

## Эффективные импульсно-периодические эксимерные лазеры

Ю.Н. Панченко, В.Ф. Лосев, Н.Г. Иванов, И.Н. Коновалов\*

*Институт сильноточной электроники СО РАН  
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 27.03.2008 г.

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований электроразрядных эксимерных лазеров с длительностью импульса излучения 30–35 нс. Лазеры генерируют импульсы излучения с энергией 0,2–0,6 Дж и работают с частотой повторения импульсов до 100 Гц. Показано, что полная электрическая эффективность лазеров может достигать 2,6%, а ресурс рабочей смеси газов – более  $10^6$  импульсов.

*Ключевые слова:* эксимерный лазер, накачка, эффективность лазера, интенсивность излучения, удельная мощность.

### Введение

В настоящее время эксимерные лазеры остаются наиболее мощными и эффективными источниками УФ-излучения, благодаря этому коммерческие эксимерные лазеры находят широкое применение и в научных исследованиях, и в технологических процессах. Наибольшее распространение такие лазеры получили в микроэлектронике, медицине и других областях. При этом типичные значения коммерческих ХеСl-лазеров составляют: кпд лазера 1–2%, удельный энергопотребление с активной среды 0,5–1 Дж/(л·атм). Данные параметры обычно реализуются при удельной мощности накачки до 1 МВт/см<sup>3</sup> и длительности импульса 20–30 нс [1]. В то же время в работах [2–4] на экспериментальных макетах показана возможность увеличения кпд ХеСl-лазера и удельного энергопотребления не менее чем в 2 раза. Однако в большинстве случаев эффективность работы лазерных установок существенно снижалась при реализации максимального энергопотребления с активной среды. Причинами, приводящими к уменьшению кпд лазера, можно считать развитие неустойчивостей в разряде или неоптимальные условия для образования и тушения рабочих молекул ХеСl<sup>\*</sup> в плазме в результате протекающих плазмохимических реакций. В связи с этим задача повышения эффективности работы коммерческих лазеров с высоким удельным энергопотреблением имеет не только научную, но и практическую значимость.

В работе [5] описаны результаты исследования лазера с мощностью накачки 45 МВт/см<sup>3</sup> и плотностью разрядного тока 14 кА/см<sup>2</sup>, при этом кпд лазера по мощности составлял 0,8%, а максимальный

удельный энергопотребление ~2,4 Дж/(л·атм), интенсивность выходного пучка 4,8 МВт/см<sup>2</sup>. В работе [6] при использовании УФ-предыонизации были реализованы условия горения разряда при плотности мощности накачки 3,77 МВт/см<sup>3</sup>, кпд лазера достигал 2,9%, удельный энергопотребление с активной среды – 0,6 Дж/(л·атм), а интенсивность выходного пучка 6,5 МВт/см<sup>2</sup>. С изменением давления смеси от 4 до 6 атм и зарядного напряжения  $U_0$  от 18 до 36 кВ кпд лазера снижался до 1,8%, но удельный энергопотребление достигал ~1 Дж/(л·атм), а интенсивность выходного излучения составляла 15,7 МВт/см<sup>2</sup>. В работе [7] нами была реализована возможность горения разряда, состоящего из множества диффузных каналов при средней мощности накачки 10 МВт/см<sup>3</sup> и средней плотности тока 5 кА/см<sup>2</sup>, кпд лазера с такой активной средой составил 1,2%, удельный энергопотребление ~3,9 Дж/(л·атм), интенсивность выходного пучка 14,9 МВт/см<sup>2</sup>.

В указанных выше работах экспериментальные макеты лазеров работали в однократном режиме, данное условие позволяло реализовать минимальную индуктивность в разрядном контуре накачки без учета ряда требований, предъявляемых к коммерческим импульсно-периодическим лазерам.

В настоящей статье приводятся экспериментальные и теоретические исследования возможности увеличения кпд и удельного энергопотребления в импульсно-периодических ХеСl-лазерах.

### Экспериментальные установки и методики измерений

Исследования проводились на коммерческих электроразрядных ХеСl-лазерах серии EL, разработанных в ИСЭ СО РАН (г. Томск). Данные лазеры могут обеспечивать энергию излучения в импульсе до 0,5 Дж и работать с частотой повторения

\* Юрий Николаевич Панченко; Валерий Федорович Лосев (losev@ogl.hcei.tsc.ru); Николай Георгиевич Иванов; Иван Николаевич Коновалов.

импульсов 10–100 Гц [8–10]. Ресурс лазерной смеси составляет  $\sim 10^7$  импульсов.

Для накачки лазеров использовалась типичная двухконтурная схема (рис. 1).

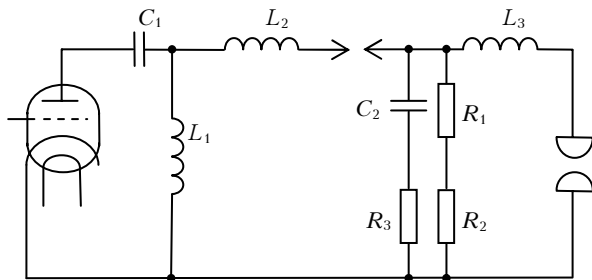


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема лазера:  $C_1 = 107$  нФ;  $C_2 = 72$  нФ;  $L_1 = 100$  мкГн;  $L_2 = 150$  нГн;  $L_3 = 4$  нГн;  $R_3$  – токовый шунт;  $R_1/R_2$  – омический делитель

Предыонизация разрядного промежутка осуществлялась УФ-излучением, которое возникало при срабатывании искровых промежутков, установленных в электрической цепи перезарядки емкости  $C_1$  на емкость  $C_2$ . Емкость  $C_1$  изменялась от 66 до 107,2 нФ для лазеров EL-350-10, EL-500-100 соответственно. Зарядка осуществлялась от источника постоянного напряжения до  $U_0 = 22 \pm 24$  кВ. В качестве коммутатора использовался тиратрон ТПИЗ-10к/25. Оптимальное значение индуктивности первого контура  $L_2 = 150$  нГн обеспечивало эффективную перезарядку первого конденсатора на второй за сравнительно большое время  $\sim 150$ – $180$  нс. Это позволяло иметь минимальные потери на коммутаторе. Емкость во втором контуре  $C_2 = 51,7$  и  $72$  нФ, для лазеров EL-350-10, EL-500-100 соответственно разряжалась через плазму и обеспечивала накачку активной среды. Емкости  $C_1$  и  $C_2$  состояли из конденсаторов TDK UHV-6A, 2700 пФ, 30 кВ. Компоновка лазерной камеры и конденсаторов  $C_2$  позволяла достигнуть малой индуктивности  $L_3 = 3,5 \pm 4$  нГн, что обеспечило малую длительность импульса накачки и большой разрядный ток (до 65 кА).

Для лазеров EL-350-10 и EL-500-100 активный объем составлял 100 и 130 см<sup>3</sup> соответственно. Использовалась газовая смесь Ne/Xe/HCl = 800/8/1 при полном давлении 3,6–3,8 атм. Длина резонатора составляла 100 см, зеркала имели коэффициенты отражения 0,95 и 0,07.

Измерение временной формы лазерного пучка проводилось фотодиодом ФЭК 22СПУ с помощью осциллографа TDS-3032. Энергия излучения регистрировалась калориметром Gentec-E.

## Результаты и их обсуждение

Выбор двух данных лазеров для наших исследований был обусловлен наличием в них близких по параметрам режимов накачки. В обоих случаях максимальная плотность тока разряда достигала 1,3–1,4 кА/см<sup>2</sup>, а удельная мощность накачки – 2,5–3,5 МВт/см<sup>3</sup>. При изменении внешних характеристик электрической цепи заданный режим накачки

задавался сменой профиля, длины и высоты электродов.

На рис. 2 приведены типичные осциллограммы импульсов напряжения и тока на емкости  $C_2$ , лазерного импульса излучения и удельной мощности накачки для лазера EL-500-100. Там же представлена расчетная зависимость импульса удельной мощности накачки. Данные приведены для смеси Ne/Xe/HCl = 860/8/1 с давлением  $P = 3,8$  атм при зарядном напряжении 24 кВ. Исходя из объема активной среды 130 см<sup>3</sup>, максимальная удельная мощность накачки равнялась 3,3 МВт/см<sup>3</sup>. Эффективность лазера, определяемая по отношению максимумов мощности генерации и накачки, составляла 3,5%.

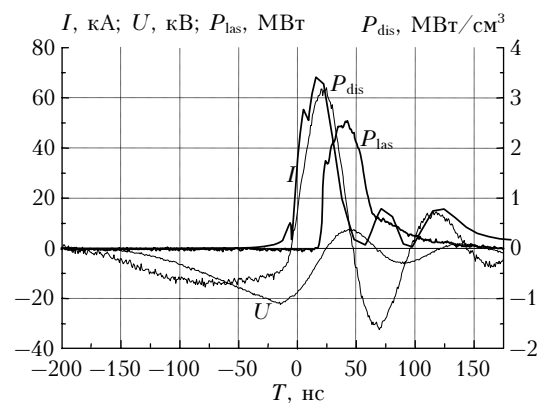


Рис. 2. Временное поведение напряжения  $U$ , тока  $I$  на емкости  $C_2$ , лазерного импульса  $P_{las}$ , удельной мощности накачки  $P_{dis}$

На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости полного кпд лазера от зарядного напряжения  $U_0$ .

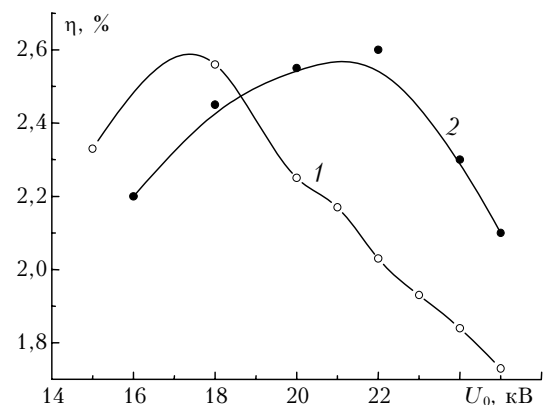


Рис. 3. Зависимости полного кпд лазера от зарядного напряжения: 1 – для лазера EL-500-100; 2 – для EL-350-10

Полный кпд лазера определялся как отношение энергии лазерного излучения к энергии, запасенной в емкости  $C_1$ . Поведение кривых выходной энергии, измеренных экспериментально и рассчитанных с помощью численной модели, совпадает с удовлетворительной точностью. Максимальный кпд для обоих лазеров достигал 2,6%. Для лазера EL-500-100 данное значение кпд реализовывалось при  $U_0 = 18$  кВ,

в случае дальнейшего повышения зарядного напряжения эффективность лазера снижалась и при 25 кВ составляла 1,7%. Для лазера EL-350-10 поведение кпд от зарядного напряжения показано кривой 2. С целью определения причины снижения кпд лазера с ростом зарядного напряжения были проведены исследования эффективности передачи первоначально запасенной энергии в энергию разряда и энергии разряда в энергию лазерного излучения.

На рис. 4 показаны зависимости внутренней эффективности работы лазера (относительно вложенной энергии в активную среду) и эффективности передачи энергии, запасенной в  $C_1$ , в плазму газового разряда от зарядного напряжения.

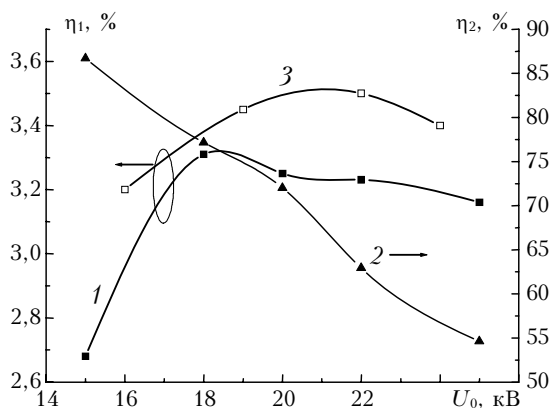


Рис. 4. Поведение внутренней эффективности лазера (1), (3) для EL-500-100, EL-350-10 соответственно и эффективность передачи энергии из емкости  $C_1$  в плазму газового разряда (2) в зависимости от зарядного напряжения для EL-500-100

Зависимости 1 и 3 рассчитывались с подбором переменной величины сопротивления разряда по совпадению вольт-амперных характеристик (ВАХ) модели с экспериментальными результатами. Из приведенных зависимостей видно, что основной причиной снижения полного кпд лазера является уменьшение эффективности передачи энергии из емкости  $C_1$  в  $C_2$ . В диапазоне изменения зарядного напряжения от 24 до 18 кВ величина удельной мощности накачки за счет сужения ширины разряда изменялась незначительно (от 3,3 до 3 МВт/см<sup>3</sup>). При дальнейшем уменьшении зарядного напряжения до 15 кВ величина удельной мощности составляла  $\sim 2$  МВт/см<sup>3</sup>. Порог генерации в диапазоне мощности накачки более 3 МВт/см<sup>3</sup> достигался через 22–25 нс после начала тока разряда. Для лазера EL-500-100 длительность импульса излучения на полувысоте интенсивности составляла 36 нс, выходная интенсивность излучения достигала значения 7,5 МВт/см<sup>2</sup>, а максимальная мощность генерации — 14,5 МВт. Для лазера EL-350-10 при длительности импульса 30 нс интенсивность излучения достигала 10 МВт/см<sup>2</sup>.

На рис. 5 представлены экспериментальные и расчетные зависимости внутренней эффективности работы лазера от удельной мощности накачки.

Показано, что с уменьшением удельной мощности накачки менее 2 МВт/см<sup>3</sup> внутренняя эффек-

тивность лазера падает. Зависимости 1 и 2 получены из экспериментальных результатов для лазеров EL-500-100, EL-350-10 соответственно. Зависимости 3 и 4 получены для лазера EL-500-100 в результате численных расчетов при разном содержании галогена в смеси. В первом случае рассматривался режим для смеси Ne/Xe/HCl = 860/8/1, во втором — Ne/Xe/HCl = 560/8/1. Из рассчитанных зависимостей следует, что с увеличением содержания галогена в смеси внутренняя эффективность увеличивается, но при этом сужается диапазон работы изменения мощности накачки. При сравнении результатов выходных параметров излучения и внутреннего кпд можно отметить, что для лазера EL-500-100 энергия импульса излучения составляла 570 мДж, кпд —  $\eta = 3,3\%$ , при удельном энергопотреблении  $E_{\text{изл}}/V = 1,22$  Дж/(л · атм); для EL-350-10 энергия импульса излучения 350 мДж,  $\eta = 3,5\%$  при  $E_{\text{изл}}/V = 1$  Дж/(л · атм).

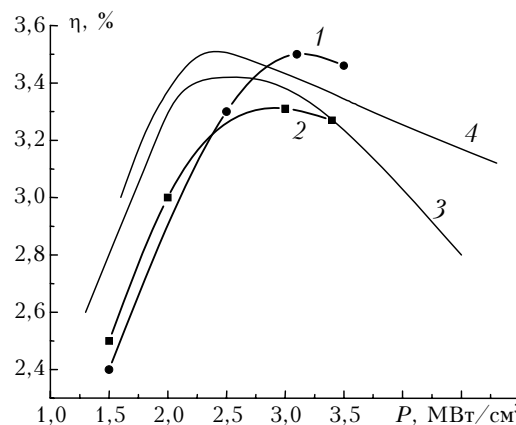


Рис. 5. Экспериментальные (1, 2) и расчетные (3, 4) зависимости внутренней эффективности работы лазера от удельной мощности накачки и концентрации галогена в смеси

На основе анализа экспериментальных и расчетных данных можно предположить, что активная среда еще имеет потенциал как по более полному использованию молекул HCl, так и по повышению величины насыщения коэффициента усиления, соответственно можно ожидать, что дальнейшее увеличение удельной мощности накачки более 3,4 МВт/см<sup>2</sup> с той же длительностью импульса позволит увеличить энергию излучения по сохранению внутренней эффективности. Однако при этом возрастают трудности с сохранением однородности объемного разряда, так как при таких уровнях накачки в разряде неизбежно возникают либо макро-, либо микронеоднородности [7]. При мощной накачке вид неоднородности определяется, главным образом, концентрацией галогена в смеси. В нашем случае при соотношении компонент Ne/HCl более 1000/1 возникали микронеоднородности. С увеличением концентрации галогена до величины соотношения Ne/HCl = 700/1 возникли макронеоднородности (рис. 6).

В оптимальной смеси при соотношении Ne/HCl = 800/1 в разряде вблизи катода возникало множество незавершенных диффузных каналов, перекрывающихся на некотором удалении от катода. Расстояние, на котором это происходило при за-

данной мощности накачки, увеличивалось с ростом концентрации галогена в смеси.

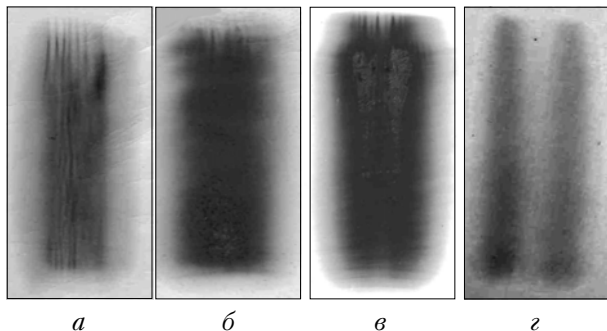


Рис. 6. Автографы лазерного пучка: *a* – Ne/Xe/HCl = 600/8/1; *б* – 860/8/1; *в* – 1000/8/1 при  $P = 3,8$  атм; *г* – Ne/Xe/HCl = 1800/10/1 при  $P = 3,6$  атм

### Заключение

Экспериментальные и теоретические исследования электроразрядных импульсно-периодических XeCl-лазеров серии EL проводились с целью увеличения кпд и удельной энергии генерации. Получена выходная энергия лазерного импульса излучения от 350 до 570 мДж с длительностью импульса 30–35 нс. Лазеры работают с частотой повторения импульсов 10 и 100 Гц. Полный кпд лазеров достигает 2,6%, удельный энергосъем с активной среды 1,4 Дж/(л · атм), интенсивность выходного пучка – до 10 МВт/см<sup>2</sup>. Показано, что при длительности импульса накачки ~35 нс увеличение удельной мощности накачки от 2 до  $(3,2 \pm 2)$  МВт/см<sup>3</sup> приводит к росту внутренней эффективности с 2,8 до 3,5%. Получено удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных значений лазерных параметров.

Авторы выражают благодарность Ю.И. Бычкову и А.Г. Ястремскому за проведение численных

расчетов внутреннего кпд и выходных параметров лазера.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-08-00197, 08-08-99075).

1. Борисов В.М., Брагин И.Е., Виноходов А.Ю., Водичиц В.А. Pumping rate of electric-discharge excimer lasers // Квант. электрон. 1995. Т. 22. № 6. С. 533–536.
2. Lacour B., Brunet H., Besaucelle H., Gagnol C. High average power XeCl and pulsed HF chemical lasers // Proc. SPIE. 1992. V. 1810. P. 498–503.
3. Riva R., Legentil M., Pasquiers S., Puech V. Experimental and theoretical investigations of a XeCl phototriggered laser // J. Phys. D. 1995. V. 28. N 5. P. 856–872.
4. Makarov M., Bonnet J., Pigach D. High efficiency discharge pumped XeCl laser // Appl. Phys. B. 1998. V. 66. N 5. P. 417–426.
5. Lo D., Xie J. A megawatt excimer laser of small discharge volume (3,8 cm<sup>3</sup>) // Opt. and Quantum Electron. 1989. V. 21. N 3. P. 147–150.
6. Miyazaki K., Toda Y., Hasama T., Sato T. Efficient and compact discharge XeCl laser with automatic UV preionization // Rev. Sci. Instrum. 1985. V. 56. N 2. P. 201–204.
7. Панченко Ю.Н., Иванов Н.Г., Лосев В.Ф. Особенности формирования активной среды в короткоимпульсном электроразрядном XeCl-лазере // Квант. электрон. 2005. V. 35. N 9. P. 618–620.
8. Bychkov Yu.I., Losev V.F., Panchenko Yu.N., Yastremsky A.G., Yampolskaya S.A. Research of short pulse discharge XeCl laser // Proc. SPIE. 2005. V. 5777. P. 558–561.
9. Bychkov Yu.I., Losev V.F., Panchenko Yu.N., Yastremsky A.G. Efficiency of discharge XeCl laser with 30 ns radiation pulse duration // Proc. SPIE. 2006. V. 6053. P. 266–269.
10. Bychkov Yu.I., Balbonenko E.F., Ivanov N.G., Losev V.F., Panchenko Yu.N., Yastremsky A.G. Discharge pulse-repetition XeCl laser with high efficiency and intensity of radiation // XII Conf. on Laser Optics. St. Petersburg, Russia. 2006, June 26–30.

*Yu.N. Panchenko, V.F. Losev, N.G. Ivanov, I.N. Kononov. Efficient pulse-periodic excimer lasers.*

Results of experimental and theoretical researches of discharge excimer lasers with 30–35 ns pulse duration of radiation are presented. Lasers generate the radiation pulses with energy of 0.2–0.6 J and pulse repetition rate up to 100 Hz. It is shown that the full laser electric efficiency of 2.6% and the resource of a working gas mix more than 10<sup>6</sup> impulses can be reached.