Письмо в редколлегию

О последовательной генерации третьей гармоники в кристаллах с неоднородной доменной структурой

О.И. Сабиров, У.К. Сапаев*

Ташкентский государственный технический университет им.И. Каримова, ул. Университетская 4, 100095 Ташкент, Узбекистан

Получена 21.12.2021, revised 28.08.2022

*Corresponding author: e-mail usapaev@gmail.com, Phone: +998 93 551 82 31, Fax: +998 71 246 4600

Численным методом исследована последовательная генерация 3-ей гармоники в квадратичных нелинейно-оптических кристаллах с неоднородной доменной структурой. Рассмотрен случай, когда толщины доменов апериодического кристалла принимают значения d_1 либо d_2, где d_1 и d_2 равны когерентной длине взаимодействий $2\omega=\omega+\omega$ и $3\omega=2\omega+\omega$ соответственно. Показано, что генерацию 3-ей гармоники можно эффективно реализовать при любых значениях длины волны основной гармоники. Для этого развит алгоритм, работающий на основе метода Монте-Карло.

Ключевые слова: нелинейный фотонный кристалл, генерация второй гармоники, генерация третьей гармоники, связанные трёхчастотные взаимодействия, кристаллы со случайной доменной структурой.

The sequential generation of the 3-rd harmonic in quadratic nonlinear optical crystals with an inhomogeneous domain structure has been studied by a numerical method. The case is considered when the thicknesses of the domains of nonperiodic crystal take the values either d_1 or d_2, where d_1 and d_2 are equal to the coherent length of interactions $2\omega=\omega+\omega$ and $3\omega=2\omega+\omega$, respectively. It is shown that the generation of the 3-rd harmonic can be effectively implemented for any values of the wavelength of the fundamental harmonic. To do this, an algorithm, based on the Monte Carlo method, is developed.

Keywords: nonlinear photonic crystal, second harmonic generation, third harmonic generation, coupled three-frequency interactions, crystals with random domain structure.

DOI: PACS number(s): 00.00.Xx, 00.00.Xx Copyright line will be provided by the publisher

I. Введение

В периодических кристаллах можно одновременно реализовать два связанных трехчастотных взаимодействия типа $3\omega=2\omega+\omega$ и $2\omega=\omega+\omega$ (см., н-р., [1] и ссылки в ней). Такой процесс преобразования частоты не может быть реализован в объемных нелинейно оптических кристаллах, поскольку для этого должно выполняться условие $n(\omega)=n(2\omega)=n(3\omega)$ для показателя преломления, что невозможно из-за дисперсионных свойств почти любых сред.

Тем не менее, периодические кристаллы позволяют решить эту проблему в определенных условиях. Н-р, при определенных значениях длины волны накачки с частотой ω возможен первый [2] или разный порядок квазисинхронизма [3] одновременно для этого связанного $3\omega=2\omega+\omega$ и $2\omega=\omega+\omega$ процесса преобразования частоты. Кроме того, кристаллы со случайными доменными структурами [4], или с доменами, сконструированными по правилам числа Фибонначи [5], или с пространственными неоднородностями доменов и их периодов [6] также позволяют эффективно

реализовать этот процесс преобразования частоты. К настоящему времени этот процесс преобразования частоты хорошо изучен при различных условиях и конфигурациях.

Хотя процессу преобразования частоты уделялось внимание на начальном этапе развития нелинейной оптики [7, 8], но с развитием технологии выращивания нелинейных фотонных кристаллов (НФК) [9] в настоящее время интерес к ним снова значительно возрос [1]. Следует отметить, что предыдущие работы, в основном, концентрировались на получении эффективной генерации 2-ой либо 3-ей гармоники. В частности, было показано, что для эффективной реализации генерации 3-ей гармоники необходимо оптимальное соотношение амплитуд основной и 2-ой гармоник на входе в периодический кристалл [2], или НФК со случайными размерами доменов [4], или НФК с оптимальным соотношением нелинейности связи при использовании 2-ой гармоники в качестве накачки [10-13]. Несмотря на большое число опубликованных работ в этом направлении пока не развиты методы, применимые для любых значений длины волны лазерного излучения (кроме [4, 6]). В большинстве этих работ требуется строго определенная длина волны лазерного излучения и соответственно толщина доменов.

В настоящей работе мы сообщаем метод, который применим для любых значений длины волны лазерного излучения, даже если квазисинхронное условие не выполняется одновременно для генерации 2-ой и 3-ей гармоники.

В предлагаемом методе НФК состоит из доменов, толщины которых равны d_1 либо d_2; где $d_1 = l_{cog1}$ – когерентная длина взаимодействия и 2ω=ω+ω, $d_2 = l_{cog2}$.– когерентная длина взаимодействия 3ω=2ω+ω.

Здесь $l_{cog1} = \pi / |\Delta k_1|;$ $l_{cog2} = \pi / |\Delta k_2|;$

$\Delta k_1 = k_2 - 2k_1;\ l_{cog2} = \pi / |\Delta k_2|;\ \Delta k_2 = k_3 - k_2 - k_1$

То есть НФК имеет только два типа по толщине доменов. При эффективной реализации генерации 3-ей гармоники метод Монте-Карло позволяет определить “правильное” располо-жение доменов по длине апериодического кристалла (мы дали ниже методику алгоритма Монта Карло). Схематическое изображение представленного метода показано на рис. 1.

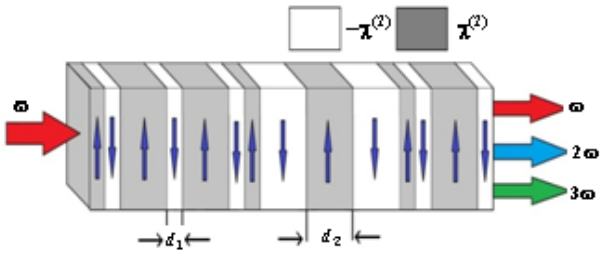


Рисунок 1. Схематический вид НФК, состоящего из доменов с двумя разными длинами d_1 и d_2

II. Теоретическая часть

Параметрические взаимодействие волн кратных частот будем анализировать, пользуясь системой уравнений для медленно меняющихся амплитуд [1-6]:

$$\begin{aligned}
\frac{d\,A_1}{d\,z} &= -i\gamma_2\delta(z)A_1^* A_2 \exp(-i\Delta k_2 z) - \\
&\quad -i\gamma_3\delta(z)A_2^* A_3 \exp(-i\Delta k_3 z) \\
\frac{d\,A_2}{d\,z} &= -i2\gamma_3\delta(z)A_1^* A_3 \exp(-i\Delta k_3 z) - \\
&\quad -i\gamma_2\delta(z)A_1^2 \exp(i\Delta k_2 z) \\
\frac{d\,A_3}{d\,z} &= -i3\gamma_3\delta(z)A_1 A_2 \exp(i\Delta k_3 z)
\end{aligned} \qquad (1)$$

где A_1, A_2 и A_3 – соответственно комплексные амплитуды ω, 2ω и 3ω волн; $\Delta k_1 = k_2 - 2k_1$; $\Delta k_2 = k_3 - k_2 - k_1$ – фазовые расстройки взаимодействующих волн соответственно для взаимодействий 2ω=ω+ω и 3ω=2ω+ω; k_1, k_2, k_3 – волновые числа ω, 2ω и 3ω волн; γ_1, γ_2, и γ_3 – коэффициенты нелинейной связи; σ(z) – знакопеременная единичная функция с периодом d_1 и d_2.

Известно, что метод Монте-Карло основан на расчете случайных процессов. В нашем случае таковым является расположение доменов толщиной d_1 и d_2 по длине кристалла. Для определения оптимальной конфигурации НФК мы генерировали случайные числа 0 или 1, которые определяли расположение доменов d_1 и d_2. Зная порядок расположения доменов, мы вычислили систему уравнений (1) численным методом. Если в конце кристалла эффективность 3-ей гармоники наибольшая, то, следовательно, выбрана оптимальная конфигурация НФК. Расчет повторяли до тех пор, пока не был достигнут требуемый КПД 3-ей гармоники.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

III. Анализ результатов

Выберем безразмерные параметры для системы уравнений (1): $d_1 = 0.01$, $d_2 = 0.5d_1$, $\gamma_2=\gamma_3=\gamma=1$, $\Delta k_2=\pi/d_1$, $\Delta k_3=\pi/d_2$, $A_1(z=0)=1$, $A_2(z=0)=0$, $A_3(z=0)=0$. Общее число доменов было выбрано равным 10000 (5000 для d_1 и 5000 для d_2) в начале цикла алгоритма. Результаты расчетов по предложенному алгоритму, основанному на методе Монте-Карло, показаны на рис. 2.

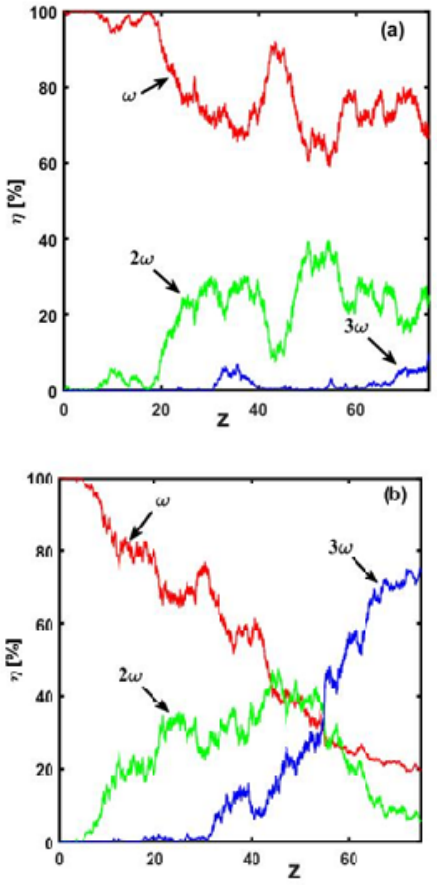


Рисунок 2. Результаты расчетов по предложенному методу: (a) результаты первого цикла, (b) результаты последнего цикла.

Как видно из рис. 2, в первом цикле расчетов эффективность 3-ей гармоники практически составляет несколько процентов. После выполнения других циклов по предложенному алгоритму эффективность 3-ей гармоники достигает значения 75% (мы ограничились расчетами на этом уровне). При этом алгоритм быстро сходится.

Далее мы исследовали динамику энергообмена между взаимодействующими волнами для реального случая эксперимента (рис. 3). Для этого выбрали следующие условия эксперимента: кристалл ниобат лития, длина волны основного излучения λ=1.52 мкм и интенсивность 1 ГВт/см^2, общее количество доменов N=800, взаимодействие ее-е (d_{33}=23 пм/В^2), т.е. все взаимодействующие волны имели не обыкновенную поляризацию. (Здесь мы можем вычислить периоды доменов d_1≈9.07 мкм, d_2≈ 3.23 мкм для взаимодействий и 2ω=ω+ω и 3ω=2ω+ω соответственно).

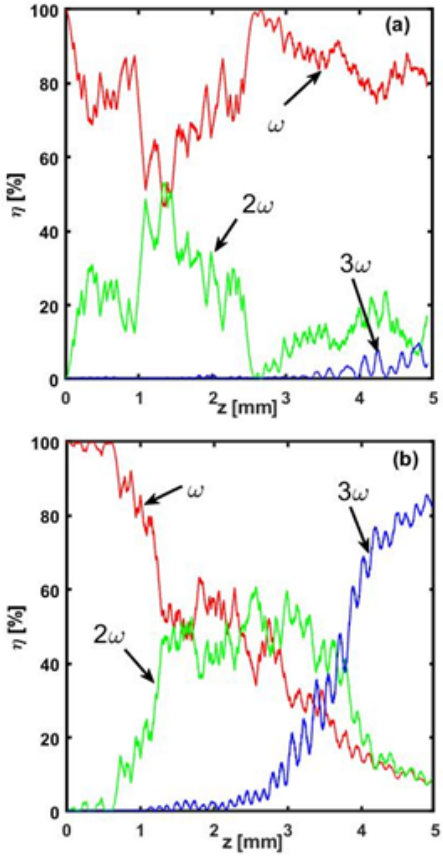


Рисунок 3. Результаты, полученные для реального случая эксперимента в первом (a) и последнем (b). цикле алгоритма: взаимодействие ее-е, апериодический кристалл $LiNbO_3$.

Получено, что представленный метод дает хорошие результаты даже для реального случая эксперимента. Полученные результаты для случая апериодически поляризованного кристалла ниобата лития показаны на рис. 3. В первом цикле алгоритма (рис. 3а) значение КПД 3-ей гармоники составляет не более ~5%. В конце цикла эффективность 3-ей гармоники достигает величины порядка ~80%.

IV. Заключение

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

Численным методом исследован процесс одновременного возбуждения генерации 2-ой и 3-ей гармоник в поле накачки с частотой ω в кристаллах с нерегулярной доменной структурой. Рассмотрен случай, когда толщины доменов равны либо когерентной длине взаимодействия 2ω=ω+ω либо 3ω=2ω+ω. Используя методику Монте-Карло, показано, что апериодический кристалл может быть конструирован для эффективной реализации генерации 3-ей гармоники при любом значении длины волны основного лазерного излучения.

Отметим, что предложенный метод легко реализуем на практике, поскольку в настоящее время выращивание периодических кристаллов с толщинами микрометрового масштаба не вызывает трудностей [1, 9]. Предложенный метод можно использовать и для случая традиционного параметрического усиления света, создавая второе квазисинхронное условие между сигнальным и холостым волнами, чтобы энергия холостой волны обратно перекачивалась в энергию сигнальной волны. Таким образом, можно реализовать условия, при которых можно достичь практически полную перекачку энергии накачки в энергию сигнальной волны.

Благодарности. Работа выполнена при частичной поддержке проектов Uzb-Ind-2021-96, Uzb-Ind-2021-83 и ATLANTIC-823897

Метаданные

On sequential generation of the third harmonic in crystals with an inhomogeneous domain structure

O.I. Sabirov, U.K. Sapaev

Tashkent State Technical University, Universitetskaya street 2, 100095, Tashkent, Uzbekistan

The sequential generation of the 3-rd harmonic in quadratic nonlinear optical crystals with an inhomogeneous domain structure has been studied by a numerical method. The case is considered when the thicknesses of the domains of nonperiodic crystal take the values either d_1 or d_2, where d_1 and d_2 are equal to the coherent length of interactions 2ω=ω+ω and 3ω=2ω+ω, respectively. It is shown that the generation of the 3-rd harmonic can be effectively implemented for any values of the wavelength of the fundamental harmonic. To do this, an algorithm, based on the Monte Carlo method, is developed.

Keywords: nonlinear photonic crystal, second and third harmonic generation, coupled three-frequency interactions, random domain structure.

Литература (References)

[1] A.S. Chirkin, V.V. Volkov, G.D. Laptev & E.Y. Morozov. Quantum Electronics **30**, No.10, 847 (2000).
[2] U.K. Sapaev, I.A. Kulagin, N.K. Satlikov, and T. Usmanov. Optics and Spectroscopy **101**, No.6, 983-985 (2006).
[3] A.L. Aleksandrovskiy, A.S. Chirkin, V.V. Volkov. Jurnal Rossiyskikh Lazernykh Issledovaniy **18**, No.2, 101-106 (1997).
[4] U.K. Sapaev, G. Assanto. Optics Express. **17,** No.5, 3765-3770 (2009).
[5] S. Zhu, Y. Zhu, N. Ming. Science **278**, No.5339, 843-846 (1997).
[6] S. Longhi. Optics Letters **32**, No.13, 1791-1793 (2007).
[7] S.A. Akhmanov, R.V. Khokhlov. Problemy nelineynoy optiki (Moskow, VINITI **293**, 2 (1964).
[8] S.A. Akhmanov, V.G. Dmitriev, V.P. Modenov. Radiotekhnika i Elektronika **9**, No 5, 814-821 (1964).
[9] D.S. Hum, M.M. Fejer. Quasi-phase matching. Comptes Rendus Physique **8**, No.2, 180-198 (2007).
[10] V.V. Volkov, A.S. Chirkin. Kvantovaya Elektronika **25**, No.2, 101-102 (1998).
[11] Ch. Zhang, Y. Zhu, S. Yang, Y. Qin, Sh. Zhu, Y. Chen, H. Liu and N. Ming. Optics Letters **25**, No.7, 436-438 (2000).
[12] M.V. Komissarova, A.P. Sukhorukov. Kvantovaya Elektronika **20**, No.10, 1025-1027 (1993).
[13] D.B. Yusupov, U.K. Sapaev. Journal of Russian Laser Research **30**, No.4, 321-326 (2009).

Мунтазам домен тузилмаси бир жинсли бўлмаган кристалларда учинчи гармоника генерация тўғрисида

О.И. Сабиров, У.К. Сапаев

Тошкент давлат техника университети, Университет кўч. 2, 100095 Тошкент, Ўзбекистон

Домен структураси бир жинсли бўлмаган квадратик ночизиқли оптик кристалларда 3-гармониканинг кетмакет ҳосил бўлиши рақамли усул билан ўрганилди. Даврий кристалл доменларининг қалинлиги d_1 ёки d_2, қийматларини қабул қилганда, d_1 ва d_2 мос равишда 2ω=ω+ω ва 3ω=2ω+ω ўзаро таъсирларининг когерент узунлигига тенг бўлган ҳолат кўриб чиқилади. 3-гармониканинг генерацияси асосий гармониканинг тўлқин узунлигининг ҳар қандай қийматлари учун самарали амалга оширилиши мумкинлиги кўрсатилган. Бунинг учун Монте-Карло усули асосида алгоритм тузилган.

Калит сўзлар: ночизиқли фотон кристалл, иккинчи ва учинчи гармоник генерация, умумлаштирилган уч частотали ўзаро таъсирлар, тасодифий домен тузилмаси.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.