УДК 535:621.372.8

П.А. Тренихин, Д.А. Козорезов, К. Хаунхорст, Д. Кип, К.В. Шандарова, В.М. Шандаров

Линейная и нелинейная дифракция световых пучков в фоторефрактивных фотонных решетках и сверхрешетках в ниобате лития

Экспериментально исследованы особенности линейной и нелинейной дифракции световых пучков в одномерных фотонных сверхрешетках, оптически индуцированных в фоторефрактивных образцах ниобата лития.

Ключевые слова: фотонная решетка, однолучевая схема, дискретная дифракция, фоторефрактивный кристалл.

При распространении света в периодических структурах связанных нелинейных оптических волноводов возможна его локализация в виде полей, сохраняющих при распространении поперечный профиль, – дискретных пространственных солитонов, что впервые теоретически предсказано в [1]. Экспериментальное подтверждение этого эффекта [2] стимулировало активные исследования явлений самовоздействия световых пучков в одномерных и двумерных системах связанных оптических волноводов, названных фотонными решетками (ФР) [3–5]. В большой степени это связано с возможностью реализации в ФР оптических аналогов эффектов взаимодействия волновых пакетов с нелинейными системами разной природы. Первыми периодическими ФР явились многоэлементные канальные волноводные структуры на основе арсенида галлия [2, 3] и оптически индуцированные ФР в фоторефрактивных кристаллах стронций-бариевого ниобата [4–6]. Для оптического индуцирования периодических ФР использовались двухлучевые или многолучевые схемы формирования фоторефрактивных голографических решеток. Возможные практические приложения нелинейных ФР связаны с реализацией фотонных элементов для управления светом с помощью света.

Переход к непериодической топологии ФР расширяет возможности реализации в них оптических аналогов некоторых эффектов, известных в атомной физике и физике твердого тела [7–9]. В то же время это требует модификации схем оптического индуцирования ФР, поскольку возможности подхода, основанного на интерференции когерентных световых пучков, оказываются при этом ограниченными. Одномерные ФР, в том числе непериодические, могут создаваться в фоторефрактивных кристаллах с использованием однопучковой оптической схемы, в которой топология ФР определяется амплитудным транспарантом [10]. Для этого может использоваться и некогерентное излучение. В данной работе экспериментально демонстрируются возможности однолучевой схемы оптического индуцирования фоторефрактивных ФР в объемных образцах ниобата лития (LiNbO₃), а также особенности эффектов линейной и нелинейной дискретной дифракции света в полученных одномерных квазипериодических волноводных системах (фотонных сверхрешетках, Φ CP).

Фоторефрактивные кристаллы LiNbO₃ представляют особый интерес для создания волноводных элементов и систем с сильной оптической нелинейностью. Фоторефрактивная нелинейность LiNbO₃ может изменяться в широких пределах при его легировании, например, ионами железа (Fe) и меди (Cu) [11]. Кроме того, благодаря низкой темновой проводимости LiNbO₃, время хранения фоторефрактивных ФР в нем может достигать нескольких месяцев, поэтому при формировании ФСР могут использоваться процессы много-ступенчатого экспонирования. Одномерные и двумерные ФР, а также одномерные ФСР создавались в LiNbO₃ голографическим методом [10, 12], однако такой подход не применим в случае непериодических ФР в объемных образцах, особенно с заметным оптическим поглощением. В планарных волноводах ФР со сложной топологией можно создать диффузией примесей либо экспонированием через амплитудную маску, полученную на поверхности волновода с помощью фотолитографии [13], однако возможности оптической реконфигурации таких ФР оказываются ограниченными.

В наших экспериментах использовались образцы LiNbO3:Fe и LiNbO3:Cu, легированные при выращивании, концентрация Fe составляла от 0,005 до 0,1 вес.%, Cu – 0,02 вес.%. Образцы имели размеры в направлении распространения света (ось X) 6–11 мм, в направ-

лении оптической оси кристаллов – 9 мм (LiNbO₃:Cu) и 10 мм (LiNbO₃:Fe). Волновой вектор создаваемых ФР ориентировался вдоль оптической оси кристалла.



Рис. 1. Возможные схемы оптического индуцирования одномерных ΦР в кристаллах LiNbO₃ и оптических волноводах на его основе: *a* – двухлучевая голографическая схема; *b* – однолучевая схема с амплитудным транспарантом; *c* – проекционная оптическая схема

На рис. 1 показаны схемы экспериментов по голографическому, контактному и проекционному формированию ФР и ФСР. Источниками света в разных экспериментах служили непрерывный твердотельный YAG:Nd³⁺ лазер с удвоением частоты (λ =532 нм) и светодиод с центральной длиной волны излучения λ =455 нм. Индуцирующие световые пучки с диаметрами 20÷30 мм формировались коллиматором и конденсором (для лазера и светодиода соответственно). Амплитудными транспарантами (АМ) являлись фотошаблоны с одномерными периодическими структурами из полосок хрома с шириной в разных группах от 4 до 40 мкм и такими же расстояниями между ними.

Основными достоинствами однолучевых схем с амплитудным транспарантом являются возможности: а) получения профилей показателя преломления волноводных элементов, близких к ступенчатому; б) создания одномерных ΦP с непериодической топологией, задаваемой структурой AM и распределением интенсивности светового пучка; в) масштабирования профиля интенсивности индуцирующего светового поля с помощью линзы в проекционной схеме; г) индуцирования ΦP в образцах с заметным поглощением света, если направления распространения света на этапах формирования ΦP и их исследования ортогональны.

Для исследования особенностей дифракции света в полученных ФР и ФСР излучение He-Ne лазера ЛГH-207A (λ =633 нм) вводилось в один или несколько их элементов. Поляризация света соответствовала необыкновенной волне в кристалле. Картины световых полей и их временная эволюция на выходной плоскости ФР и ФСР изучались с помощью видеокамеры.

В качестве примера рис. 2 иллюстрирует различие в топологии ФР, сформированных в образце LiNbO₃:Fe (0,1 вес.%) когерентным излучением в контактной схеме.



Рис. 2. Картины светового поля на выходной плоскости ФР с числом элементов 50 (Λ=12 мкм) (*a*) и с числом элементов 5 (Λ=18 мкм) (*b*). Возбуждение коллимированным световым пучком (λ=633 нм)

Рисунок 2, *а* соответствует распределению интенсивности света на выходной плоскости многоэлементной (50 волноводных элементов), а рис. 2, *б* – малоэлементной (5 элементов) ФР. Для возбуждения ФР использовался нефокусированный лазерный пучок (λ=633 нм) с мощностью около 1÷2 мкВт.

Дифракция света в ФР и ФСР имеет существенные различия. В периодических ФР параметры всех волноводных элементов одинаковы, и при одноэлементном возбуждении вид дифракционных картин на выходной плоскости ФР не зависит от возбуждаемого эле-

мента. В ФСР параметры элементов меняются периодически, поэтому дифракционные картины при возбуждении разных элементов отличаются.



Рис. 3. Картины светового поля на выходной плоскости ФР и ФСР в линейном (a, e, ∂) и нелинейном (δ, c, e) режимах (Λ =16 мкм; a - t=0; $\delta - t=6$ мин) и ФСР (Λ =16 мкм, $\Lambda_{\rm m}$ =60 мкм; e - t=0; c - t=11 мин; $\partial - t=0$; e - t=24 мин)

Рисунок 3 иллюстрирует это для линейного режима (a, s, ∂) и для нелинейного самовоздействия света в ФР (см. рис. 3, δ) и ФСР (z и ∂). В нелинейном случае в базовой ФР через некоторое время после возбуждения достигается режим щелевого дискретного солитона (см. рис. 3, δ) с практически полной локализацией света в возбуждаемом волноводе. В ФСР в нелинейном режиме наблюдалась частичная локализация световой мощности в возбуждаемом элементе (см. рис. 3, z) либо существенная делокализация света в ФСР (см. рис. 3, ∂), в зависимости от номера возбуждаемого волновода, в образце LiNbO₃:Fe (0,05 вес.%). Параметры данной ФСР: $\Lambda = 16$ мкм, $\Lambda_m = 60$ мкм, изменение показателя преломления в области базовой ФР $n = 5 \cdot 10^{-5}$, глубина модуляции параметров базовой ФР модулирующей структурой 50%. Режим щелевого пространственного солитона в базовой ФР (см. рис. 3, δ) наблюдался при той же световой мощности и меньшем времени



Рис. 4. Картины светового поля на выходной плоскости ФСР (*a*), соответствующие рис. 3, *в*, *г*, и распределения светового поля в ФСР с такими же параметрами, полученные путем численного моделирования при возбуждении одного из элементов (*б*)

формирования. Отличия в характеристиках эффекта самовоздействия световых полей в ФСР обусловлены различием параметров ее волноводных элементов и, как следствие, различием коэффициентов связи между соседними элементами в разных ее областях.

Случай частичной нелинейной локализации светового поля в ФСР иллюстрируется результатами численного моделирования (рис. 4). Параметры модельной ΦCP : $\Lambda{=}16$ мкм, $\Lambda_{\rm m}{=}64$ мкм, глубина модуляции базовой ФР параметров модулирующей структурой 50%. При моделировании использовалась специализированная программа, реализованная в среде MatLab, в которой численно решалось скалярное уравнение для распространения светового пучка в параксиальном приближении [10].

Таким образом, результаты экспериментов подтвердили эффективность однолучевой схемы с амплитудным транспарантом в оптическом идуцировании ФСР в объемных фоторефрактивных кристаллах ниобата лития.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (НИР РНП.2.1.1.429, НИР по госконтракту № 02.740.11.0553).

Литература

1. Christodoulides D.N. Discrete Self-Focusing in Nonlinear Arrays of Optical Waveguides / D.N. Christodoulides, R.I. Joseph // Opt. Lett. - 1988. - № 13. - P. 794.

2. Discrete spatial optical solitons in waveguide arrays / H.S. Eisenberg, Y. Silberberg, Y. Morandotti et al. // Phys. Rev. Lett. - 1998. - № 81. - P. 3383.

3. Christodoulides D.N. Discretizing light behaviour in linear and nonlinear waveguide lattice / D.N. Christodoulides, F. Lederer, Y. Silberberg // Nature. - 2003. - № 424. - P. 817.

4. Observation of Discrete Solitons in Optically Induced Real Time Waveguide Array / J. Fleischer, T. Carmon, M. Segev et al. // Phys. Rev. Lett. - 2003. - Lett. 90.

5. Observation of two-dimensional discrete solitons in optically-induced nonlinear photonic lattices / J.W. Fleischer, M. Segev, N.K. Efremidis, D.N. Christodoulides // Nature. - 2003. - \mathbb{N} 422. - P. 147-150.

6. Spatial solitons in optically induced gratings / D. Neshev, E. Ostrovskaya, Yu. Kivshar, W. Krolikowski // Opt. Lett. - 2003. - № 28. - P. 710.

7. Experimental observation of Rabi oscillations in photonic lattices / K. Shandarova, C.E. Rueter, D. Kip et al. // Phys. Rev. Lett. - 2009. - № 102. - P. 123905.

8. Optically-induced defect states in photonic lattices: formation of defect channels, directional couplers, and disordered lattices leading to Anderson-like light localization / A. Kanshu, C.E. Rueter, D. Kip, V.M. Shandarov // Appl. Phys. - 2009. - N_{\odot} 95. - P. 537.

9. Adiabatic light transfer via dressed states in optical waveguide arrays / G. Della Valle, M. Ornigotti, T. Toney Fernandez et al. // Appl. Phys. Lett. – 2008. – N_{2} 92. – P. 011106.

10. Quasi-one-dimensional photonic lattices and superlattices in lithium niobate: linear and nonlinear discrete diffraction of light / S.A. Davydov, P.A. Trenikhin, V.M. Shandarov et al. // Physics of wave phenomena. -2010. - Vol. 18, $N_{\rm D} 1. - P. 1-6$.

Kip D. Photorefractive optical waveguides // Appl. Phys. - 1988. - № 67. - P. 131.
Shandarov V.M. Light propagation in double-periodic nonlinear photonic lattices in lithium niobate / V.M. Shandarov, E. Smirnov, C.E. Rüter, D. Kip, K.V. Shandarova // Appl. Phys. B. - 2007. - Vol. 88, № 3. - P. 359-362.

13. Tan Y. Formation of reconfigurable optical channel waveguides and beam splitters on top of proton-implanted lithium niobate crystals using spatial dark soliton-like structures / Y. Tan [et al.] // J. Phys. D. - 2008. - Vol. 41. - P. 102001.

Тренихин Павел Александрович

Аспирант каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники ТУСУРа Тел.: 8-952-886-57-82 Эл. почта: paher@sibmail.com

Козорезов Дмитрий Александрович

Аспирант каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧиКР) ТУСУРа Эл. почта: ShandarovVM@svch.rk.tusur.ru

Хаунхорст Кристиан

PhD prof. of Helmut-Schmidt-University Hamburg,Germany Эл. почта: christian.haunhorst@hsu-hh.de

Кип Детлер

PhD prof. of Helmut-Schmidt-University Hamburg,Germany Эл. почта: kip@hsu-hh.de

Шандарова Ксения Владимировна

Канд. техн. наук. ст. науч. сотрудник лаб. квантовой радиоэлектроники ТУСУРа Тел.: (382-2) 70-15-18 Эл. почта: ShandarovVM@svch.rk.tusur.ru

Шандаров Владимир Михайлович

Д-р физ.-мат. наук., проф. каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники ТУСУРа Тел.: (3822) 701-518 Эл. почта: ShandarovVM@svch.rk.tusur.ru

Trenikhin P.A., Kozorezov D.A., Haunhorst K., Kip D., Shandarova K.V., Shandarov V.M. Linear and nonlinear diffraction of the light beams in photorefractive photonic lattices and superlattices in lithium niobate

Features of the linear and nonlinear light diffraction in one-dimensional photonic superlattices, optically induced in photorefractive lithium niobate samples, have been experimentally investigated. **Keywords:** photonic lattices, one beams scheme, discrete diffraction, photorefractive crystal.