

Модуляция бesselевых световых пучков в кристаллах парателлурита акустооптическим методом

Г. В. Кулак¹⁾, А. М. Варанецкий²⁾, П. И. Ропот²⁾, Л. А. Тозик¹⁾

¹⁾Мозырский государственный педагогический университет им. И. П. Шамякина,
Мозырь, Беларусь, e-mail: g.kulak57@mail.ru

²⁾Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: p.ropot@dragon.bas-net.by

Исследована акустооптическая модуляция бesselевых световых пучков с длиной волны 532 нм на продольных ультразвуковых волнах в кристаллах парателлурита. С использованием двумерной теории связанных волн показано, что с увеличением длины акустооптического взаимодействия и мощности ультразвука эффективность дифракции увеличивается. Для центральной частоты ультразвука 100 МГц достигнута ширина полосы частотной перестройки модулятора ~ 35–50 МГц по уровню 3дБ при максимальной эффективности дифракции ~56 %.

Ключевые слова: акустооптическое взаимодействие, ультразвуковая волна, полоса пропускания, акустооптическая модуляция, эффективность дифракции.

Modulation of Bessel Light Beams in Paratellurite Crystals by an Acousto-Optic Method

G. V. Kulak¹⁾, A. M. Varanetsky²⁾, P. I. Ropot²⁾, L. A. Tozik¹⁾

¹⁾Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin, Mozyr, Belarus,
e-mail: g.kulak57@mail.ru

²⁾B. I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: p.ropot@dragon.bas-net.by

Acousto-optic modulation of 532 nm Bessel light beams by longitudinal ultrasound waves in paratellurite crystals was studied. Using two-dimensional coupled-wave theory, it was shown that diffraction efficiency increases with increasing acousto-optic interaction length and ultrasound power. For an ultrasound center frequency of 100 MHz, a modulator frequency tuning bandwidth of ~35–50 MHz at a 3 dB level was achieved, with a maximum diffraction efficiency of ~56%.

Keywords: acousto-optic interaction, ultrasonic wave, bandwidth, acousto-optic modulation, diffraction efficiency.

Введение

Акустооптические модуляторы света используются в качестве устройств ввода информации в оптические обрабатывающие системы [1]. При этом могут быть реализованы системы для одноканальной и многоканальной обработки информационных сигналов, например, от радиолокационных антенных решеток. В настоящее время значительный интерес для оптических информационных технологий представляют квазибездифракционные световые поля, которые соответствуют световым пучкам с сохраняющимся в процессе распространения поперечным распределением амплитуды поля. Наиболее известным классом квазибездифракционных полей являются бesselевы световые пучки (БСП) [2].

В настоящей работе теоретически и экспериментально исследованы особенности акустооптической модуляции бесселевых световых пучков на продольной ультразвуковой (УЗ) волне, распространяющейся вдоль оптической оси кристалла парателлурита (TeO_2). Рассмотрена акустооптическая (АО) модуляция при изотропной АО дифракции пучков обыкновенной поляризации (o -о преобразование). При теоретическом исследовании применена двумерная теория связанных волн (см. [3]) с учетом отстройки брэгговского синхронизма.

1. Теоретические результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлена схема изотропной брэгговской дифракции линейно поляризованных световых пучков

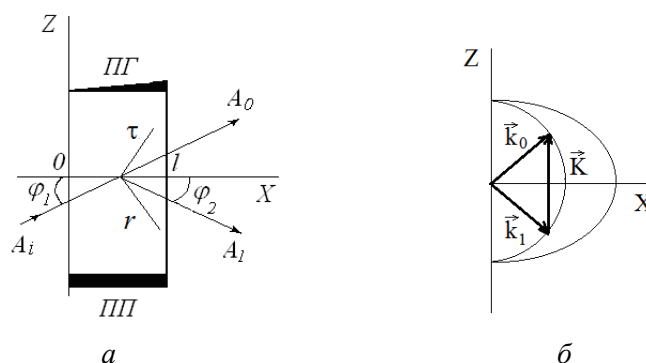


Рис. 1. Схема АО взаимодействия БСП и продольной УЗ волны (а); геометрия расположения преломленной и дифрагированной плосковолновых компонент БСП в плоскости дифракции на продольной УЗ волне в кристалле TeO_2 (б): ПП – пьезопреобразователь; ПГ – поглотитель ультразвука; φ_1 и φ_2 – угол падения и дифракции соответственно; $\vec{K}$ – волновой вектор ультразвука, $\vec{k}_0$, $\vec{k}_1$ – волновые векторы преломленной и дифрагированной волн

Рассмотрим геометрию АО взаимодействия (рис. 1), для которой УЗ волна распространяется в кристалле TeO_2 вдоль оси Z и занимает пространство между плоскостями $x = 0$ и $x = l$. Ось падающего БСП расположена в плоскости XZ под углом φ_1 к фронту УЗ волны. Сечение поверхности волновых векторов плоскостью дифракции XZ и расположение плосковолновых компонент падающего ($\vec{k}_0$) и дифрагированного ($\vec{k}_1$) и плосковолновых компонент показано на рис.1, б. При этом, как показано на рис. 1, б, реализуется дифракционный процесс: $\vec{k}_0 + \vec{K} = \vec{k}_1 + \Delta\vec{k}$ ($\Delta\vec{k}$ - отстройка фазового синхронизма). Для рассматриваемой геометрии АО взаимодействия следует положить: $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi = \arcsin(\lambda_0 v / 2n_o v)$, где λ_0 – длина световой волны в вакууме, (n_o – обыкновенный показатели преломления кристалла), v - фазовая скорость продольной УЗ волны [1]).

В рамках двумерной теории связанных волн система связанных дифференциальных уравнений для комплексных амплитуд дифрагированных волн $A_0(r)$, $A_1(\tau)$ имеет вид:

$$\frac{\partial A_0}{\partial \tau} + ie^{i\Delta k(\tau+r)}\chi A_1 = 0, \quad \frac{\partial A_1}{\partial r} + ie^{-i\Delta k(\tau+r)}\chi A_0 = 0, \quad (1)$$

где коэффициент связи дифрагированных волн χ выражается через свертки тензора диэлектрической проницаемости $\Delta\epsilon_{ij} = -\epsilon_{ik}\epsilon_{lj}P_{klmn}U_{mn}$ (ϵ_{ij}, U_{mn} – компоненты тензора диэлектрической проницаемости и тензора УЗ деформации) с векторами поляризации $\vec{e}_0, \vec{e}_1$ дифрагированных волн нулевого и первого порядка, то есть $\chi = k^2(\vec{e}_0\Delta\epsilon\vec{e}_1)/2$; $\tau = x\sin\varphi - z\cos\varphi$, $r = x\sin\varphi + z\cos\varphi$; $k = 2\pi n/\lambda_0$; $\Delta k = (\pi f_0\lambda_0/n_0v^2)\Delta f$ – отстройка фазового синхронизма ($\Delta f = (f - f_0)$ – отстройка частоты УЗ волны от центральной f_0) [1]. Если искать решение системы уравнений (1) методом Римана с использованием граничных условий: $A_0(x=0) = A_{i0}$, $A_1(x=0) = 0$, то общее решение можно представить в виде:

$$A_0(r) = A_1(r) - \frac{1}{2}v \int_{-1}^{+1} A_1[r - g(1-q)] e^{-i\delta g(1-q)} \frac{J_1(v\sqrt{1-q^2})}{\sqrt{1-q^2}} dq, \quad (2)$$

$$A_1(\tau) = -i\frac{1}{2}ve^{-i2\delta\tau} \int_{-1}^{+1} A_1[g(1-q) - \tau] e^{-i\delta g(1-q)} J_0(v\sqrt{1-q^2}) dq, \quad (3)$$

где $v = \chi l / kn^2 \cos\varphi$ – индекс модуляции УЗ волной; $g = l \sin\varphi$ – геометрический параметр; $\delta = \Delta k / 2 \sin\varphi$; $J_0(x)$, $J_1(x)$ – функции Бесселя первого рода, соответственно нулевого и первого порядка. При этом индекс модуляции выражается через коэффициент акустооптического качества M_2 : $v = \frac{2\pi}{\lambda_0 \cos\varphi} \sqrt{\frac{M_2 P_a l}{2h}}$, где P_a –

мощность ультразвука, h – ширина пьезопреобразователя. Выражения (2), (3) позволяют рассчитать амплитудное распределение дифрагированного пучка нулевого и первого порядка для любого уровня акустической мощности и широкого класса падающих световых пучков. Эффективность АО дифракции (η) определяется соотношением

$$\eta = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} |A_1(\tau)|^2 d\tau}{\int_{-\infty}^{+\infty} |A_0(r)|^2 dr + \int_{-\infty}^{+\infty} |A_1(\tau)|^2 d\tau}. \quad (4)$$

Численные расчеты проводились для АО дифракции излучения с длиной волны $\lambda_0 = 532$ нм на медленной сдвиговой УЗ волне, распространяющейся под малым углом $\varphi \ll 1$ к оси [110] кристалла TeO_2 . Коэффициент АО качества для линейно-поляризованного падающего волнового пучка равен [1]: $M_2 = 34,5 \cdot 10^{-18} \text{ с}^3/\text{Г}$. БСП имеет вид: $A_i(r) = AJ_0(kr \sin\gamma)$, где $A(\gamma)$ – амплитуда (угол конусности) БСП.

На рис. 2, а для падающего БСП представлена зависимость дифракционной эффективности η от мощности ультразвука P_a , рассчитанная по формулам (2) – (5), при различных значениях длины АО взаимодействия l . Зависимость эффективности АО дифракции η от отстройки частоты УЗ волны от брэгговской (Δf) при различных длинах АО взаимодействия представлена на рис. 2, б.

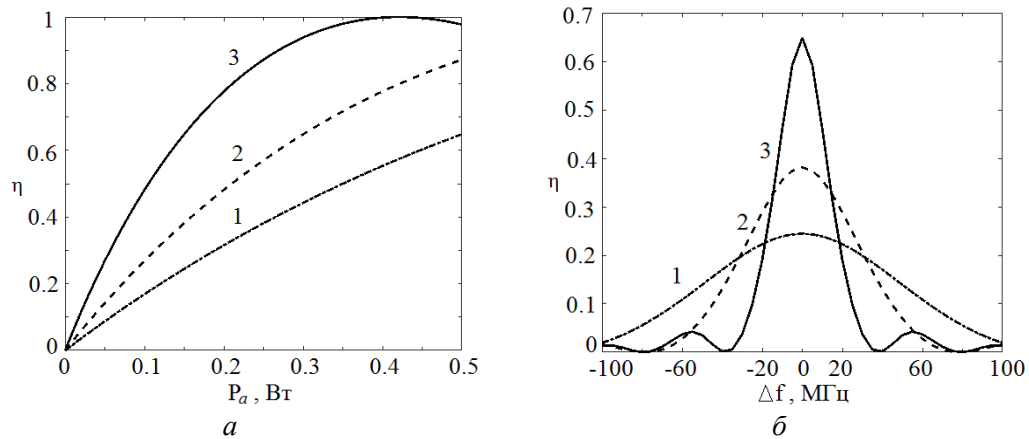


Рис. 2. Зависимость эффективности дифракции η бesselового светового пучка η от мощности УЗ волны P_a при точном брэгговском синхронизме (а); зависимость эффективности дифракции η БСП от отстройки частоты УЗ волны от брэгговской Δf при различных длинах АО взаимодействия l : 1 – 3 мм, 2 – 5 мм, 3 – 10 мм (кристалл TeO_2 , $\lambda_0 = 532$ нм, $n_0 = 2,29$, $M_2 = 34,5 \cdot 10^{-18} \text{ c}^3/\text{г}$, $h = 4$ мм, $\gamma = 0,5^\circ$, $f_0 = 100$ МГц, $\Delta f = 0$ (а), $P_a = 0,15$ Вт) (б)

Максимум эффективности дифракции ($\eta = 1$) достигается при достижении длины АО взаимодействия $l = 10$ мм. Из рис. 2, б следует, что при уменьшении длины АО взаимодействия имеет место увеличение ширины полосы пропускания АО модулятора по уровню 50 % от максимального значения. Ширина полосы пропускания устройства при изменении длины АО взаимодействия в пределах 5÷10 мм изменяется в пределах 35÷50 МГц.

2. Экспериментальные результаты

На рис. 3 представлена экспериментальная схема исследования АО дифракции БСП на продольной УЗ волне.

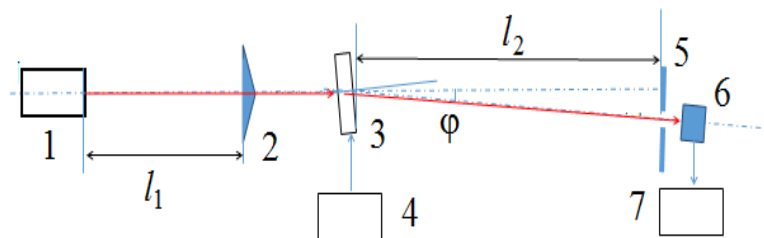


Рис. 3. Схема АО дифракции БСП на продольной УЗ волне:

1 – лазер OBIS LS 532-20 (длина волны 532 нм, мощность 20 мВт, диаметр пучка 0,75 мм; расходимость 0,9 мрад.; 2 – аксиконы AX252-A (Thorlabs); 3 – АО ячейка на TeO_2 с центральной частотой $f_0 = 100$ МГц; 4 – генератор высокочастотный RIGOL DG5071; 5 – диафрагма; 6 – фотодиодный приемник S121C (Thorlabs); 7 – измеритель мощности LaserStar (Ophir)

На рис. 3, за счет угловой расходимости, световой пучок с диаметром на входе 0,75 мм, пройдя расстояние $l_1 = 1$ м, приобретает диаметр равный 1,5 мм (на входе в аксикон). Коэффициент преобразования электрической мощности в акустическую составляет $\sim 0,1$.

На рис. 4 представлена зависимость эффективности АО дифракции η от частоты УЗ волны f , подаваемой УЗ генератором (4) на ПП (3) на рис. 3.

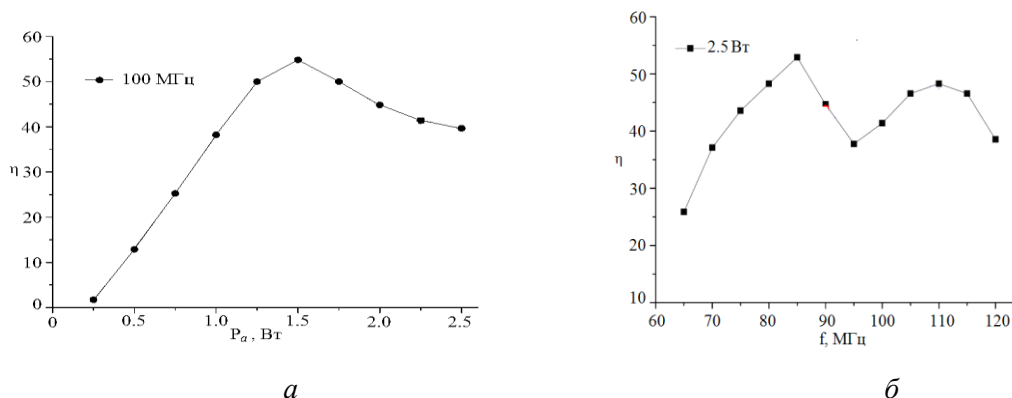


Рис. 4. Зависимость эффективности дифракции η от электрической мощности, вырабатываемой ВЧ генератором (а); зависимость эффективности дифракции η от частоты УЗ волны, вырабатываемой генератором (4) на рис. 3 (кристалл TeO_2 , электрическая мощность $P_э = 2,5$ Вт, $h = 4$ мм, $l = 10$ мм) (б)

Из рис. 4, а следует, что для падающего БСП эффективность дифракции при строгом выполнении условия Брэгга достигает 56 %. Ширина полосы пропускания модулятора, как следует из рис. 4б составляет ~ 35 МГц.

Заключение

Таким образом, при АО преобразовании БСП на продольной УЗ волне достижима эффективность АО взаимодействия ~ 56 % при акустической мощности $\sim 0,15$ Вт и длине АО взаимодействия 10 мм. Ширина полосы пропускания АО модулятора может составить $\sim 35 \div 50$ МГц. Теоретические результаты на основе двумерной теории связанных волн согласуются с полученными экспериментальными данными.

Библиографические ссылки

1. Блистанов А. А. Кристаллы квантовой и нелинейной оптики. – М.: МИСИС. 2000.
2. Durnin, J. Exact solutions for nondiffracting beams // J. Opt. Soc. Am. 1987. V.4, № 4. P. 651–654.
3. Белый В. Н. Дифракция световых пучков на затухающих ультразвуковых волнах в оптически изотропных средах / В. Н. Белый, И. Г. Войтенко, Г. В. Кулак // Журн. прикл. спектр. 1992. Т. 56, № 5-6. С. 831–836.