

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В ОДНОМЕРНОМ ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ ИЗ ИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА¹

А.М. Герасимов², Н.Д. Кундикова³, Ю.В. Микляев⁴,
Д.Г. Пихуля⁵, М.В. Терпугов⁶

Проведено исследование генерации второй гармоники в одномерном фотонном кристалле. Выполнен расчет записи $\chi^{(2)}$ -решетки в периодической системе «воздух-стекло» с последующей генерацией второй гармоники в такой структуре. Рассчитан эффективный коэффициент преобразования излучения во вторую гармонику при различных длинах волн первой гармоники. *Ключевые слова:* фотонный кристалл, генерация второй гармоники (ГВГ), оптическая нелинейность.

Введение

В настоящее время большой интерес вызывают работы по генерации второй гармоники в изотропных средах. Традиционно используемые для удвоения частоты оптического излучения нелинейные материалы достаточно дороги и сложны в обработке, хотя и позволяют преобразовывать излучение во вторую гармонику с эффективностью порядка 50–60 %, тогда как изотропные среды позволяют создавать структуры и объекты практически любой сложности форм и структуры. Актуальность этой темы обусловлена возможностью изготовления периодических структур из подобных изотропных сред, например, для ГВГ в одномерном фотонном кристалле. ГВГ в одномерном фотонном кристалле достаточно хорошо изучена, но лишь для нелинейных сред. Так, в 2003 году была получена ГВГ в одномерном фотонном кристалле с эффективностью преобразования излучения во вторую гармонику около 1 % [1]. Кроме того, была рассчитана эффективность преобразования излучения во вторую гармонику для нелинейного фотонного кристалла. Эффективность преобразования составила 10^{-2} – 10^{-3} [2].

ГВГ в изотропных средах затруднена из-за отсутствия в таких средах нелинейности второго порядка или $\chi^{(2)}$, а также из-за трудности выполнения условия фазового синхронизма, которое в случае одномерного фотонного кристалла выполняется автоматически. Однако в изотропных телах возможна эффективная ГВГ оптического излучения. Впервые ГВГ в изотропной среде наблюдалась в 1981 году, когда случайно обнаружилась ГВГ излучения неодимового лазера в германо-силикатном волокне [3, 4]. При этом эффективность преобразования была невелика и составила около 10^{-8} . Далее, в 1987 году был предложен механизм, объясняющий возникновение квадратичной нелинейности в изотропных средах [5]. Далее, в 1987 году [6] была предложена теория, согласно которой в волокне при распространении излучения первой и второй гармоник происходит упорядоченная пересориентация дефектов, имеющих $\chi^{(2)} \neq 0$, что впоследствии вызывает ГВГ при облучении только первой гармоникой. Для проверки этой гипотезы был проведен эксперимент с оптическим волокном, в котором была достигнута эффективность преобразования излучения во вторую гармонику 0,03 %.

Запись $\chi^{(2)}$ решетки в одномерном фотонном кристалле

¹ Исследование выполнено при частичной поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14 В37 21 1633

² Герасимов Александр Михайлович – аспирант, кафедра оптики и спектроскопии, Южно-Уральский государственный университет
E-mail: alexandro.gerasimov@gmail.com

³ Кундикова Наталья Дмитриевна – доктор физико-математических наук, профессор, зав. лабораторией нелинейной оптики Института электрофизики РАН, декан физического факультета, Южно-Уральский государственный университет
E-mail: kundikovan@susu.ac.ru

⁴ Микляев Юрий Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент, с.н.с. лаборатории нелинейной оптики Института электрофизики РАН, кафедра оптики и спектроскопии, Южно-Уральский государственный университет
E-mail: miklyaev@mail.ru

⁵ Пихуля Денис Григорьевич – ассистент, м.н.с. лаборатории нелинейной оптики Института электрофизики РАН, кафедра оптики и спектроскопии, Южно-Уральский государственный университет
E-mail: denisp@land.ru

⁶ Терпугов Михаил Владимирович – магистр, Южно-Уральский государственный университет
E-mail: mterpugov@gmail.com

Согласно работе [5], нелинейность второго порядка может появиться в изотропной среде в случае воздействия на нее полем с неравным нулю средним кубом поля, $\langle E^3 \rangle \neq 0$. Если подвергнуть изотропную среду одновременно излучению первой и второй гармоники, то суммарное поле как раз будет иметь неравный нулю средний куб поля и в такой среде будет записана $\chi^{(2)}$ решетка:

$$\chi^{(2)}(R) = \alpha E_{2\omega}(R) E_{\omega}^*(R) E_{\omega}^*(R), \quad (1)$$

где коэффициент α , определяется экспериментально и много меньше единицы.

Был сделан расчет записи такой решетки в одномерном фотонном кристалле с помощью программного пакета МЕЕР [7]. Была задана структура одномерного фотонного кристалла «стекло-воздух» с показателем преломления стекла 1,5. Размер воздушных и стеклянных промежутков соответствовал и для излучения с длиной волны 1,064 мкм (рис. 1). На рис. 1 светлые промежутки соответствуют стеклу с показателем преломления 1,5, черные – воздуху.

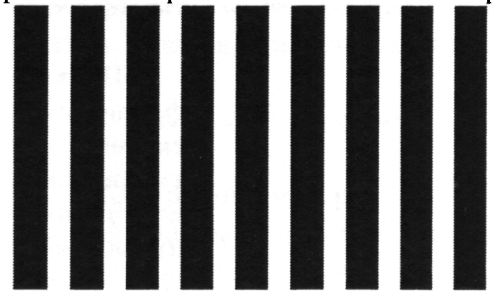


Рис. 1. Одномерный фотонный кристалл стекло-воздух

Для наведения нелинейного коэффициента второго порядка в указанную структуру запускалось излучение двух длин волн – первой и второй гармоники. Пример распространения излучения для разных длин волн представлен на рис. 2.

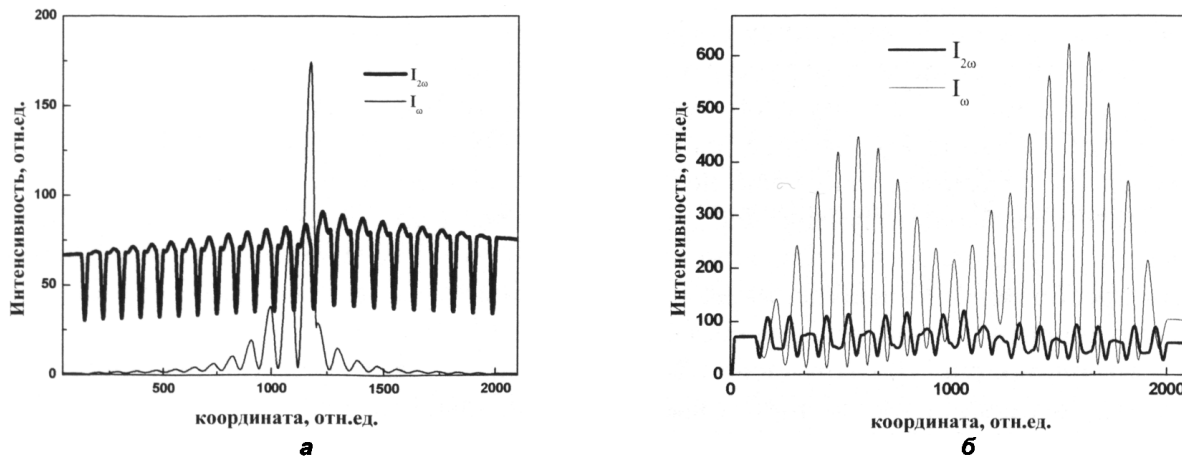


Рис. 2. Распространение излучения первой и второй гармоники в одномерном фотонном кристалле, длина волны источника: а) 1,060 мкм и 0,530 мкм б) 1,266 мкм и 0,633 мкм

Из рис. 2 хорошо видно, как происходит в фотонном кристалле распространение излучения с длинами волн, отличающимися в два раза.

Таким образом, в данной структуре записывается решетка нелинейности второго порядка (1) с коэффициентом $\alpha = 0,01$ (рис. 3).

На этом рисунке видно, что $\chi^{(2)}$ решетка формируется неравномерно по всей протяженности фотонного кристалла и равна нулю в воздушных промежутках, так как там возникновение $\chi^{(2)}$ при больших мощностях входного излучения возможно, но кратковременно и носит флуктуационный характер.

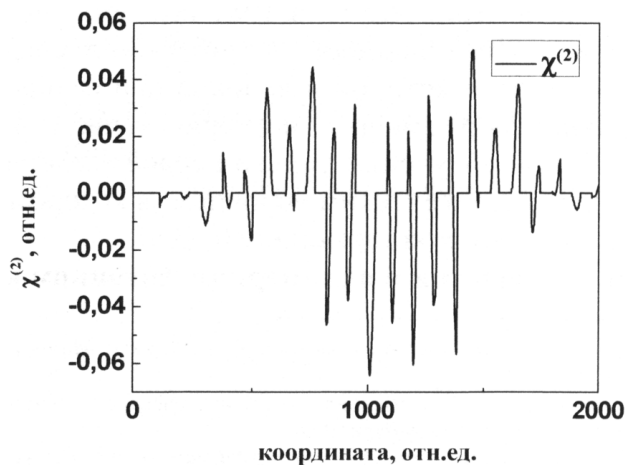


Рис. 3. $\chi^{(2)}$ решетка в одномерном фотонном кристалле при записи длинами волн 1,226 мкм и 0,613 мкм

Генерация второй гармоники в одномерном фотонном кристалле

После того, как в фотонном кристалле сформирована $\chi^{(2)}$ решетка, в данную структуру запускается излучение первой гармоники единичной интенсивности и на выходе из структуры имеет место ГВГ, эффективность которой можно оценить по величине пика, соответствующего второй

гармоники. На рис. 4, а–г показана картина такой генерации для различных длин волн, указанных на графиках.

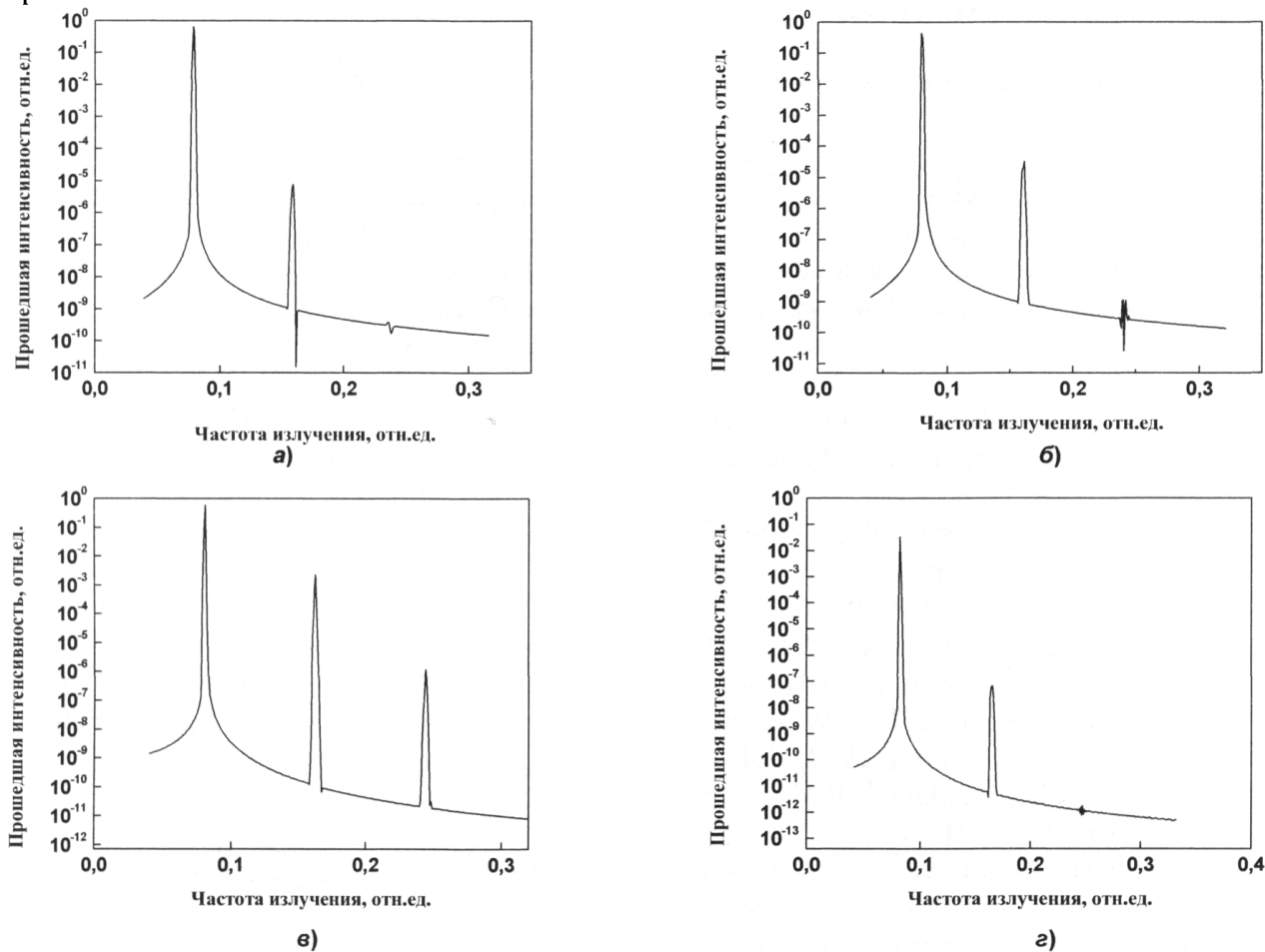


Рис. 4. ГВГ в одномерном фотонном кристалле при длине волны: а) 1266 нм, б) 1246 нм, в) 1226 нм г) 1206 нм

Как видно из рис. 4, эффективность ГВГ получается различной при различных длинах волн падающего излучения первой гармоники. При длине волны излучения первой гармоники 1,226 мкм мы видим генерацию не только второй, но и третьей гармоники, которая возникла из-за суммирования частот первой и второй гармоники. В этом случае эффективность ГВГ составила 0,2 %.

Таким образом, проведено моделирование процесса записи $\chi(2)$ решеток в одномерном фотонном кристалле с последующей ГВГ при облучении излучением с различными длинами волн. Получена ГВГ для длины волны 1,226 мкм с эффективностью преобразования 0,2 %.

Литература

1. Zaporozhchenko, R.G. Relation between Efficiency of Second Harmonic Generation and Spectral Properties of a One-Dimensional Photonic Crystal / R.G. Zaporozhchenko // Optics and Spectroscopy. – 2003. – Vol. 95, № 6. – P. 976–982.
2. Multiple wavelength second-harmonic generation in one-dimensional nonlinear photonic crystals / L.M. Zhao, C. Li, Y.S. Zhou, F.H. Wang // J. Opt. Soc. Am. B. – 2008. – Vol. 25, № 12. – P. 2010–2014.
3. Sasaki, Y. Phase-matched sum-frequency light generation in optical fibers / Y. Sasaki, Y. Ohmori // Appl. Phys. Lett. – 1981. – Vol. 39, № 6. – P. 466–468.
4. Ohmori, Y. Two-Wave Sum-Frequency Light Generation in Optical Fibers / Y. Ohmori, Y. Sasaki // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1982. – Vol. 18, № 4. – P. 758–762.
5. Баранова, Н.Б. Расширение голографии на многочастотные поля / Н.Б. Баранова, Б.Я. Зельдович // Письма в ЖЭТФ. – 1987. – Т. 45, № 12. – С. 562–565.
6. Stolen, R.H. Self-organized phase-matched harmonic generation in optical fibers / R.H. Stolen, H.W.K. Tom // Optics Letters. – 1987. – Vol. 12, № 8. – С. 585–587.
7. <http://ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/Meep>

EFFICIENCY OF SECOND HARMONIC GENERATION IN ONE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL FROM ISOTROPIC MATERIAL

A.M. Gerasimov¹, N.D. Kundikova², Yu.V. Miklyaev³, D.G. Pikhulya⁴, M.V. Terpugov⁵

Investigation of second-harmonic generation in one-dimensional photonic crystal was carried out. The calculation of the recording of the grating $\chi(2)$ in a periodic system consisted of layers of air and glass and is followed by second-harmonic generation was performed. The effective factor of transformation of radiation into the second harmonic at different wavelengths of the first harmonic was estimated.

Keywords: photonic crystal, second harmonic generation (SHG), optical nonlinearity.

References

1. Zaporozhchenko R.G. Relation between Efficiency of Second Harmonic Generation and Spectral Properties of a One-Dimensional Photonic Crystal. *Optics and Spectroscopy*. 2003. Vol. 95, no. 6. pp. 976–982.
2. Zhao L.M., Li C., Zhou Y.S., Wang F.H.. Multiple wavelength second-harmonic generation in one-dimensional nonlinear photonic crystals. *J. Opt. Soc. Am. B*. 2008. Vol. 25. Issue 12, pp. 2010–2014. [<http://dx.doi.org/10.1364/JOSAB.25.002010>]
3. Sasaki Y., Ohmori Y. Phase-matched sum-frequency light generation in optical fibers. *Appl. Phys. Lett.* 1981. Vol. 39, no. 6. pp. 466–468.
4. Ohmori Y., Sasaki Y. Two-Wave Sum-Frequency Light Generation in Optical Fibers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1982. Vol. 18, no. 4. pp. 758–762.
5. Baranova N.B., Zel'dovich B.Ya. Extension of holography to multifrequency fields. *JETP Letters*. Vol. 45. Issue 12. p. 717.
6. Stolen R.H., Tom H.W.K. Self-organized phase-matched harmonic generation in optical fibers. *Optics Letters*. 1987. Vol. 12, no. 8. pp. 585–587.
7. <http://ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/Meep>

Поступила в редакцию 21 июня 2013 г.

¹ Gerasimov Alexander Michaylovich is Post-graduate Student, Optics and Spectroscopy Department, School of Physics, South Ural State University

E-mail Alexandro.gerasimov@gmail.com

² Kundikova Nataliya Dmitrievna is Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Nonlinear Optics Laboratory of IFF RAS, Dean of Physics Faculty, South Ural State University

E-mail kundikovand@susu.ac.ru

³ Miklyaev Yuriy Vladimirovich is Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Senior Staff Scientist of the Nonlinear Optics Laboratory of IEF RAS, Optics and Spectroscopy Department, South Ural State University

E-mail miklyaev@mail.ru

⁴ Pikhulya Denis Grigorievich is Assistant Junior Research Fellow of the Nonlinear Optics Laboratory of IEF RAS Department of Optics and Spectroscopy, South Ural State University

E-mail denisp@land.ru

⁵ Terpugov Mikhail Vladimirovich is Master Student, South Ural State University

E-mail mterpugov@gmail.com