

Влияние высших волноводных мод на процессы когерентного четырехволнового взаимодействия в полых волноводах

А. Н. Наумов, Ф. Джамманко*¹⁾, Д. А. Сидоров-Бирюков, А. Б. Федотов, П. Марсили*¹⁾, А. Руффини*¹⁾,
А. М. Желтиков²⁾

Международный лазерный центр, физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова
119899 Москва, Россия

* *Dipartimento di Fisica e Unitá INFN – University of Pisa*
56127 Pisa, Italy

Поступила в редакцию 2 февраля 2001 г.

Исследованы процессы когерентного четырехволнового взаимодействия (ЧВВ) лазерных импульсов в наполненных газом полых волноводах. Экспериментальные данные и полученные выражения для амплитуды ЧВВ-сигнала свидетельствуют о том, что возбуждение волноводных мод высших порядков является важным физическим фактором, оказывающим существенное влияние на нелинейно-оптические процессы в полых волноводах.

PACS: 42.65.-k

Нелинейно-оптические взаимодействия в полых волноводах в настоящее время широко используются для формирования предельно коротких световых импульсов [1, 2] и получения излучения вакуумного ультрафиолетового и рентгеновского диапазонов (вплоть до области “водяного окна прозрачности”) методом генерации оптических гармоник [3–8]. Применение волноводов этого типа позволяет также существенно увеличить чувствительность методов газового анализа, основанных на когерентной четырехфотонной спектроскопии [9, 10].

Использование полых волноводов в ряде случаев позволяет успешно решить проблему фазового рассогласования волн накачки и сигнала, генерируемого в результате невырожденного по частоте нелинейно-оптического процесса. За счет выбора параметров полого волновода, давления газа и возбуждения соответствующих волноводных мод удается обеспечить условия, при которых волноводная составляющая фазовой расстройке компенсирует фазовую расстройку, связанную с дисперсией газа [3, 8, 9, 11]. При выполнении этих условий имеется возможность повышения энергии генерируемого в результате нелинейно-оптического процесса сигнала за счет увеличения длины полого волновода. Управление параметрами коротких импульсов коротковолнового излучения, получаемого в результате

нелинейно-оптических процессов в полых волноводах, может осуществляться за счет эффекта фазовой кросс-модуляции [12–14].

Анализ результатов экспериментов, посвященных нелинейно-оптическим взаимодействиям в полых волноводах, обычно выполняется в рамках моделей, не учитывающих возможность возбуждения высших волноводных мод в процессе нелинейно-оптического взаимодействия в полом волноводе. Позволяя качественно правильно предсказать общие закономерности нелинейно-оптических взаимодействий в полых волноводах, такой подход не всегда может быть использован для расчета конкретных параметров полых волноводов, обеспечивающих максимальные эффективности нелинейно-оптических взаимодействий [10]. Для выполнения более точного анализа нелинейно-оптических процессов в полых волноводах требуется учет волноводных мод высших порядков, влияющих на условия фазового согласования и приводящих к изменению энергий световых импульсов, участвующих в нелинейно-оптических взаимодействиях. Экспериментальному и теоретическому исследованиям эффектов, связанных с влиянием высших волноводных мод на нелинейно-оптические процессы в полых волноводах, и посвящена настоящая работа.

Рассмотрим процесс четырехволнового взаимодействия (ЧВВ), происходящий по схеме $3\omega = 2\omega + 2\omega - \omega$, где ω и 2ω -частоты излучения накачки (излучение основной частоты задающего лазера и его вторая гармоника). Процесс такого типа, как сви-

¹⁾F. Giammanco, P. Marsili, A. Ruffini.

²⁾e-mail: zheltikov@top.phys.msu.su

детельствуют экспериментальные данные [3], позволяет добиться высоких эффективностей нелинейно-оптического преобразования частоты в полых волноводах. Результаты наших экспериментальных исследований для процессов этого типа будут представлены ниже.

Пусть излучение основной частоты и излучение второй гармоники (излучения накачки) распространяются в направлении оси z вдоль полого волновода с внутренним радиусом a . Полый волновод наполнен газом с кубической нелинейностью и показателем преломления n и имеет оболочку с действительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon > n^2$. Поля накачки и ЧВВ-сигнала при этом могут быть представлены в следующем виде:

$$E_1 = \frac{1}{2} f_1^q(\rho) A_0^q \exp[-i\omega t + (iK_1^q - \alpha_1^q/2)z] + \text{с.с.}, \quad (1)$$

$$E_2 = \frac{1}{2} \sum_l f_2^l(\rho) B_0^l \exp[-2i\omega t + (iK_2^l - \alpha_2^l/2)z] + \text{с.с.}, \quad (2)$$

$$E_3 = \frac{1}{2} f_3^m(\rho) C^m(z) \exp[-3i\omega t + iK_3^m z] + \text{с.с.}, \quad (3)$$

где $f_1^q(\rho)$, $f_2^l(\rho)$ и $f_3^m(\rho)$ – поперечные распределения полей излучения основной частоты, второй гармоники и ЧВВ-сигнала, соответствующие модам EH_{1q} , EH_{1l} и EH_{1m} полого волновода, соответственно (см. [15, 16]), ρ – расстояние до оси полого волновода; A_0^q и B_0^l – амплитуды полей излучения основной частоты и излучения второй гармоники на входе в волновод; $C^m(z)$ – медленно меняющаяся амплитуда сигнала ЧВВ; K_1^q , K_2^l и K_3^m – постоянные распространения излучения основной частоты, второй гармоники и ЧВВ-сигнала, соответственно; α_1^q и α_2^l – коэффициенты затухания волноводной моды EH_{1q} на основной частоте и волноводной моды EH_{1l} на частоте второй гармоники (см. [15]). Представление поля второй гармоники в выражении (2) в виде суммы мод полого волновода позволяет описывать ЧВВ-процессы, в которых две волны накачки с одинаковой частотой 2ω имеют поперечные распределения поля, соответствующие двум различным волноводным модам $\text{EH}_{1l'}$ и $\text{EH}_{1l''}$ (то есть $l = l', l''$).

Используя стандартные предположения относительно свойств полых волноводов, использующихся для нелинейно-оптического преобразования частоты, и применяя метод анализа уравнений для медленно меняющейся амплитуды ЧВВ-сигнала, аналогичный описанному в работах [10, 11, 14], получим следующее выражение для амплитуды ЧВВ-сигнала, возбуждаемого в волноводной моде EH_{1m} :

$$C^m = i\beta^{ml'l''q} A_0^{q*} B_0^{l'} B_0^{l''} \left\{ \exp\left[-\frac{\alpha_3^m}{2} L\right] - \right.$$

$$\left. - \exp\left[\left(-\frac{\alpha_1^q + \alpha_2^{l'} + \alpha_2^{l''}}{2} - i\Delta k^{ml'l''q}\right)L\right] \right\} / \left(\frac{\alpha_3^m - \alpha_1^q - \alpha_2^{l'} - \alpha_2^{l''}}{2} - i\Delta k^{ml'l''q} \right), \quad (4)$$

где α_3^m – коэффициент затухания для моды EH_{1m} полого волновода на частоте ЧВВ-сигнала, L – длина волновода. Фазовая расстройка $\Delta k^{ml'l''q}$ с учетом дисперсии волноводных мод может быть записана в виде

$$\Delta k^{ml'l''q} = K_3^m - K_2^{l'} - K_2^{l''} + K_1^q \approx \Delta k^g + \Delta k^{ml'l''q}, \quad (5)$$

где Δk^g и $\Delta k^{ml'l''q}$ – компоненты фазовой расстройки, связанные с дисперсией газа и волноводных мод, соответственно. То обстоятельство, что расстройка волновых векторов, входящая в выражение (4) и определяющая эффективность ЧВВ-взаимодействия, зависит не только от дисперсии газа, но и от дисперсии волноводных мод, дает возможность улучшения условий фазового согласования для определенного набора волноводных мод накачки и ЧВВ-сигнала. Нелинейный коэффициент $\beta^{ml'l''q}$ может быть выражен через соответствующую нелинейно-оптическую кубическую восприимчивость [14]:

$$\beta^{ml'l''q} = \frac{27\pi\omega^2}{K_3^m c^2} \chi^{(3)} \frac{\int \int f_3^m(\rho) f_2^{l'}(\rho) f_2^{l''}(\rho) f_1^q(\rho) \rho d\rho d\theta}{\int \int [f_3^m(\rho)]^2 \rho d\rho d\theta}, \quad (6)$$

где $\chi^{(3)}$ – нелинейная восприимчивость третьего порядка, ответственная за ЧВВ-процесс.

Выражение (4) позволяет установить зависимость мощности ЧВВ-сигнала от геометрических размеров полого волновода, а также сорта и давления газа. Ниже мы воспользуемся этим выражением для анализа экспериментальных данных.

Экспериментальная установка для исследования ЧВВ-процессов в наполненных газом полых волноводах (рис.1) состояла из пикосекундного лазера, вакуумной камеры, в которую помещался полый волновод, и системы регистрации на основе фотоумножителя. Лазер на кристалле Nd:YAG позволял получать импульсы излучения с длиной волны 1.06 мкм (частота накачки ω) и 0.53 мкм (частота накачки 2ω) длительностью 50 пс. Максимальная энергия излучения с длиной волны 1.06 мкм достигала 100 мДж. Для удвоения частоты использовался кристалл КДР. Излучение накачки заводилось в волновод при помощи ахроматической линзы. Энергии пучков накачки на выходе из волновода контролировались при помощи пары фотодиодов. Энергии импульсов основного

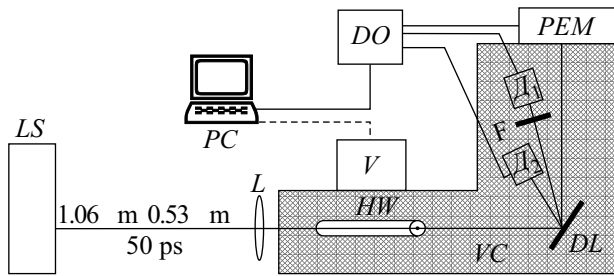


Рис.1. Экспериментальная установка для исследования влияния давления газа в полном волноводе на ЧВВ-процессы: *LS* – пикосекундная лазерная система, *L* – ахроматическая линза, *VC* – вакуумная камера, *HW* – полый волновод, *DL* – дифракционная решетка, *PEM* – фотоумножитель, *F* – фильтр для выделения основного излучения; *D*₁ и *D*₂ – фотодиоды для контроля энергии основного излучения и второй гармоники соответственно; *DO* – цифровой осциллограф, *V* – система напуска газа, управляемая персональным компьютером ПК

излучения и второй гармоники в этих экспериментах составляли 1 и 0.1 мДж, соответственно. Сигнал, генерируемый в результате нелинейно-оптического взаимодействия в полном волноводе, регистрировался фотоумножителем и обрабатывался при помощи цифрового осциллографа. Результат усреднения сигнала по 30 импульсам сохранялся на персональном компьютере.

Сравнение экспериментальных данных, приведенных на рис.2 и 3, с результатами расчетов, выполненных в соответствии с выражением (4), указывает на заметную роль высших волноводных мод в процессах нелинейно-оптического взаимодействия в полых волноводах. Показательными в этом отношении являются результаты, полученные для ЧВВ-процесса $3\omega = 2\omega + 2\omega - \omega$ в заполненном аргоном волноводе длиной 17.4 см и внутренним диаметром $a = 100$ мкм (рис.2). Хорошее согласие между экспериментальными данными (точки) и результатами расчетов (сплошные линии) достигается при учете вклада высших волноводных мод. В частности, экспериментальная зависимость, представленная на рис.2, может быть воспроизведена с хорошей точностью на основе выражения (4), если принять во внимание не только ЧВВ-процесс, происходящий в основной волноводной моде (когда излучение основной частоты, вторая гармоника и ЧВВ-сигнал имеют пространственный профиль распределения интенсивности, характерный для EH_{11} мод полого волновода), но и ЧВВ-процесс, идущий с участием EH_{12} моды основного излучения, EH_{11} и EH_{13} мод второй гармо-

ники и EH_{12} моды ЧВВ-сигнала. Максимум ЧВВ-сигнала, который наблюдается при давлении аргона около 0.7 атм, при этом соответствует достижению фазового согласования для ЧВВ-процесса, происходящего в основной волноводной моде (штриховая линия на рис.2 показывает фазовую расстройку для этого процесса). При более низких давлениях возрастает роль ЧВВ EH_{12} моды основного излучения, EH_{11} и EH_{13} мод второй гармоники и EH_{12} моды ЧВВ-сигнала (фазовая расстройка для этого процесса показана штрих-пунктирной линией на рис.2). Высшие волноводные моды полого волновода, таким образом, могут оказывать заметное влияние на ЧВВ-процессы.

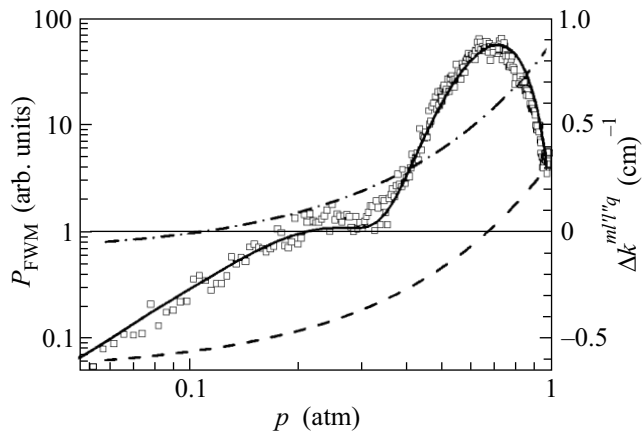


Рис.2. Зависимости мощности ЧВВ-сигнала (точками показаны экспериментальные данные, сплошной линией – результаты расчетов) и фазовой расстройки для ЧВВ-процесса $3\omega = 2\omega + 2\omega - \omega$ в полном волноводе, наполненном аргоном, от давления аргона p . Штриховой линией показана фазовая расстройка для ЧВВ-процесса, происходящего в основной волноводной моде EH_{11} . Штрих-пунктирная линия показывает фазовую расстройку для ЧВВ-процесса с участием EH_{12} моды основного излучения, EH_{11} и EH_{13} мод второй гармоники и EH_{12} моды ЧВВ-сигнала. Длина полого волновода – 17.4 см, внутренний диаметр полого волновода – 100 мкм.

Экспериментальные данные также указывают на то, что чем больше диаметр полого волновода, тем более значительную роль играют высшие волноводные моды в нелинейно-оптических процессах. На рис.3 представлены результаты, полученные для ЧВВ-процесса $3\omega = 2\omega + 2\omega - \omega$ в заполненном аргоном полном волноводе длиной 20.1 см и внутренним диаметром $a = 203$ мкм. Для получения хорошего согласия между экспериментальными данными (точки) и ре-

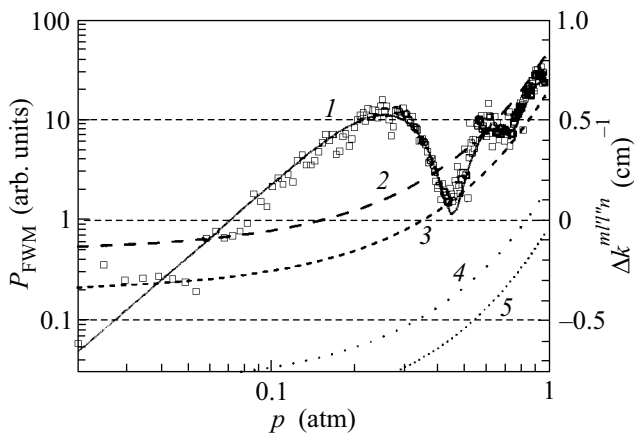


Рис.3. Зависимости мощности ЧВВ-сигнала (точками показаны экспериментальные данные, сплошной линией 1 – результаты расчетов) и фазовой расстройки для ЧВВ-процесса в полом волноводе, наполненном аргоном, от давления аргона p . Штриховой линией 2 показана фазовая расстройка для ЧВВ-процесса, идущего с участием мод EH_{11} накачки и сигнала. Штриховые и пунктирные линии 3–5 показывают фазовые расстройки для ЧВВ-процессов с участием (3) моды EH_{13} основного излучения, мод EH_{11} и EH_{14} второй гармоники и моды EH_{11} сигнала, (4) мод EH_{11} основного излучения и второй гармоники и моды EH_{12} сигнала, (5) моды EH_{11} основного излучения, мод EH_{11} и EH_{12} второй гармоники и моды EH_{13} сигнала. Длина полого волновода – 20.1 см, внутренний диаметр полого волновода – 203 мкм.

зультатами расчетов (сплошная линия 1) в этом случае требуется учет ЧВВ-процессов, идущих с участием волноводных мод EH_{11} , EH_{13} излучения основной частоты, мод EH_{11} , EH_{12} и EH_{14} излучения второй гармоники и мод EH_{11} , EH_{12} , и EH_{13} ЧВВ-сигнала (фазовые расстройки для этих ЧВВ-процессов показаны штриховыми линиями 2–5 на рис.3). Максимум ЧВВ-сигнала, который наблюдается при давлении аргона около 0.25 атм, при этом соответствует достижению фазового согласования для ЧВВ-процесса, происходящего в основной волноводной моде (фазовая расстройка для этого процесса показана штриховой линией 2 на рис.3), а при давлении аргона около 0.6 атм длина волновода близка трем длинам когерентности для данного ЧВВ-процесса ($L = 3L_{coh}$). Максимум ЧВВ-сигнала, наблюдаемый при давлении аргона около 0.9 атм, соответствует достижению фазового согласования для ЧВВ-процесса, идущего с участием мод EH_{11} основного излучения и второй гармоники и моды EH_{12} сигнала (фазовая расстройка для этого процесса показана штриховой линией 4 на рис.3)

и для ЧВВ-процесса с участием моды EH_{11} основного излучения, мод EH_{11} и EH_{12} второй гармоники и моды EH_{13} сигнала (штриховая линия 5 на рис.3). Четырехволновое взаимодействие моды EH_{13} основного излучения, мод EH_{11} и EH_{14} второй гармоники и моды EH_{11} ЧВВ-сигнала дает заметный вклад в результирующий сигнал при изменении давления аргона в диапазоне от 0.3 до 0.4 атм, когда выполнено условие фазового согласования для данного процесса (штриховая линия 3 на рис.3).

На рис.4 показаны зависимости мощности ЧВВ-сигнала, генерируемого в наполненных аргоном полых волноводах с различными внутренними диаметрами и длиной ≈ 20 см, от давления аргона p . Как видно на рис.4, максимум ЧВВ-сигнала, связанный с взаимодействием накачки и сигнала в основной моде полого волновода, смещается при увеличении внутреннего диаметра волновода в область низких давлений, приближаясь в случае больших внутренних радиусов к предельному значению, соответствующему процессу ЧВВ в коллимированных пучках. В этом предельном случае максимальная мощность ЧВВ-сигнала, в соответствии с выражениями (4)–(6), достигается при давлении газа в волноводе, равном 0.16 атм (при этом давление когерентная длина $L_{ph} = \pi/\Delta k^g$ становится равной длине волновода). Эти результаты находятся в полном согласии с нашими ожиданиями, основанными на анализе выражений (4)–(6). Максимум ЧВВ-сигнала, который наблюдается при давлении аргона около 0.7 атм для волновода диаметром 152 мкм, может быть объяснен, по аналогии с рассмотренными выше случаями, ЧВВ-процессом, идущим с участием высших волноводных мод накачки и сигнала.

Таким образом, выполненные в данной работе экспериментальное и теоретическое исследования позволили выявить ряд важных свойств нелинейно-оптических взаимодействий в наполненных газом полых волноводах, представляющих интерес с методической точки зрения и открывающих новые возможности для практических приложений полых волноводов в нелинейной оптике, оптике сверхкоротких импульсов и нелинейной спектроскопии. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о существенном влиянии, оказываемом на процессы четырехволнового взаимодействия волноводными модами высших порядков. Данный эффект может быть использован для увеличения энергии коротковолнового излучения, получаемого при нелинейно-оптических взаимодействиях в полых волноводах. Эффекты, связанные с влиянием волноводных мод высших порядков, также необходимо принимать во

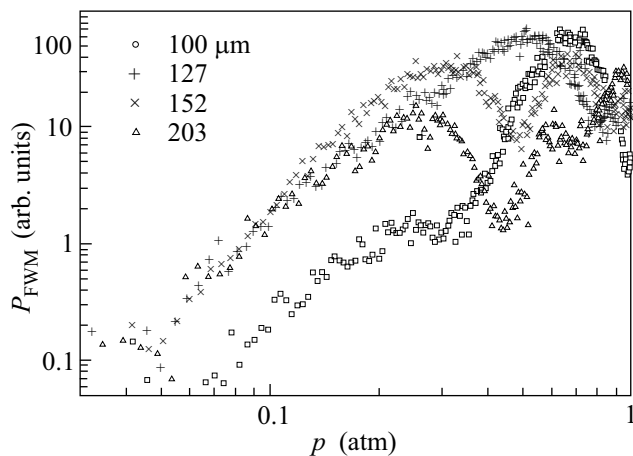


Рис.4. Зависимости мощности ЧВВ-сигнала в наполненных аргоном полых волноводах с различными внутренними диаметрами от давления аргона p . Длина волновода во всех экспериментах составляла примерно 20 см. Внутренний диаметр волновода равен (\square) 100, ($+$) 127, (\times) 152, (Δ) 203 мкм

внимание при оптимизации преобразователей частоты и компрессоров импульсов на основе полых волноводов в условиях, когда возбуждение высших волноводных мод приводит к нежелательным потерям энергии.

Работа выполнена при поддержке гранта # 00-15-99304 Президента Российской Федерации, гранта Российского фонда фундаментальных исследований # 00-02-17567, Федеральной программы "Интеграция" (государственный контракт АО155) и гранта CRDF # RP2-2266.

1. M. Nisoli, S. De Silvestri, and O. Svelto, *Appl. Phys. Lett.* **68**, 2793 (1996).

2. M. Nisoli, S. De Silvestri, O. Svelto et al., *Opt. Lett.* **22**, 522 (1997).
3. C. G. Durfee III, S. Backus, M. M. Murnane, and H. C. Kapteyn, *Opt. Lett.* **22**, 1565 (1997).
4. A. Rundquist, C. G. Durfee III, Z. Chang et al., *Science* **5368**, 1412 (1998).
5. Y. Tamaki, K. Midorikawa, and M. Obara, *Appl. Phys.* **B67**, 59 (1998).
6. C. G. Durfee III, A. Rundquist, Z. Chang et al., in: *International Quantum Electronic Conference (IQEC'98), Postdeadline Papers*, San Francisco, OSA, Washington, 1998, QPD5.
7. E. Constant, D. Garzella, P. Breger et al., *Phys. Rev. Lett.* **82**, 1668 (1999).
8. C. G. Durfee III, A. R. Rundquist, S. Backus et al., *Phys. Rev. Lett.* **83**, 2187 (1999).
9. R. B. Miles, G. Laufer, and G. C. Bjorklund, *Appl. Phys. Lett.* **30**, 417 (1977).
10. A. B. Fedotov, F. Giammanco, A. N. Naumov et al., *Appl. Phys. B* (in press).
11. A. N. Naumov, A. M. Zheltikov, A. B. Fedotov et al., *J. Opt. Soc. Am. B* (in press).
12. N. I. Koroteev and A. M. Zheltikov, *Appl. Phys.* **B67**, 53 (1998).
13. C. G. Durfee III, S. Backus, H. C. Kapteyn, and M. M. Murnane, *Opt. Lett.* **24**, 697 (1999).
14. A. M. Желтиков, Н. И. Коротеев, А. Н. Наумов, *ЖЭТФ* **115**, 1561 (1999).
15. E. A. J. Marcatili and R. A. Schmelzter, *Bell Syst. Tech. J.* **43**, 1783 (1964).
16. M. J. Adams, *An Introduction to optical waveguides*, J. Wiley and Sons, Chichester, 1981.