

В.Н. Белый¹, Н.А. Хило¹, П.И. Ропот¹, П.А. Хило

¹Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси

²Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого

АКУСТООПТИЧЕСКАЯ КРУГОВАЯ РАЗВЕРТКА СВЕТОВОГО ЛУЧА ПРИ КВАЗИКОЛЛИНЕАРНОЙ ДИФРАКЦИИ В АНИЗОТРОПНЫХ КРИСТАЛЛАХ

Исследована возможность создания нового типа анизотропного акустооптического дефлектора (АОД) с круговой угловой разверткой. Проведено исследование акустооптического (АО) взаимодействия БСП, распространяющегося в кристалле тетрагональной симметрии в направлении, перпендикулярном оптической оси четвертого порядка в плоскости XZ, с ультразвуковой волной, распространяющейся в том же направлении. Исследована эффективность АО взаимодействия от азимутального угла. Определена угловая ширина дифракционного максимума и число разрешимых положений световой волны при круговом сканировании.

Ключевые слова: Бесселев световой пучок, ультразвуковая волна, угловое разрешение, эффективность дифракции

Введение. Среди устройств, используемых для развертки лазерных пучков, акустооптические дефлекторы (АОД) выделяются рядом преимуществ: высоким быстродействием угловой развертки лазерного пучка, отсутствием механических узлов, малыми габаритными размерами и массой. Наилучшие характеристики АОД получены при использовании анизотропной дифракции Брэгга, при которой синхронизм акустооптического взаимодействия существенно шире, чем в случае изотропной дифракции. В видимой и ближней ИК-областях оптического спектра наибольшее применение нашли анизотропные АОД на парателлурите (TeO_2) – акустооптическом материале, обладающим целым рядом уникальных характеристик.

Одним из наиболее серьезных недостатков АОД остается относительно небольшие значения максимальных углов развертки сканирующего пучка (как правило, до 3° для длины волны 1,064 мкм).

Геометрия АО дифракции. В работе исследована возможность создания нового типа анизотропного АОД с круговой угловой разверткой, что отчасти компенсирует указанный недостаток. Для этого проведено исследование АО взаимодействия БСП, распространяющегося в кристалле тетрагональной симметрии в направлении, перпендикулярном оси четвертого порядка в плоскости XZ, с ультразвуковой волной, распространяющейся во встречном направлении. Геометрия взаимодействия приведена на рисунке 1. Падающий ТЕ, поляризованный БСП, является астигматический с волновым вектором k_e , зависящим от азимутального угла φ , а дифрагированный ТН, поляризованный БСП – круговым с волновым вектором k_o .

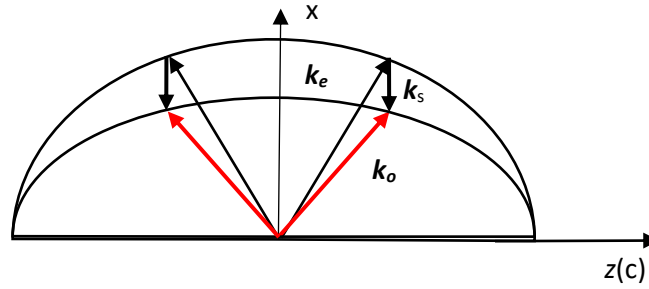


Рисунок 1 – Геометрия акустооптического взаимодействия

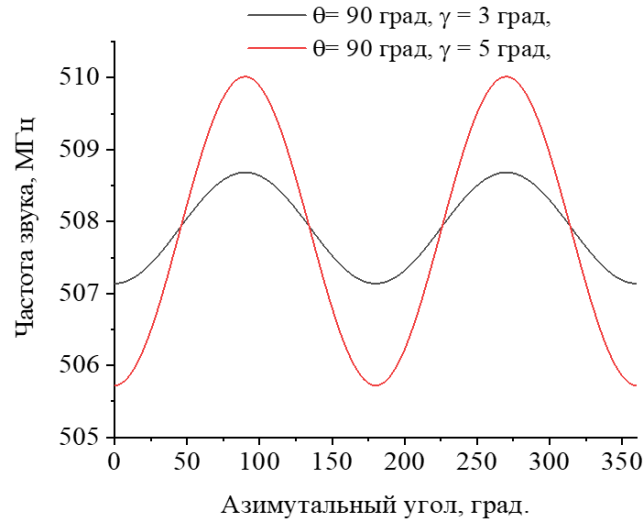


Рисунок 2 – Изменение частоты ультразвуковой волны, необходимой для синхронного АО взаимодействия, в зависимости от азимутального угла

Волновые векторы k_o и k_e , принадлежащие указанным конусам и лежащие в плоскости (x, z) , показаны на рисунке 1. Проекции данных векторов на границу раздела являются поперечными волновыми числами БСП, которые в данном случае одинаковы для обоих пучков. Модуль волнового вектора k_s , удовлетворяющий условию продольного синхронизма при АО взаимодействии, определяется из соотношения

$$k_s = k_e(\alpha) \cos \gamma - \sqrt{k_o^2 - (k_e(\alpha) \sin \gamma \sin \phi)^2 - (k_e(\alpha) \cos \phi)^2},$$

$$k_e(\alpha) = k_o \sqrt{\frac{\epsilon_o \epsilon_e}{\epsilon_e \cos(\gamma, \phi)^2 + \epsilon_o \sin(\gamma, \phi)^2}}$$

где γ – угол конусности падающего БСП, ϕ – азимутальный угол в плоскости ZY .

Как следует из графиков на рисунке 2, при распространении БСП в направлении, перпендикулярном оптической оси при заданной частоте ультразвуковой волны существуют четыре азимутальных угла, при которых выполняется условие продольного синхронизма при акустооптическом взаимодействии.

Эффективность АО взаимодействия. Так как каждая плосковолновая компонента падающего астигматического БСП е-типа эффективно взаимодействует только с одной из компонент БСП о-типа из-за волнового рассинхронизма для других

компонент, то укороченные уравнения для АО дифракции имеют вид, аналогичный случаю взаимодействия плоских волн

$$\begin{aligned} \frac{dA_o}{dy} &= i\chi_1 A_e \exp(-i\Delta ky), \\ \frac{dA_e}{dy} &= i\chi_2 A_o \exp(i\Delta ky) \end{aligned} \quad (1)$$

В (1) A_e и A_o – амплитуды проходящей и дифрагировавшей плосковолновой компоненты, Δk – волновая расстройка, зависящая от азимутального угла φ . Параметр АО связи имеет вид $\chi_{1,2} = \frac{\pi\Delta\varepsilon}{\lambda n_{e,o} \cos \gamma_{d,t}}$, $\chi = \sqrt{\chi_1 \chi_2}$, а индуцированное акустической

волной изменение диэлектрической проницаемости $\Delta\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_e p_{13} \sqrt{\frac{2P}{\rho v^3 ab}}$. Здесь p_{13} – фотоупругая постоянная, ρ – плотность кристалла, v – скорость акустической волны, a, b – размеры пьезопреобразователя, P – акустическая мощность.

Эффективность дифракции рассчитывается из укороченных уравнений (1) и равна

$$\eta(\varphi, P) = \frac{\chi^2}{[\Delta k(\varphi)/2]^2 + \chi(P)^2} \sin^2 \left(L \sqrt{[\Delta k(\varphi)/2]^2 + \chi(P)^2} \right),$$

где L – длина взаимодействия.

Численный расчет проведен при следующих параметрах кристалла TeO_2 : длина волны $\lambda=0.63\text{мкм}$, показатели преломления $n_o=2.25$, $n_e=2.41$, фотоупругая постоянная, ответственная за акустооптическое взаимодействие, $p_{13}=0.21$, скорость УЗ волны $v=2.1\text{ км/с}$. При этом глубина модуляции диэлектрической проницаемости $\sim 10^{-6}$. Число разрешимых положений плосковолновой компоненты порядка 50 в одном квадранте.

Заключение. В работе предложен метод осуществления выборочного синхронизма плосковолновых компонент БСП при АО дифракции. В результате такого типа АО дифракции происходит азимутальное сканирование дифрагированного парциального светового пучка, выделенного из конуса плоских волн, составляющих падающий БСП.

Исследована эффективность АО взаимодействия в зависимости от азимутального угла. Определена угловая ширина отдельного максимума дифракции и число разрешимых положений плосковолновой компоненты при круговом сканировании

Список использованных источников

1. Belyi, V. Acousto-Optic Control of Bessel-like Beam Parameters in the Far Zone with the Use of Uniaxial TeO_2 and $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$ Crystals / V.N. Belyi, N.A Khilo, A.M. Varanetskiy, P.I. Ropot, A.V. Agashkov and P.A Khilo // IEEE. – 2024. – P. 1–5, doi: 10.1109/WECNF61770.2024.10564657.