

Оптимизация режимов возбуждения электроразрядных эксимерных лазеров

К. Ф. Зноско

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

Представлены результаты оптимизации параметров системы возбуждения электроразрядных эксимерных лазеров выполненных по типу LC-контура. Показано, что для получения высокой выходной энергии лазера при высокой эффективности необходимо разделить во времени процесс формирования объемного разряда и энерговклад в него. В этом случае формирование разряда осуществляется разрядом обострительной емкости, а энерговклад - разрядом накопительной емкости длительностью до 250 нс и более.

Ключевые слова: электроразрядный эксимерный лазер, импульсный разряд, энерговклад в разряд, система возбуждения разряда, накопительная емкость, обострительная емкость.

Optimization of excitation modes of electric-discharge excimer lasers

K. F. Znosko

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

The results of optimizing the excitation system parameters of electric-discharge excimer lasers designed as LC circuits are presented. It is shown that to achieve high laser output energy with high efficiency, it is necessary to separate the formation of the volume discharge and the energy input to it. In this case, the discharge is formed by the discharge of the peaking capacitor, and the energy input is carried out by the discharge of the storage capacitor, lasting up to 250 ns or more.

Keywords: electric-discharge excimer laser, pulsed discharge, energy input into the discharge, discharge excitation system, storage capacitor, peaking capacitor.

Введение

В настоящее время источники когерентного излучения – лазеры получили широкое распространение и применение. Они используются для лазерной литографии, абляции и обработки материалов и изделий [1], в лазерно-эмиссионном спектральном анализе материалов и веществ [2], для получения плазмы и в лазерно-плазменных технологиях [3], для наноструктурирования вещества, нанотехнологиях и синтезе наноматериалов совместно с электровзрывными технологиям [4], а также во многих других отраслях науки, техники и производства.

Среди многообразия типов лазеров особое место занимают лазеры генерирующие излучение в УФ области спектра. Среди лазеров этого спектрального диапазона несомненно наиболее мощными являются электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов [5–9]. Высокая импульсная мощность, возможность получения малой расходимости и узкой линии генерации сделали эти лазеры незаменимыми не только в различных отраслях науки и техники, но и производства. Разработка и совершенствование эксимерных лазеров открывает новые

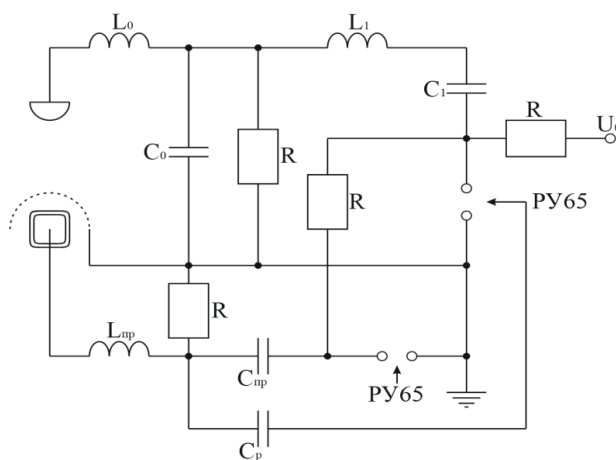
перспективы в микроэлектронике, фотолитографии, разделении изотопов, получении наноматериалов, медицине и биологии. Хотя были проведены масштабные исследования и разработки эксимерных лазеров, они еще продолжают оставаться объектом изучения и модернизации, включения в технологическую структуру производственных комплексов.

1. Экспериментальная установка

Исследования по оптимизации режимов возбуждения электроразрядных эксимерных лазеров проводились на установке, которая разработана с учетом опыта приобретенного ранее [4–5, 10, 11]. Излучатель лазера представлял собой диэлектрическую разрядную камеру, внутри которой располагались цельнометаллический анод, катод и электрод предыонизации. Межэлектродный промежуток между катодом и анодом составлял $\sim 3,5$ см. Катод имел близкий к цилиндрическому профиль, был изготовлен из листовой нержавеющей стали и имел перфорированное окно сечением $90 \times 1,5$ см² светопропусканием 50 % с диаметром ячеек ~ 1 мм. Анод являлся цельнометаллическим и имел профиль близкий к профилю Чанга.

Электрод предыонизации представлял собой металлический электрод, поверхность которого покрыта диэлектриком с высоким пробивным напряжением толщиной 0,5 мм. Предыонизация рабочей смеси в межэлектродном промежутке осуществлялась разрядом ограниченным диэлектриком из-под сетчатого катода. Длина электродов составляла 90 см. Разрядный объем составлял $90 \times 3,5 \times 1,5$ см³. На торцах разрядной камеры располагались зеркала резонатора. В качестве глухого зеркала использовалась кварцевая пластина с Al-покрытием. Выходным зеркалом служила чистая плоская кварцевая пластина.

Возбуждение разряда осуществлялось системой выполненной по типу LC-контура. Параметры контуров возбуждения с учетом активной среды предварительно моделировались аналогично работам [12–14]. Электрическая схема лазера представлена на рисунке. Накопительная ёмкость C_1 набиралась из конденсаторов К15-10 и достигала в исследованиях значения 350 нФ. Индуктивность L_1 в контуре перезарядки C_1 на C_0 изменялась от 11 нГн до 100 нГн, а L_0 – от 3 нГн до 20 нГн. Обострительная емкость C_0 была набрана из конденсаторов К15-4.



Электрическая схема электроразрядного эксимерного лазера

Разряд предыонизации возбуждался отдельным контуром $L_{пр}C_{пр}$. Так, как коммутатор в контуре L_1C_1 включался импульсом от контура предыонизации, то начало импульса тока основного разряда запаздывало примерно на ~ 100 нс относительно начала импульса предыонизации. Это давало возможность создать достаточно высокую концентрацию начальных электронов в основном межэлектродном промежутке для формирования однородного объемного разряда. Емкости C_1 и $C_{пр}$ заряжались от источника постоянного высокого напряжения через резисторы R . Емкость $C_{пр}$ предназначена для формирования импульса поджига коммутатора в контуре L_1C_1 для создания основного разряда. В качестве коммутаторов использовались разрядники РУ65. Все узлы и элементы системы возбуждения лазера были расположены непосредственно на излучателе.

Оптимизация параметров системы возбуждения разряда в эксимерном ХеСІ лазере проводилась с буферным неоном. Энергия генерации в импульсе измерялась с помощью измерителя энергии лазерного излучения Ophir Pulsar 4.

2. Результаты исследования и их обсуждение

Исследование влияния каждого из параметров схемы возбуждения в достаточно широком диапазоне варьирования, а так же от их совокупности на величину энерговклада, эффективность энерговклада и энергию генерации позволили определить оптимальные электрические параметры схемы накачки электроразрядного эксимерного лазера выполненной по типу LC-контура для указанной выше геометрии разряда и его объема. Разработанную методику можно использовать для расчета параметров системы возбуждения при проектировании эксимерных лазеров по заданным выходным характеристикам генерации.

Из анализа экспериментальных и расчетных зависимостей получено, что наибольший энерговклад достигается при достаточно больших значениях накопительной емкости (250–350 нФ), позволяющей запасать до ~ 250 Дж энергии, и малых значениях обострительной емкости 2–5 нФ. Увеличение накопительной емкости более 300–350 нФ, не является целесообразным, так как эффективность процесса энерговклада в разряд при этом снижается из-за неустойчивости объемной стадии разряда и конечной ее длительности.

Значительное влияние на длительность энерговклада и, соответственно, длительность импульса генерации оказывает обострительная емкость. При малых ее значениях (3–5 нФ) наблюдаются импульсы тока через разрядный промежуток длительностью до 250 нс. В этом случае зависимость мощности энерговклада от времени представляет собой импульс колоколообразной формы с высокочастотными колебаниями на фронте, которые не оказывают влияния на однородность разряда. Уменьшение значения обострительной емкости до 1–2 нФ позволяет незначительно увеличить величину энергии, вкладываемой в межэлектродный промежуток. Дальнейшее ее, уменьшение приводит резкому снижению энерговклада. Увеличение C_0 приводит к увеличению колебательной структуры импульса разрядного тока, что приводит к образованию неоднородностей в разряде и в итоге к снижению величины энергии вложенной в разряд за время его объемной фазы.

Таким образом, максимальные энергии достигаются при соотношении обострительной и накопительной емкостей 0,01–0,02, при этом значение накопительной

емкости должно быть порядка 250–350 нФ. Использование такого соотношения емкостей позволяет получить достаточно длительную объемную стадию разряда (до 250 нс), и, следовательно, длительное время энерговклада, так как в данном случае происходит его разделение на две стадии: стадию формирования и стадию энерговклада в разряд.

Для достижений максимальных энергий генерации лазера необходимо стремиться величину индуктивности обострительного контура L_0 сделать минимально возможной для данной конструкции лазера. Как было показано, что эта индуктивность является паразитной и ее уменьшение приводит к значительному увеличению энергии. В расчетных моделях ее можно принять равной нулю, однако на практике ее снизить ниже 3 нГн не удастся.

Определяющее влияние на энерговклад в разряд и выходную энергию лазера оказывает индуктивность L_1 . Численное моделирование показывает, что при минимальных значениях обострительной емкости C_0 и максимальных значениях C_1 величина L_1 должна быть уменьшена до 5–6 нФ. Экспериментально снизить L_1 удалось только до 11 нГн. Рост индуктивности L_1 приводит к затягиванию импульса тока разряда и снижению энерговклада в него.

Иная картина наблюдается при реализации режима с полной перезарядкой емкостей. В этом случае C_0 примерно равна C_1 , а их значения находятся в диапазоне 70–150 нФ. В этом случае с увеличением индуктивности L_1 наблюдается рост энерговклада в активную среду до значений $L_1 \sim 30\text{--}35$ нГн. Это обусловлено тем, что при данных значениях индуктивности L_1 накопительная емкость C_1 успевает полностью перезарядиться на обострительную C_0 . Энергия запасенная в C_1 оказывается перекачанной в C_0 . Если характеристическое время контура $C_1 L_1$ намного больше характеристического времени контура $C_0 L_0$, то после пробоя межэлектродного промежутка в максимуме напряжения на C_0 практически вся энергия будет вложенной в разряд за время $\sim 60\text{--}80$ нс. При этом будут генерироваться короткие ($\sim 40\text{--}60$ нс) импульсы с высокой энергетической эффективностью.

Эффективным является режим накачки, при котором возбуждение активной среды лазера производится мощным импульсом, сформированным разрядом обострительной емкости на фоне разряда накопительной емкости. При этом накопительная емкость должна иметь достаточно большое значение (порядка 300 нФ). Данный режим достигается при соотношении C_0/C_1 около 0,2–0,4. Он характеризуется небольшой длительностью процесса энерговклада (~ 100 нс), повышенной его мощностью, наличием длинного «хвоста» у разрядного тока и короткой ($\sim 60\text{--}70$ нс) длительностью импульса генерации.

Заключение

Таким образом, режим накачки активной среды лазера, при котором достигаются максимальные величины энерговклада, характеризуется максимальными длительностями процесса энерговклада. Он осуществляется при малых значениях обострительной емкости, больших значениях накопительной емкости и малых значениях индуктивности накопительного контура. В этом случае возбуждение разряда разделено на две стадии: обострительная емкость в течение ~ 10 нс осуществляет пробой межэлектродного промежутка и формирование объемного разряда, а

накопительная емкость осуществляет в него энерговклад в течение длительного времени (~250 нс). Это позволяет вложить в разряд, за время существования его объемной стадии, практически всю запасенную в накопительной емкости энергию, получить высокие значения выходной энергии лазера и высокую его эффективность (по отношению к запасенной в накопительной емкости энергии).

Библиографические ссылки

1. Зноско, К. Ф. Механизмы усиления интенсивности спектральных линий плазмы и роста выноса материала из эрозионного кратера при двухимпульсной лазерной абляции / К. Ф. Зноско // *Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Серыя 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, выліч. тэхніка і кіраванне*. 2023. Т. 13, № 1. С. 116–132.
2. Исследование микроэлементного химического состава строительного песка методами спектрального анализа / С. С. Ануфрик [и др.] // *Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Серыя 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, выліч. тэхніка і кіраванне*. 2016. Т. 6, № 2. С. 57–63.
3. Курьян, Н. Н. Временная динамика свечения лазерно-эмиссионного факела глины / Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, В. В. Григуть // *Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Серыя 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, выліч. тэхніка і кіраванне*. 2018. Т. 8, № 2. С. 101–110.
4. Зноско, К. Ф. Размерные характеристики наночастиц, синтезированных в плазме электро-взрывного разряда // *Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Серыя 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, выліч. тэхніка і кіраванне*. 2024. Т. 14, № 1. С. 81–92.
5. Баранов В. Ю. Электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов. / В. Ю. Баранов, В. М. Борисов, Ю. Ю. Степанов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 216 с.
6. Месяц Г. А. Импульсные газовые лазеры. / Г. А. Месяц, В. В. Осипов, В. Ф. Тарасенко. – М.: Наука, 1991. 272с.
7. Электроразрядный ХеСl-лазер с энергией генерации 10 Дж и длительностью импульса излучения 300 нс / И. Н. Коновалов [и др.] // *Квант. электрон.* 2005. Т. 35, № 3. С. 237–240.
8. Ануфрик, С. С., Влияние параметров LC-контура на энергию генерации ХеСl-лазера / С. С. Ануфрик, К. Ф. Зноско, А. Д. Курганский // *Квант. электрон.* 1989. Т. 16, № 11. С. 2228–2231.
9. Ануфрик, С. С., Энергетические характеристики ХеСl-лазера с возбуждением LC-инвертором / С. С. Ануфрик, А. П., Володенков К. Ф. Зноско // *Журнал прикладной спектроскопии*. 1999. Т. 66, № 5. С. 702–707.
10. Зноско, К. Ф., Белаиш В. Ч. Коаксиальные ХеСl-эксилампы барьерного и емкостного разрядов // *Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Серыя 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, выліч. тэхніка і кіраванне*. 2019. Т. 9, № 3. С. 74–85.
11. Зноско, К. Ф., Белаиш В. Ч. Системы высокочастотного возбуждения ХеСl-эксиламп барьерного и емкостного разрядов // *Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка*. 2019. Т. 9, № 1. С. 28–39.
12. Volodenkov, A. Modeling of emission characteristics of XeCl excilamps in pulse-periodic mode of work / A. Volodenkov, S. Anufrik, K. Znosko // *High Temperature Material Processes*. 2014. Vol. 18, No. 3. P. 181–196.
13. Anufrik, S. S. Kinetic model for XeCl-lasers / S. S. Anufrik, A. P. Volodenkov, K. F. Znosko // *LFNM 2006 : proceedings of the 8th Int. conference on laser and fiber-optical networks modeling, Kharkiv, Ukraine, June 29 – July 1, 2006 / Kharkiv State University of Radio Electronics, ed. by I. A. Sukhoivanov. – [S. l.] : IEEE, 2006. P. 80–83.*
14. Anufrik, S. Simulation of active medium of XeCl lasers / S. Anufrik, A. Volodenkov, K. Znosko // *Advanced Lasers and Systems 2007 : proceedings of the Int. conf. on lasers, applications, and technologies, Minsk, Belarus, May 28 – June 1, 2007 / Eds.: V. A. Orlovich, V. Panchenko, I. A. Scherbakov. – Minsk : Society of Photo Optical, 2007. Art. 673106. – (Proceedings of SPIE ; vol. 6731). URL: <https://doi.org/10.1117/12.751862>.*