

УДК 621.373.826.038.823

В.В. Боровков, С.Л. Воронов, Б.В. Лажинцев, В.А. Нор-Аревян, Г.И. Федоров

### ФОРМИРОВАНИЕ РАЗРЯДА В ТРЕХЭЛЕКТРОДНОМ ХеСІ-ЛАЗЕРЕ В РЕЖИМЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО РАЗМНОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Исследованы характеристики трехэлектродного ХеСІ-лазера с двойным разрядом в режиме предварительного размножения электронов. Применение данного способа формирования разряда позволило существенно снизить рабочее напряжение основных емкостей накопителей, получить полное согласование источника накачки с нагрузкой и повысить кпд лазера до 3,7%.

В настоящее время значительное внимание уделяется разработке и исследованию электроразрядных эксимерных лазеров, основанных на схемах с двойным разрядом. Применение этих схем позволяет заметно улучшить согласование источника накачки с нагрузкой за счет снижения напряжения на основном емкостном накопителе и существенно увеличить эффективность лазера. Известны две схемы формирования двойного разряда. Это двухэлектродная система с магнитным коммутатором в цепи основного разрядного контура [1], причем в ХеСІ-лазере с небольшой апертурой разряда достигнут рекордный кпд – 5% [2], а в [3] сообщается о создании импульсно-периодического ХеСІ-лазера со средней мощностью 1,54 кВт, эффективностью 3,6% в однократных импульсах и 2,2% в частотном режиме работы. Другая схема формирования двойного разряда основана на трехэлектродной конструкции лазера [4 – 6], где в ХеСІ-лазере реализован кпд 2,8%. Следует отметить, что трехэлектродные лазеры с двойным разрядом изучены недостаточно полно, хотя и обладают определенными преимуществами по сравнению с двухэлектродными системами: это отсутствие магнитного коммутатора в цепи основного разряда, в несколько раз меньшая энергия управляющего импульса, возможность работы в системе задающий генератор-усилитель.

Описанные в данной статье эксперименты являются продолжением исследований трехэлектродного ХеСІ-лазера [6] и направлены на повышение кпд лазера и снижение напряжения зарядки основного источника накачки.

В этом лазере основной источник накачки, присоединенный к двум основным электродам, заряжался за несколько микросекунд, а зажигание разряда обеспечивалось высоковольтным низкоэнергетичным импульсом, поступающим на управляющий средний электрод. При этом происходил последовательный пробой двух разрядных промежутков, которые образовывали два лазерных канала. Однако при равных межэлектродных зазорах в схеме [6] при уменьшении параметра  $E/P$  ниже 1,3 кВ/(см · атм) появлялась временная задержка (100 – 200 нс) пробоя второго

разрядного промежутка, что приводило к ухудшению качества разряда и снижению кпд лазера.

Для устранения этого явления мы использовали принцип предварительного размножения электронов в электрическом поле [7] аналогично [8, 9]. Применение данного способа формирования разряда позволило снизить напряжение на основных емкостных накопителях в ~2 раза по сравнению с [6] и обеспечить зажигание разряда при напряженностях поля на межэлектродных промежутках до 0,5 кВ/(см · атм).

На рис. 1 представлена принципиальная электрическая схема электроразрядного эксимерного лазера с управляющим средним электродом.

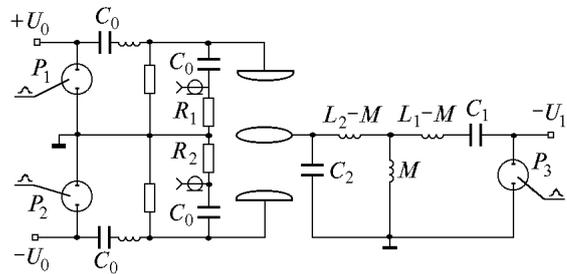


Рис. 1. Электрическая схема трехэлектродного ХеСІ-лазера

Для создания начальной концентрации электронов применялась двусторонняя искровая предьонизация. Межэлектродные зазоры составляли 3,5 см каждый, ширина области разряда ~2 см, длина 50 см.

К основным электродам электроразрядной камеры подключался емкостный накопитель, собранный из конденсаторов марки КВИ-3 ( $2C_0 = 880$  нФ при индуктивности разрядного контура 50 нГн), который заряжался за время ~50 мкс от сосредоточенной емкости марки К75-48 до напряжения  $U_0 = \pm 12$  кВ.

Для зажигания разряда применялся импульсный трансформатор Тесла со следующими параметрами:  $C_1 = 3,4$  нФ,  $C_2 = 2$  нФ,  $U_1 = 30$  кВ. При этом  $C_2$  представляла собой распределенную по длине разрядных промежутков емкость и подключалась к управляющему среднему электроду. Соотношение первой и второй амплитуд полуволн напряжения на выходе

трансформатора Тесла ( $C_2$ ) составляло 1/2. При этом в течение первой полуволны происходило размножение электронов во втором канале с уровня УФ-предыонизации ( $\sim 10^7 \text{ см}^{-3}$ ) до концентрации  $10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , а формирование сильноточной стадии разряда осуществлялось на второй полуволне выходного напряжения трансформатора Тесла.

Исследование генерационных характеристик проводилось в смеси 2 Торр HCl, 20 Торр Хе и 4 атм Ne. Резонатор лазера был образован диэлектрическими плоскими зеркалами с коэффициентами отражения 99 и 25% на длине волны 308 нм, которые одновременно служили торцевыми окнами разрядной камеры. Импульс лазерного излучения регистрировался с помощью фотоэлемента СДФ-10, энергия излучения измерялась калориметром ИМО-2Н. Регистрация вольт-амперных характеристик разряда проводилась с помощью малоиндуктивных шунтов  $R_1$  и  $R_2$  и резистивного делителя напряжения.

На рис. 2 представлены характерные осциллограммы импульсов напряжения на среднем электроде, токов и генерации в лазерных каналах.

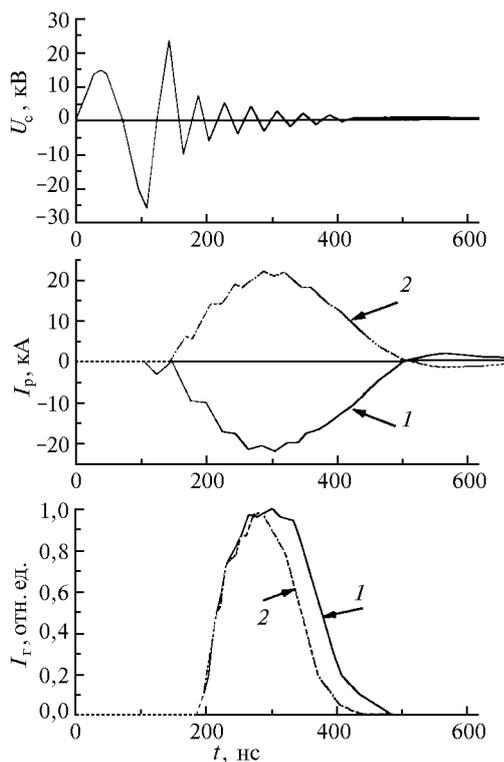


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения на среднем электроде, токов разряда и генерации в первом (1) и втором (2) каналах соответственно.  $U_0 = \pm 11$  кВ,  $U_1 = 30$  кВ

В таблице приведены результаты измерений энергии генерации в лазерных каналах.

Следует отметить, что при  $U_0 \leq \pm 8$  кВ электропрочность смеси позволяла работать в режиме статической зарядки емкостного накопителя, присоединенного к основным электродам камеры. При этом

даже при УФ-предыонизации не происходило пробоя разрядных промежутков.

$U_0$ , кВ	8	9	10	11	12
$E_1$ , Дж	0,39	0,68	0,91	1,13	1,2
$E_2$ , Дж	0,28	0,51	0,71	0,85	0,88
$E_0$ , Дж	0,67	1,19	1,62	1,98	2,08
кпд, %	2,3	3,2	3,6	3,6	3,2

Примечание.  $U_0$  – абсолютное значение напряжения на двухполярном источнике зарядки основного емкостного накопителя;  $E_1$  – энергия генерации лазерного канала, который в стадии формирования разряда пробивается первым;  $E_2$  – энергия генерации лазерного канала, который в стадии формирования разряда пробивается вторым;  $E_0$  – суммарная энергия генерации; кпд – кпд лазера относительно энергии, запасенной в емкостных накопителях основного и ударного контуров.

Из таблицы видно снижение кпд при уменьшении напряжения зарядки основного накопителя ниже  $\pm 10$  кВ. Причем это снижение наблюдалось и при более добротном резонаторе. Анализ осциллограмм тока и напряжения на среднем электроде показал, что при  $U_0 < \pm 10$  кВ хотя и отсутствовала задержка пробоя второго разрядного промежутка, однако происходило затягивание переднего фронта импульса тока разряда в течение первых 40 нс. Вероятно, это связано с недостаточно высокой концентрацией электронов во втором промежутке, создаваемой на стадии формирования разряда. Увеличение энергии, запасаемой в ударном контуре, в 1,5 раза ( $C_1 = 5$  нФ,  $C_2 = 3,55$  нФ,  $U_1 = 30$  кВ) позволило исключить затягивание разгорания разряда при  $U_0 = \pm 9$  кВ и получить энергию генерации 0,76 и 0,66 Дж в первом и втором каналах соответственно при среднем кпд 3,7%. При данном давлении галогеносодержащего вещества ударный контур обеспечивал формирование разряда  $U_0 = \pm 7$  кВ ( $E/P = 0,5$  кВ/(см · атм) на разрядных промежутках), однако при этом происходили увеличение длительности импульса тока до  $\sim 0,7$  мкс и резкое снижение энергии генерации. Уменьшение давления HCl до 1,2 Торр позволило сформировать диффузный разряд с длительностью полупериода тока 350 нс и при полном согласовании источника накачки с нагрузкой.

Следует отметить, что качество разряда (энергия генерации), формируемое в режиме предварительного размножения электронов, существенным образом зависело от напряжения зарядки емкостного накопителя ударного контура. Уменьшение или увеличение  $U_1$  относительно оптимального на 2 – 3 кВ сопровождалось заметным снижением энергии генерации лазера.

Увеличение емкости основного накопителя ( $2C_0$ ) в 1,5 раза привело к росту энергии генерации при  $U_0 = \pm 9$  кВ лишь на 20%. При этом длительность полупериода тока возросла на 25%. Как показали интерференционные исследования, снижение кпд лазера связано с нарушением устойчивости диффузной стадии в процессе горения разряда.

Для выяснения причин различия энергии генерации в каналах в данном варианте емкостного накопителя основного разряда проводились измерения распределения излучения в ближней зоне лазерного канала. Для этого вблизи выходного зеркала ( $R = 25\%$ ) размещалась щелевая диафрагма шириной 2 мм. Сканирование диафрагмы проводилось при ориентации ее перпендикулярно плоскости электродов и параллельно ей.

Таким образом были получены распределения собственного излучения лазера по ширине разрядного промежутка и по его высоте. Изменение очередности пробоя лазерных промежутков на стадии формирования разряда осуществлялось путем смены полярности зарядки основного накопителя.

На рис. 3 представлены распределения излучения в ближней зоне лазерных каналов.

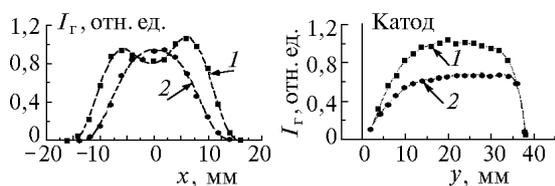


Рис. 3. Распределение излучения ХеСl-лазера в ближней зоне: *a* – по ширине разрядного промежутка, *б* – по его высоте.  $U_0 = \pm 9$  кВ: 1 – канал, который на стадии формирования разряда пробивается первым; 2 – канал, который пробивается вторым

Из рис. 3 видно, что ширина зоны генерации на полувысоте во втором канале меньше на  $\sim 30\%$ , чем в первом. Очевидно, это связано с особенностями формирования разряда в каналах. Так как электроды имели профиль Чанга, то в соответствии с напряженностью электрического поля следовало ожидать распределения концентрации электронов в межэлектродном зазоре с максимумом в центре разрядного промежутка. Действительно, распределение излучения генерации во втором канале отражает эту закономерность. В то же время распределение лазерного излучения в канале, который пробивается первым, имеет провал в центре разрядного промежутка. Отличие в условиях формирования разряда заключается в том, что при пробое первого разрядного промежутка в этом канале возникает предимпульс тока длительностью  $\sim 50$  нс (см. рис. 2), который связан с перезарядкой обострительной емкости  $C_2$ . При этом на спаде тока происходит более быстрая диссоци-

тивная рекомбинация электронов в той области, где больше концентрация колебательно-возбужденных молекул HCl, т.е. в центре разрядного промежутка. Данное явление приводит к провалу в распределении концентрации электронов в центре разряда. Более подробно влияние колебательной кинетики HCl на пространственное распределение излучения ХеСl-лазера ранее анализировалось в [10, 11].

Вероятно, различие в энергии генерации первого и второго каналов связано с разной шириной разряда и, как следствие, с различной удельной мощностью накачки. При этом во втором канале зарегистрировано более раннее прекращение генерации, что вызвано более ранним развитием неустойчивостей в разряде.

Таким образом, в данной статье показано, что использование принципа предварительного размножения электронов в трехэлектродном электроразрядном ХеСl-лазере с равными межэлектродными зазорами позволяет обеспечить формирование разряда при напряжениях ниже уровня статического пробоя. Реализован КПД 3,6 – 3,7% при мощности накачки до  $350$  кВт/см<sup>3</sup> и удельном энергокладе до  $0,08$  Дж/см<sup>3</sup>.

1. Taylor R.S., and Leopold K.E. // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 47. N 2. P. 81 – 83.
2. Gerritsen J.W., Keet A.L., Ernst G.J., Witteman W.J. // Opt Commun. 1990. V. 77. N 5, 6. P. 395 – 396.
3. Fujikawa S., Inoue M., Sato Y., Saito Y., Haruta K., Murai Y., Nagai H. // CLEO'94 Conference Digest. 1994. P. 26 – 27.
4. Bollanti S., Di Lazzaro P., Flora F., Giordano G., Letardi T., Petrucci C., Schina G., Zheng C.E. // Proc. SPIE. 1994. V. 2206. P. 144 – 153.
5. Боровков В.В., Воронин В.В., Воронов С.Л., Зенков Д.И., Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А., Тананакин В.А., Федоров Г.И. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 4. С. 36 – 39.
6. Боровков В.В., Воронин В.В., Воронов С.Л., Зенков Д.И., Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А., Тананакин В.А., Федоров Г.И. // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. N 1. С. 41 – 42.
7. Пат. 2029423 РФ, МКИ5, N 01 S 3/09, 3/097. Способ получения генерации в газовом электроразрядном лазере и газовый электроразрядный лазер / В.В. Боровков, В.В. Воронин, С.Л. Воронов, В.Е. Жеребцов, В.В. Иванов, Б.В. Лажинцев, В.А. Нор-Аревян, В.А. Тананакин, Г.И. Федоров. Оубл. в БИ. 1995. N 5.
8. Bychkov Yu., Kostyrya I., Makarov M., Suslov A., Yastremsky A. // Rev. Sci. Instrum. 1994. V. 65. N 4. P. 793 – 798.
9. Басов В.А., Коновалов И.Н. // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. N 9. С. 787 – 790.
10. Брагинский В.М., Белокриницкий Н.С., Головинский П.М., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Щедрин А.И. // Квантовая электроника. 1990. Т. 17. N 11. С. 1390 – 1394.
11. Van Goor F.A., Timmermans J.C.M., Witteman W.J. // Opt. Commun. 1996. V. 124. P. 56 – 62.

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
Саров, Нижегородской обл.

Поступила в редакцию  
9 октября 1997 г.

*V.V. Borovkov, S.L. Voronov, B.V. Lazhintsev, V.A. Nor-Areвяn, G.I. Fedorov. Discharge Formation in Three-electrode ХеСl-laser in Preliminary Electron Multiplication Regime.*

Characteristics of three-electrode ХеСl laser with double discharge in the regime of preliminary electron multiplication are investigated. Application of this method of discharge formation allows one to significantly decrease operating voltage on the main storage capacitor, to obtain full matching of the pumping source with the load, and to increase laser efficiency up to 3.7%.