

О ПУТЯХ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Р.Дж.КАСУМОВА, Л.С.ГАДЖИЕВА, Г.А.САФАРОВА

*Бакинский Государственный Университет,
AZ 1148, г.Баку, ул. З.Халилова, 23*

Проанализирован процесс генерации третьей гармоники в регулярных доменных структурах в приближении заданной интенсивности. Показано, что в отличие от приближения заданного поля в данном приближении эффективность преобразования зависит не только от длины доменов, фазовой отстройки, но и от интенсивности накачки и коэффициентов нелинейной связи волн. Кроме того анализ показал, что кроме самих значений нелинейных коэффициентов их отношение также влияет на эффективность преобразования. Получено оптимальное значение отношения коэффициентов нелинейной связи волн, при которых эффективность преобразования частоты максимальна. Показано, что с уменьшением фазовой расстройки взаимодействующих волн оптимальное значение отношения коэффициентов увеличивается.

Высокоэффективное преобразование энергии лазерного излучения в гармоники крайне интересно тем, что позволяет значительно повысить контраст фемтосекундных импульсов [1]. Так использование апериодически поляризованных нелинейных кристаллов позволило осуществить компрессию сверхкоротких световых импульсов в кристалле LiNbO_3 и получить уменьшение длительности импульсов в 150 раз [2].

В регулярных доменных структурах, собранных на основе одного периодически поляризованного кристалла, возможна одновременная генерация на нескольких длинах волн, что делает подобные многослойные доменные структуры крайне актуальными [3, 4].

Квазисинхронизм был использован для создания источников 3-х основных цветов (RGB источники), а также для определения качества кристаллов [5,6].

Исследование квазисинхронных взаимодействий в приближении заданной интенсивности [7] позволяет обнаружить ряд новых эффектов [8], отсутствующих в приближении заданного поля [9,10]. Анализ в приближении заданной интенсивности нелинейного взаимодействия волн в случае генерации второй гармоники показал, что выбором оптимальной длины доменов, фазовой расстройки между взаимодействующими волнами, интенсивности накачки в данных структурах можно значительно повысить эффективность преобразования [8, 11].

В настоящей работе в приближении заданной интенсивности основного излучения с учетом фазовых эффектов проанализировано влияние коэффициентов нелинейной связи волн на эффективность процесса квазисинхронного взаимодействия в регулярной доменной структуре, собранной из кристаллических слоев с кубической восприимчивостью.

Допустим, что исследуемая слоистая структура состоит из последовательных слоев с периодически изменяющимся знаком кубической восприимчивости. Причем каждый слой – это диссипативная и диспергирующая нелинейная среда.

Будем применять стандартный метод расчета квазисинхронного взаимодействия в приближении заданной интенсивности, развитый нами в работе [8] для случая генерации второй гармоники.

Укороченные уравнения, описывающие прямой процесс генерации третьей гармоники в первом домене с учетом потерь в среде, имеют вид [12]

$$\begin{aligned} \frac{dA_1}{dz} + \delta_1 A_1 &= -i\gamma_1 A_3 A_1^* \exp(i\Delta z), \\ \frac{dA_3}{dz} + \delta_3 A_3 &= -i\gamma_3 A_1^3 \exp(-i\Delta z), \end{aligned} \quad (1)$$

где $A_{1,3}$ - комплексные амплитуды волны накачки и третьей гармоники на соответствующих частотах $\omega_{1,3}$ ($\omega_3 = 3\omega_1$), δ_j - коэффициенты поглощения взаимодействующих волн на частотах ω_j ($j=1, 3$), $n_{1,3}$ - показатели преломления на частотах $\omega_{1,3}$, λ_1 - длина волны излучения накачки, $\Delta = k_3 - 3k_1$ - фазовая расстройка волн в пределах каждого домена, γ_j - коэффициенты нелинейной связи взаимодействующих волн на соответствующих частотах ω_j ($j=1, 3$) [12]:

$$\gamma_1 = \frac{3\pi^2}{n_1 \lambda_1} \chi_h^{(3)}, \quad \gamma_3 = \frac{3\pi^2}{n_3 \lambda_1} \chi_h^{(3)}, \quad (2)$$

здесь $\chi_h^{(3)} = \chi^{(3)}(-3\omega_1, \omega_1, \omega_1, \omega_1)$ - кубичная восприимчивость нелинейной среды.

В приближении заданной интенсивности при использовании стандартной процедуры преобразований системы (1) с учетом

$$A_1(z=0) = A_{10} \exp(i\varphi_{10}), \quad A_3(z=0) = 0$$

выражение для комплексной амплитуды третьей гармоники на выходе из первого домена ($z=l_1$) имеет вид [13, 14]

$$A_3(l_1) = -i\gamma_3 A_{10}^3 l_1 \operatorname{sinc}(\lambda_1' l_1) \exp\left[2i\varphi_{10} - (\delta_3 + 3\delta_1 + i\Delta)l_1/2\right], \quad (3)$$

где $\lambda_1'^2 = 3\Gamma_1^2 - (\delta_3 - 3\delta_1 - i\Delta)^2/4$, $\Gamma_1^2 = \gamma_1 \gamma_3 I_{10}^2$, $\operatorname{sinc}x = \sin x/x$, $I_j = A_j A_j^*$,

здесь φ_{10} - начальная фазы волны накачки на входе в первый домен.

Для комплексной амплитуды третьей гармоники на выходе второго домена ($z=l_2$) с учетом $A_{1,3}(z=0) = A_{1,3}(l_1) \exp(i\varphi_{1,3}(l_1))$ можно получить

$$\begin{aligned} A_3(l_2) = A_3(l_1) \left\{ \cos \lambda_2' l_2 - \left[i\gamma_3' \frac{A_1^3(l_1)}{A_3(l_1)} e^{i[3\varphi_1(l_1) - \varphi_3(l_1)]} - \frac{3\delta_1 - \delta_3 + i\Delta}{2} \right] \frac{\sin \lambda_2' l_2}{\lambda_2'} \right\} \times \\ \exp\left[i\varphi_3(l_1) - (\delta_3 + 3\delta_1 + i\Delta)l_2/2\right], \end{aligned} \quad (4)$$

где $\lambda_2'^2 = 3\Gamma_2^2 - (\delta_3 - 3\delta_1 - i\Delta)^2/4$, $\Gamma_2^2 = \gamma_1 \gamma_3 I_1^2$ (Здесь $\varphi_{1,3}(l_1)$ - изменение фазы волны на переходе от первого домена ко второму на частотах $\omega_{1,3}$).

Стандартным путем решая систему (1) с учетом граничных условий на входе в третий домен

$$A_{1,3}(z=0) = A_{1,3}(l_2) \exp(i\varphi_{1,3}(l_2)), \quad (5)$$

для комплексной амплитуды третьей гармоники на выходе третьего домена имеем ($\delta_3 = 3\delta_1$)

$$A_3(l_3) = A_3(l_2) \left\{ \cos \lambda_3 l_3 - i \left(\gamma_3 \frac{A_1^3(l_2)}{A_3(l_2)} e^{i[3\varphi_1(l_2) - \varphi_3(l_2)]} - \frac{\Delta}{2} \right) \frac{\sin \lambda_3 l_3}{\lambda_3} \right\} \exp(-\delta_3 - i\frac{\Delta}{2})l_3, \quad (6)$$

где $\varphi_{1,2}(l_2)$ - изменение фазы волны на переходе от второго домена к третьему на частотах $\omega_{1,3}$, соответственно,

$$\lambda_3^2 = 3\Gamma_3^2 + \Delta^2/4, \quad \Gamma_3^2 = \gamma_1 \gamma_2 I_1^2(l_2).$$

Известно, что эффективность преобразования энергии волны накачки в энергию волны третьей гармоники в нелинейной среде длины l определяется выражением

$$\eta_3(l) = I_3(l) / I_{10}. \quad (7)$$

Из проведенного анализа (7) с использованием полученных выражений для комплексных амплитуд третьей гармоники (3), (4) и (6) следует, что по мере распространения волны гармоники в регулярной доменной структуре происходит постепенный рост η_3 от 0 на входе до максимального значения на выходе структуры. Это осуществляется за счет когерентных длин доменов и оптимальных значений интенсивностей накачки и фазовой расстройки между взаимодействующими волнами. Как только эффективность в первом домене достигает оптимального значения на когерентной длине волна гармоники переходит во второй домен. Здесь рост η_2 продолжается до когерентной длины второго домена и т.д. Однако помимо использования перечисленных оптимальных параметров дальнейшего увеличения эффективности преобразования можно достичь выбором нелинейных коэффициентов γ_1, γ_3 .

Анализ в приближении заданной интенсивности выражений для комплексной амплитуды третьей гармоники (3), (4) и (6) показывает, что кроме самих значений нелинейных коэффициентов $\gamma_{1,3}$ их отношение γ_3/γ_1 также влияет на эффективность преобразования, что было экспериментально обнаружено в работе [15].

Ниже приведены результаты численного счета выражений для эффективности преобразования в третью гармонику в приближении заданной интенсивности. Здесь же для сравнения даны результаты приближения заданного поля. Согласно (7) из выражений (3) и (4) рассчитаны эффективности преобразования после одного (сплошные кривые) и двух (пунктирные кривые) доменов $\eta_3(l_{1,2})$ от величины γ_3/γ_1 для трех вариантов значений фазовой расстройки $\tilde{\Delta} = \Delta/\gamma_1 I_{10}$. Динамический процесс преобразования в гармонику показан на Рис.1 в отсутствие потерь. Анализ проведен для широкого диапазона изменений величины γ_3/γ_1 , что позволяет применение полученных результатов не только к известному классу нелинейных кристаллов, но и к новым нелинейным соединениям.

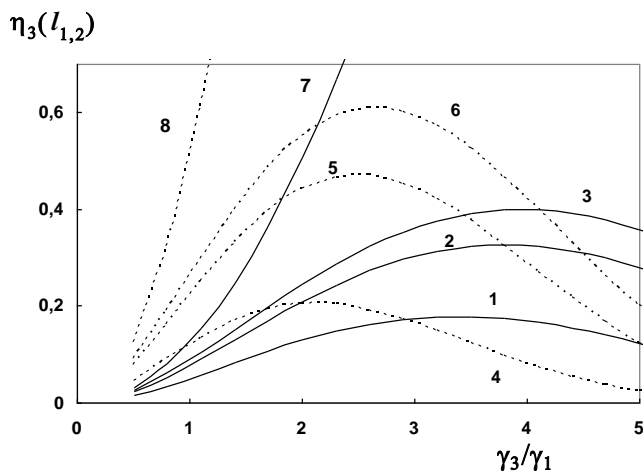


Рис.1.

Зависимости эффективности преобразования в третью гармонику $\eta_3(l_{1,2})$ от отношения γ_3/γ_1 для $\delta_j = 0$, $\gamma_1 I_{10} l_1 = 0.53$; $\gamma_1 I_{10} l_2 = 0.55$ при $\tilde{\Delta} = \Delta/2\gamma_1 I_{10} = 2.8$ (кривые 3, 6, 7, 8), 3 (кривые 2, 5) и 3.5 (кривые 1, 4). Сплошные кривые 1-3, 7 соответствуют зависимости $\eta_3(l_1)$, а пунктирные кривые 4-6, 8 - зависимости $\eta_3(l_2)$. Кривые 1-6 получены в приближении заданной интенсивности, а кривые 7-8 — в приближении заданного поля.

Из сравнения двух пар кривых 3, 7 и 6, 8 видно, что при прочих равных параметрах задачи, как и ожидалось, зависимости, полученные в приближении

заданного поля (кривые 7 и 8), имеют монотонный характер. В случае же применения приближения заданной интенсивности в поведении кривых наблюдается явно выраженный максимум. Это свидетельствует о существовании оптимального значения $(\gamma_3/\gamma_1)_{opt}$, при котором достигается максимальное преобразование энергии волны накачки в волну гармоники. При этом значение $(\gamma_3/\gamma_1)_{opt}$ зависит от величины фазовой расстройки взаимодействующих волн. С уменьшением фазовой расстройки максимумы кривых смещаются вправо, т.е. оптимальное значение $(\gamma_3/\gamma_1)_{opt}$ увеличивается (сравнить соответственно кривые 1, 2 и 3 и кривые 4, 5 и 6). Этот факт необходимо учесть при разработке эффективных лазерных частотных преобразователей на базе новых перспективных нелинейных материалов.

Таким образом, выбирая оптимальные длины доменов, фазовую отстройку, интенсивность накачки, а также оптимальное значение отношения коэффициентов нелинейной связи волн, можно даже при малом числе периодов “решетки” модуляции нелинейной восприимчивости достичь значительных величин эффективности преобразования на выходе регулярной доменной структуры.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ANSF (грант AZ-PI-3123-BA-08).

1. В.М.Гордиенко, С.С.Гречин и др., *Квантовая электроника*, **35** (2005) 525.
2. M.A.Arборе et al, *Opt. Lett.*, **22** (1997) 1341.
3. O.Phister, J.S.Wells, L.Hollberg et al, *Opt. Lett.*, **22** (1997) 1211.
4. E.Yu.Morozov, A.S.Chirkin, *Квантовая электроника*, **34** (2004) 227.
5. M.Robles-Agudo, R.S.Cudney, L.A.Rios, *Optics Express*, **14** (2006) 10663.
6. F.Brunner et al, *Opt. Lett.*, **29** (2004) 1921.
7. Z.H.Tagiev, R.J.Kasumova, R.A.Salmanova, N.V.Kerimova, *J. Opt. B: Quantum Sermiclass. Opt.*, **3** (2001) 84.
8. Z.H.Tagiev, R.J.Kasumova, *Opt. Comm.*, **281** (2008) 814.
9. С.А.Чиркин, В.В.Волков, *Квантовая электроника*, **30** (2000) 847; А.В.Бохин, В.Г.Дмитриев, *Квантовая электроника*, **32** (2002) 219.
10. S.M.Saltiel, et al, *Bulgarian J. of Phys.*, **33** (2006) 1.
11. Z.H.Tagiev, R.J.Kasumova, G.A.Safarova, A.Karimi, *Appl. Opt.*, **47** (2008) 3681.
12. Дж.Райнтжес, *Нелинейные оптические параметрические процессы в жидкостях и газах*. М., (1987) 510.
13. З.А.Тагиев, *ЖПС*, **45** (1986) 855.
14. Z.H.Тағйев, R.C.Qasimova, G.Ə.Səfərova, *Труды V Международной НТК «Актуальные проблемы физики», 25-27 июня*, (2008) 45.
15. Y.Qiang Qin, Y.Y.Zhu, C.Zhang, and N.B.Ming, “*Theoretical investigations of efficient cascaded third-harmonic generation in quasi-phase-matched and – mismatched configurations*” *JOSA B*, **20** (2003) 73.

LAZER ŞÜASININ ÇEVRLMƏ EFFEKTİVLİYİNİN ARTIRILMASI YOLLARI

R.C.QASIMOVA, L.S.HACIYEVA, G.Ə.SƏFƏROVA

İşdə nizamlı domen quruluşunda üçüncü harmonika generasiya prosesi sabit intensivlik yaxınlaşmasında təhlil edilmişdir. Bu yaxınlaşmada nizamlı domen quruluşu üçün aparılan təhlil göstərir ki, sabit amplitud yaxınlaşmasından fərqli olaraq, çevrilmənin effektivliyi təbəqələrin uzunluqlarından, dalğaların fazalar fərqiindən əlavə əsas dalğanın intensivliyindən və dalğaların qeyri-xətti əlaqə əmsallarından aslıdır. Bundan başqa çevrilmə effektivliyi nəinki qeyri-xətti əlaqə əmsallarından hətta onların nisbətindən aslıdır. İşdə həmin nisbətin optimal qiyməti alınmışdır. Göstərilmişdir ki, qarşılıqlı təsirdə olan dalğaların fazalar fərqi azaldıqca qeyri-xətti əlaqə əmsallarının optimal qiyməti artmış olur.

ON WAYS OF INCREASE OF CONVERSION EFFICIENCY OF LASER RADIATION

R.J.KASUMOVA, L.S.GADJIEVA, G.A.SAFAROVA

The third harmonic generation process in regular domain structures has been analyzed in the constant-intensity approximation. It has been shown in this approximation, as opposed to the constant-field approximation, in regular domain structures the efficiency of frequency conversion depended not only on the lengths of layers, and phase mismatches but also on the pump intensity and coefficients of the nonlinear wave coupling. Analysis of efficiency of conversion to third harmonic has demonstrated that besides the values of nonlinear coefficients themselves their ratio also has influenced on conversion efficiency. With a decrease of phase mismatch of interacting waves the optimal values of nonlinear coefficients have increased.

Редактор: А.Измайлов