volodenkov A., Znosko K. Simulation of systems of ХеСl-laser excitation of different types. Proceedings of the International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL 2003. Vol. 1, P. 146–148.
11. Anufrik S., Volodenkov A., Znosko K. Modeling of emission characteristics of ХеСl Excilamps in pulse-periodic mode of work. High Temperature Material Processes. 2014. Vol. 3, No. 18, P. 181–196.
12. Anufrik S., Volodenkov A., Znosko K. Kinetic model for ХеСl-lasers. LFNМ'2006. Kharkov, 2006. P. 80–83.

## Electric discharge excimer ХеСl mini laser

S.S. Anufrik, A.P. Volodenkov, K.F. Znosko

*Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus;  
e-mail: znosko@rambler.ru*

The design of the ХеСl mini laser and the results of its experimental study are presented. Its feature is the simplicity of the design of the emitter, the use of a two-stage system of magnetic compression of current pulses and semiconductor high-voltage bipolar transistors with an insulated gate as a switch. The dependence of the output parameters of a mini-laser on the conditions of its excitation and the composition of the active medium is experimentally established. It has been shown that the optimal working mixture is 1.5 Torr HCl + 15 Torr Xe + 4 atm. Ne at a voltage across the sharpening tanks ~ 20 kV. When using the optimal working mixture, the maximum output energy per pulse was 12 mJ. The duration of the lasing pulses was ~ 20 ns. The efficiency of the ХеСl mini laser relative to the energy stored in the sharpening vessel is ~ 4 %.

**Keywords:** excimer laser, pulsed discharge, discharge electrodes, gas-discharge plasma, electric discharge excitation system.