

УДК 534.535

В. Н. Белый*

доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН Беларуси

П. А. Хило**

доктор физико-математических наук, профессор

Н. А. Хило*

кандидат физико-математических наук, доцент

П. И. Ропот*

кандидат физико-математических наук, доцент

С. В. Кулаков***

доктор технических наук, профессор

*Институт физики НАН Беларуси

**Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

***Санкт-Петербургский государственный университет

аэрокосмического приборостроения

АКУСТООПТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БЕССЕЛЕВЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В КРИСТАЛЛЕ $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$

Исследованы особенности анизотропной акустооптической (АО) дифракции бесселева светового пучка (БСП) на поперечно-поляризованной плоской акустической волне в кристалле $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$ тетрагональной симметрии класса 4/m. Предложена новая оптическая схема АО-дифракции, в которой БСП формируется внутри кристалла из кольцевого падающего пучка. Построена резонансная кривая, и рассчитана эффективность дифракции БСП ограниченного диаметра.

Ключевые слова: бесселевы световые пучки, акустооптическая дифракция, акустооптический модулятор.

V. N. Belyi*

Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus

P. A. Khilo**

Dr. Sc., Phys.-Math., Professor

N. A. Khilo*

PhD, Phys.-Math., Associate Professor

P. I. Ropot*

PhD, Phys.-Math., Associate Professor

S. V. Kulakov***

Dr. Sc., Tech., Professor

*Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus

**Sukhoi State Technical University of Gomel

***St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ACOUSTO-OPTIC INTERACTION OF BESSEL LIGHT BEAMS IN THE $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$ CRYSTAL

The features of anisotropic acousto-optic (AO) diffraction of a Bessel light beam (BLB) on the transversely polarized plane acoustic wave in the $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$ crystal of tetragonal symmetry of the 4/m class are investigated. A new optical scheme of AO diffraction is proposed, in which BLB is formed inside a crystal from an annular incident beam. Resonance curve is constructed and diffraction efficiency of BLB with a limited diameter is calculated.

Keywords: bessel light beams, acousto-optic diffraction, acousto-optic modulator.

В данной работе исследуются особенности акустооптической (АО) дифракции бесселева светового пучка (БСП) в кристалле висмут-лития молибдата $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$. Физические свойства этих кристаллов делают их перспективными для применения в акустооптике. Для осуществления АО-дифракции с участием БСП была выбрана поперечная акустическая мода, позволяющая реализовать режим анизотропной дифракции.

Геометрия акустооптического взаимодействия

На рис. 1 показано расположение волновых векторов бесселева светового пучка и акустической волны. Окружность относится к обыкновенной волне (индекс o), эллипс расположен внутри круга ($n_e < n_o$) и относится к необыкновенной плоской волне (индекс e). В случае анизотропной $e \rightarrow o$ дифракции падающий пучок является ТН-поляризованным (или e -пучком). Для его описания используется модель векторного бесселева пучка [1; 2]. Парциальный волновой вектор $k_{e,in}$ падающего пучка, лежащий в плоскости (x, z) оптической оси, показан на рис. 1.

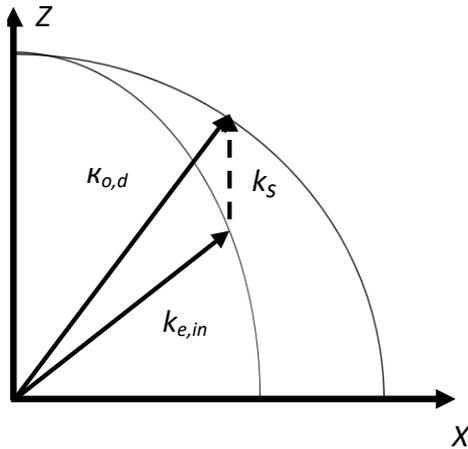


Рис. 1. Сечение поверхности волновых векторов одноосного оптически отрицательного кристалла главной плоскостью XZ и векторная диаграмма АО-дифракции БСП на акустической волне: $k_{e,in}$ – волновой вектор падающего БСП, k_{od} – волновой вектор дифрагированного БСП, k_s – волновой вектор акустической волны

Волновой вектор $k_{o,d}$ относится к дифрагированному БСП, а вектор k_s – к акустической плоской волне. В рассматриваемой геометрии падающий и дифрагированный БСП, а также акустическая волна распространяются в положительном направлении оси Z.

Уравнения векторного синхронизма для АО-взаимодействия с участием БСП формально совпадают с соответствующими уравнениями для плоских волн, т. е. имеют вид:

$$\vec{k}_e + \vec{k}_s = \vec{k}_{d,o}. \quad (1)$$

С помощью формулы (1) рассчитана зависимость между углом γ конуса падающего БСП и частотой двух акустических мод, необходимая для реализации синхронного АО-взаимодействия в кристалле $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$ (рис. 2).

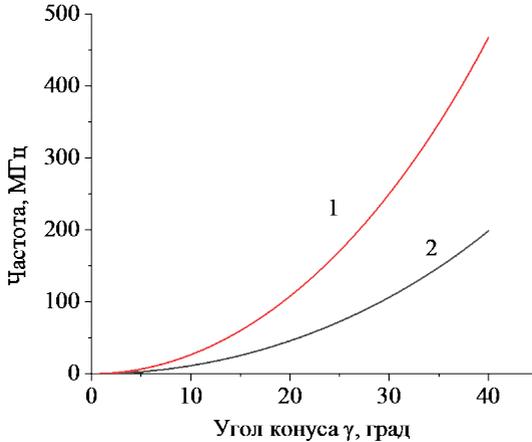


Рис. 2. Зависимость частоты акустической волны для e - o -взаимодействия в кристалле $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$ от угла конуса падающего БСП для продольно- (индекс 1) и поперечно- (индекс 2) поляризованных акустических мод при $\lambda = 0,63$ мкм, $n_o = 2,368$, $n_e = 2,255$, $v_1 = 3,9 \cdot 10^3$ м/с, $v_2 = 1,7 \cdot 10^3$ м/с

Так как поглощением акустических волн в кристаллах $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$ и $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$ можно пренебречь только до частот не более 200 МГц, то из рис. 2 следует, что эффект поглощения ограничивает сверху допустимые углы конуса БСП.

Тензор диэлектрической проницаемости для АО-дифракции бесселевых световых и акустической волн

Изменение тензора диэлектрической проницаемости $\Delta \epsilon$ для рассматриваемого $e \rightarrow o$ типа АО-дифракции имеет следующие ненулевые компоненты:

$$\begin{aligned}\Delta\varepsilon_{\phi,z} &= -i\frac{1}{4}\varepsilon_o\varepsilon_e\mu_0k_s(p_{44} - ip_{45})\exp(i\phi), \\ \Delta\varepsilon_{p,z} &= -i\frac{1}{4}\varepsilon_o\varepsilon_e\mu_0k_s(p_{45} - ip_{44})\exp(i\phi),\end{aligned}\quad (2)$$

где p_{44}, p_{45} – компоненты тензора фотоупругости. Из (2) следует, что падающий БСП порядка m при АО-взаимодействии будет рассеиваться в бесселев пучок порядка $m + 1$.

При использовании продольной акустической волны индуцируются диагональные компоненты тензора $\Delta\varepsilon$: $\Delta\varepsilon_{pp}, \Delta\varepsilon_{\phi\phi}, \Delta\varepsilon_{zz}$, т. е. становится возможной изотропная дифракция типа $e \rightarrow e$, или $o \rightarrow o$. Такие типы дифракции представляют интерес в связи с возможностью повышения эффективности АО-преобразования вследствие взаимодействия одинаковых по пространственной структуре световых пучков. Данная геометрия взаимодействия может быть реализована при обратной рассеянии БСП [1], но требует применения акустических волн с частотой несколько гигагерц. Это, однако, затруднительно из-за сильного поглощения акустического поля. Возможен и второй способ реализации изотропной АО-дифракции, который требует перехода к бесселевым акустическим пучкам [2].

Эффективность дифракции бесселева светового пучка

Укороченные уравнения для АО-дифракции с участием БСП и плоской акустической волны имеют вид:

$$\frac{dA_{m+1}^o}{dz} = i\chi_{m+1,m}^{oe}A_m^e \exp(-i\Delta k_z z), \quad \frac{dA_m^e}{dz} = i\chi_{m,m+1}^{eo}A_{m+1}^o \exp(i\Delta k_z z). \quad (3)$$

Здесь A_m^e и A_{m+1}^o – амплитуды проходящего и дифрагированного БСП, Δk_z – волновая расстройка. Параметры акустооптической связи $\chi_{m,n}^{oe}$ содержат интегралы перекрытия компонент падающего и дифрагированного БСП. Решение уравнений (3) позволяет рассчитать эффективность дифракции η (рис. 3). Расчет проведен для кристалла $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$ на длине волны $\lambda = 0,63\text{мкм}$. Используются следующие значения компонент тензора упругости [3]: $c_{44} = 16,03 \cdot 10^{10}$ Па, $c_{11} = 94,67 \cdot 10^{10}$ Па, $c_{33} = 67,51 \cdot 10^{10}$ Па, $c_{13} = 29,05 \cdot 10^{10}$ Па, $c_{12} = 40,93 \cdot 10^{10}$ Па, $c_{66} = 23,07 \cdot 10^{10}$ Па $c_{16} = -8,23 \cdot 10^{10}$ Па, $\rho = 5,67 \cdot 10^3 \text{кг/м}^3$. Диаметр светового БСП равен 6 мм, угол конуса 10 град, длина взаимодействия 1,8 см и соответствовала бездифракционной длине падающего БСП. Акустическая волна имела частоту 50 МГц, мощность 1 Вт.

Из рис. 3 следует, что эффективность дифракции в максимуме более 80%, а угловая ширина резонансной кривой по уровню 0,5 равна примерно 0,1 мрад. Так как падающий БСП диаметром 6 мм имеет ширину углового спектра также около 0,1 мрад, то в целом реализуется высокая эффективность дифракции БСП.

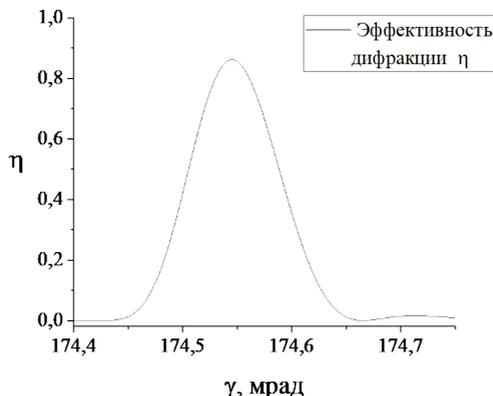


Рис. 3. Зависимость эффективности АО-дифракции бesselева светового пучка на плоской акустической волне от угла конуса γ дифрагированного БСП

На рис. 4 показан вариант оптической схемы для реализации АО-дифракции бesselева светового пучка на плоской акустической волне.

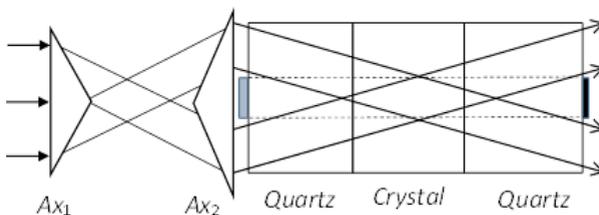


Рис. 4. Оптическая схема, позволяющая реализовать АО дифракцию БСП на плоской акустической волне

Здесь два аксикона Ax_1 и Ax_2 трансформируют входной гауссов пучок в кольцевой конический пучок в плоскости пьезопреобразователя. Пьезопреобразователь расположен не на кристалле, а на вспомогательной пластине, например, из плавяного кварца. Эта пластина находится в акустическом контакте с кристаллом $LiVi(MoO_4)_2$ и имеет толщину, достаточную для локализации кристалла в области существования бesselева пучка (ромб на рис. 4). Вторая пластина кварца предназначена для установки поглотителя акустического пучка. Проходящее и дифрагированное поля в виде кольцевых конических пучков выводятся из второй вспомогательной пластины. При необходимости конический пучок на выходе можно преобразовать в осевой, применяя дополнительный аксикон.

Таким образом, в работе проведен расчет е-о-типа дифракции БСП на поперечно-поляризованной плоской акустической волне в кристалле

LiBi(MoO₄)₂. Предложена новая оптическая схема АО-дифракции, в которой БП формируется внутри кристалла из кольцевого падающего пучка. Численные оценки показывают возможность достижения высокой эффективности дифракции.

Библиографический список

1. Belyi V. N., Khilo P. A., Kazak N. S., Khilo N. A. Generation of TH- and TE-polarized Bessel light beams at acousto-optic interaction in anisotropic crystals // Opt. commun. 2014. Vol. 325. P. 84–91.
2. Belyi V. N., Khilo P. A., Kazak N. S., Khilo N. A. Transformation of phase dislocations under acousto-optic interaction of optical and acoustical Bessel beams // J. Opt. 2016. №. 7. P. 074002–08.
3. Mazur M. M., Pavlyuk A. A., Ryabinin A. V. Acoustic and Optical Properties of a LiBi(MoO₄)₂ Crystal // Inorganic Materials. 2021. Vol. 57, № 4. P. 372–376.