

УДК 534.535

В. Н. Белый*

доктор физико-математических наук, академик

Н. А. Хило*

кандидат физико-математических наук, доцент

А. М. Варанецкий*

научный сотрудник

П. И. Ропот*

кандидат физико-математических наук, доцент

П. А. Хило**

доктор физико-математических наук, профессор

А. В. Агашков*

кандидат физико-математических наук

*Институт физики НАН Беларуси

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

АКУСТООПТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ПУЧКОВ БЕССЕЛЕВА ТИПА В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНООСНЫХ КРИСТАЛЛОВ TeO_2 И $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$

Теоретически и экспериментально изучены особенности брэгговской дифракции кольцевых световых пучков на продольной ультразвуковой волне, распространяющейся вдоль оптической оси кристаллов TeO_2 и $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$. Показано, что дифрагированный пучок в дальней зоне трансформируется в пучок бесселева типа, содержащий интенсивный центральный максимум и несколько слабоинтенсивных боковых колец. Исследована зависимость осевой интенсивности таких малокольцевых пучков, а также их пространственная поперечная структура от продольной координаты на больших расстояниях. Полученные результаты перспективны для разработки методов модуляции и управления параметрами излучения в системах беспроводной оптической связи.

Ключевые слова: акустооптика, брэгговская дифракция, кольцевые и бесселевы световые пучки, аксикон, кристаллы.

V. N. Belyi*

Dr. Sc., Phys.-Math., Academician

N. A. Khilo*

PhD, Phys.-Math., Associate Professor

A. M. Varanetski*

Research Employee

P. I. Ropot*

PhD, Phys.-Math., Associate Professor

P. A. Khilo**

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

A. V. Agashkov*

PhD, Phys.-Math.

*Institute of Physics of the NAS of Belarus

** Sukhoi State Technical University of GomeI

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

Features of Bragg diffraction of annular light beams on longitudinal ultrasound wave propagating along optical axis of TeO_2 and $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$ crystals are theoretically and experimentally studied. It is shown that the diffracted beam in the far zone is transformed into a Bessel-like beam containing an intense central maximum and several low-intensity lateral rings. The dependence of axial intensity of such low-ring beams, as well as their spatial transverse structure on the longitudinal coordinate at large distances, is investigated. The obtained results are perspective for the development of methods for modulation and control of radiation parameters in wireless optical communication systems.

Keywords: acousto-optics, Bragg diffraction, annular and Bessel light beams, axicons, crystals.

Введение

В настоящее время значительный интерес обращен к разработке методов формирования и управления параметрами малокольцевых световых пучков бесселева типа. Использование малокольцевых квазибездифракционных пучков перспективно, в частности, для создания систем оптической связи в свободном пространстве. Система связи, основанная на применении таких пучков, может обеспечить максимальную осевую интенсивность на апертуре приемника, так как формируются бесселевы пучки с одним-двумя боковыми максимумами, которые обеспечивают подавление дифракционной расходимости пучка на больших расстояниях [1].

Предложенный в [2, 3] подход основан на формировании кольцевого пучка (КП) с использованием системы из двух конических линз. Кольцевая структура пучка позволяет осуществлять эффективный его ввод в телескопы отражательного типа (Ньютона или Кассегрена). Передача информации в системах беспроводной линии связи требует разработки методов модуляции и управления параметрами светового излучения, которые служат для осуществления реальной передачи потока данных.

Целью настоящей работы является исследование особенностей акустооптического (АО) управления параметрами КП, которые в дальней зоне трансформируются в малокольцевые пучки бесселева типа, необходимые для осуществления оптической связи в свободном пространстве.

Теоретическое рассмотрение акустооптической дифракции кольцевого пучка на ультразвуке в кристаллах TeO_2 и $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$

Схема с двумя аксиконами рассчитывалась аналогично [2, 3], но с отличием, что перетяжка падающего гауссова пучка (ГП) располагалась вдали от аксикона. В этом случае поле на выходе второго аксикона рассчитывается по формуле:

$$a(r) = \frac{-k_0^2}{z_{12}z_0} \iint \exp \left(-\frac{r_2^2}{w_0^2} + ik_0 \left(-\gamma(r_2 + r_1) + \frac{r_2^2 + r_1^2}{2z_0} + \frac{r_1^2 + r^2}{2z_{12}} \right) \right) \times \times J_0 \left(\frac{k_0 r_2 r_1}{z_0} \right) J_0 \left(\frac{k_0 r_1 r}{z_{12}} \right) r_2 r_1 dr_2 dr_1. \quad (1)$$

Здесь $k_0 = 2\pi/\lambda$, w_0 – полуширина ГП, z_0 – расстояние от перетяжки до первого аксикона, z_{12} – расстояние между аксиконами, γ – угол отклонения луча аксиконом.

На рис. 1 показано поперечное распределение интенсивности кольцевого поля в выходной плоскости второго аксикона.

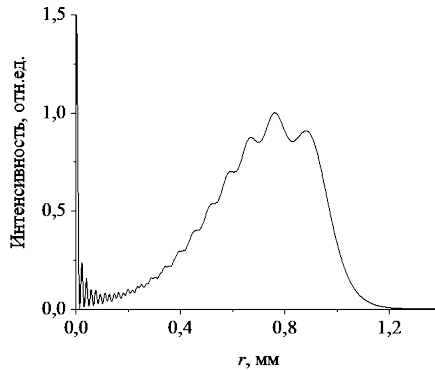


Рис. 1. Поперечное распределение интенсивности (нормирована на единицу) кольцевого поля, полученного в схеме с двумя аксиконами. Параметры схемы: $\lambda = 532$ нм, $\gamma = 0,9$ град, $w_0 = 0,4$ мм, $z_0 = 1$ м, $z_{12} \approx 7$ см

Из рис. 1 видно, что кольцевое поле имеет небольшую пространственную модуляцию, а также заметную интенсивность в окрестности оси. Важно отметить при этом, что как осцилляции, так и осевой пик интенсивности не изменяют существенно поле в дальней зоне.

В процессе изотропной $o \rightarrow o$ дифракции КП распространялся под углом Брэгга к оси y , а акустическая волна – в положительном направлении оси z . При этом ось y параллельна $[110]$ для TeO_2 и параллельна $[100]$ для $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$. На длине волны $\lambda = 532$ нм и акустической частоте 100 МГц для кристалла TeO_2 и $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$ угол Брэгга равен, соответственно, 9,3 и 10,6 угл. мин. Дифрагированное поле в рассматриваемом случае также является КП и интеграл перекрытия равен единице. При этом полуширина углового спектра КП внутри кристалла TeO_2 и $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$ равна около 1 угл. мин. Угловая ширина синхронизма значительно превышает ширину углового спектра КП, что позволяет при расчетах АО дифракции использовать плосковолновое приближение.

Дифрагированный КП при распространении в открытом пространстве постепенно трансформируются вследствие дифракции в пучок бесселева типа. Это следует из того, что переход в дальнюю зону реализует Фурье-преобразование поля в ближней зоне, что в данном случае означает трансформацию КП в бесселев пучок. Эта трансформация реализуется на возрастающем участке кривой зависимости осевой интенсивности исходно КП от расстояния до АО ячейки. После завершения этапа формирования пучка бесселева типа происходит его дифракционное расплывание.

Исследована динамика трансформации КП в пучок бесселева типа при переходе в дальнюю зону дифракции. Показано, что из состояния смеси осевого и кольцевого пучков поле переходит в состояние т.н. малокольцевого бесселева светового пучка (БСП). Диаметр центрального максимума при этом возрастает линейно с расстоянием, а максимальная интенсивность падает обратно пропорционально квадрату расстояния.

Экспериментальные результаты для кристалла TeO_2

В эксперименте (рис. 2, а) твердотельный лазер OBIS LS 532-20 генерировал ГП ($M^2 \approx 1.1$) с полушириной 0,35 мм на длине волны 532 нм. На расстоянии 1 м располагались два аксикона AX252-A (Thorlabs) с углом при основании 2 град. КП на выходе второго аксикона имел диаметр примерно 2 мм (см. рис. 2, б).

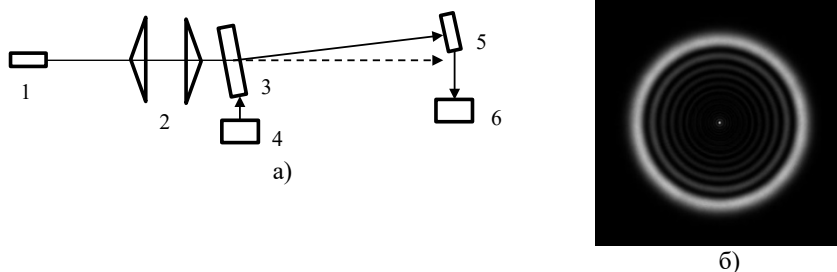


Рис. 2. а) Оптическая схема эксперимента: 1 – лазер, 2 – аксиконы, 3 – АО ячейка, 4 – генератор, 5 – фотодиодный приемник; 6 – измеритель мощности;
б) вид КП на выходе второго аксикона

Далее КП (рис. 2, б) направлялся на АО ячейку с центральной частотой $f_0 = 100$ МГц под углом Брэгга. Эффективность АО дифракции составляла величину 57% при RF мощности 0,6 Вт, подаваемой на пьезопреобразователь. При этом дифрагированный пучок в ближней зоне сохраняет азимутально симметричный кольцевой профиль. Поперечное распределение интенсивности дифрагированного пучка в дальней зоне показано на рис. 3.

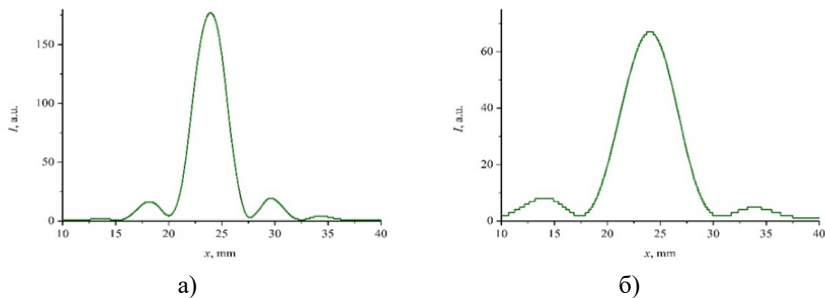


Рис. 3. Поперечные распределения интенсивности пучка на расстоянии 41 м (а) и 81 м (б)

На рис. 3 видно, что в дальней зоне КП трансформируется в малокольцевой пучок бесселева типа, содержащий интенсивный центральный максимум и один или два слабоинтенсивных боковых кольца. Измерения распределения мощности по кольцам показали, что на расстоянии 81 м в центральном максимуме и первом кольце содержится 70% мощности, при этом процентное содержание мощности в кольцах практически не зависит от расстояния. Важно отметить, что боковые кольца БСП уменьшают темп дифракционного распыления осевого максимума.

Заключение

Показано, что акустооптика позволяет эффективно управлять параметрами малокольцевых пучков беселева типа, которые в дальней зоне содержат интенсивный центральный максимум и несколько слабоинтенсивных боковых колец.

Библиографический список

1. Система лазерной связи в свободном пространстве: пат. ВУ 23338 / Н. С. Казак [и др.]. Оpubл. 28.02.2021.
2. Bessel-like light beams formed by the two-component scheme consisting of axicon and spherical lens / N. A. Khilo [et al.] // Optics Communications. 2021. V. 483. P. 126666.
3. Формирование бесселевых световых пучков на больших расстояниях из кольцевых полей / Н. А. Хило [и др.] // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. 2022. Т. 58, № 1. С. 90–100.