

07

© 1991

ЭФФЕКТИВНОЕ ВКР ПРЕОБРАЗОВАНИЕ  
ИЗЛУЧЕНИЯ  $HeCl$  ЛАЗЕРА В АНТИСТОКСОВУ ОБЛАСТЬ

С.В. М е л ь ч е н к о

Ряд важных практических приложений обусловил интерес к ВКР преобразованию излучения эксимерных лазеров в стоксову область. Однако преобразование в антистоксову область, дающее возможность расширения набора лазерных длин волн в УФ диапазоне спектра и продвижения в ВУФ диапазон, несомненно, также заслуживает внимания. До настоящего времени эффективность преобразования в антистоксову область  $\eta_{AS}$  значительно уступала эффективности преобразования в стоксову область  $\eta_S$  и не превышала 6 % в  $AS_1$  [1] (в 6 раз меньше  $\eta_{S_1}$ ) и 2 % в  $AS_2$  [2]. Лишь недавно [3] была получена  $\eta_{AS_1} \sim 11\%$  при взаимодействии коллимированных пучков Стокса и накачки, распространяющихся под углом, близким к углу точного фазового синхронизма.

В описываемых ниже экспериментах удалось довести  $\eta_{AS_1}$  до 20 % от энергии излучения накачки при жесткой фокусировке пучка накачки и введении добавки в рассеивающую среду, изменяющей ее дисперсию.

Использовался  $HeCl$  лазер ( $\lambda = 308$  нм) с энергией до 100 мДж в импульсе длительностью 40 нс на полувысоте, снабженной неустойчивым телескопическим резонатором с увеличением  $M=10$ . Расходимость выходного пучка лазера составляла 0.6 мрад. Излучение фокусировалось в ячейку с водородом линзами с  $F=34, 46, 60$  и  $94$  см. Варьировалось также давление водорода с каждой линзой. Разделение компонент ВКР осуществлялось с помощью призмы, а в качестве регистратора использовались либо ИМО-2Н, либо фотодиод ФЭК-22 совместно с импульсным вольтметром В4-17. Осциллограммы лазерных импульсов контролировались с помощью осциллографа С8-12.

При прохождении излучения через водород наблюдались 4 стоксовы и 3 антистоксовы компоненты ВКР. Максимальная эффективность преобразования в первую антистоксову компоненту реализована при  $F=46$  см и давлении водорода 10 атм и составила 9.5 % (рис. 1). Во вторую антистоксову компоненту в этих условиях преобразовывалось  $\sim 1.5\%$  энергии накачки, а во все стоксовы компоненты - 45 %. Преобразование в первую антистоксову компоненту осуществлялось значительно эффективнее, если в водород при давлении 8-10 атм добавлялись пары воды до давления насыщенных паров при комнатной температуре - 15 Тор. В этих условиях  $\eta_{AS_1}$  достигал 20 % ( $E_{AS_1}=20$  мДж,  $P_{AS_1}=500$  кВт)

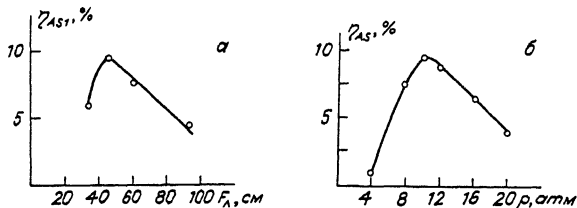


Рис. 1. Зависимость эффективности преобразования в  $AS_1$  от фокусного расстояния линзы (а) и давления водорода (б): а -  $p_{H_2} = 10$  атм,  $E_H = 100$  мДж; б -  $F_L = 46$  см,  $E_H = 100$  мДж.

при давлении водорода 8 атм. Наблюдалось также некоторое увеличение длительности импульсов на  $\lambda = 273$  нм с 35 до 45 нс (на полувысоте).  $\eta_{S_1}$  сохранялся на достаточно высоком уровне  $\sim 35\%$ , в то время как  $\eta_{S_2}$  снижался до 2–3%.

Обсудим полученные результаты. Известно, что основным механизмом образования первой антистоксовой компоненты является четырехфотонное взаимодействие:

$$\omega_{AS_1} = 2\omega_H - \omega_{S_1}.$$

Это взаимодействие осуществляется тем эффективнее, чем меньше волновая расстройка  $\Delta k$ :  $\Delta k = |2\vec{k}_H - \vec{k}_{S_1} - \vec{k}_{AS_1}|_z$ ,  $z$  – направление распространения волны накачки. Согласно [4], при учете взаимодействия только двух связанных волн (стоксовой и антистоксовой) коэффициент усиления для антистоксовой волны  $g_{AS}$  определяется следующим выражением:

$$g_{AS} = \left[ (\Delta k^2/4 + a(\Delta k)\Delta k g_S)^2 + \frac{g_S^2 \Delta k^2}{4} \right]^{1/4} \cdot \sin\left(\arctg \frac{g_S \Delta k}{2(\Delta k^2/4 + a(\Delta k)\Delta k g_S)} : 2\right). \quad (1)$$

Здесь  $g_S$  – коэффициент усиления стоксовой волны, а  $a(\Delta k)$  – коэффициент, учитывающий соотношение между действительной и мнимой частью нелинейной восприимчивости и определенный нами эмпирически как  $0.55 \Delta k^4$ .

Если на линзу с фокусным расстоянием  $F$  падает коллимированный лазерный пучок диаметром  $D$ , то два луча, распространяющиеся в пучке на расстоянии  $L$  друг от друга, пересекаются в фокусе под углом  $\theta \approx L/F$  ( $L \ll F$ ), причем,  $0 < \theta \leq \theta_{max} \approx D/F$ . При достижении порога ВКР преобразования до перетяжки можно считать, что по одному из рассматриваемой пары направлений распространяется стоксова волна, а по другому волна накачки. Тогда, из геометрических соображений (рис. 2), волновая расстройка для взаимодействия этих двух волн определяется как

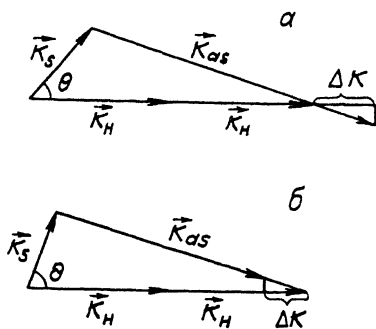


Рис. 2. Векторная диаграмма взаимодействующих волн при  $\theta < \theta_0$  (а) и  $\theta > \theta_0$  (б).

$$\Delta k = k_s \cos \theta + k_{as} \cos \arctg \frac{k_s \sin \theta}{2k_L - k_s \cos \theta} - 2k_L, \quad \theta < \theta_0; \quad (2)$$

$$\Delta k = 2k_L - k_s \cos \theta - (k_{as}^2 - k_s^2 \sin^2 \theta)^{1/2}, \quad \theta > \theta_0. \quad (3)$$

$\theta_0$  – угол, при котором  $\Delta k = 0$  (точный фазовый синхронизм взаимодействующих волн). Коэффициент усиления антистоксовой волны в данном направлении  $G_{as}$  определяется совместным вкладом взаимодействующих волн, распространяющихся под разными углами:

$$G_{as} = \int_0^{\theta_{max}} g_{AS}(\theta) d\theta. \quad (4)$$

Остановимся более подробно на определении  $\alpha(\Delta k)$ . При фокусировке пучков разной апертуры одной и той же линзой оказалось, что если  $\theta_{max} < 8$  мрад, то антистоксова волна практически не образуется. Это соответствует  $\Delta k > 20 \text{ см}^{-1}$ . Скорость убывания функции в формуле (1) определяется скоростью роста функции  $\alpha(\Delta k)$ . Исходя из того, что функция  $g_{AS}(\Delta k)$  должна быть близка к нулю при  $\Delta k > 20 \text{ см}^{-1}$ , а также на основании измеренных значений  $P_{AS1}$  для различных условий путем численного моделирования был определен оптимальный коэффициент  $\alpha(\Delta k)$ .

При добавке в рассеивающую среду паров воды, молекулы которой диссоциируют под действием мощного УФ излучения с образованием радикала ОН, имеющего сильную полосу поглощения на  $\lambda = 306 \text{ нм}$  (вблизи длины волны накачки), происходит изменение показателя преломления среды на  $\lambda = 308 \text{ нм}$ . Соответствующая добавка в показатель преломления определяется формулой Селмейера [5]:

$$n_i - 1 = 2\pi N_i x^{(1)}, \quad x^{(1)} = r_e / 4\pi^2 \frac{f_n}{1/\lambda_n^2 - 1/\lambda_H^2},$$

где  $n_i$  - показатель преломления среды, обусловленный частицами  $i$ -го сорта,  $N_i$  - концентрация этих частиц,  $\lambda_H$  - длина волны падающего излучения,  $\lambda_n$  - длина волны близкого к  $\lambda_H$  перехода атома или молекулы,  $f_n$  - сила осциллятора этого перехода, для ОН -  $1.2 \cdot 10^{-3}$  [6],  $r_e = 2.818 \cdot 10^{-13}$  см. Показатели преломления на  $\lambda_S$  и  $\lambda_{AS}$  меняются незначительно. В результате меняется соотношение между  $k_H$ ,  $k_S$  и  $k_{AS}$  и, как следствие,  $\Delta k$  при данном  $\theta$  по сравнению с чистым водородом. В аналогичном эксперименте по изменению апертуры падающего на линзу пучка угол схождения, при котором антистоксова компонента не образовывалась, уменьшился до 4.5 мрад. Полагая, что под действием УФ излучения диссоциировало не более 1% молекул воды (точных экспериментальных данных мы не имеем), получаем верхнюю оценку добавок в показатель преломления -  $1.8686 \cdot 10^{-5}$ , а  $\theta$ , при котором  $g_{AS} \sim 0$ , оцениваем из формулы (1) - 4 мрад, что довольно близко к экспериментальному значению.

Зная показатель преломления чистого водорода [7] и его смеси с водой, можно рассчитать  $\Delta k$  для этих двух случаев по формулам (2) и (3) для различных  $\theta$ , а по формулам (1) и (4) произвести численный расчет  $G_{AS}$  и  $P_{AS_1}$ . Для оптимальных условий образования первой антистоксовой компоненты:  $G_{AS} = 1.258145 g_S$ ,  $P_{AS_1} = 0.48 P_{S_1}$  в чистом водороде и  $G_{AS} = 1.302242 g_S$ ,  $P_{AS_1} = 0.92 P_{S_1}$  в смеси водорода с водой. В расчете учитывалось реальное распределение интенсивности падающего на линзу пучка (с провалом в центре за счет выходного зеркала резонатора). Начальная мощность стоксовой волны  $P_{S_0} = 1$  Вт, антистоксовой волны  $P_{AS_0} = 0.01$  Вт определена измерением интенсивности излучения на соответствующих длинах волн, распространяющегося в направлении, перпендикулярном направлению распространения пучка накачки вблизи порога ВКР. Длина зоны взаимодействия  $L = 7$  см определена по интенсивности рассеянного вбок стоксового излучения на различных расстояниях от фокальной плоскости линзы при максимальной мощности накачки, используемой в данных экспериментах - 2.5 МВт.  $g_S = 2.5$  рассчитан по известным значениям  $P_{S_1}$ . Экспериментально было получено  $P_{AS_1} = 0.3 P_{S_1}$  с чистым водородом и  $P_{AS_1} = 0.57 P_{S_1}$  с добавкой воды. Несмотря на весьма упрощенное представление картины явления имеется неплохое качественное согласие расчета с экспериментальными данными.

Заметим в заключение, что излучение на  $\lambda = 273$  нм имело расходимость, не более чем в 1.5 раза превышающую расходимость излучения накачки. Однако, угол раствора конуса, в котором распространялась первая антистоксова компонента, был больше, чем у накачки на 14 мрад для чистого водорода и на 10 мрад для смеси водорода с водой. Другими словами, для антистоксова пучка

фокальная плоскость линзы была как бы сдвинута к выходному концу кюветы на 10–15 см.

## С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] А н д р е е в Р.Б. и др. // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. № 1. С. 56–60.
- [2] F a l s i n i P. etc. // Opt. Commun. 1985. Vol. 53. No 6. P. 421–424.
- [3] Г р а с ю к А.З. и др. // Квантовая электроника. 1990. Т. 17. № 5. С. 599–602.
- [4] Б л о м б е р г е н Н. Нелинейная оптика. Москва: Мир, 1966. С. 175.
- [5] Р а й н т ж е с Дж. Нелинейные оптические параметрические процессы в жидкостях и газах. Москва: Мир, 1987. С. 64.
- [6] К у з ь м е н к о Н.Е. и др. // УФН. 1979. Т. 127. В. 3. С. 451–478.
- [7] W i l k e V., S c h m i d t W. // Appl. Phys. 1979. V. 18. No 2. P. 177–181.

Институт сильноточной  
электроники СО АН СССР,  
Томск

Поступило в Редакцию  
14 ноября 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 4

26 февраля 1991 г.

05.4

© 1991

## УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭКСИМЕРНЫХ ЛАЗЕРОВ

Я.О. Д о в г и й, И.В. К и т ы к,  
Р.В. Л у ц и в, С.З. М а л и н и ч,  
А.В. Н о с а н, В.В. Т к а ч у к

Известно, что основной параметр высокотемпературных сверхпроводников состава  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  температура перехода  $T_C$  определяется их дефектностью по кислороду. При  $x \approx 0.5$  кристаллы являются полупроводниками, а при  $x < 0.5$  – сверхпроводниками с температурой перехода в пределах 20–90 К [1–3]. Увеличивать концентрацию кислорода, а тем самым и  $T_C$ , можно, в частности, отжигая образцы в потоке кислорода.

Проведенные нами исследования по воздействию излучения  $XeCl$  лазера ( $\lambda = 308.16$  нм) показали, что, несмотря на оплавление