

Электроразрядный лазер на хлориде ксенона с модульной системой возбуждения

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

*Гродненский государственный университет имени Янки Купалы
230023, Гродно, Беларусь, ул. Ожешко 22, znosko@grsu.by*

Работа посвящена исследованию характеристик электроразрядного эксимерного лазера на хлориде ксенона, с модульным выполнением системы возбуждения. Уделено внимание разработке и оптимизации конструкции лазера, обеспечивающего выходную энергию излучения до 1,8 Дж в импульсе. Система возбуждения разряда состояла из шести модулей, синхронно работающих на общую нагрузку. Синхронность включения модулей была не хуже 5 нс. Приведены результаты экспериментального исследования энергетических и временных характеристик излучения лазера в зависимости от состава и давления рабочей смеси, зарядного напряжения, параметров цепи возбуждения разряда. Показано, что оптимальной является рабочая среда состава $\text{HC1}:\text{Xe}:\text{Недород} = 1:17:2000$ при общем давлении 4 атмосферы. Длительность импульса генерации составляла 60–150 нс в зависимости от параметров модулей системы возбуждения.

Ключевые слова: эксимерный лазер, эксимерная молекула, хлорид ксенона, электроразрядный XeCl -лазер, импульсный разряд, разрядные электроды; excimer laser, excimer molecule, xenon chloride, electric discharge XeCl laser, pulsed discharge, discharge electrodes.

Введение

Электроразрядные эксимерные лазеры представляют собой важный класс импульсных газовых лазеров, работающих в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне спектра и находящихся широкое применение в науке, технике, промышленности [1–3]. Они занимают ключевое место среди современных источников УФ-излучения благодаря своей уникальности, высокой мощности и прецизионности воздействия и играют важную роль в технологиях высокоточной обработки материалов, микрообработке, литографии, фотохимии, диагностике и терапии заболеваний глаза, а также в фундаментальных научных исследованиях. Способность генерировать излучение в УФ-диапазоне длин волн позволяет использовать их там, где лазеры других типов неэффективны.

На выходные параметры излучения эксимерных лазеров влияет целая совокупность факторов, важнейшими среди которых являются способ возбуждения рабочей среды, конструкция излучателя и система предварительной ионизации рабочей среды. Наиболее распространенным способом возбуждения является использование электроразрядных схем с поперечным сильноточным разрядом и предварительной ионизацией рабочей среды в межэлектродном промежутке [4–5]. Для формирования объемного разряда в рабочей среде лазеров применяются высоковольтные импульсные генераторы различного типа.

Актуальной задачей на современном этапе развития эксимерных лазеров является повышение их энергетической эффективности, увеличение удельных мощностных характеристик, а также улучшение надежности и безопасности эксплуатации. Решение этих задач требует оптимизации как отдельных компонентов системы возбуждения, так и всей конструкции лазера в целом. Важную роль в этом играет компьютерное моделирование электрических цепей и процессов преобразования энергии, подводимой к активной среде [6–7]. Оно позволяет снизить трудозатраты и материальные расходы при проведении исследований, а также предварительно рассчитать параметры системы возбуждения и геометрию активной среды на стадии проектирования лазера. Несмотря на значительные достижения в этой области, эксимерные лазеры остаются объектом активного изучения и модернизации, поскольку их применение требует дальнейшего совершенствования выходных параметров, в том числе зависящих от свойств системы возбуждения разряда.

Экспериментальная установка и методика исследований

Из анализа результатов экспериментального исследования и компьютерного моделирования электроразрядных эксимерных лазеров на галогенидах инертных газов следует, что для повышения их выходной энергии и эффективности необходимо концентрировать энергию возбуждения и вкладывать ее в разряд в течение времени горения его объемной стадии. Используя традиционные системы возбуждения, основанные на LC-контурах и LC-инверторах с обострением импульса тока и УФ-предыонизацией рабочей среды в межэлектродном промежутке, достичь этого сложно. Во-первых, это связано с падающей вольт-амперной характеристикой самого разряда, во-вторых, с геометрическими ограничениями на уменьшение индуктивности разрядных контуров, в-третьих, с потерей энергии и затягиванием импульса разрядного тока коммутатором. Для преодоления этих трудностей применяют многоканальные коммутаторы, распределенные высокопроводниковые включатели, магнитное сжатие импульсов тока, проводят согласование разряд-

ных контуров, увеличивают однородность и интенсивность предыонизации активной среды в межэлектродном промежутке и т.д. С учетом выше сказанного, нами предложено использовать модульное выполнение системы возбуждения разряда с параллельным подключением модулей к разрядному промежутку лазера и их синхронным включением.

При разработке электроразрядного лазера на хлориде ксенона использовались подходы, применяемые ранее, при разработке эксимерных лазеров [5, 8–9] и эксиламп [10–12]. Предварительное компьютерное моделирование характеристик электроразрядного лазера проводилось на основе методик, изложенных в [7, 13–14]. Поперечный разрез излучателя и схема модуля системы возбуждения приведены на рис. 1. Излучатель лазера выполнен на основе диэлектрической камеры цилиндрической формы длиной 1150 мм. На торцах камеры размещались резонаторные узлы с зеркалами лазера, позволяющие осуществлять их юстировку. В качестве выходного зеркала использовалась чистая кварцевая пластина, а в качестве глухого — зеркало с A1 покрытием. Внутри диэлектрической разрядной камеры на расстоянии 35 мм друг от друга расположены разрядные электроды, изготовленные из нержавеющей стали. Цельнометаллический анод имел полусферический профиль. Катод имел плоский профиль с перфорированной рабочей зоной со светопропусканием 50%. Предыонизация рабочей среды в межэлектродном промежутке осуществлялась излучением барьерного разряда из-под перфорированного электрода. Электрод предыонизации был размещен под рабочей зоной перфорированного электрода на расстоянии 5 мм от него аналогично [4–5]. Он также изготовлен из нержавеющей стали, а его поверхность была покрыта слоем диэлектрика толщиной 0,7 мм обладающего высоким напряжением пробоя. Выполненная таким образом система предыонизации рабочей среды в межэлектродном промежутке позволила максимально приблизить источник УФ-излучения к области основного разряда и обеспечить достаточно равномерное распределение начальных электронов в нем.

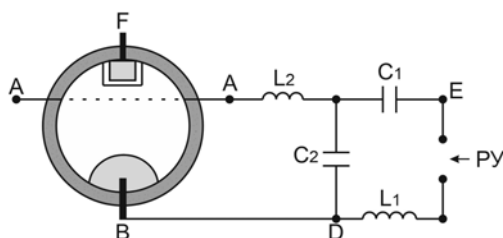


Рис. 1. Поперечный разрез излучателя и схема модуля системы возбуждения

Эскиз эксимерного лазера с модульной системой возбуждения представлен на рис. 2. К излучателю (1) подключено шесть модулей системы возбуждения (2). Каждый модуль включал в себя (см. рис. 1) накопительные конденсаторы C_1 емкости которых 40 нФ, контурные индуктивности L_1 , управляемый разрядник ПУ-65, обострительные конденсаторы C_2 емкостью 1,5 нФ и индуктивность контура обострительной емкости L_2 . В качестве накопительных конденсаторов использовались конденсаторы К15-10, а в качестве обострительных конденсаторов применялись конденсаторы КВИ-3. Каждый модуль монтировался в отдельном блоке. Индуктивности L_1 и L_2 были минимизированы. Подключение модулей к излучателю осуществлялось медными полосковыми шинами в точках А и В. Поджиг коммутаторов осуществлялся высоковольтными импульсами с крутыми передними фронтами (~ 5 нс), формируемыми импульсными кабельными трансформаторами с дополнительным их обострением. Это позволило обеспечить включение шести коммутаторов во временном интервале до 5 нс. Зарядное напряжение подавалось к точкам Е модулей, а заземлялись они в точках D. Высоковольтный импульс для питания предыонизации подавался к точке F от отдельного блока. Начало предыонизации опережало начало основного разряда на время ~ 100 нс [9].

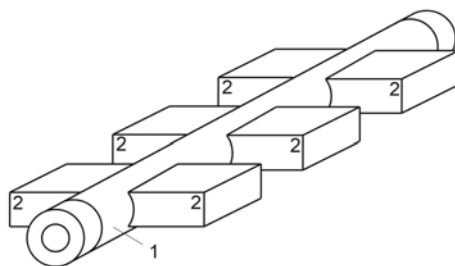


Рис. 2. Эскиз эксимерного лазера с модульной системой возбуждения

Энергия лазерного излучения измерялась измерителем энергии и мощности лазерного излучения Ophir Pulsar 4. Форма и длительность импульса генерации лазера измерялись с помощью фотоэлемента, сигнал с которого подавался на осциллограф DSO C8-46/4. Временное поведение напряжения на лазерных электродах регистрировалось при помощи резистивно-емкостного делителя напряжения, а разрядные токи — низкоомными шунтами.

Полученные результаты и их обсуждение

Проведена оптимизация состава рабочей среды лазера. На рис. 3 приведены зависимости энергии генерации лазера от давления HCl в рабочей среде. Давление Xe при этом составляло 15 (кривая 1), 20 (кривая 2), 25 (кривая 3) и 30 (кривая 4) Торр. Давление буферного газа Ne составляло 4 атм. Во всех случаях наблюдался выраженный максимум на зависимостях энергии генерации лазера от давления HCl. Величина давления галогеноносителя при котором наблюдалась максимальная выходная энергия лазера зависела от давления Xe в его рабочей среде. Максимальная энергия генерации, составляющая ~ 1,8 Дж, наблюдалась при давлении HCl ~ 1,5 Торр и давлении Xe ~ 25 Торр.

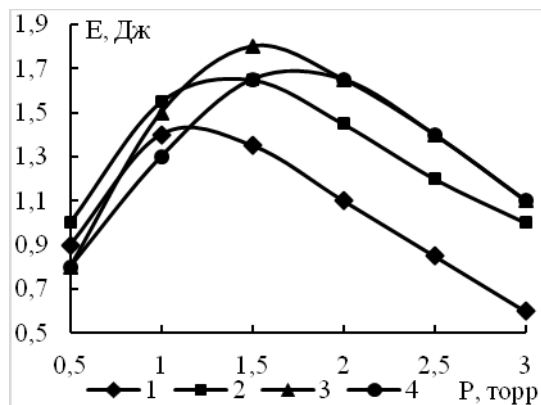


Рис. 3. Зависимости энергии генерации лазера от давления HCl в рабочей среде

Зависимости энергии генерации лазера от давления Xe в рабочей среде приведены на рисунке 4. Давление HCl составляло 1 (кривая 1), 1,5 (кривая 2), 2 (кривая 3) и 2,5 (кривая 4) Торр, а давление Ne по прежнему равнялось 4 атм. Видно, что энергия генерации лазера сильно зависит от величины давления Xe в активной среде. На всех кривых наблюдался выраженный максимум, расположение которого зависело от величины давления HCl.

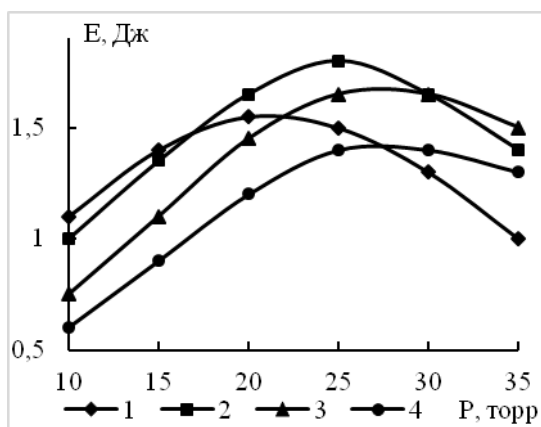


Рис. 4. Зависимости энергии генерации лазера от давления Xe в рабочей среде

На рис. 5 представлены зависимости энергии генерации лазера от давления буферного газа Ne. Давления HCl и Xe составляли: HCl + Xe = 1 + 15 Торр (кривая 1); HCl + Xe = 1,5 + 25 Торр (кривая 2); HCl + Xe = 2 + 30 Торр (кривая 3). Энергия генерации лазера увеличивалась практически линейно с ростом давления буферного газа Ne, независимо от давлений HCl и Xe в рабочей среде. Использовать давление Ne > 4 атм. в данной конструкции излучателя было проблематичным в виду опасности возможной его разгерметизации.

На рис. 6 приведены зависимости энергии генерации лазера от величины зарядного напряжения на накопительных конденсаторах модулей системы возбуждения. Давления HCl и Xe составляли: HCl + Xe = 1 + 15 Торр (кривая 1); HCl + Xe = 1,5 + 25 Торр (кривая 2); HCl + Xe = 2 + 30 Торр (кривая 3). Давление Ne равнялось 4 атм. Диапазон изменения величины используемого зарядного напряжения составлял 20–36 кВ. При использовании зарядного напряжения меньшего 20 кВ разряд и энергия генерации лазера были нестабильными. Визуально наблюдались на фоне объемного разряда многочисленные искровые разряды. Рост величины зарядного напряжения приводил к стабилизации разряда, он становился более объемным, а энергия генерации лазера возрастала и стабилизировалась. Начиная с 24 кВ наблюдался практически линейный рост энергии генерации лазера.

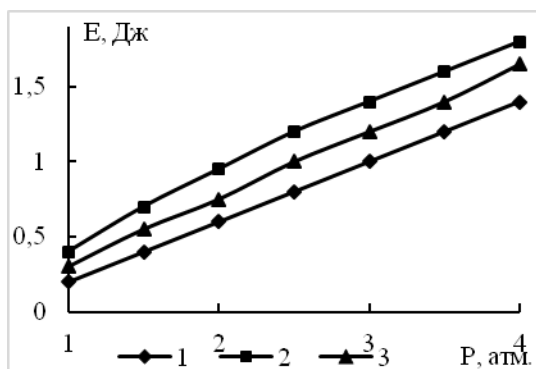


Рис. 5. Зависимости энергии генерации лазера от давления Ne в рабочей среде

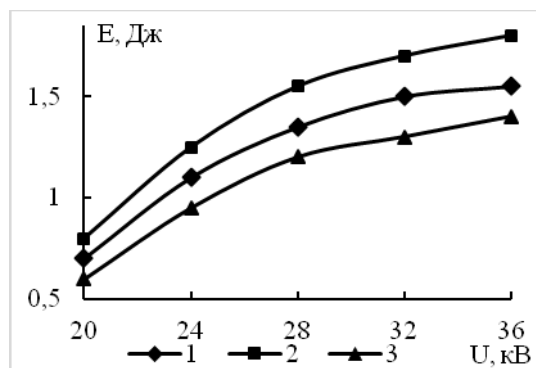


Рис. 6. Зависимости энергии генерации лазера от зарядного напряжения

На рис. 7 приведены зависимости КПД лазера на хлориде ксенона от величины зарядного напряжения на накопительных емкостях (от величины энергии, запасенной в емкостях модулей). Получен максимальный КПД лазера, составляющий 1,8% при использовании оптимального состава рабочей среды и зарядного напряжения 24 кВ.

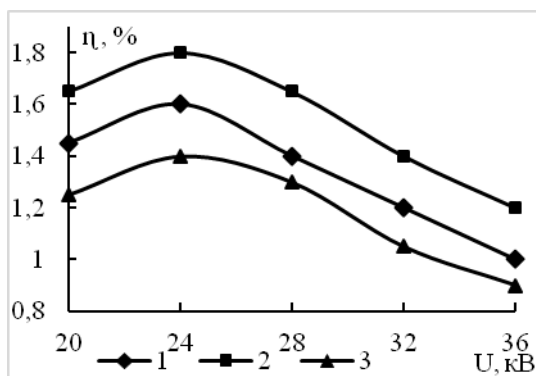


Рис. 7. Зависимости КПД XeCl-лазера от величины зарядного напряжения

Емкости конденсаторов и величины индуктивностей модулей системы возбуждения могли принимать другие значения, в зависимости от требуемых выходных параметров лазерного импульса. В рассматриваемом варианте индуктивности были минимизированы, так, как реализован режим энерговклада в разряд от накопительных емкостей. Так, как величина обострительных емкостей малая, то их роль состояла в формировании однородного объемного разряда. Заряжаясь, за время задержки разряда в межэлектродном промежутке, до практически двойного зарядного напряжения они разряжались на фронте импульса тока основного разряда. Энерговклад, в сформированный разряд, осуществлялся от накопительных емкостей при пониженном напряжении. Это позволяло поддерживать объемную стадию разряда до 150 нс и получать примерно такую же длительность импульса генерации. При использовании режима возбуждения рабочей среды с полной перезарядки накопительных емкостей на обострительные длительность импульса составляла 60 нс.

Относительно невысокий полученный КПД обусловлен несколькими причинами. Во-первых, КПД рассчитывался от энергии, запасенной в накопительных емкостях, а не от энергии, вложенной в разряд. Во-вторых, значение обострительной емкости экспериментально не оптимизировалось, а было взято из результатов компьютерного моделирования. Так, как наибольший КПД был при зарядном напряжении 24 кВ, то

можно считать, что оно является оптимальным для заданного давления буферного газа. Поэтому, в-третьих, низкий КПД при зарядном напряжении 36 кВ обусловлен низким давлением рабочей среды, поднять которое возможности не имелось. В-четвертых, повысить плотность вкладываемой энергии в разряд было затруднительным в силу невозможности дальнейшего уменьшения индуктивности в контуре перезарядки накопительной емкости на обострительную в данной конструкции модулей. В-пятых, использовалось глубокое зеркало лазерного резонатора с Al-покрытием. Компьютерное моделирование показывает, что устранение этих причин позволит увеличить энергию генерации и КПД в два раза.

Заключение

Таким образом, разработан и реализован электроразрядный лазер на хлориде ксенона с модульной системой возбуждения, исследованы амплитудно-временные характеристики его системы возбуждения и генерируемого излучения. На рабочей смеси, состоящей из $\text{HC1:Xe:Ne} = 1:17:2000$ при общем давлении 4 атм., получена энергия генерации в импульсе длительностью ~ 150 нс по основанию равная 1,8 Дж. Зарядное напряжение при этом равнялось 36 кВ. Модульное выполнение системы возбуждения разряда в лазере позволило сократить длительность импульса разрядного тока, повысить мощность накачки активной среды и плотность мощности энерговклада в нее.

Список литературы

1. Баранов В.Ю., Борисов В.М., Степанов Ю.Ю. Электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 216 с.
2. Месяц Г.А., Осипов В.В., Тарасенко В.Ф. Импульсные газовые лазеры. М.: Наука, 1991. 272 с.
3. Федоров А.И. Импульсные газовые УФ-лазеры, возбуждаемые самостоятельным разрядом с УФ-предыонизацией: монография. Томск: Том. ГАСУ, 2023. 236 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. Ануфрик С.С., Зноско К.Ф., Курганский А.Д. Влияние параметров LC-контра на энергию генерации XeCl -лазера // Квант. электрон. 1989. Т. 16, № 11. С. 2228–2231.
6. Sorkina R. Theoretical simulation of spatial-time characteristics of a discharge XeCl excimer laser active medium // J. Phys. D: Appl. Phys. 1990. V 23. P. 806–812.
7. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., Znosko K.F. Kinetic model for XeCl -lasers // Proc. 8th Internat. Conf. on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, LFNМ 2006. Kharkiv, Ukraine, June 2006., Art. 4018200 P. 80–83.
8. Ануфрик С.С., Володенков А.П., Зноско К.Ф. Энергетические характеристики XeCl -лазера с возбуждением LC-инвертором // Журн. прикл. спектроскоп. 1999. Т. 66, № 5. С. 702–707.
9. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., Znosko K.F. Influence of the preionization system on the lasing energy of a XeCl laser // J Opt. Technol. 2000. V. 67, N 11. P. 961–967.
10. Зноско К.Ф., Белаи В.Ч. Системы высокочастотного возбуждения XeCl -эксилламп барьерного и емкостного разрядов // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Серія 6. Техніка. 2019. Т. 9, № 1. С. 28–39.
11. Ануфрик С.С., Володенков А.П., Зноско К.Ф. XeCl -эксилламп барьерного и емкостного разрядов // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Серія 2. Математика. Фізика. Інформатика, виліч. техніка і кіравання. 2015. № 1 (186). С. 113–123.
12. Зноско К.Ф., Белаи В.Ч. Коаксальные XeCl -эксилламп барьерного и емкостного разрядов // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Серія 2. Математика. Фізика. Інформатика, виліч. техніка і кіравання. 2019. Т. 9, № 3. С. 74–85.
13. Anufrik S., Volodenkov A., Znosko K. Modeling of emission characteristics of XeCl Excilamps in pulse-periodic mode of work // High Temp. Mater. Process. 2014. V. 18, N 3. P. 181–196.
14. Anufrik S., Volodenkov A., Znosko K. Simulation of active medium of XeCl lasers // Advanced Lasers and Systems 2007: proceedings of the Int. conf. on lasers, applications, and technologies. Aug. 10, 2007. Minsk. Art. 673106. (Proceedings of SPIE; V. 6731).

K.F. Znosko, S.S. Anufrik, A.P. Volodenkov. Electric-discharge xenon chloride laser with a modular excitation system.

The work is devoted to the study of the characteristics of an electric-discharge excimer laser on xenon chloride, with a modular implementation of the excitation system. Attention is paid to the development and optimization of the laser design, providing an output radiation energy of up to 1.8 J per pulse. The discharge excitation system consisted of six modules synchronously operating on a common load. The synchronicity of the modules was no worse than 5 ns. The results of an experimental study of the energy and time characteristics of laser radiation depending on the composition and pressure of the working mixture, charging voltage, and parameters of the discharge excitation circuit are presented. It is shown that the optimal working medium is $\text{HC1:Xe:Ne} = 1:17:2000$ at a total pressure of 4 atmospheres. The duration of the generation pulse was 60–150 ns depending on the parameters of the excitation system modules.