

С.В. Мельченко, А.Н. Панченко, В.Ф. Тарасенко, Г.С. Евтушенко

## ВЛИЯНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПРОБОЯ НА ВКР ИЗЛУЧЕНИЯ ХеСІ-ЛАЗЕРА В ГАЗАХ И ПАРАХ

Приведены результаты экспериментов по ВКР-преобразованию излучения ХеСІ-лазера в водороде и парах свинца при различной расходимости пучка накачки. Показано, что основным процессом, ограничивающим эффективность преобразования, является оптический пробой, влияние которого возрастает с увеличением энергии и расходимости преобразуемого излучения. При преобразовании излучения ХеСІ-лазера с расходимостью 0,1 мрад в водороде полный квантовый кпд составил ~90%.

Отработка путей создания лазерных источников с энергией в импульсе 1–10 Дж и общей эффективностью  $\geq 1\%$  в сине-зеленой области спектра продолжает оставаться в настоящее время актуальной задачей в связи с такими практическими приложениями, как локация и зондирование атмосферы. Один из наиболее перспективных способов достижения указанной цели — вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) излучения эксиплексных лазеров в газах и парах. Однако выходной пучок таких лазеров при использовании обычного плоскопараллельного резонатора имеет большую расходимость, что не дает возможности осуществить эффективное ВКР-преобразование. Снизить расходимость пучка практически до дифракционного предела позволяют либо неустойчивые резонаторы с большим увеличением (ценой потерь в энергетике), либо системы генератор—усилитель (ценой усложнения установки). Компромиссным решением является использование простых типов неустойчивых резонаторов, которые дают возможность получить выходной пучок с расходимостью, в 10–100 раз превышающей дифракционный предел. Эффективность ВКР-преобразования в этом случае может быть достаточно высокой и достигать 70% (полный квантовый кпд) [1–3]. Однако проблема повышения кпд таких систем, а также возможность увеличения энергии преобразуемого излучения практически не исследовалась.

В настоящей работе исследовано влияние расходимости и энергии излучения накачки на эффективность ВКР. Полный квантовый кпд ВКР-преобразования излучения ХеСІ-лазера в водороде составил 90%, в парах свинца — 37%. Показано, что основным процессом, конкурирующим с процессом ВКР, является оптический пробой, влияние которого тем сильнее, чем хуже качество пучка и больше энергия преобразуемого излучения.

Эксперименты проводились с лазерами ЛИДА-101 [4] и ЛИДА-КТ [5], имеющими активную длину 80 и 60 см соответственно. Использовались неустойчивые резонаторы трех типов: частично разъюстированный плоскопараллельный резонатор [4], резонатор, состоящий из вогнутого зеркала с  $R = 5$  м и грани фокусирующей линзы с  $F = 60$  см [6] и резонатор, состоящий из плоского и выпуклого ( $R = 1$  м) зеркал с алюминиевым покрытием.

При исследовании ВКР-преобразования в водороде лазерный пучок фокусировался линзой с  $F = 60$  см в трубу из нержавеющей стали длиной 1 м и диаметром 5 см, снабженную боковым окном. Для ВКР-преобразования в парах свинца использовалась керамическая трубка диаметром 2 см и длиной 50 см, на внешней стенке которой размещен нагреватель. В холодном состоянии ячейка заполнена буферным газом гелием до 500 Торр. Регистрация спектра излучения осуществлялась спектрографами ИСП-30 и ИСП-51, энергии излучения — калориметрами ИМО-2 Н с использованием светофильтров для разделения компонент. Временные характеристики излучения регистрировались с помощью осциллографов С8-12 и 6 ЛОР, сигнал на которые подавался от фотодиода ФЭК-22, расположенного за выходной щелью монохроматора МДР-2.

При ВКР-преобразовании излучения ХеСІ-лазера в водороде было получено 4 стоксовых и 3 антистоксовых компоненты в видимом и УФ-диапазонах спектра [7]. Эффективность преобразования зависела от расходимости лазерного пучка и энергии лазерного излучения. Так, первый из описанных выше резонаторов позволял получить пучок с расходимостью ~2 мрад. Полный квантовый кпд преобразования такого пучка не превышал 30%. Второй тип резонатора формировал излучение с расходимостью ~0,8 мрад. Полный квантовый кпд преобразования в этом случае достигал 70%. Было замечено, что увеличение энергии преобразуемого излучения без изменения расходимости пучка может привести к снижению эффективности преобразования. Кроме того, заметно изменяется эффективность преобразования мощности излучения во время импульса (рис. 1). При превышении плотности мощности накачки в фокусе линзы  $170$  МВт/см<sup>2</sup> эффективность преобразования начинает падать, несмотря на то, что коэффициент усиления ВКР пропорционален плотности мощности накачки. Эти данные позволяют предположить наличие нелинейного процесса, конкурирующего с процессом ВКР.

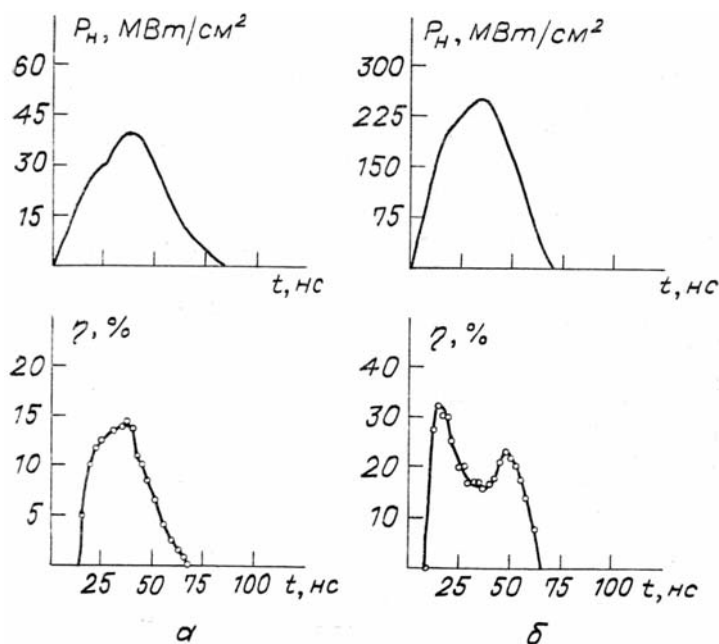


Рис. 1. Осциллограммы импульсов падающего излучения и эффективность преобразования в первую стоксову компоненту ВКР в водороде в зависимости от времени для пиковой плотности мощности накачки  $P_n$  40 (а) и 250 (б) МВт/см<sup>2</sup>. Расходимость пучка накачки 0,8 мрад. Давление водорода 16 атм

Визуальные наблюдения в боковое окно ячейки показали наличие оптического пробоя в газе, при котором было зарегистрировано сильное рассеяние падающего и преобразованного излучения в фокальной области линзы. На рис. 2 показана зависимость пороговой плотности мощности для ВКР-преобразования и оптического пробоя от давления водорода.

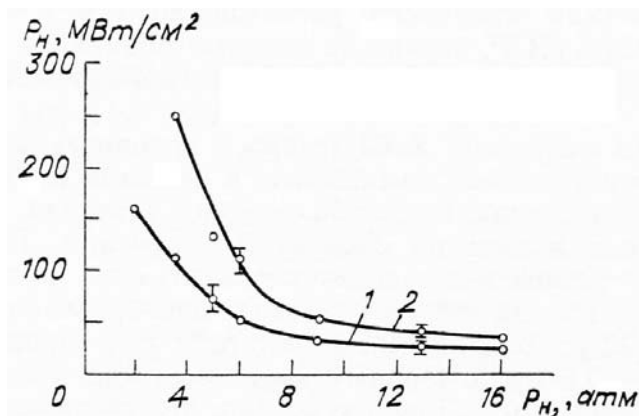


Рис. 2. Пороги ВКР преобразования (1) и оптического пробоя (2) в зависимости от давления водорода. Расходимость падающего излучения 0,8 мрад

Для мощного УФ-излучения с большой расходимостью оптический пробой имеет достаточно низкий порог, что объясняется, с одной стороны, многофотонной ионизацией газа УФ-излучением, с другой — большой диффузионной длиной  $\Lambda$ , определяющей диффузионноподобные потери электронов и имеющей порядок радиуса пучка в перетяжке [8]:

$$\Lambda \sim r = F\Theta/2, \quad (1)$$

где  $F$  — фокусное расстояние линзы;  $\Theta$  — расходимость излучения.

Полную картину процесса можно представить, анализируя осциллограммы падающего излучения, преобразованного излучения и излучения накачки, рассеянного в боковое окно из фокальной области линзы (рис. 3). После достижения порога ВКР ( $t_1 = 5$  нс) начинается рост преобразованного излучения (рис. 3, б, кривая 1). Плотность мощности излучения в фокусе продолжает нарастать, достигая при  $t = t_2 = 8$  нс порога оптического пробоя (рис. 2). К моменту времени  $t_3 = 15$  нс плотность образовавшейся плазмы такова, что она заметно влияет на световой поток: мощность преобразованного излучения начинает падать и одновременно растет интенсивность излучения, рассеянного в боковое окно (рис. 3, в).

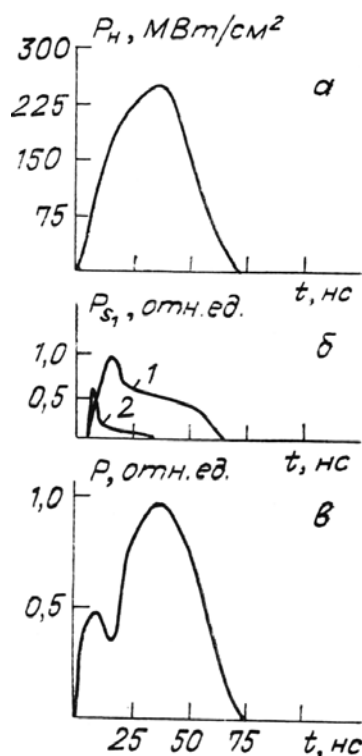


Рис. 3. Осциллограммы импульсов падающего излучения (а); первой стоксовой компоненты (б): 1 — в водороде; 2 — в парах свинца, и рассеянного излучения в боковое окно камеры (в) при расходимости пучка накачки 0,8 мрад и давлении водорода 16 атм

Для устранения влияния оптического пробоя необходимо повысить его порог без изменения порога ВКР. Так, увеличение диффузионноподобных потерь за счет снижения расходимости пучка до 0,1 мрад (1) при использовании третьего типа резонатора позволило существенно повысить эффективность преобразования. Полный квантовый КПД при преобразовании пучка с энергией 10 мДж составил ~90%. Необходимо отметить, что увеличение энергии пучка до 100 мДж приводило к превышению порога оптического пробоя (~10 ГВт/см) и соответственно к снижению КПД до 70%.

В экспериментах по ВКР-преобразованию излучения ХеСl-лазера в парах свинца использовался только резонатор второго типа. Характерно, (рис. 3, б, кривая 2), что преобразование в видимый диапазон ( $\lambda = 458$  нм) срывалось, если плотность мощности накачки превышала определенную величину. Кроме того, на выходе из кюветы наблюдалось излучение в широком спектральном диапазоне, характерное для плазмы оптического пробоя. Эффективность преобразования составляла 37%, что ниже результатов, полученных с пучками более высокого качества.

Таким образом, оптический пробой является основным процессом, конкурирующим с процессом ВКР-преобразования излучения эксиплексных лазеров в газах и парах. Он накладывает ограничение на эффективность преобразования излучения с большой энергией в импульсе. Для эффективного преобразования излучения широкоапертурных лазеров с энергией излучения 1–10 Дж и более необходимо либо снизить расходимость выходного пучка до дифракционного предела, либо использовать «мягкую» фокусировку и коллимированные пучки [9, 10].

$\theta$ , мрад	$\eta_{s1}$ , % ( $\lambda = 353$ нм)	$\eta_{s2}$ , % ( $\lambda = 414$ нм)	$\eta_{s3}$ , % ( $\lambda = 499$ нм)	$\eta_{\sigma s1}$ , % ( $\lambda = 273$ нм)	$\eta_{\Sigma}$ , %
Водород					
2	10	12	3	3,5	28,5
0,8	40	20	8	5	73
0,1	50	24	13	3,5	90,5
Пары свинца					
0,8	37	—	—	—	37

В заключение приведем данные по квантовой эффективности  $\eta$  преобразования излучения лазера в различные компоненты ВКР при различной расходимости пучка накачки в водороде ( $E_n = 10$  мДж) и

парах свинца ( $E_n = 50$  мДж). Эффективность преобразования излучения в водороде в  $S_4$  ( $\lambda = 631$  нм), в  $AS_2$  ( $\lambda = 246$  нм) и  $AS_3$  ( $\lambda = 223$  нм) была незначительной и составляла в сумме  $\lesssim 1\%$  (таблица).

1. Loree T.R., Sze R.C., Barker D.L. //IEEE J. Quant. Electr. 1984. V. QE-20. № 3. P. 218–222.
2. Falsini P., Pini R., Salimbeni R., Vannini M., Haider A.Y., Buffa R. //Opt. Com. 1985. V. 53. № 6. P. 421–424.
3. Burnham R., Djeu N. //Opt. Lett. 1978. V. 3. № 6. P. 215–217.
4. Mel'chenko S.V., Panchenko A.N., Tarasenko V.F. //Opt. Com. 1985. V. 56. № 1. P. 51–52.
5. Тарасенко В.Ф., Панченко А.Н., Мельченко С.В., Белокриницкий Н.С., Антоненко М.П., Ступак Ю.И., Волошина Т.А., Ткачук О.А. //Квантовая электроника, 1987. Т. 14. № 12. С. 2450–2451.
6. Мельченко С.В., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. //Оптика и спектроскопия. 1986. Т. 61. Вып. 2. С. 303–308.
7. Мельченко С.В., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. //Квантовая электроника. 1986. Т. 13. № 7. С. 1496–1500.
8. Райзер Ю.П. Лазерная искра и распространение разрядов. М.: Наука, 1974. 308 с.
9. Brosnan S.J., Komine H., Starraerts E.A., Plummer M.J., West J.B. //Opt. Lett. 1982. V. 7. № 4. P. 154–156.
10. Trainor D.W., Human H.A., Heinrichs R.M. //IEEE J. Quant. Elect. 1982. V. QE-18. № 11. P. 1929–1934.

Институт сильноточной электроники СО АН СССР,  
Томск

Поступила в редакцию  
27 декабря 1989 г.

S.V. Mel'chenko, A.N. Panchenko, V.F. Tarasenko, G.S. Evtushenko. **Influence of Optical Breakdown on Stimulated Raman Scattering of XeCl-Laser in Gases and Vapors.**

Some results of experiments on the conversion of XeCl-laser radiation by stimulated Raman effect in the cell with  $H_2$  and lead vapors, obtained at different beam divergence are presented. It is shown that the main factor restricting the conversion efficiency is the optical breakdown, the role of which increases with the increase of pulse energy and beam incident divergence. Thus, the total conversion efficiency reaches 90% at 0.1 mrad divergence in the hydrogen cell.