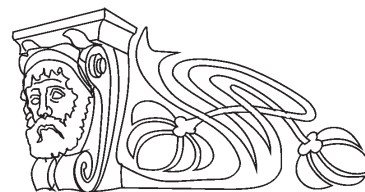




УДК 535.345.1

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УСИЛЕНИЯ В ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

А. С. Пластун<sup>1</sup>, А. И. Конюхов<sup>1</sup>, Л. А. Мельников<sup>2</sup>, Ю. А. Мажирина<sup>2</sup><sup>1</sup> Саратовский государственный университет<sup>2</sup> Саратовский государственный технический университет

Рассчитан коэффициент усиления сигнальной волны при её параметрическом усилении в фотонно-кристаллическом волокне. Структура фотонно-кристаллического волокна оптимизирована для расширения спектрального диапазона, в котором возможно параметрическое усиление. Для волокна с оптимизированными параметрами ширина контура усиления может превышать величину 400 нм. Исследовано изменение спектра параметрического усиления при модуляции поперечных размеров фотонно-кристаллического волокна.

**Ключевые слова:** фотонный кристалл, нелинейные эффекты, параметрическое усиление, численное моделирование, фотонно-кристаллическое волокно, волновод, дисперсия.

### Parametric Gain Calculation in Photonic Crystal Fiber

A. S. Plastun, A. I. Konyukhov,  
L. A. Melnikov, Yu. A. Mazhirina

Signal wave parametric gain was calculated in photonic crystal optical fiber. Photonic crystal fiber structure was optimized for broadband parametric gain. It is shown, that gain bandwidth for photonic-crystal fiber optical parametric amplifier could be more than 400 nm. Spectral changings in parametric gain due to modulation of photonic crystal waveguide cross-section was studied.

**Key words:** photonic crystal, nonlinear effects, parametrical gain, numerical modeling, photonic crystal fiber, waveguide, dispersion.

### Введение

Дисперсия в волоконном световоде имеет определяющее значение при распространении световых импульсов [1]. Использование фотонно-кристаллической оболочки для управления дисперсией позволяет изменять дисперсионные свойства волокна в широком диапазоне параметров [2]. Как правило, фотонно-кристаллическая оболочка волокна образована системой воздушных отверстий. Высокий контраст между показателем преломления стекла воздуха позволяет значительно повысить степень локализации поля в сердцевине волокна, что приводит к усилению нелинейных процессов. Возможность управления как дисперсией, так и нелинейностью является достаточно интересной для задач оптического параметрического усиления. С использованием подходящей накачки можно достичь усиления сигнала и преобразования частоты лазерного излучения в заданном диапазоне [3].

Для эффективного нелинейного преобразования частот необходимо, прежде всего, обеспечить близкий к нулю коэффициент дисперсии второго порядка [1]. Так называемый фотонно-кристаллический волновод (ФКВ) со сверхплоским профилем дисперсии может быть использован для генерации суперконтинуума в телекоммуникационном окне. Регулируя условия синхронизма, для параметрического преобразования частоты можно создать широкий и плоский суперконтинуум, который находится в интервале от 500 до 1750 нм при помощи субнаносекундных источников накачки [4]. Еще одно возможное применение параметрических эффектов в оптических волокнах – это изготовление волоконно-оптических параметрических усилителей для телекоммуникационных систем. Для этой цели необходимо обеспечить достаточно равномерное усиление в окрестности 1550 нм. В результате исследований был представлен параметрический усилитель, использующий широкополосное волокно диаметром 200 нм с высокой нелинейностью [5]. Для того чтобы сгладить усиление без использования фильтров, используют как мультисегментные [6], так и параметрические усилители с двойной накачкой [7]. В этой статье рассмотрим коротковолновый параметрический усилитель с одинарной накачкой на основе ФКВ из оптического стекла. Волокна, изготовленные из оптического стекла, обладают на порядок большей нелинейностью [6], чем сопоставимые волокна, изготовленные из плавленого кварца. Большим эффективным коэффициентом нелинейности (порядка  $1100 \text{ Вт}^{-1} \text{ км}^{-1}$  на длине волны 1550 нм) обладают дырчатые фотонно-кристаллические волноводы (ФКВ) на основе стекла, легированного оксидом висмута [8]. Высокая нелинейность позволяет создать параметрический усилитель при помощи короткого отрезка волокна. Использование небольших отрезков волокна позволяет избежать сильного затухания оптического сигнала, поскольку оптическое стекло обладает достаточно сильными потерями. Например, потери в стекле



SF6 (Schott) на длине волны 1550 нм составляют величину порядка 1 дБ/м [9]. При расчете дисперсионных характеристик ФКВ предполагалось, что волновод изготовлен из стекла ТФ-10 (тяжелый флинт) [10]. Дисперсионные характеристики такого стекла аналогичны характеристикам стекла SF6 (Shott). В работе рассматриваются эффекты, связанные с параметрическим усилением оптического сигнала.

### Дисперсионные характеристики и спектр усиления

При расчетах использовалась векторная численная модель, основанная на методе плоских волн для суперячейки [7]. На рис. 1 приведена схема ячейки. Центральная область формирует дефект с высоким показателем преломления. Постоянная распространения  $\beta$  [1] основной моды рассчитывается из векторных уравнений Максвелла для магнитного поля [11]. На рис. 2, а показаны результаты расчета коэффициентов дисперсии 2-го, 3-го и 4-го порядков. Коэффициент  $\beta_2$  связан с дисперсионным параметром  $D$  ( $\text{пс} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$ ) по формуле

$$D = -\omega^2 \beta_2(\omega) / (2\pi c), \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света. На рис. 2, б показана зависимость эффективного коэффициента нелинейности  $\gamma$  [1] от длины волны:

$$\gamma(s) = \omega n_2 / (c A_{\text{eff}}(s)), \quad (2)$$

где нелинейный показатель преломления стекла TF10  $n_2 = 2.2 \times 10^{-19} \text{ м}^2 \text{В}^{-1}$ , а  $A_{\text{eff}}$  – эффективная площадь основной моды [1].

В приближении отсутствия потерь параметрическое усиление может быть описано формулой

$$G(L) = \frac{P_s(L)}{P_s(0)} = 1 + \left( \frac{\gamma P_p}{g} \sin h(gL) \right)^2. \quad (3)$$

Здесь  $P_p$ ,  $P_s$  – мощность волны накачки и сигнальной волны соответственно,  $L$  – длина волокна,  $g$  – параметр усиления, который можно описать следующей формулой:

$$g^2 = (\gamma P_p)^2 - (\Delta\beta + 2\gamma P_p)^2 / 4, \quad (4)$$

где  $\Delta\beta = \beta(\omega_s) + \beta(\omega_i) - 2\beta(\omega_p)$ .

Ширина полосы усиления в оптическом параметрическом усилителе (ОПУ), настроенном для работы в широком диапазоне, составляет порядка  $\omega_b \sim (\gamma P_p / \beta_4)^{1/4}$ , где  $\beta_4$  – коэффициент дисперсии 4-го порядка. Для увеличения полосы усиления

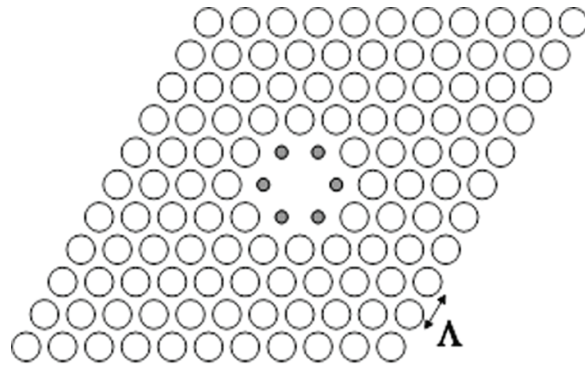


Рис. 1. Поперечное сечение ФКВ. Штрихованными окружностями показаны воздушные отверстия радиуса  $R_1$ , другие окружности показывают воздушные отверстия радиуса  $R_2$ .  $\Lambda$  – период структуры

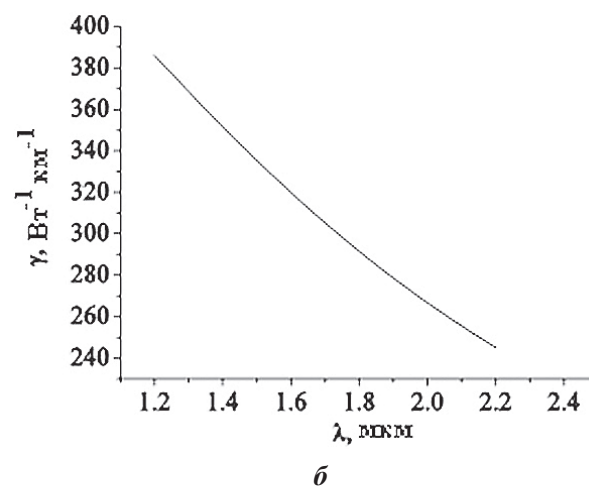
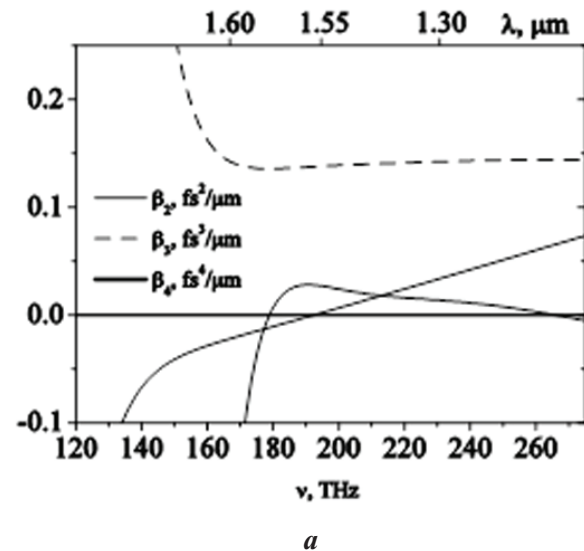


Рис. 2. Дисперсионные характеристики волокна: а –  $\beta_m = d_m \beta / d\omega_m |_{\omega=\omega_p}$ ; б – нелинейный коэффициент  $\gamma$  в зависимости от длины волны.  $L = 1.0498 \text{ мкм}$ ,  $R_1 = 0.174 \text{ мкм}$ ,  $R_2 = 0.406 \text{ мкм}$



необходимо уменьшить среднее квадратичное значение  $\beta_4$ :

$$RMS = \frac{1}{\omega_1 - \omega_2} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \beta_4(\omega)^2 d\omega, \quad (5)$$

где  $\omega_1 = 170$  ТГц,  $\omega_2 = 220$  ТГц. Среднее квадратичное значение было оптимизировано путем изменения периода структуры и радиусов отверстий  $R_1$  и  $R_2$ .

Параметрическое усиление очень чувствительно к изменениям дисперсии групповой скорости. Усиление максимально вблизи частоты  $\omega_{ZD}$ , соответствующей нулю дисперсии групповой скорости. Отклонения от  $\omega_{ZD}$  могут привести к уменьшению усиления. Для масштабирования размера структуры введем параметр  $s$ :

$$A(s) = sA, \quad R^{(s)}_1 = sR_1, \quad R^{(s)}_2 = sR_2. \quad (6)$$

Для изучения дисперсии и нелинейных характеристик ФКВ постоянная распространения  $\beta(\omega, s)$  была аппроксимирована функцией

$$\beta(\omega, s) = \left( \sum_{m=0}^3 a_m(s) \omega^m + \sum_{n=1}^6 b_n(s) \omega^{-n} \right) \frac{\omega}{c}. \quad (7)$$

Зависимость коэффициентов  $a_m(s)$ ,  $b_n(s)$  от параметра  $s$  аппроксимируется полиномом 6-го порядка. Коэффициент нелинейности  $\gamma = \gamma(s)$  выражается полиномом 3-го порядка. Зависимость частоты от коэффициента  $\gamma$  не бралась в расчет. В отличие от разложения  $\beta(\omega, s)$  в ряд Тейлора, формула (7) обеспечивает лучшую аппроксимацию в широком диапазоне частот.

Параметрическое усиление возможно при выполнении условий фазового синхронизма между волной накачки и сигнальной волной. На рис. 3, а и 3, б показана фазовая расстройка и соответствующая величина усиления слабого сигнала. Длина волны излучения накачки  $\lambda_p = 1.55$  мкм. Изменение масштабного фактора для рис. 3 составляло величину 1%. Несмотря на изменение масштабных размеров, усиление остается ненулевым в диапазоне длин волн  $1.4 \text{ мкм} < \lambda < 1.7 \text{ мкм}$ . Для  $s = 1.0175$  полоса усиления становится широкой. Однако диапазон изменения геометрических размеров волокна, при котором возможно усиление в районе  $\lambda = 1.2$  мкм и  $\lambda = 2.15$  мкм, достаточно мал. В рассмотренных режимах дисперсия групповой скорости остается аномальной. С увеличением множителя  $s$  от 1.015 до 1.025 коэффициент дисперсии 2-го порядка на длине волны накачки  $\beta_2(\lambda_p)$  уменьшается от  $-0.08 \text{ пс}^2/\text{км}$  до  $-0.8 \text{ пс}^2/\text{км}$ .

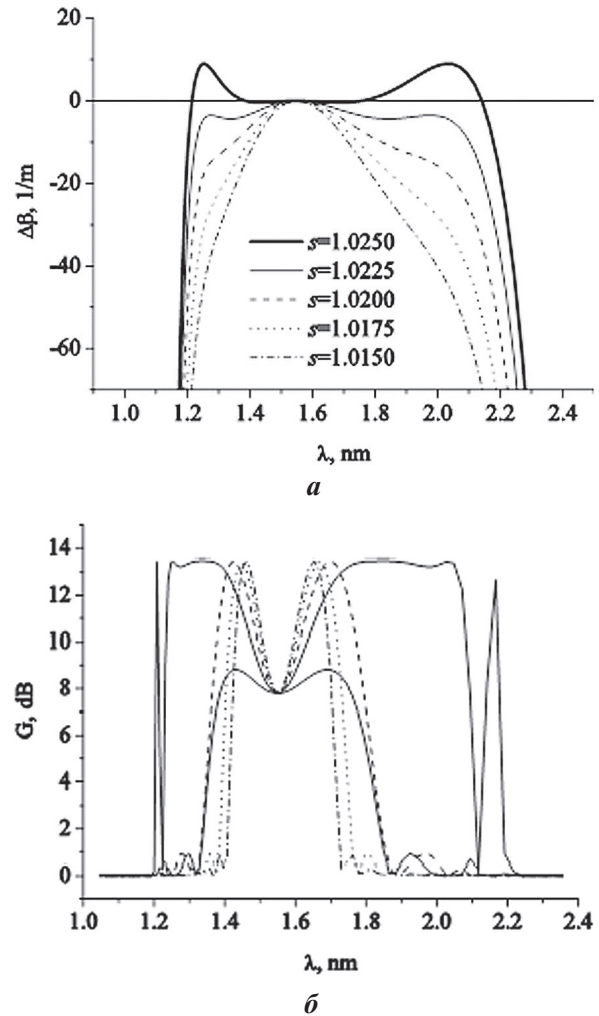


Рис. 3. Линейная фазовая расстройка (а) и спектр усиления (б), полученные в волокне с длиной  $L = 1$  м, энергией накачки  $P_p = 10$  Вт, длиной волны накачки  $\lambda_p = 1.55$  мкм. Период структуры и радиусы отверстий даны масштабным фактором  $s$

## Выводы

На основе моделирования параметрического усиления в ФКВ из оптического стекла путем подбора периода структуры и радиусов отверстий минимизировано значение дисперсии 4-го порядка в диапазоне  $0.4 \text{ мкм} - 1.6 \text{ мкм}$ . Для расширения спектрального диапазона параметрического усиления предложено использовать структуру, имеющую центральный ряд воздушных отверстий с уменьшенным диаметром. ФКВ с оптимизированными параметрами позволяет усиливать оптические сигналы на длинах волн  $1.2 - 2.1 \text{ мкм}$ .

## Список литературы

1. Аргавал Г. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996. 323 с.



2. Желтиков А. Да будет белый свет : генерация суперконтинуума сверхкороткими лазерными импульсами // Успехи физ. наук. 2006. Т. 176. С. 623.
3. Nagel J., Temyanko V., Dobler J., Dianov E., Biriukov A. High Power, Narrow Linewidth Continuous Wave Raman Amplifier at 1.27  $\mu\text{m}$  // IEEE Photonics Technology Letters. 2011. Vol. 23, № 9. P. 585.
4. Wadsworth W. J., Joly N., Knight J., Birks T. A., Biancalana F. Supercontinuum and four-wave mixing with Q-switched pulses in endlessly single-mode photonic crystal fibres // Opt. Express. 2004. Vol. 12. P. 299.
5. Ho M. C., Uesaka K., Marhic M. E., Akasaka Y., Kazovsky L. 200-nm-bandwidth fiber optical amplifier combining parametric and Raman gain // J. Lightwave Technol. 2001. Vol. 19. P. 977.
6. Marhic M. E., Yang F. S., Ho M. C., Kazovsky L. Large cross-phase modulation and four wave mixing in tellurite EDFAs // J. Lightwave Technol. 1999. Vol. 17. P. 210.
7. Broeng J., Mogilevstev D., Barkou S. E., Bjarklev A. Photonic crystal fibers : A new class of optical waveguides // Opt. Fibre Technol. 1999. Vol. 5. P. 305.
8. Ebendorff-Heidepriem H., Petropoulos P., Asimakis S., Finazzi V., Moore R. Bismuth glass holey fibers with high nonlinearity // Opt. Express. 2004. Vol. 12. P. 5082.
9. Ravi Kanth Kumar V. V., George A. K., Reeves W. H., Knight J., Russell P. Tellurite photonic crystal fiber // Opt. Express. 2002. Vol. 10. P. 1520.
10. Каталог бесцветного оптического стекла. URL: <http://lzos.ru/content/view/77/29>.
11. Joannopoulos J., Johnson S., Winn J., Meade R. Photonic Crystals-Molding the Flow of Light. 2nd ed. Princeton NJ : Princeton University Press, 2008. 305 p.

УДК 535.345.1

## НЕСТАЦИОНАРНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ НУТАЦИЯ В ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ ПРОТЯЖЁННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКАХ В УСЛОВИЯХ РЕЗОНАНСНОГО САМОВОЗДЕЙСТВИЯ

И. Л. Пластун, А. Г. Мисюрин

Саратовский государственный технический университет  
E-mail: [inna\\_pls@mail.ru](mailto:inna_pls@mail.ru)



На основе численного моделирования был исследован процесс нестационарной оптической нутации, возникающей при повышении амплитуды модуляции частоты протяженного лазерного пучка в случае, когда несущая частота лазерного сигнала близка к частоте атомного перехода. Рассмотрено взаимовлияние оптической нутации и эффектов резонансного самовоздействия в условиях насыщения поглощения и дисперсии.

**Ключевые слова:** оптическая нутация, нестационарные когерентные эффекты, резонансное самовоздействие, распространение лазерного пучка, частотная модуляция, отклик среды, фокусировка и дефокусировка пучка.

### Optical Transient Nutation in Frequency-modulated cw Laser Beams in Resonant Self-Action Conditions

I. L. Plastun, A. G. Misurin

On the basis of numerical simulations an optical transient nutation is investigated. This effect is developed on high modulation amplitude of frequency-modulated cw laser beam propagating in resonance conditions. At modulation periods comparable with the atomic relaxation times the time dependence of the output intensity exhibits the combined manifestations of optical nutation and resonance self-action.

**Key words:** optical transient nutation, resonance self-action, laser beam propagation, frequency modulation, medium response, beam focusing and defocusing.

### Введение

Эффект нестационарной оптической нутации был предсказан и неоднократно наблюдался в двухуровневых нелинейно-оптических системах с однородно уширенными переходами при резком включении или выключении резонансного возбуждающего поля (см., например, [1]). Он сводится к тому, что при определённых условиях, когда частота Раби превышает скорость релаксации поляризации, коэффициент пропускания возбуждённой среды приближается к стационарному значению, проходя этап затухающих колебаний, что приводит к затухающим осцилляциям возбуждающего лазерного сигнала. Как правило, экспериментальное наблюдение оптической нутации производится на основе техники импульсного штарковского переключения частоты,