Удвоение частоты интенсивных коротких лазерных импульсов в кристаллах с регулярной доменной структурой в условиях самовоздействия

З.Дж. Рузиев, У.К. Сапаев*

Ташкентский государственный технический университет, Университетская 4, 100095 Ташкент, Узбекистан

Получена 25.12.2020.

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

Численным методом исследован процесс удвоения частоты первого типа взаимодействия (oo-e) интенсивных коротких лазерных импульсов в кристаллах с регулярной доменной структурой. Проанализированы влияние дисперсии среды до третьего порядка и кубической нелинейности керровского типа на процесс формирования импульса второй гармоники. Рассмотрен случай, когда одновременно выполняются как условия квазисинхронизма, так и равенства групповых скоростей. Показано, что в этом случае незначительное отличие размера доменов от точного значения, обеспечивающее условие квазисинхронизма, приводит к значительному увеличению эффективности (почти в два раза) генерации второй гармоники. Как показывают расчеты, последнее обусловлено также компенсацией фазовых сдвигов, вызванных кубической нелинейностью керровского типа. В качестве периодически поляризованного кристалла выбран ниобат лития с 5% добавкой оксида магнии (5% $MgO:LiNbO_3$)..

Ключевые слова: кристаллы с регулярной доменной структурой, генерация второй гармоники, фемтосекундные импульсы, дисперсия, ниобат лития, 5% $MgO:LiNbO_3$.

Frequency doubling of the first type of interaction (oo-e) of intense short laser pulses in crystals with a regular domain structure is numerically studied. The influences of the dispersion of the medium up to the third order and cubic nonlinearity of the Kerr type on the formation of the second harmonic pulse are analyzed. The case is considered when both the conditions of quasi-phase and the equality of the group velocities are simultaneously satisfied. It is shown that in this case an insignificant change of the domain size from the exact value providing the condition of quasi-phase matching leads to a significant increase in the efficiency (almost two time) of second harmonic generation. Numerical calculations show that the latter is due to the compensation of phase shifts caused by the Kerr-type cubic nonlinearity and a change in the size of the domains from the exact value. Lithium niobate with a 5% addition of magnesium oxide (5% $MgO:LiNbO_3$) was chosen as a periodically polarized crystal.

Keywords: crystals with regular domain structure, second harmonic generation, femtosecond pulses, dispersion, lithium niobate, 5% $MgO:LiNbO_3$.

В настоящее время кристаллы с регулярной доменной структурой (РДС кристаллы) широко используются для реализации различных типов процессов преобразования частоты лазерного излучения (см., н-р, в [1]). В них условие фазового синхронизма (квазисинхронизма) осуществляется периодическим изменением знака квадратичной восприимчивости от слоя к слою. При этом размер доменов РДС кристалла должен быть равен когерентной длине выбранного процесса преобразования частоты.

Идея метода квазисинхронизма впервые предложена Н. Бломбергеном почти сразу после создания лазеров и на начальном этапе развития нелинейной оптики [2]. Но долгие годы на его использование на практике не обращалось внимания. Это было вызвано трудностями технологии выращивания таких кристаллов. В настоящее время, благодаря усовершенствованию технологии и успехам нанотехнологии, их создание даже в обычных лабораторных условиях не вызывает трудностей [3].

Известно, что в РДС кристаллах возможность выполнения условия квазисинхронизма для любых типов преобразования частоты не является их единственным уникальным свойством. Например, в них также можно создать условия как квазисинхронизма, так и равенства групповых скоростей взаимодействующих волн коротких лазерных импульсов [4-11].

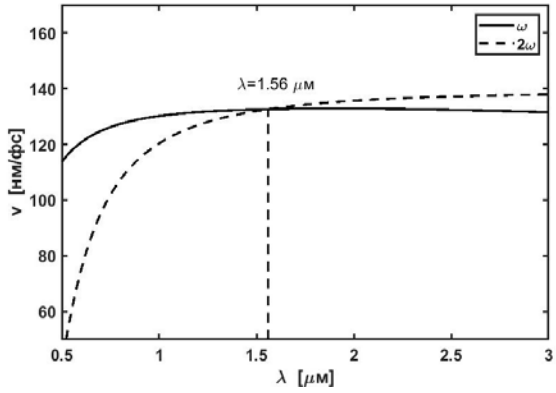


Рисунок 1. Изменение значений групповых скоростей основного излучения *o*-волны (сплошная кривая) и его второй гармоники *e*-волны (пунктирная кривая) с изменением длины волны при взаимодействии *oo-e*. Температура кристалла $T \approx 19.45$°C. Кристалл – 5% $MgO:LiNbO_3$.

Это условие можно широко использовать для процессов преобразования частоты коротких и ультракоротких лазерных импульсов. К сказанному можно отнести, например, РДС кристаллы, созданные на основе периодически поляризованного кристалла ниобата литии с 5% добавкой оксида магния ($5\%MgO:LiNbO_3$). В данном кристалле приблизительно при 1560 нм основного излучения и при взаимодействии *oo-e* групповые скорости основного импульса и второй гармоники будут примерно равны друг другу (см., рис. 1).

Удвоение частоты в периодически поляризованном кристалле $5\%MgO:LiNBO_3$ при одновременном выполнении квазисинхронизма и равенства групповых скоростей исследовано ранее в работах [4-11] для демонстрации эффективной нелинейной компрессии [4], формирования солитонов [5], увеличения эффективности с изменением температуры кристалла [7-10] или с линейно изменяющимися размерами доменов [11].

В данной работе, в отличие от предыдущих, будет показано, что при одновременном выполнении условия квазисинхронизма и равенства групповых скоростей в РДС-кристалле $5\%MgO:LiNBO_3$ имеется оптимальное значение длины доменов (отличающееся от их точного значения), при котором значительно увеличивается эффективность генерации второй гармоники.

Таким образом, удвоение частоты *oo-e* взаимодействия коротких лазерных импульсов в нестационарном режиме и с учетом нелинейности третьего порядка в РДС кристалле описывается следующей системой дифференциальных уравнений в частных производных (см. также [4, 12]):

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + D_1(\omega)\frac{\partial A_1}{\partial t} - \frac{iD_2(\omega)}{2}\frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} + \frac{D_3(\omega)}{6}\frac{\partial^3 A_1}{\partial t^3} = \\ = i\frac{4\pi}{\lambda n_1} d_{13}\sigma(z) A_1^* A_2 \exp(-i\Delta k z) + \\ + i\frac{3\pi}{\lambda n_1} A_1\left[\chi^3_{1111}|A_1|^2 + 2\chi^3_{1212}|A_2|^2\right] \quad , \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + D_1(2\omega)\frac{\partial A_2}{\partial t} - \frac{iD_2(2\omega)}{2}\frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} + \frac{D_3(2\omega)}{6}\frac{\partial^3 A_2}{\partial t^3} = \\ = i\frac{4\pi}{\lambda n_2} d_{13}\sigma(z) A_1^2 \exp(i\Delta k z) + \\ + i\frac{6\pi}{\lambda n_2} A_2\left[\chi^3_{1212}|A_2|^2 + 2\chi^3_{2222}|A_1|^2\right] \quad (2)$$

с граничными условиями:

$$A_1(z,t)|_{(z=0)} = A_0 \exp(-2\ln 2(t/\tau_0)^2 \,,\; A_2(z,t)|_{(z=0)} = 0 \,.$$

Здесь A_1 и A_2 – комплексные амплитуды соответственно основной и второй гармоник; A_0 – максимальное значение амплитуды основной гармоники на входе в кристалл; $D_m(\omega) = \left.\frac{\partial^m k}{\partial \omega^m}\right|_{\omega=\omega_0;2\omega_0}$, (где m = 1,2,3); Δk =

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

$2k_0(\omega_0)-K_0(2\omega_0)$ – фазовая расстройка взаимодействующих волн; $n_1 = n_1(\omega_0)$ и $n_2 = n_2(2\omega_0)$ – показатели преломления основного излучения и второй гармоники соответственно; $\omega_0 = 2\pi c/\lambda$ – центральная циклическая частота основного излучения (c – скорость света в вакууме, λ – длина волны основного излучения); d_{31} и χ_{1111}, χ_{1212}, χ_{2121}, χ_{2222} – коэффициенты нелинейности второго и третьих порядков соответственно; $\sigma(z)$ – знакоменяющаяся периодическая функция. Численный расчет проведен для следующего случая $I = 2\times10^{14}$ Вт/м^2 $\lambda = 1560$ нм, $\tau = 10$ фс при FWHM, d_{31}=3.4 пм/В, $\chi_{1111}\approx2.94\times10^{-21}$ м^2/В^2, $\chi_{1212}=\chi_{2121}\approx7\times10^{-22}$ м^2/В^2, $\chi_{2222}\approx5.32\times10^{-21}$ м^2/В^2 [4, 13]. Зависимость показателя преломления от длины волны и температуры ($T\approx19.45^oC$) выбрана из [14]. При выбранном нами уровне интенсивности начинает проявляться влияние эффекта Керра, что приводит к снижению эффективности удвоения частоты. На рис. 2 показана зависимость эффективности генерации второй гармоники от изменения длины домена при z ≈ 3 см.

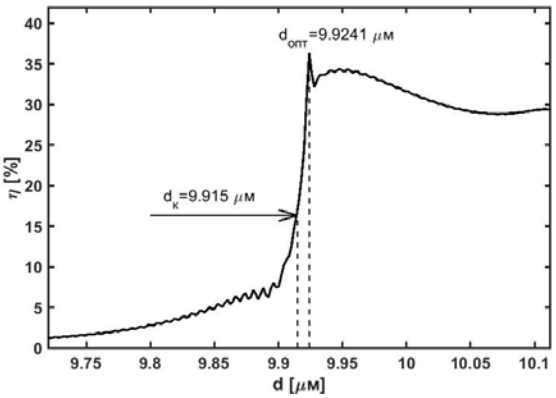


Рисунок 2. Зависимость эффективности второй гармоники от изменения длины домена кристалла 5% MgO:LiNbO$_3$.

Из рисунка нетрудно заметить, что максимальная эффективность не наблюдается при точном значении размера доменов $d_c = \pi/|\Delta k| =$ 9.915 мкм, а наоборот при $d_{opt} \approx$ 9.9241 мкм. Хотя это увеличение составляет всего лишь примерно ~1%, но оно практически позволяет повысить эффективность почти в два раза. Как показывают

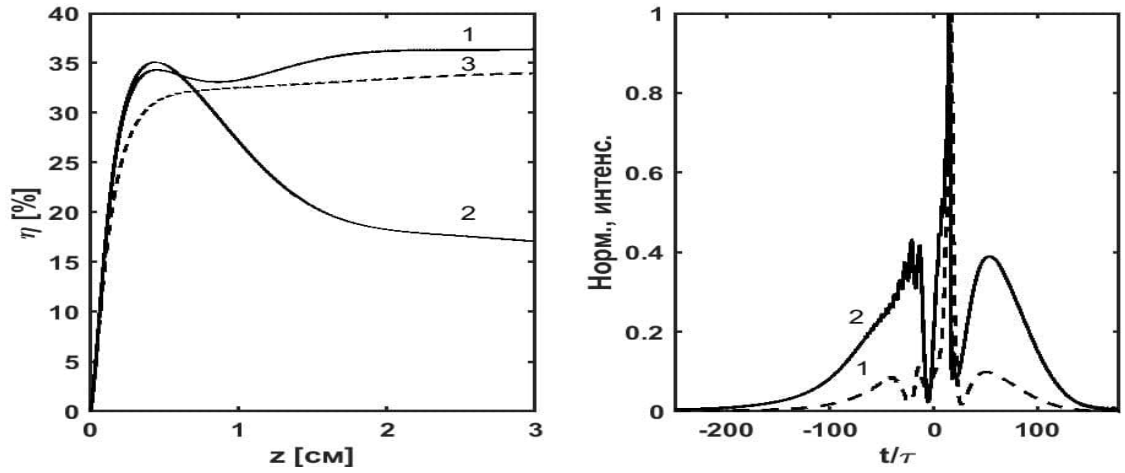


Рисунок 3. В левой части показана зависимость эффективности генерации второй гармоники от длины периодически поляризованного кристалла 5% MgO:LiNbO$_3$ при различных условиях: кривая (*1*) при d_{opt}, кривая (*2*) при d_c и пунктирная кривая (*3*) при d_{opt}, но без учета керровской нелинейности. На правом рисунке показан временной профиль нормированной интенсивности импульса второй гармоники на выходе из кристалла, где кривая (*2*) для при d_c, пунктирная кривая (*1*)для d_{opt}.

расчеты, с увеличением размера доменов увеличение эффективности вызвано взаимной компенсацией фазовых сдвигов, вызванных нелинейностями третьего порядка и «избыточной» фазой нелинейной решетки.

Для ясного понимания этого резонансного случая также был проведен численный анализ формирования импульса второй гармоники по длине периодического кристалла при d_c и d_{opt}. На рис. 3 (слева) показаны результаты этих расчётов.

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

Кривая (1) показывает зависимость эффективности удвоения частоты при d_{opt}, в то время как кривая (2)- при d_c. Заметим, что эффективность увеличивается от ~17% до ~37% в конце нелинейной решетки. Чтобы определить какой эффект был декомпенсирован из-за изменения размера доменов, расчеты были проведены также без учета влияния всех членов кубичной нелинейности при d_{opt}. Пунктирная кривая (*3*) показывает результаты последнего случая. Здесь тоже наблюдается повышение эффективности, но наиболее заметный выигрыш в эффективности наблюдается при учете влияния нелинейности керровского типа (кривая *1*). На правом рисунке показан временной профиль интенсивности второй гармоники на выходе из периодического кристалла. Из рисунка видно, что при оптимальном выборе размера доменов также наблюдается высококонтрастный импульс второй гармоники (пунктирная кривая 1). Здесь кривая *2* показывает результаты расчетов при d_c, где хорошо видна «плохая» контрастность импульса второй гармоники.

Таким образом, в данной работе численным методом исследован процесс генерации второй гармоники интенсивных коротких лазерных импульсов в кристаллах с регулярной доменной структурой 5% $MgO:LiNbO_3$ с учетом влияния дисперсии среды до третьего порядка и кубической нелинейности. Проанализирован случай, когда одновременно выполняются условия квазисинхронизма и равенства групповых скоростей. Показано, что имеется оптимальная длина доменов, при которой наблюдается значительное повышение эффективности данного процесса преобразования частоты. Это обусловлено тем, что небольшое отклонение размера доменов от точного значения, обеспечивающее квазисинхронизм, позволяет компенсировать фазовый сдвиг, вызванный влиянием кубической нелинейности керровского типа. Результаты работы можно использовать для других процессов преобразования частоты.

Метаданные

Frequency doubling of short intinse laser pulses in regular domain structures under self-action effect

Z.J. Ruziev, U.K. Sapaev

Tashkent State Technical University, University Street 4, 100095, Tashkent, Uzbekistan

Frequency doubling of the first type of interaction (oo-e) of intense short laser pulses in crystals with a regular domain structure is numerically studied. The influence of the medium dispersion up to the third order and cubic nonlinearity of the Kerr type on the formation of the second harmonic pulse is analyzed. A case is considered when both the conditions of quasi-phase matching and the equality of the group velocities are simultaneously satisfied. It is shown that in this case an insignificant change on the domain size from the exact value providing the condition of quasi-phase matching leads to a significant increase in the efficiency (almost twofold) of second harmonic generation. Numerical calculations show that the latter is due to the compensation of phase shifts caused by the Kerr-type cubic nonlinearity and a change in the size of the domains from the exact value. Lithium niobate with 5% addition of magnesium oxide (5% $MgO:LiNbO_3$) was chosen as a periodically polarized crystal.

Keywords: crystals with regular domain structure, second harmonic generation, femtosecond pulses, dispersion, lithium niobate, 5% $MgO:LiNbO_3$

Литература (References)

[1] S.D. Hum, M.M. Fejer, Comptes Rendus Physique, **82**.180 (2007).
[2] A.J. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducning, S.P. Pershan Phys Rev, **127**.1918 (1962).
[3] A.S. Chirkin, V.V. Volkov, G.D. Laptev. Kvantovaya Elektronika, **30**, 847 (2000)
[4] U.K. Sapaev, I.A. Kulagin, et al. Journal of Russian Laser Research, **32**, 41 (2011).
[5] X. Zeng, S. Ashihara, N. Fujioka, T. Shimura, K. Kuroda. Optics Express, **14**, 9358 (2006).
[6] X. Zeng., N. Ashihara, Z. Wang, T. Wang, et al. Optics Express, **17**, 16877 (2009).
[7] J. Zhang., Y. Chen., F. Lu., W. Dang. Applied Optics, **46**, 7792 (2007).
[8] J. Zhang, Y. Chen, F. Lu, X. Chen. Optics Express, **16**, 6957, (2008).
[9] A. Tehranchi., R. Kashyap., Optics Express, **16**, 18970 (2008)
[10] N. E .Yu, J. H. Ro, M. Cha, Optics Letters **27**, 1046 (2002).
[11] G. Li, Y. Cui, Optics Express, **25**, 29225 (2017).
[12] S.A. Axmanov i dr., Optika femtosekundnix lazernix impulsov; Nauka, **25**, 209 (1988)
[13] I. Shoji, T. Kondo, A. Kitamoto, M. Shirane Opt. Soc. Am. B, **14**, 2268 (1997).
[14] G. Li, Y. Cui, Optics Express, **25**.29225 (2017). O. Gayer, G. Z. Sacks, E. Galun, A. Arie. Appl. Phys. B, **91**, 343 (2008).

Тартибли домен структурали кристалларда ўзўзига таъсир шартлари асосида пайдо бўладиган қисқа ва юқори интенсивликли лазер импульсларининг частота иккиланиши хусусиятлари

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

З.Ж. Рўзиев, У.К. Сапаев

Тошкент Давлат Техника Университети, Университет кўчаси 2, 100095, Тошкент, Ўзбекистон

Сонли ҳисоблашлар ёрдамида регуляр домен структурали кристалларда юқори интенсивликга ва қиска давомийликка эга бўлган лазер импульсларининг биринчи тур таьсирида (оо-е) пайдо бўладиган частота иккиланиши жараёни ўрганилди. Иккинчи гармоника генерацияси пайдо бўлиш жараёни мухит дисперсиясининг учинчи тартибигача ва кубик ночизиқли Керр эффектлари мавжуд ҳолат учун ўрганилди. Группавий тезликларнинг тенглашган ва квази-синхронизм шартлари бир вақтда бажариладиган ҳол кўриб чиқилди. Бу ҳолда квази-синхронизм ҳолатини таьминловчи доменлар узунлигининг кичик ўзгариши ҳам иккинчи гармоника эффективлигининг сезиларли ошишига олиб келиши (деярли икки марта) аниқланди. Сони ҳисобалшалр шуни кўрстдикий бу ҳолат Керр ночизиқлийлиги ҳисобидан юзага келадиган фаза силжиши домен узунлигининг кичик ўзгариши билан компенсацияланиши натижасидадир. Даврий қутубланган кристалл сифатида 5% магний оксиди қўшилган литий ниобат олинди (5% $MgO:LiNbO_3$).

Калит сўзлар: регуляр домен структурали кристаллар, иккинчи гармоника генерацияси, фемтосекунд импульслар, дисперсия, 5% $MgO:LiNbO_3$.

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.