

Акустооптическая модуляция световых волн в двумерных фотонных кристаллах

Г. В. Кулак, Т. В. Николаенко, Л. А. Тозик

Мозырский государственный педагогический университет, Мозырь, Беларусь;

e-mail: g.kulak57@mail.ru

Исследовано неколлинеарное брэгговское акустооптическое взаимодействие света на продольной ультразвуковой волне в фотонных кристаллах: Si-SiO₂. Показано, что наибольшая эффективность изотропной акустооптической дифракции достигается при нулевом значении параметра заполнения для ТЕ- и ТМ- поляризованных дифрагированных волн. Наибольшая ширина полосы пропускания акустооптической модуляции в условиях неколлинеарной акустооптической дифракции имеет место для ТМ- поляризованных световых волн.

Ключевые слова: акустооптическое взаимодействие; ультразвуковая волна; полоса пропускания; акустооптическая модуляция.

Acousto-optical modulation of light waves in two-dimensional photonic crystals

G. V. Kulak, T. V. Nikolaenko, L. A. Tozik

Mozyr State Pedagogical University, Mozyr, Belarus; e-mail: g.kulak57@mail.ru

The non-collinear Bragg acousto-optical interaction of light on a longitudinal ultrasonic wave in photonic crystals: Si-SiO₂ is investigated. It is shown that the highest efficiency of isotropic acousto-optic diffraction is achieved at zero value of the filling parameter for TE- and TM-polarized diffracted waves. The largest bandwidth of acousto-optic modulation under conditions of non-collinear acousto-optic diffraction occurs for TM-polarized light waves.

Keywords: acousto-optic interaction; ultrasonic wave; bandwidth; acousto-optic modulation.

Введение

В работе [1] разработан метод расчета зависимостей угла Брэгга от частоты света и ультразвука в фотонных кристаллах при изотропной и анизотропной акустооптической (АО) дифракции. При этом учтено наличие запрещенных зон для распространения света и ультразвука в таких кристаллах. Показано, что в двумерных фотонных кристаллах (ФК) на основе кремния (Si) и кварца (SiO₂) возможна изотропная (без изменения поляризации дифрагированной волны) брэгговская АО дифракция света на ультразвуке.

Теоретические результаты и их обсуждение

Двумерный фотонный кристалл представляет собой квадратную решетку, составленную из цилиндрических включений из однородного материала [2]. В качестве модельного можно использовать кварцевые волокна, размещенные в матрице из кремния. Предположим, что в ФК вдоль оси Y распространяется продольная или

сдвиговая ультразвуковая (УЗ) волна (см. рис. 1, а). Световая волна, как показано на рис. 1, б, распространяется под углом α оси X.

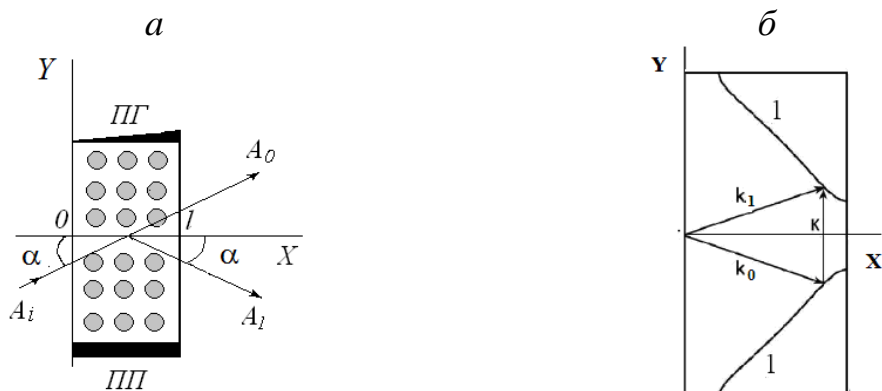


Рис. 1. а) Схема неколлинеарной АО дифракции в ФК на продольной УЗ волне (ПП – пьезопреобразователь, ПГ – поглотитель, ФК – фотонный кристалл, l – длина АО взаимодействия); б) диаграмма волновых векторов при заданной частоте (f_s) ультразвука и длине волны (λ) света при изотропной дифракции под углом α к фронту УЗ волны (1 – дисперсионная кривая ФК)

Предположим, что световая волна с волновым вектором \vec{k}_0 и частотой ω дифрагирует с волновым вектором \vec{k}_1 в ФК на УЗ волне с волновым вектором \vec{K} и частотой Ω . Тогда, с учетом ФК, характеризуемого вектором обратной решетки \vec{G} , выполняется условие пространственного и временного синхронизма [1]:

$$\vec{k}_0 + \vec{K} + \vec{G} = \vec{k}_1 + \Delta\vec{k}, \omega_1 = \omega + \Omega, \quad (1)$$

где $\Delta\vec{k}$ – отстройка фазового синхронизма.

Следует отметить, что собственные волны ФК являются неоднородными, а их фурье-спектр содержит множество пространственных гармоник. Однако, следуя результатам работы [1], будем, в дальнейшем, ограничиваться двухволновым приближением. На рис. 1, б представлены векторные диаграммы для волн ТЕ- (ТМ-) поляризации при изотропной брэгговской дифракции. При этом концы волновых векторов дифрагирующих волн лежат на дисперсионных кривых постоянной частоты. Возможны два типа изотропной дифракции: ТЕ-ТЕ-преобразование и ТМ-ТМ-преобразование. Следует отметить, что при брэгговском режиме двухволнового АО взаимодействия толщина кристалла вдоль оси X (длина АО взаимодействия) $l \gg 2\pi n v^2 / \lambda \Omega^2$, где v – фазовая скорость УЗ волны, n – средний показатель преломления материала ФК, λ – длина волны света в вакууме [3].

Система уравнений связанных волн имеет вид:

$$q_{00} \frac{dA_0}{dx} = \delta_{01} A_1 e^{-i\Delta k x}, \quad q_{11} \frac{dA_1}{dx} = \delta_{10} A_0 e^{i\Delta k x}, \quad (2)$$

где $q_{\alpha\beta}, \delta_{\alpha\beta}$ – скалярные коэффициенты; $A_0(0) = A, A_1(0) = 0$, где A – амплитуда падающей волны.

Расчеты показывают, что изотропная дифракция возможна на продольной УЗ-волне при ТЕ-ТЕ-преобразовании и при ТМ-ТМ-преобразовании в структуре, состоящей из оптически изотропных материалов, например SiO₂-Si. Тогда, при условии точного брэгговского синхронизма, скалярные коэффициенты системы уравнений (2) находим для ТЕ-ТЕ-преобразования из соотношений:

$$\begin{aligned} q_{00} &= \varsigma_{33}(k_{0y} - k_{0x}), \delta_{01} = -\Delta\varsigma_{33} \left[(k_{0y} - k_{0x})(k_{1y} - k_{1x}) \right] / 2, \\ q_{11} &= \varsigma_{33}(k_{1y} - k_{1x}), \delta_{10} = \Delta\varsigma_{33} \left[(k_{0y} - k_{0x})(k_{1y} - k_{1x}) \right] / 2. \end{aligned} \quad (3)$$

В случае ТМ-ТМ-преобразования в (2) полагаем

$$\begin{aligned} q_{00} &= -2\varsigma_{22}k_{0x}, \delta_{01} = k_{1x}(k_{0y} - k_{0x})\Delta\varsigma_{22}, \\ q_{11} &= \varsigma_{22}k_{1x}, \delta_{10} = k_{0x}(k_{1x} - k_{1y})\Delta\varsigma_{22}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь коэффициенты тензора диэлектрической непроницаемости и приращения диэлектрической непроницаемости даются соотношениями [1, 2]:

$$\varsigma_{\alpha\beta}(\vec{G}) = \frac{1}{S} \int_S \varepsilon_{\alpha\beta}^{-1}(\vec{r}) e^{-i\vec{G}\vec{r}} d^2\vec{r}, \Delta\varsigma_{\alpha\beta}(\vec{G}) = \frac{1}{S} \int_S \Delta\varepsilon_{\alpha\beta}^{-1}(\vec{r}) e^{-i\vec{G}\vec{r}} d^2\vec{r}, \quad (5)$$

причем S – площадь элементарной ячейки двумерного ФК. Здесь, в соответствии с рис. 1, б, следует полагать: $k_{0x} = k \cos \alpha, k_{1x} = k \cos \alpha, k_{0y} = k \sin \alpha, k_{1y} = k \sin \alpha + K$.

Рассмотрим неколлинеарное АО взаимодействие, представленное на рис. 1, б. При дифракции на продольной УЗ-волне в системе ФК следует полагать:

$$\Delta\varsigma_{33} = \left[f\pi_{33}^{(1)} + (1-f)\pi_{33}^{(2)} \right] \tilde{T}_{33}, \Delta\varsigma_{22} = \left[f\pi_{22}^{(1)} + (1-f)\pi_{22}^{(2)} \right] \tilde{T}_{22}, \quad (6)$$

где $\pi_{33}^{(1,2)}, \pi_{22}^{(1,2)}$ – пьезооптические коэффициенты соответственно включения («1») и матрицы («2») [6]; f – параметр заполнения материала ФК ($0 \leq f \leq 1$) [2]; $\tilde{T}_{33}, \tilde{T}_{22}$ – амплитуда тензора напряжений в поле продольной УЗ-волны. Амплитуды тензора напряжений даются соотношениями:

$$\tilde{T}_{33} = \left(P_a / \{ l h v_g [f s_{33}^{(1)} + (1-f) s_{33}^{(2)}] \} \right), \tilde{T}_{22} = \left(P_a / \{ l h v_g [f s_{22}^{(1)} + (1-f) s_{22}^{(2)}] \} \right), \quad (7)$$

где P_a – мощность УЗ волны, l (h) – длина (ширина) пьезопреобразователя, v_g – групповая скорость продольной УЗ волны, $s_{33}^{(1,2)}, s_{22}^{(1,2)}$ – компоненты тензора упругих податливостей соответственно включения («1») и матрицы («2») [4].

Компоненты обратного тензора диэлектрической непроницаемости находим из соотношения [2]: $\varsigma_{22} = \varsigma_{33} = f / \varepsilon^{(1)} + (1-f) / \varepsilon^{(2)}$, где $\varepsilon^{(1)}$ ($\varepsilon^{(2)}$) – диэлектрическая проницаемость включения (матрицы).

Тогда эффективность АО дифракции $\eta = |A_1(l)|^2 / |A|^2$ находим из соотношения:

$$\eta = \frac{q^2 \sin^2 \left(l \sqrt{q^2 + (\Delta k / 2)^2} \right)}{q^2 + (\Delta k / 2)^2}, \quad (8)$$

где $q = 2\pi n^2 \cos(\alpha + \pi/4) \Delta \zeta_{33} / 2\sqrt{2}\lambda$, $\Delta k = \pi \lambda f_s \Delta f / n v_g^2$, причем $\Delta f = (f_s - f_B)$ – отстройка частоты ультразвука f_s от брэгговской (f_B); в случае ТМ-ТМ- преобразования в выражении для q следует выполнить замену: $\Delta \zeta_{33} \rightarrow \Delta \zeta_{22}$.

Численные расчеты с использованием выражения (7) проводились для ФК из системы: SiO₂ (включение)-Si (матрица). На рис. 2 представлена зависимость эффективности дифракции η от мощности ультразвука P_a при различных значениях параметра заполнения ФК f .

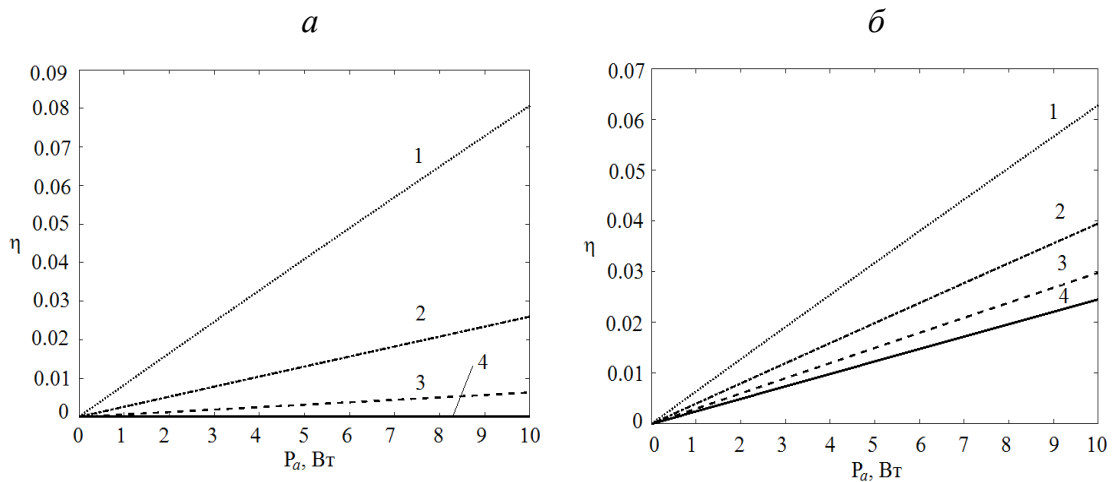


Рис. 2. Зависимость эффективности дифракции η от мощности ультразвука P_a для ТЕ-ТЕ-преобразования (а) и ТМ-ТМ-преобразования (б) при различных значениях параметра заполнения ФК f : 1-0, 2-0,2, 3-0,5, 4-1 ($n_1 = \sqrt{\epsilon^{(1)}} = 1,51, n_2 = \sqrt{\epsilon^{(2)}} = 3,43$; $l = 5$ см, $h = 1$ мм, $\lambda = 3$ мкм, $v_g = 7600$ м/с, $f_s = 81$ МГц, $\alpha = 1^\circ$)

Из рис. 2 следует, что наибольшая эффективность АО дифракции достигается при значении параметра заполнения, близком к $f \approx 0$; при ТЕ-ТЕ- преобразовании дифрагированных волн на продольной УЗ-волне она составляет ~8 %. При этом материал приобретает свойства кварца. При $f \approx 1$ для ТЕ-ТЕ-преобразования эффективность дифракции близка к нулевому значению $\eta \approx 0$. Данная особенность связана со значительно большим значением пьезооптической постоянной кварца по сравнению с пьезооптической постоянной кремния. Отметим, что для ТМ-ТМ-преобразования эффективность дифракции при $f \approx 1$ и $P_a = 10$ Вт достигает значения $\eta \approx 2,3\%$.

На рис. 3 представлена зависимость эффективности дифракции η от параметра отстройки частоты ультразвука от брэгговской Δf при различных значениях параметра заполнения ФК f .

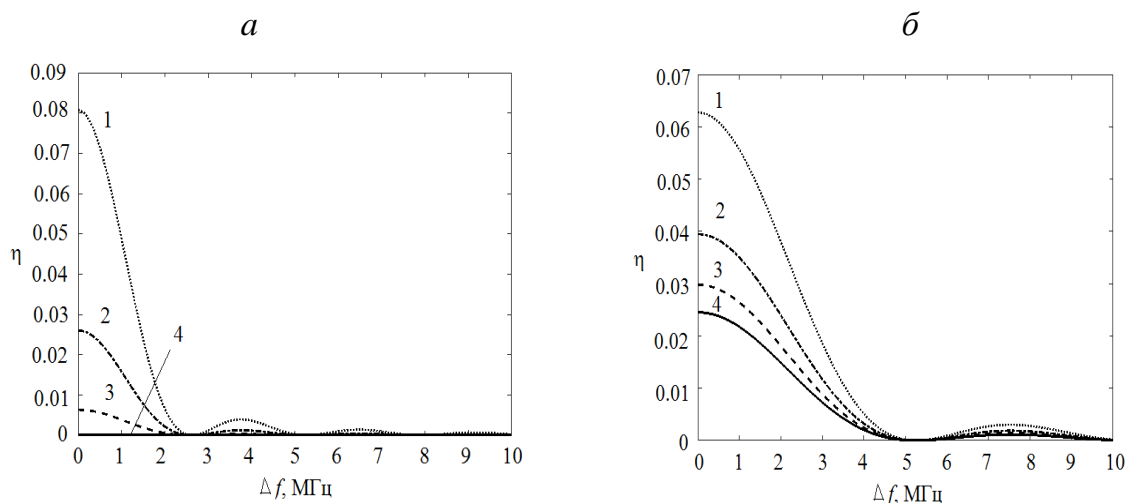


Рис.3. Зависимость эффективности дифракции η от параметра отстройки частоты ультразвука f_s от брэгговской Δf при различных значениях параметра заполнения ФК f : 1 – 0; 2 – 0,2; 3 – 0,5; 4 – 1 ($n_1 = 1,51$, $n_2 = 3,43$; $l = 5$ см, $h = 1$ мм, $\lambda = 3$ мкм, $v_g = 7600$ м/с, $P_a = 10$ Вт, $f_s = 81$ МГц, $\alpha = 1^\circ$)

Из рис. 3 следует, что наибольшая полоса АО модуляции $\Delta f_{1/2}$ по уровню 50 % от максимального значения достигает для ТМ-ТМ- преобразования световых волн на ультразвуке в ФК и составляет $\Delta f_{1/2} \approx 4,3$ МГц; ширина полосы пропускания для ТЕ-ТЕ- преобразования составляет $\Delta f_{1/2} \approx 3,1$ МГц. При этом ширина полосы брэгговского синхронизма практически не зависит от параметра заполнения ФК f .

Заключение

Таким образом полоса АО модуляции $\Delta f_{1/2}$ по уровню 50 % от максимального значения для ТМ-ТМ- АО преобразования световых волн на ультразвуке в ФК составляет ~ 4 МГц; ширина полосы пропускания для ТЕ-ТЕ- преобразования составляет ~ 3 МГц. Для увеличения эффективности АО дифракции и ширины полосы пропускания устройства можно использовать, другие комбинации материалов матрица-включение [1].

Библиографические ссылки

1. Белокопытов Г. В., Пятакова З. А. Акустооптическое взаимодействие в двумерных фотонных кристаллах: эффективность дифракции // Оптика и спектроскопия. 2011. Т. 110, № 4. С. 636-644.
2. Joannopoulos J.D., Johnson S.G., Winn J.N., Meade R.D. Photonic Crystals. Modeling the Flow of Light. Princeton University Press. 2008. 281 P..
3. Балакший В. Н. Физические основы акустооптики. / В. Н. Балакший, В. Н. Парыгин, Л. Е. Чирков. – М.: Радио и связь, 1985. 280 с.
4. Акустические кристаллы. Справочник / А. А. Блистанов [и др.]; под ред. М. П. Шаскольской. М.: Наука, 1986. 629 с.