

УДК 535

И.А. Трушников¹, А.В. Инюшов¹, А.С. Перин^{1,2}, В.В. Криштоп^{3,4}¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия²Институт оптики атмосферы им. академика В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия³Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия⁴Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, Россия

ФОРМИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ БЕССЕЛЕПОДОБНЫМИ СВЕТОВЫМИ ПУЧКАМИ

Экспериментально продемонстрировано преобразование гауссовых лазерных пучков в одномерные и двумерные бесселеподобные световые пучки. Полученные бесселеподобные пучки использовались для формирования дифракционных оптических элементов в кристаллических образцах фоторефрактивного ниобата лития. Исследована эволюция распределения светового поля одномерных и двумерных фазовых дифракционных структур при их оптическом индуцировании бесселеподобными монохроматическими пучками в фоторефрактивных образцах ниобата лития.

Ключевые слова: дифракционная структура, фотонная структура, бесселеподобный пучок, фоторефрактивный эффект, ниобат лития, амплитудный транспарант.

I.A. Trushnikov¹, A.V. Inyushov¹, A.S. Perin^{1,2}, V.V. Krishtop^{3,4}¹Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia²V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia³Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia⁴Perm Scientific and Production Instrument Making Company, Perm, Russia

FORMATION OF PHASE OPTIC ELEMENTS IN PHOTOREFRACTIVE CRYSTAL OF LITHIUM NIOBATE BY BESSEL-LIKE OPTICAL BEAMS

The experimentally demonstrated transformation of Gaussian laser beams into 1D and 2D Bessel-like beams. Bessel-like beams were used to form photonic diffraction structures in crystalline lithium niobate samples with photorefractive properties. Evolution of characteristics of 1D phase diffraction structures is experimentally investigated at their optical induction by Bessel-like monochromatic bunch-

es in photorefractive samples of lithium niobate. The obtained pictures of a near and far zone point to the saturable nonlinear optical response of this material.

Keywords: diffraction structure, photonic structures, bessel-like beam, photorefractive effect, lithium niobate, amplitude mask.

Введение

В большинстве случаев источники лазерного излучения генерируют световые пучки с гауссовым профилем распределения интенсивности света. Однако в некоторых случаях требуются нестандартные формы световых полей, обладающие свойствами, отличными от свойств гауссовых лазерных пучков. В оптике представляет интерес формирование световых пучков с разными амплитудными профилями, особенно световых полей, практически свободных от дифракции [1, 2]. Подобного рода световые пучки применяются в медицине, биомедицинской оптике, прецизионной химии, фармакологии [3]. К таким «бездифракционным» пучкам относятся световые поля, распределение интенсивности которых описывается функциями Бесселя [4], пучки Эйри [5] и некоторые другие виды световых пучков [6, 7], сохраняющие амплитудный профиль при распространении в среде. Реальные бесселевы пучки света не могут существовать из-за бесконечной оптической мощности, которую они должны перенести [7]. Бесселеподобные пучки, поперечный профиль интенсивности которых описывается квадратом функции Бесселя, близки к теоретическому распределению бездифракционных полей, которые не ограничены в поперечном направлении. Определенный интерес с точки зрения исследования нелинейно-оптических эффектов вызывает использование бесселеподобных световых пучков для формирования фотонных дифракционных элементов в фоторефрактивных кристаллах. Практический интерес для записи таких структур, несомненно, представляют сегнетоэлектрические кристаллы ниобата лития (LiNbO_3), характеризующиеся проявлением фоторефрактивного нелинейного отклика при низкой интенсивности света [8–12]. Обычно в практических целях, например для изготовления электрооптических модуляторов [13, 14], используют кристаллы ниобата лития с нефоторефрактивными добавками. Использование фоторефрактивной примеси, например меди, при облучении маломощным непрерывным лазером приводит к формированию фазовых дифракционных решеток и более сложных голографических

структур [15], что открывает перспективы создания гибридных оптоэлектронных и полностью оптических элементов фотоники.

Таким образом, целью данной работы является исследование формирования фазовых дифракционных оптических элементов в фоторефрактивном кристалле ниобата лития бесселеподобными световыми пучками, полученными путем преобразования пространственной структуры лазерных гауссовых пучков.

Экспериментальные условия и результаты экспериментов

Обычно для формирования бесселеподобных световых полей используют аксиконические линзы, кольцевые транспаранты или элементы оптического волокна [3, 6–7]. В некоторых случаях интерес представляют как одномерные бесселеподобные световые пучки, распределение интенсивности которых вдоль лишь одной из поперечных координат описывается зависимостью, близкой к квадрату функции Бесселя, так и двумерные бесселеподобные световые поля. Для формирования одномерных световых полей в экспериментах использовались амплитудные транспаранты в виде металлических пластин с двумя прямоугольными щелями. Для формирования двумерных бесселеподобных световых пучков использовались два наложенных металлических транспаранта с разной ориентацией прямоугольных щелей в одном из них относительно таковых для второго транспаранта.

В качестве источников излучения в экспериментах использовался твердотельный лазер YAG:Nd^{3+} с длиной волны излучения $\lambda = 532$ нм. Для формирования одномерного бесселеподобного светового пучка лазерное излучение с гауссовым профилем освещало амплитудный транспарант, расположенный в фокальной плоскости цилиндрической линзы. В некоторой области после линзы, в результате интерференции двух почти параллельных световых пучков, образуется квазиодномерная интерференционная картина. Распределение интенсивности в области интерференции зависит от длины волны света, соотношения ширины щелей и расстояния между их центрами. В области пересечения пучков оно может быть близким к распределению, характерному для пучка Бесселя (рис. 1, а, б). Для формирования двумерных бесселеподобных световых пучков используются два наложенных металлических транспаранта с разной ориентацией прямоугольных щелей: с ориентацией относительно друг друга под углом 90° (рис. 1, в, г) и под уг-

лом 45° . Интерференционная картина в этом случае формируется с помощью сферической линзы. В результате интерференции световые поля обладают высокой продольной однородностью и ограниченным числом максимумов распределения интенсивности света в поперечных сечениях [16].

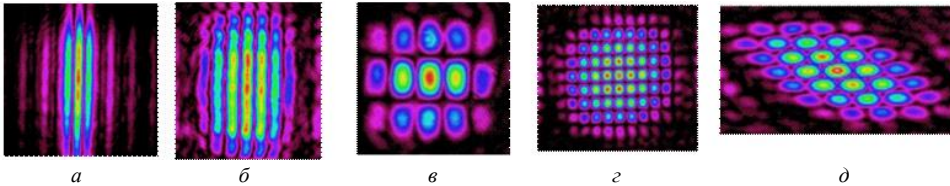


Рис. 1. Картины распределения интенсивности света в поперечных сечениях для одномерных (*a*, *б*) и двумерных (*в*, *г*, *д*) бесселеподобных световых пучков с шириной центральных максимумов: *a* – 90 мкм; *б* – 120 мкм; *в* – 60×90 мкм; *г* – 50×50 мкм; *д* – 70×60 мкм

Формирование дифракционных оптических элементов в фоторефрактивном кристалле ниобата лития бесселеподобными световыми пучками, полученными путем преобразования пространственной структуры лазерных гауссовых пучков с помощью амплитудных транспарантов, проводилось по схеме, изображенной на рис. 2. За счет проявления фоторефрактивного эффекта в освещенных областях происходила модуляция показателя преломления, в результате чего в объеме кристалла формировалась фазовая дифракционная структура (решетка).

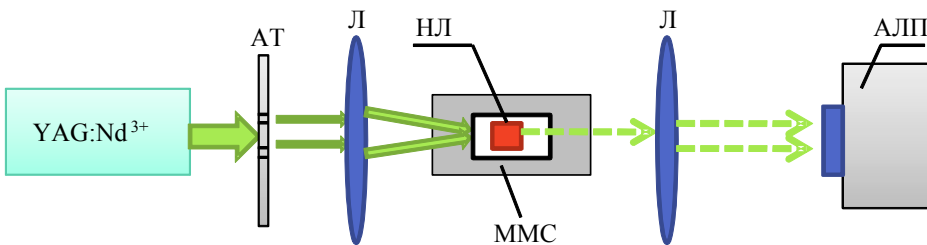


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для формирования дифракционных оптических элементов бесселеподобными световыми пучками: YAG:Nd³⁺ – источник лазерного излучения; АТ – амплитудный транспарант; Л – фокусирующие линзы; ММС – микрометрический столик; НЛ – образец LiNbO₃; АЛП – анализатор лазерных пучков

Амплитудный транспарант (АТ) располагался в фокальной плоскости линзы (цилиндрической или сферической в зависимости от од-

номерной или двумерной формы формируемого бесселеподобного светового пучка). В продольном направлении равномерная картина с периодическим распределением максимумов интенсивности светового поля формируется в фокальной области линзы за счет интерференции гауссова пучка, проходящего через щели АТ. При формировании двумерного бесселеподобного светового поля используются два АТ с необходимым углом наклона между щелями. Интерференционная картина, представляющая собой одномерный и двумерный бесселеподобный световой пучок, формирует фазовую дифракционную область в образце кристалла ниобата лития. В качестве экспериментального образца был выбран кристалл ниобата лития, легированный в процессе роста ионами меди ($\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$). Легирование кристалла позволяет повысить фоторефрактивную чувствительность кристаллов ниобата лития, не увеличивая величину темновой проводимости LiNbO_3 , что обеспечивает практически стационарный характер оптических неоднородностей, формируемых в нем за счет фоторефрактивного эффекта [17]. Размер пластины составлял $10 \times 2 \times 15 \text{ мм}^3$ по осям X , Y и Z соответственно. Для формирования дифракционных структур образцы экспонировались полученными бесселеподобными световыми полями на длине волны 532 нм. Поляризация излучения в экспериментах соответствовала необыкновенной волне в кристалле.

В результате экспонирования экспериментальных образцов сформированными одномерными бесселеподобными пучками в $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ была «записана» фазовая дифракционная решетка с периодом около 100 мкм. В данном случае для формирования одномерного бесселеподобного пучка был использован АТ с шириной щелей 0,2 мм и расстоянием между их центрами 0,5 мм. Картины светового поля и соответствующие им профили распределения интенсивности света (в направлении оптической оси кристалла, рис. 3) иллюстрируют начальную стадию эксперимента ($t = 0 \text{ с}$), когда на входную грань образца сфокусирован бесселеподобный одномерный световой пучок, и завершающую стадию эксперимента ($t = 80 \text{ с}$), когда в образце сформировалась фазовая дифракционная структура. Оптическая мощность индуцирующего пучка и время формирования решетки составили соответственно 15 мВт и 80 с. Анализ полученных картин показал, что в освещенных областях кристалла наблюдается изменение соотношения интенсивностей ближайших максимумов интерференционной картины, которое можно объяснить насыщаемым характером фоторефрактивной нели-

нейности кристалла при формировании оптических неоднородностей в объеме образца [17].

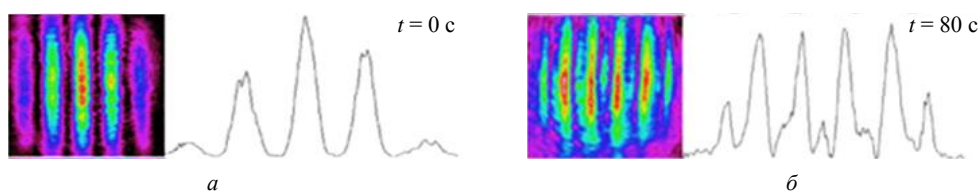


Рис. 3. Картины светового поля и соответствующие им профили распределения интенсивности на выходной плоскости образца $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ в начальный (а) и конечный (б) моменты времени процесса формирования дифракционной решетки

Существование фазовой дифракционной структуры при экспонировании кристалла ниобата лития одномерным бесселеподобным световым пучком подтверждается картиной дифракции света в дальней зоне при зондировании полученного оптического элемента параллельным световым пучком с гауссовым распределением интенсивности с длиной волны $\lambda = 532$ нм (рис. 4).

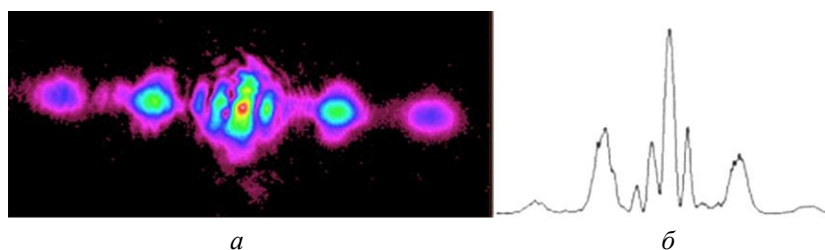


Рис. 4. Картина светового поля (а) и профиль его интенсивности (б) в дальней зоне дифракции света на одномерной фазовой решетке в образце $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$

В случае использования двумерного бесселеподобного пучка был использован АТ с размерами щелей 300 и 500 мкм и их перпендикулярной ориентацией относительно друг друга. Ориентация же самих щелей АТ относительно оптической оси кристалла составляла $\pm 45^\circ$. Пространственный период формируемой структуры составил 100 мкм. Картина светового поля на рис. 5, а иллюстрирует начальную стадию эксперимента, когда на входную грань образца сфокусирован сформированный АТ бесселеподобный двумерный световой пучок. Картина светового поля (рис. 5, б) иллюстрирует ближнюю зону дифракции считывающего пучка (при $\lambda = 532$ нм) на двумерной фазовой решетке,

полученной после экспонирования указанным двумерным бесселеподобным пучком пластины $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$. Оптическая мощность индуцирующего пучка и время формирования решетки составили соответственно 15 мВт и 3 мин.

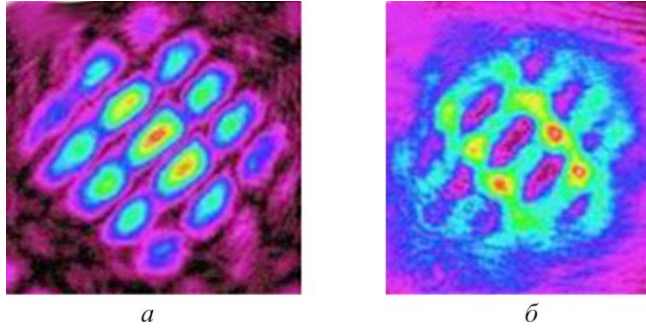


Рис. 5. Картина светового поля (*a*) двумерного бесселеподобного пучка (перпендикулярно наложенные транспаранты расположены под углом 45° к оптической оси) и картина дифракции в ближней зоне на выходной плоскости пластины $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ (*б*)

Существование фазовой двумерной дифракционной структуры при экспонировании кристалла ниобата лития двумерным бесселеподобным световым пучком подтверждается картинками дифракции света в дальней зоне при зондировании сформированных оптических элементов параллельным световым пучком с гауссовым распределением интенсивности на длине волны $\lambda = 532$ нм (рис. 6).

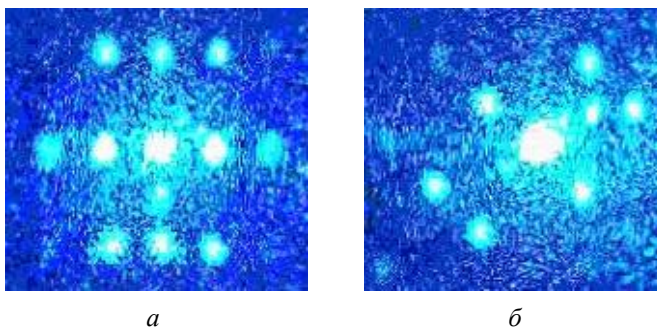


Рис. 6. Картина светового поля в дальней зоне дифракции при различной ориентации щелей АТ относительно оптической оси кристалла: *a* – перпендикулярно наложенные транспаранты расположены под углом 90° к оптической оси; *б* – перпендикулярно наложенные транспаранты расположены под углом 45° к оптической оси

Изучение дифракционных картин в дальней зоне при зондировании экспонированного образца световым пучком с диаметром от 0,1 до 1 мм позволило установить, что возмущения показателя преломления, наведенные при экспонировании образца, имеют квазирегулярный двумерный характер. Пример подобной картины представлен на рис. 6, и ее вид соответствует дифракции света на двумерной периодической структуре [18].

Таким образом, в работе экспериментально продемонстрирована возможность пространственного преобразования гауссовых лазерных пучков в одномерные и двумерные бесселеподобные световые пучки. Полученные результаты открывают перспективу создания фотонных дифракционных и волноводных структур в фоторефрактивных кристаллах с помощью квазибездифракционных бесселеподобных световых пучков.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых ученых МК-3217.2021.4.

Список литературы

1. Durnin J. // Journal of the Optical Society of America. – 1987. – Vol. 4, № 4. – P. 651–654.
2. Berry M.V., Balazs N.L. // American Journal of Physics. – 1979. – Vol. 47, № 3. – P. 264–267.
3. Duocastella M., Arnold C.B. // Laser Photonics Rev. – 2012. – Vol. 6. – P. 607–621.
4. McGloin D., Dholakia K. // Contemporary Physics. – 2005. – Vol. 46, № 1. – P. 15–28.
5. G. Siviloglou, J. Broky, A. Dogariu, D. Christodoulides // Optics and Photonics News. – 2008. – Vol. 19, № 12. – P. 21.
6. Chávez-Cerda S., McDonald G.S., New G.H.C. // Optics communications. – 1996. – №. 1-3. – P. 225–233.
7. Durnin J., Miceli Jr J.J., Eberly J.H. // Physical review letters. – 1987. – Vol. 58, № 15. – P. 1499.
8. Перин А.С., Козлова С.М., Шандаров В.М. // Доклады Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 2-2 (22). – С. 81–83.
9. Perin A.S., Shandarov V.M., Ryabchenok V.Yu. // Physics of Wave Phenomena. – 2016. – Vol. 24, № 1. – P. 7–10.

10. Максименко В.А. Поляризационно-интерференционный метод исследования фоторефрактивного эффекта в одноосных кристаллах // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2019. – Т. 62. – №. 8.

11. Максименко В.А., Карпец Ю.М. Фотоиндуцированное изменение коэффициента линейного дихроизма в легированных кристаллах ниобата лития // Бюллетень научных сообщений. – 2020. – №. 25. – С. 45–47.

12. Влияние расходимости пучка накачки на форму индикатрисы фотоиндуцированного рассеяния света в кристаллах ниобата лития / В.А. Максименко, В.В. Криштоп, В.В. Суриц, Н.Д. Поваров // Оптический журнал. – 2018. – Т. 85, №. 7. – С. 11–16.

13. Афанасьев В.М., Пономарев Р.С. Определение величины полуволнового напряжения электрооптического модулятора интенсивности излучения на основе интерферометра Маха-Цендера // Прикладная фотоника. – 2020. – Т. 7, №. 1. – С. 16–24.

14. Афанасьев В.М., Пономарев Р.С. Электрооптические амплитудные модуляторы Маха-Цендера на основе ниобата лития, их модификации и форматы модуляции // Прикладная фотоника. – 2017. – Т. 4, №. 4. – С. 336–359.

15. Шандаров В.М. // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, №. 10. – С. 13–21.

16. Inyushov A., Safronova P., Trushnikov I., Sarkyt A., Shandarov V. // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 867, №. 1. – P. 012023.

17. Шандаров В.М. // Письма в ЖТФ. – 1995. – Т. 21, №. 12. – С. 46–50.

18. Борн М., Вольф Э. // Основы оптики. – 1980.

References

1. Durnin J. Exact solutions for nondiffracting beams. The scalar theory. *Journal of the Optical Society of America*, 1987, vol. 4, no. 4, pp. 651–654.

2. Berry M.V., Balazs N.L. Nonspreading wave packs. *American Journal of Physics*, 1979, vol. 47, no. 3, pp. 264–267.

3. Duocastella M, Arnold C.B. Bessel and annular beams for materials processing. *Laser Photonics Rev.*, 2012, vol. 6, pp. 607–621.

4. McGloin D., Dholakia K. Bessel beams: diffraction in a new light. *Contemporary Physics*, 2005, vol. 46, no. 1, pp. 15–28.

5. Siviloglou G., Broky J., Dogariu A., Christodoulides, D. Airy beams: a new class of optical waves. *Optics and Photonics News*, 2008, vol. 19, no. 12, p. 21.

6. Chávez-Cerda S., McDonald G.S., New G.H. C. Nondiffracting beams: travelling, standing, rotating and spiral waves. *Optics communications*, 1996, vol. 123, no. 1-3, pp. 225–233.

7. Durnin J., Miceli Jr J.J., Eberly J.H. Diffraction-free beams. *Physical review letters*, 1987, vol. 58, no. 15, p. 1499.

8. Perin A.S., Kozlova S.M., Shandarov V.M. Prostranstvennoye samovozdeystviye kogerentnykh svetovykh puchkov v fotorefraktivnom interferometre Fabri-Pero. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2010, no. 2-2 (22), pp. 81–83. (In Russ.)

9. Perin A.S., Shandarov V.M., Ryabchenok V.Yu. Photonic waveguide structures in photorefractive lithium niobate with pyroelectric mechanism of nonlinear response. *Physics of Wave Phenomena*, 2016, vol. 24, no. 1, pp. 7–10.

10. Shandarov V.M. Samovozdeystviye svetovykh poley v volnovodnykh fotonnykh strukturakh na osnove elektroopticheskikh kristallov. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2015, vol. 58, no. 10, pp. 13–21. (In Russ.)

11. Inyushov A., Safronova P., Trushnikov I., Sarkyt A., Shandarov V. Formation of Photonic Structures in Photorefractive Lithium Niobate by 1D and 2D Bessel-like Optical Fields. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 867, no. 1, pp. 012023.

12. Shandarov V.M. Effekt kompensatsii temnovoy provodimosti $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ pri ego legirovaniy med'yu. *Pis'ma v ZHTF*, 1995, vol. 21, no. 12, pp. 46–50. (In Russ.)

13. Born M., Wolf E., Principles of Optics, Pergamon. Oxford, 1980.

14. Afanas'ev V.M., Ponomarev R.S. Experimental Determination of the Half-Wave Voltage of the Mach-Zender Electro-Optical Amplitude Modulator. *Applied Photonics*, 2020. vol. 7, no. 1, pp. 16–24.

15. Afanas'ev V.M., Ponomarev R.S. Electrooptical Amplitude Modulator Mach-Zehnder Based Lithium Niobate, Their Modifications and Modulation Formats. *Applied Photonics*, 2017. vol. 4, no. 4, pp. 336–359.

16. Maksimenko V.A. Polarization-Interference Method for Studying Photorefractive Effect in Uniaxial Crystals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*, 2019. vol. 62. no. 8, pp. 729–733.

17. Maksimenko V.A., Karpets Y.M. Photo-Induced Change in Coefficient Linear Dichroism in Doped Lithium Niobate Crystals. *Bulletin of scientific reports*, 2020, no. 25. pp. 45–47.

18. Maksimenko V.A., Krishtop V.V., Surits V.V., Povarov N.D. How the Divergence of the Pump Beam Affects the Shape of the Photoinduced Light Scattering Pattern in Lithium Niobate Crystals. *Journal of Optical Technology*. 2018, vol. 85. no. 7. pp. 11–16.

Получено 01.03.2021