

УДК 533.93-022.532

Е.С. Мухаметкаримов^{1*}, Ж.А. Кудышев¹, А.Е. Давлетов¹,
И.Р. Габитов², А.И. Маймистов³

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

²Математический факультет Университета Аризоны, США, Тусон

³Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Россия, г. Москва

*E-mail: m.c.erzhan@mail.ru

Генерация второй гармоники в метаматериалах с потерями

Аннотация. В режиме непрерывного излучения изучен процесс генерации второй гармоники в метаматериалах с отрицательным показателем преломления. При малых значениях фазовой расстройки распределение интенсивности полей фундаментальной волны и волны второй гармоники представляется монотонной функцией координат, а при достижении фазовой расстройкой некоторого критического значения распределения интенсивностей становится периодическим. В данной работе исследовано влияние потерь на фундаментальной и второй гармониках на величину критической расстройки.

Ключевые слова: метаматериал, генерация второй гармоники, фазовая расстройка.

Введение

Метаматериалы – это нанокompозитные материалы, у которых показатель преломления отрицателен для волн определенных диапазонов частот. Отрицательность показателя преломления означает, что вектор Пойнтинга S и вектор фазовой скорости k направлены в противоположные стороны, соответственно тройка векторов k , E и H является левоориентированной [1]. Материалы с такими свойствами не встречаются в природе, их получают путем внедрения металлических структур определенной геометрической формы в диэлектрическую матрицу [2-5].

При взаимодействии волн большой интенсивности, напряженность электрических полей которых соизмерима с напряженностью микроскопических полей в атомах вещества, появляется нелинейная реакция вектора поляризации P на вектор напряженности электрического поля E . Примером такого нелинейного взаимодействия волны с веществом является генерация волны удвоенной частоты, называемой второй гармоникой.

Генерация второй гармоники в метаматериале

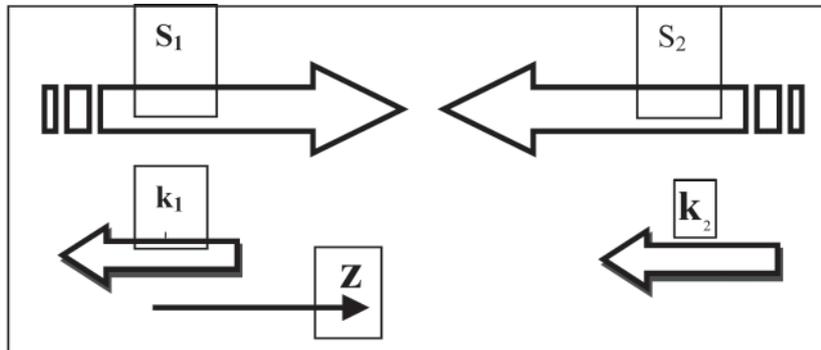
В данной работе исследуется процесс генерации второй гармоники в диссипативном метаматериале, показатель преломления которого отрицателен на «фундаментальной» частоте частоте ω и положителен на частоте второй гармоники 2ω . При этом для выполнения фазового синхронизма необходимо, чтобы «фундаментальная» волна и вторая гармоника распространялись в противоположных направлениях. В рамках данной задачи рассматривается случай, в котором вектор k_1 направлен в положительном направлении оси x , в то время как вектор k_2 ориентирован в отрицательном направлении оси z (рис. 1).

Система уравнений, описывающая трехволновое взаимодействие с учетом квадратичной нелинейности χ_2 , в приближении медленно меняющихся огибающих имеет вид [6]:

$$\begin{aligned} \frac{dE_1}{dz} &= -iE_1^* E_2 \exp(-i\Delta z) - \alpha_1 E_1, \\ \frac{dE_2}{dz} &= iE_1^2 \exp(i\Delta z) + \alpha_2 E_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\Delta k = 2k_1 - k_2$ соотношение фазового синхронизма, описывающее эффективную передачу энергии от фундаментальной волны к второй гармонике, A_1 – комплексная амплитуда волны на фундаментальной частоте,

A_2 – комплексная амплитуда волны второй гармоники на удвоенной частоте, а α_1 и α_2 – коэффициенты потерь на фундаментальной частоте и частоте второй гармоники соответственно.



S_1, S_2 – вектора Пойнтинга волн на «фундаментальной» частоте и частоте второй гармоники, соответственно, k_1, k_2 – волновые вектора волн на «фундаментальной» частоте и частоте второй гармоники.

Рисунок 1 – Процесс генерации второй гармоники в метаматериалах с отрицательным показателем преломления

Предполагается, что левый конец образца совпадает с началом координат $z = 0$, а правый ко-

нец соответствует точке $z = L$. Тогда граничные условия для системы (1) записываются так:

$$E_1(0) = e_{10} \exp(i\varphi_{10}), E_2(L) = 0 \quad (2)$$

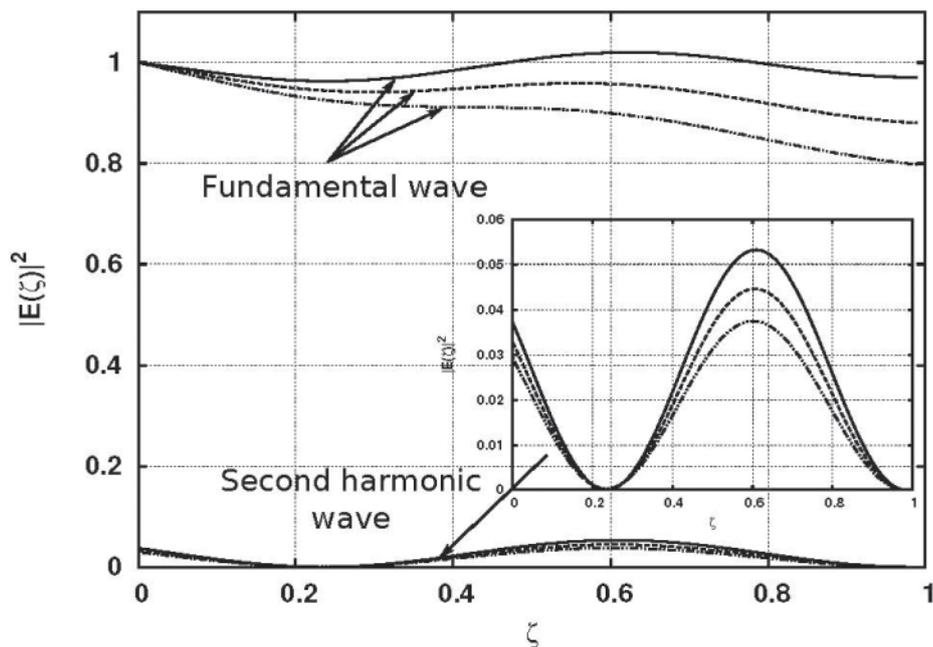
где e_{10} – вещественная амплитуда фундаментальной волны на входе в образец, φ_{10} – начальная фаза входящей волны. При расчетах начальная фаза фундаментальной волны на левом конце образца принималась равной $\varphi_{10} = \pi$. Безразмерные параметры имеют следующий вид: $\Delta = \Delta k / \kappa$ – фазовая расстройка, $l = \kappa L$ – безразмерная длина образца, $\zeta = \kappa z$ – безразмерная координата вдоль образца, $\tilde{\alpha}_{1,2} = \alpha_{1,2} / \kappa$ – безразмерные коэффициенты поглощения на фундаментальной частоте и частоте второй гармоники соответственно. Из-за того, что граничные условия (2) заданы на разных концах образца, а волны распространяются в противоположных направлениях, то для численного решения системы (1) необходимо использовать итерационный метод.

В работе [1] установлено, что существует критическая расстройка фазового синхронизма, которая определяет изменения характера распре-

деления интенсивностей фундаментальной волны и волны второй гармоники от монотонного режима к периодическому. Однако, в реальном метаматериале всегда имеются потери, поэтому представляет практический интерес учет поглощения в среде и установление его влияния на возможные режимы генерации второй гармоники и величину критической расстройки.

Результаты расчетов показаны на рисунках 2-3. На рисунке 2 представлена зависимость распределения интенсивностей волн по координатам при фиксированном значении фазовой расстройки $\Delta = 10$ с учетом потерь.

На рисунке 3 приведены результаты расчета зависимостей критического значения расстройки от коэффициентов потерь. Из полученных результатов следует, что рост коэффициентов потерь приводит к росту критического значения расстройки. Также следует отметить, что увеличение $\tilde{\alpha}_1$ ведет к более быстрому увеличению Δ_c чем аналогичное увеличение $\tilde{\alpha}_2$.



Сплошные кривые $\tilde{\alpha}_1 = \tilde{\alpha}_2 = 0$ □ штриховые кривые $\tilde{\alpha}_1 = \tilde{\alpha}_2 = 0.025$ и пунктирные кривые $\tilde{\alpha}_1 = \tilde{\alpha}_2 = 0.05$

Рисунок 2 □ □ ави □ им □ от □ ра □ пре □ лени □ интен □ ив □ н □ те □ ун □ да □ ментал □ но □ вол □ ны и вол □ ны второ □ гар □ мони □ ки от ди □ ан □ ии при □ ик □ ир □ ванном □ на □ ении ра □ ро □ ки $\Delta = 10$

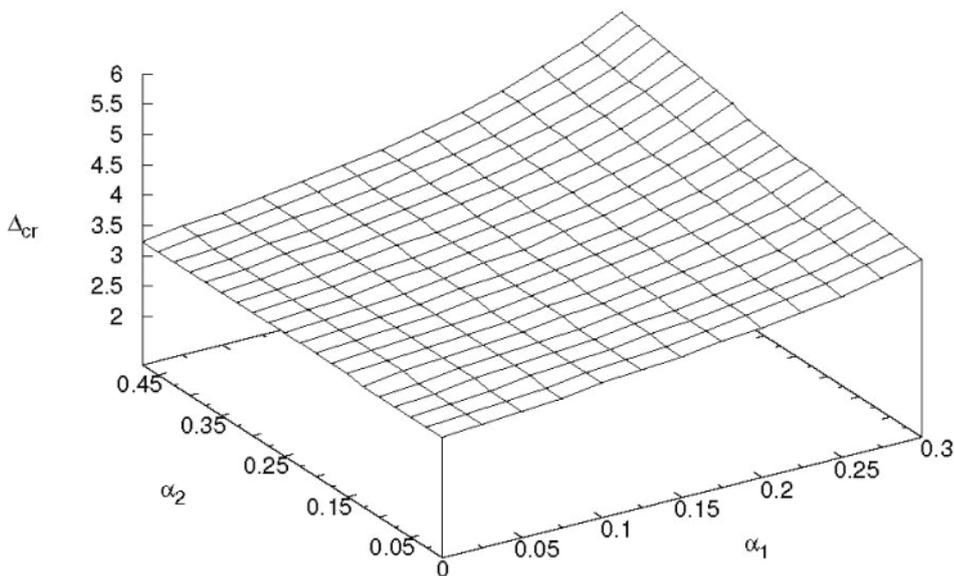


Рисунок 3 □ □ ави □ им □ от □ крити □ ко □ ра □ тро □ ки Δ_{cr} от ко □ □ □ и □ ентов потер □ $\tilde{\alpha}_1$ и $\tilde{\alpha}_2$ при $e_{10} = 1$

Заключение

Таким образом, изучен процесс генерации второй гармоники в диссипативных метаматериалах при наличии фазовой расстройки. Найдены критические значения фазовой расстройки, разделяющих два режима генерации и исследованы их зависимости от коэффициентов потерь на фундаментальной волне и волне второй гармоники. Установлено, что поглощение на фундаментальной волне сильнее влияет на критические значения фазовой расстройки, чем поглощение на волне второй гармоники.

Литература

- 1 Veselago V.G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ // Sov. Phys. Usp. – 1968. – N 10. – P.509-514.
- 2 Pendry J.B. Negative Refraction Makes a Perfect Lens // Physical Review Letters. – 2000 – Vol. 85, Iss. 18. – P. 3966 -3969.

- 3 Smith, D. R., Schurig, D. & Pendry, J. B. Some of the waves emitted or reflected // Appl. Phys. Lett. – 2002. – Vol. 81. – P. 2713–2715.

- 4 Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // УФН. – 1967. – Т. 172. – С. 1215.

- 5 Robbins D.J., Pendry J. B., Holden A.J. and Stewart W.J. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1999 – Vol. 47(11). – P.2075.

- 6 Popov A.K. and Shalaev V. M. Negative-index metamaterials: Second-harmonic generation, Manley-Rowe relations and parametric amplification // Appl. Phys. B – 2006 – Vol. 84 – P.131-137.

- 7 Kudyshev Zh., Gabitov I.R., Maimistov A. The effect of phase mismatch on second harmonic generation in negative index materials // arXiv:1102.0538v1, 2011.

Е.С. Мухаметкаримов, Ж.А. Кудышев, А.Е. Давлетов, И.Р. Габитов, А.И. Маймистов
Әлсіреуі бар метаматериалдардың екінші ретті гармониканың генерациясы

Сыну көрсеткіші теріс метаматериалдардағы екінші ретті гармониканың генерациясын үзіліссіз шашырау режимінде зерттеу жүргізілді. Фундаменталды толқын мен екінші ретті гармониканың арасындағы фазалар айырымы аз болғанда өріс интенсивтілігі координата бойынша монотонды функция, ал фазалар айырымы белгілі критикалық мәніне жеткенде периодты функция түрінде болады. Бұл жұмыста фазалар айырымының критикалық мәніне тоқын әлсіреулерінің әсері зерттелген.

Түйін сөздер: метаматериал, екінші ретті гармоника, фазалық ығысу.

Ye.S. Mukhametkarimov, Zh. Kudyshev, A.E. Davletov, I. Gabitov, A. Maimistov
Second harmonic generation in dissipative metamaterials

In the regime of continuous waves the second harmonic generation process in dissipative negative refraction-index metamaterials is considered. At small values of the phase mismatch the intensity distributions of both the fundamental and second harmonic waves are monotonic functions of coordinates. But if the phase mismatch reaches some critical value, the intensity distributions of the two waves undergo a transition from monotonic to oscillatory pattern. The influence of the losses in the medium on that critical value of the phase mismatch is numerically studied.

Keywords: metamaterial, second harmonic generation, phase mismatch.