

## ВЫНУЖДЕННЫЕ ЧЕТЫРЕХФОТОННЫЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СТЕКЛЯННЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ

*Е.М.Дианов, Э.А.Захидов, А.Я.Карасик,  
П.В.Мамышев, А.М.Прохоров*

В волоконных световодах при лазерной накачке наблюдалась генерация стокс-антистоксовых пар с частотными сдвигами вплоть до  $5000 \text{ см}^{-1}$ . Наблюдаемые эффекты объяснены четырехфотонными процессами, требующими выполнения условия фазового синхронизма.

Стекланные волоконные световоды (СВС), благодаря своей способности поддерживать высокие плотности мощности светового излучения на больших длинах, являются уникальными объектами для исследования нелинейных эффектов. В СВС интенсивно исследовались такие нелинейные эффекты как ВКР [1, 2], ВРМБ, оптический эффект Керра и другие [3]. Вынужденный четырехфотонный параметрический процесс (ВЧП) – нелинейный процесс, при котором два фотона накачки  $\omega_{H1}$  и  $\omega_{H2}$  преобразуются в стоксов  $\omega_C$  и антистоксов  $\omega_A$  фотоны ( $\omega_A > \omega_H > \omega_C$ ), и по закону сохранения энергии  $\omega_{H1} + \omega_{H2} = \omega_A + \omega_C$ . ВЧП требует выполнения условия фазового синхронизма, которое записывается для волновых векторов  $\mathbf{k}_{H1} + \mathbf{k}_{H2} = \mathbf{k}_A + \mathbf{k}_C$ . В среде с нормальной материальной дисперсией при коллинеарном взаимодействии плоских волн фазовый синхронизм невозможен – всегда  $\mathbf{k}_A + \mathbf{k}_C > 2\mathbf{k}_H$ . В СВС различные

моды имеют разные постоянные распространения  $\beta_{mn}$  (рис.1, а), поэтому, если фотоны  $\omega_H, \omega_A, \omega_C$  будут распространяться в разных модах, условие фазового синхронизма, в принципе, может быть выполнено за счет компенсации материальной дисперсии модовой. В СВС такой ВЧП с частотными сдвигами  $\Delta\bar{\nu} < 400 \text{ см}^{-1}$  наблюдался и анализировался в [4] ( $\Delta\bar{\nu} = \bar{\nu}_A - \bar{\nu}_H = \bar{\nu}_H - \bar{\nu}_C$ ).

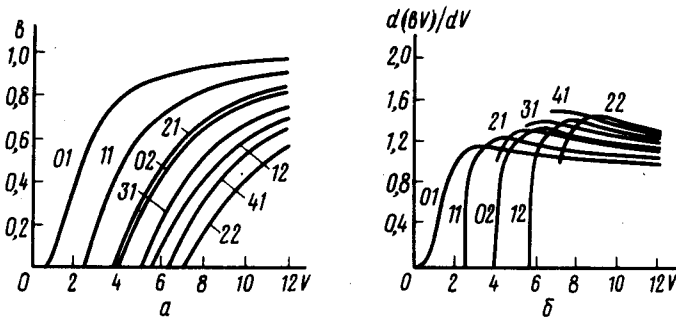


Рис.1. а – Зависимость нормированного эффективного показателя преломления  $b$  для различных  $LP$  мод от характеристического параметра  $V = 2\pi\bar{\nu}a(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ ,  $a$  – радиус СВС [5] ( $b_{mn} = (\beta_{mn} / k - n_2) / (n_1 - n_2)$ ),  $\Delta n = n_1 - n_2$  – разность показателей преломления оболочки и сердцевины; б – зависимость нормированных групповых задержек  $d(bV)/dV$  для различных  $LP$  мод от характеристического параметра  $V$  [5]

Условие фазового синхронизма для СВС

$$\beta_A + \beta_C - \beta_{H1} - \beta_{H2} = \Delta K(\Delta\bar{\nu}) + f(\Delta\bar{\nu}) = 0, \quad (1)$$

где  $\Delta K(\Delta\bar{\nu})$  – описывает материальную дисперсию, а

$$f(\Delta\bar{\nu}) = 2\pi\Delta n \left[ (b_A + b_C - b_{H1} - b_{H2}) + \left( \frac{d(b_A V)}{dV} - \frac{d(b_C V)}{dV} \right) \Delta\bar{\nu} \right]. \quad (2)$$

Для исследований мы выбрали СВС с сердцевиной  $\text{SiO}_2 + \text{GeO}_2$  и оболочкой из  $\text{SiO}_2$  с  $\Delta n \approx 4,5 \cdot 10^{-3}$ ,  $2a \approx 9 \text{ мкм}$ . Для накачки использовалось излучение второй гармоники лазера на гранате с неодимом ( $\lambda_H = 532 \text{ нм}$ ), работающего в импульсно-периодическом режиме с  $F = 12,5 \pm 25 \text{ Гц}$  и  $\tau_H = 15 \text{ нсек}$ . Для данной  $\lambda_H$  параметр СВС  $V \approx 6$ . Лазерное излучение с помощью объектива вводилось в СВС, на выходе СВС через второй объектив излучение попадало либо в монохроматор для измерения спектра, либо на дифракционную решетку и далее на экран или фотопленку.

На рис.2, а представлена фотография ближнего поля выходящего из СВС длиной  $\sim 6 \text{ м}$  излучения после разложения его в спектр дифракционной решеткой. Видно, что помимо излучения накачки (Н) в спектре имеются антистоксова компонента (А) с  $\bar{\nu}_A > \bar{\nu}_H$  и стоксова компонента (С) с  $\bar{\nu}_C < \bar{\nu}_H$ , распределения полей которых соответствуют  $LP_{01}$  и  $LP_{11}$  модам соответственно, при этом  $\Delta\bar{\nu} = \bar{\nu}_A - \bar{\nu}_H = \bar{\nu}_H - \bar{\nu}_C \approx 105 \text{ см}^{-1}$ .

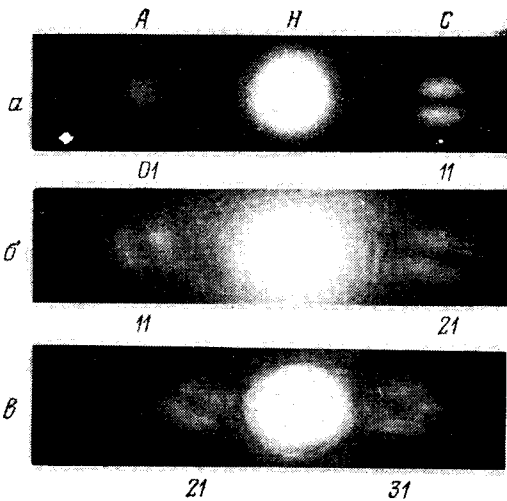


Рис.2. Фотографии излучения ВЧП на выходе СВС длиной  $\sim 6$  м после разложения дифракционной решеткой, H, A, C, соответствуют ближнему полю излучения накачки, антистоксовой и стоксовой компонент

Меняя угол ввода излучения накачки в СВС и тем самым преимущественно возбуждая разные группы мод, мы получали разные модовые комбинации стокс-антистокс с разными сдвигами  $\Delta\bar{\nu}$  (рис.2, б A ( $LP_{11}$ ), C ( $LP_{21}$ ) —  $\Delta\bar{\nu} \approx 110 \text{ см}^{-1}$ , рис.2, в A ( $LP_{21}$ ), C ( $LP_{31}$ ) —  $\Delta\bar{\nu} \approx 67 \text{ см}^{-1}$ ). На всех фотографиях (рис.2) интенсивность стоксовых компонент несколько выше, чем антистоксовых и наблюдается некоторое спектральное "смазывание", последнее, по-видимому, связано с вариацией диаметра СВС по его длине [4]. В рассмотренных случаях стоксовой компоненте всегда соответствует мода более высокого порядка, чем антистоксовой. При этом, один фотон накачки распространяется в той же моде, что и стоксов фотон, а другой фотон накачки — в моде вместе с антистоксовым фотоном. В этом случае (2) упрощается

$$f(\Delta\bar{\nu}) = 2\pi\Delta n \left( \frac{d(b_A V)}{dV} - \frac{d(b_C V)}{dV} \right) \Delta\bar{\nu}. \quad (2')$$

Построив функцию  $\Delta K(\Delta\bar{\nu})$  (выражение (1)) на основе данных дисперсии плавленого кварца [6] с учетом малости содержания  ${}^7\text{GeO}_2$  для нашего СВС, и зная экспериментальные значения  $\Delta\bar{\nu}$ , мы для каждого случая (рис.2) находили соответствующее значение  $\Delta K(\Delta\bar{\nu})$ , которое при фазовом синхронизме равно  $-f(\Delta\bar{\nu})$ . Таким образом, зная лишь  $\Delta n$  и измерив  $\Delta\bar{\nu}$ , из (2') можно рассчитать разность групповых задержек различных мод, а следовательно, из рис.1, б оценить значение параметра  $V$ . Для случаев а, б, и в (рис.2) мы получили значения  $V$  соответственно равные 6; 5,5 и 6,1. Некоторые расхождения величин  $V$  связаны, по-видимому, с отличием профиля показателя преломления нашего СВС от ступенчатого, для которого были рассчитаны зависимости рис.1.

На СВС длиной  $0,3 \div 1$  м нами наблюдалась генерация двух стокс-антистоксовых пар, соответствующих  ${}^1LP_{11}$  модам, с близкими частотными сдвигами,  $\Delta\bar{\nu}_1 \approx 1950 \text{ см}^{-1}$  и  $\Delta\bar{\nu}_2 \approx 2100 \text{ см}^{-1}$  (рис.3). Направленные лепестков  ${}^1LP_{11}$  мод одной пары ортогонально направлению лепестков другой пары. В отличие от ВЧГ с малыми  $\Delta\bar{\nu}$  (рис.2) интенсивности

стоксовых и антистоксовых компонент в каждой паре между собой существенно не отличаются. Мощность накачки, соответствующая пороговому значению генерации, измеренная на выходе СВС длиной 0,6 м, составила  $\sim 1$  кВт. Данной экспериментальной ситуации, когда стоксов и антистоксов фотоны распространяются в  $LP_{11}$  моде, могут соответствовать два случая: 1) оба фотона накачки в  $LP_{01}$  моде; 2) один фотон накачки — в  $LP_{01}$ , другой — в  $LP_{11}$ . Частотный сдвиг  $\Delta\bar{\nu}$ , рассчитанный по формуле (2) с учетом зависимости  $\Delta K(\Delta\bar{\nu})$  и данных рис.1, *a* хорошо совпадает с экспериментальным для случая 2) и примерно в 2 раза больше для случая 1). Однако необходимо заметить, что в случае 2) интеграл перекрытия полей четырех участвующих в процессе мод с учетом их поляризации, которым, в частности, определяется эффективность ВЧП в СВС [4] равен нулю.

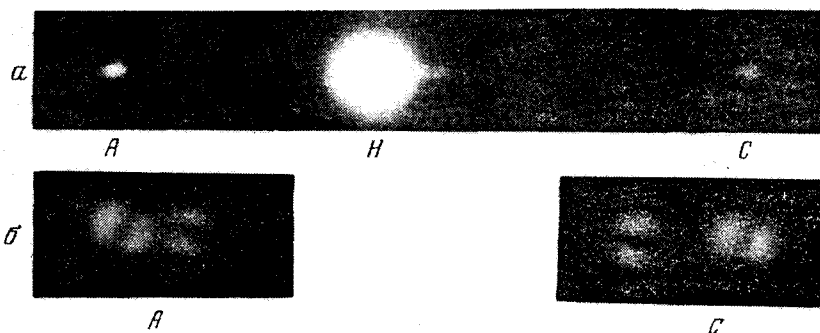


Рис.3. Фотографии излучения ВЧП на выходе СВС длиной 0,6 м после разложения дифракционной решеткой Н, А, С, соответствуют ближнему полю излучения накачки, антистоксовой и стоксовой компонент. *a* — Общий вид (справа от накачки виден спектр ВКР); *б* — стоксовые и антистоксовые компоненты с большим спектральным разрешением, чем на *a*

Генерация двух пар стокс-антистокс с разными  $\Delta\bar{\nu}$  (рис.3) связана, очевидно, с разными значениями фазовых постоянных  $\beta$  для  $LP_{11}$  мод, что может быть следствием эффекта двулучепреломления в СВС, т.е. снятием вырождения между двумя ортогональными поляризациями  $LP$  моды из-за эллиптичности или анизотропии  $n_1$  в сердцевине СВС [7]. В пользу этого говорит и тот факт, что при вращении на входе СВС направления поляризации лазерного излучения накачки (с помощью пластинки  $\lambda/2$ ) мы добивались преимущественной генерации одной из двух пар стокс-антистокс. Кроме того при использовании СВС с заведомо малым двулучепреломлением [7] расщепления  $LP_{11}$  моды не наблюдалось. Однако отметим, что поляризация генерируемых  $LP_{11}$  мод в нашем случае всегда была эллиптической.

Нами также наблюдалась генерация стокс-антистоксовых пар:  $\lambda_C \approx 696,7$  нм,  $\lambda_A \approx 430,3$  нм ( $\Delta\bar{\nu} \approx 4400$  см $^{-1}$ );  $\lambda_C \approx 721$  нм,  $\lambda_A \approx 421,5$  нм ( $\Delta\bar{\nu} \approx 4939$  см $^{-1}$ ). При этом в генерации участвовали одновременно пары из 4 — 5 мод, разнесенных по спектру. Так в антистоксовой области

присутствовали например, моды  $LP_{41}$ ,  $LP_{22}$ , которые кстати на частоте накачки в силу условия отсечки (рис.1, а) в данном СВС не распространяются. Отметим, что длина когерентности ВЧП, которая лимитируется неоднородностью параметров СВС по его длине, оказалась весьма значительной для больших  $\Delta\bar{\nu}$  ( $\sim 0,5$  м), хотя и существенно меньше, чем в случае ВЧП с малыми  $\Delta\bar{\nu}$  (более 5 м).

В заключение отметим, что, используя СВС с различными параметрами, ВЧП можно применять как источник когерентного излучения с новыми частотами, с другой стороны метод удобен для селективного возбуждения отдельных мод и дает ценную информацию о характеристиках СВС, таких как фазовые постоянные, групповые задержки, степень двулучепреломления и другие.

Авторы благодарят А.Н.Гурьянова и Д.Д.Гусовского за изготовление СВС.

Физический институт  
им. П.Н.Лебедева  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
4 июня 1981 г.

## Литература

- [1] В.В.Григорьянц, Б.Л.Давыдов, М.Е.Жаботинский, В.Ф.Золин, Г.А.Иванов, В.И.Смирнов, Ю.К.Чаморовский. Письма в ЖТФ, 3, 54, 1977.
- [2] З.Ф.Нестерова, И.В.Александров, И.В.Мельник, Б.С.Непорент, Д.К.Саттаров. Письма в ЖЭТФ, 31, 36, 1980.
- [3] R.H.Stolen, Fiber and Integrated Optics., 3, 21, 1980.
- [4] R.H.Stolen. IEEE. J.Quantum Electronics QE-11, 100, 1975. 75.
- [5] D."Gloge. Appl. Opt., 10, 2252, 1971.
- [6] А.В.Белов, А.Н.Гурьянов, Е.М.Дианов, В.М.Машинский, В.Б.Неуструев, А.В.Николайчик, А.С.Юшин. Квантовая электроника. 5, 695, 1978.
- [7] А.Н.Гурьянов, Д.Д.Гусовский, Г.Г.Девярых, Е.М.Дианов, А.Я.Карасик, В.А.Козлов, М.М.Миракян, А.М.Прохоров. Квантовая электроника, 8, 1981.