

УДК 535:621.372.8

П.А. Тренихин, В.М. Шандаров, Ф. Чен

Исследование возможности продольной оптической модуляции одномерных фоторефрактивных фотонных решеток в ниобате лития

Экспериментально исследована возможность продольной пространственной оптической модуляции параметров одномерной системы связанных оптических волноводов (фотонной решетки), оптически индуцированной в фоторефрактивном кристалле ниобата лития.

Ключевые слова: оптический волновод, фотонная решетка, фоторефрактивный эффект, ниобат лития.

Некоторые эффекты, известные в физике твердого тела и квантовой механике, можно реализовать в оптически неоднородных средах, например в системах связанных оптических волноводов, называемых в литературе фотонными решетками (ФР) [1]. Примерами такой реализации могут служить работы, посвященные изучению Блоховских осцилляций, межзонного туннелирования Зинера, осцилляций Раби [2–4]. На наш взгляд, определенный интерес в этом плане представляет и эффект, известный под названием сверхизлучения Дике [5], который характеризуется когерентным излучением коллектива атомов, находящихся в макроскопически большом объеме и связанных за счет их взаимной корреляции. В нескольких работах были проведены экспериментальные исследования проявления сверхизлучения Дике в отдельных материалах, таких, например, как кристалл $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$ [6]. С прикладной точки зрения этот эффект представляет значительный интерес, как один из методов получения когерентного излучения в беззеркальных системах [5]. Кроме того, предложено несколько схем для реализации лазерного охлаждения твердых тел, использующих явление сверхизлучения [7]. Целью данной работы явилось экспериментальное исследование возможности пространственной оптической модуляции параметров одномерных фоторефрактивных ФР, что в принципе может позволить реализовать в них пространственный оптический аналог эффекта сверхизлучения Дике.

Световые поля в линейных периодических системах связанных оптических волноводов (линейных ФР) описываются суперпозицией собственных мод, получивших название «блоховские моды», что связано с аналогией математического аппарата при анализе таких систем и явлений в физике твердого тела [1]. Согласно данному подходу линейная ФР характеризуется спектром разрешенных и запрещенных зон, определяющих возможные направления и частоты распространяющихся световых полей. Так, на рис. 1, *a* показана типичная зонная структура одномерной линейной ФР, представляющей собой систему связанных каналных оптических волноводов на поверхности кристаллической подложки, рис. 1, *б* иллюстрирует поперечные пространственные распределения полей основных гармоник блоховских мод такой ФР [1].

Полоса пропускания на рис. 1, *a*, обозначенная белым цветом – полубесконечная запрещенная зона – отвечает полному внутреннему отражению. Первая ограниченная запрещенная зона вызвана резонансным брэгговским отражением от периодической структуры. На рис. 1, *б* на фоне периодического профиля показателя преломления одномерной решетки представлены профили поля блоховских волн (сплошная линия), соответствующие верхнему и нижнему краю первой полосы и верхнему краю второй полосы спектра пропускания.

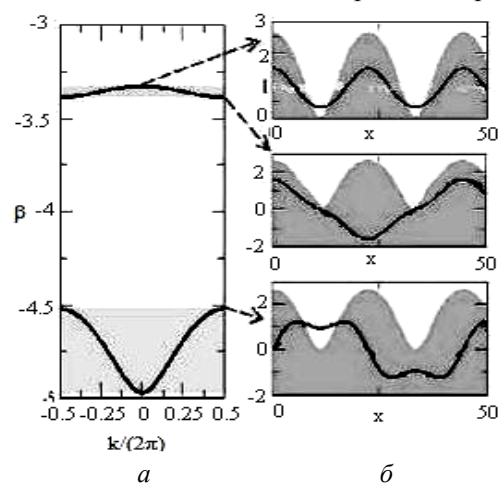


Рис. 1. Типичная зонная структура периодической системы связанных волноводов – *a*; профили поля блоховских волн вдоль поперечной координаты – *б* [1]

Пространственным аналогом эффекта сверхизлучения Дике в линейной ФР является трансформация блоховской моды одной полосы пропускания в таковую для другой. Например, моды соответствующей верхней части первой полосы пропускания на рис. 1, а в моду верхней части второй полосы пропускания. Такое преобразование мод возможно при периодической модуляции параметров ФР вдоль волноводного элемента. Это приводит к адиабатической связи между разными блоховскими модами, проявляющейся в изменении распределения света на выходной плоскости массива волноводов.

В экспериментах в качестве среды для формирования ФР использовался кристалл ниобата лития (LiNbO_3). Его фоторефрактивная нелинейность может изменяться в широких пределах при легировании, например, ионами железа (Fe) и меди (Cu). Кроме того, благодаря низкой темновой проводимости LiNbO_3 время хранения наведенных неоднородностей в нем может достигать нескольких месяцев. С другой стороны, их стирание достигается достаточно просто, путем нагрева кристаллического образца до температуры около 180°C или однородным освещением его в течение некоторого времени некогерентным излучением.

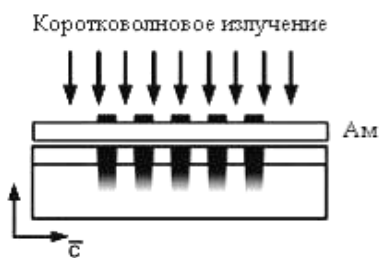


Рис. 2. Схема эксперимента по оптическому индуцированию одномерных ФР в кристаллах LiNbO_3 контактным методом

Базовая ФР формировалась в кристаллическом образце, легированном железом LiNbO_3 , путем ее оптического индуцирования, используя амплитудный транспарант и контактный метод [8], схема эксперимента представлена на рис. 2. Размеры образца составляли $10 \times 5 \times 10 \text{ мм}^3$ вдоль осей X, Y, Z . Основными достоинствами схемы с амплитудным транспарантом являются возможности: а) получения профилей показателя преломления волноводных элементов, близких к ступенчатому; б) создания одномерных ФР с непериодической топологией, задаваемой топологией транспаранта и распределением интенсивности светового пучка; в) индуцирования ФР в образцах с заметным поглощением света, если направления распространения света на этапах формирования ФР и их исследования ортогональны [8].

Качество и характеристики сформированной ФР оценивались по картинам светового поля на выходной плоскости структуры при ее возбуждении широким световым пучком и по эффективности дифракции света на ФР. Рисунок 3, а соответствует световой картине на выходной плоскости ФР при ее зондировании широким пучком, распространяющимся вдоль оси X . Рисунок 3, б показывает поперечный профиль распределения интенсивности для этого случая. Фотонная структура формировалась в кристаллическом образце $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 0,05 вес. %, амплитудный транспарант представлял собой одномерную дифракционную решетку с периодом 18 мкм. Индуцирующий световой пучок имел диаметр 3 см, мощность излучения составляла 50 мВт, а время экспонирования 40 мин. Волновой вектор создаваемых ФР ориентировался вдоль оптической оси кристалла.

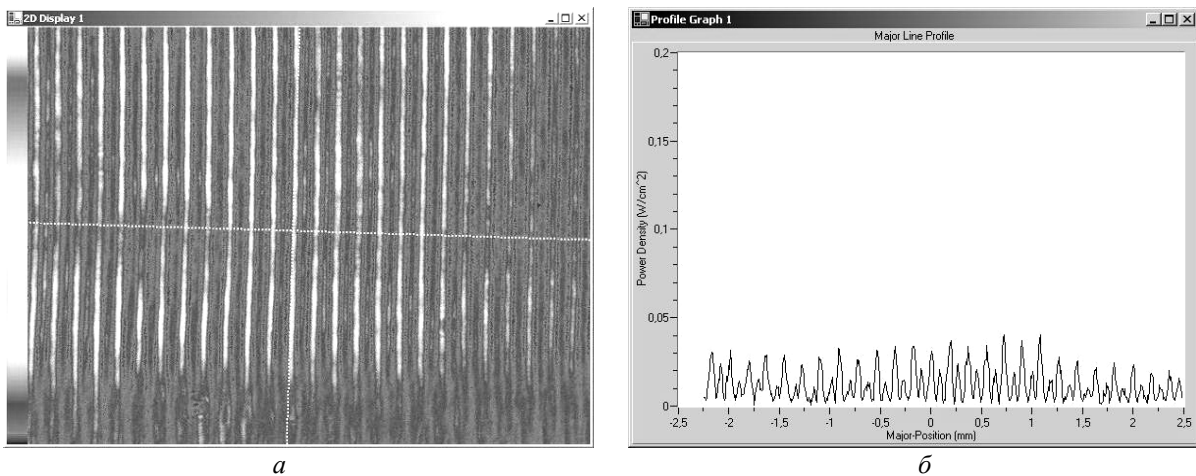


Рис. 3. Картина светового поля (а) и поперечный профиль его распределения (б) на выходной плоскости ФР. Число элементов 50 ($\Lambda=18 \text{ мкм}$); дифракционная эффективность $\eta=21\%$, $\Delta n_e=1,91 \cdot 10^{-5}$

Дифракционная картина в дальней зоне при распространении света вблизи направления оси Y представлена на рис. 4. Режим дифракции близок к брэгговскому, однако в дифрагированном поле присутствует несколько максимумов, что связано с профилем показателя преломления в области ФР, близким к ступенчатому. Эффективность дифракции (для +1 и -1 дифракционных максимумов) световой волны на ФР составила 21 %. По дифракционной эффективности было определено изменение необыкновенного показателя преломления кристалла в области ФР Δn_e , исходя из формулы Когельника для брэгговской дифракции света на голографических решетках (1):

$$\eta = \sin^2 \left(\frac{\pi \Delta n_e L}{\lambda \cos \theta} \right), \quad (1)$$

где L – толщина решетки; λ – длина волны света; θ – угол Брэгга. Оно составило $\Delta n_e = 1,91 \cdot 10^{-5}$.

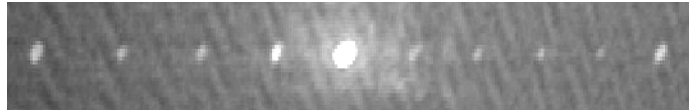


Рис. 4. Картина дальнего поля при дифракции необыкновенно поляризованной световой волны на ФР (свет распространяется вблизи оси Y)

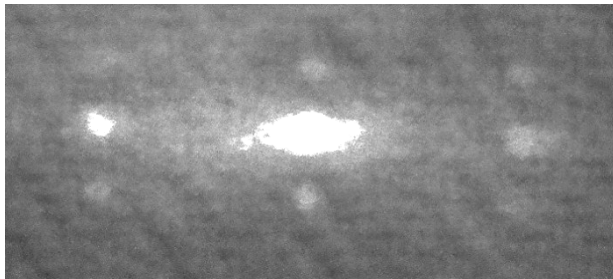


Рис. 5. Дифракция лазерного пучка при его распространении вблизи оси Y кристаллического образца

Продольная модуляция параметров фотонной решетки осуществлялась также контактным методом. Амплитудный транспарант, периодом чередования затемненных полос 50 мкм, помещался таким образом, что волновой вектор модулирующей дифракционной структуры ориентировался параллельно волноводным элементам базовой ФР. Экспонирование проводилось в течение 60 мин, при диаметре светового пучка 3 см и мощности излучения 50 мВт. При данной ориентации

транспаранта формирование фоторефрактивной решетки в оптически однородной области кристалла LiNbO_3 запрещено. Однако, как экспериментально продемонстрировано в [9], оно становится возможным при наличии в экспонируемой области предварительно сформированной ФР. Это подтверждено и проведенным экспериментом по продольной модуляции базовой ФР. Так, на рис. 5 представлена картина дифракции света в дальней зоне при зондировании модулированной ФР излучением He-Ne лазера ($\lambda = 633$ нм) в направлении вблизи оси Y . Из рисунка видно, что кроме максимумов, обусловленных дифракцией света на базовой ФР, появляются и дифракционные максимумы в ортогональном направлении, обусловленные продольной модуляцией базовой ФР. Малая интенсивность этих максимумов объясняется малой глубиной модуляции базовой ФР, однако для наблюдения эффектов преобразования блоховских мод ФР, по нашим оценкам, это не является препятствием.

Таким образом, результаты эксперимента подтвердили возможность продольной оптической модуляции параметров фоторефрактивной фотонной решетки в ниобате лития, что в дальнейшем может быть использовано в исследованиях как фундаментального, так и прикладного характера.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (НИР РНП.2.1.1.429, НИР по Госконтракту № 02.740.11.0553), РФФИ (совместный проект РФФИ–ГФЕН Китая, грант 11-02-91162-ГФЕН_а) и Фонда естественнонаучных исследований Китая (грант № 1111120063 NSFC).

Литература

1. Nonlinear optics and light localization in periodic photonic lattices / D.N. Neshev, A.A. Sukhorukov, W. Krolikowski, Yu.S. Kivshar // *J. Nonlinear Opt. Phys. Mater.* – 2007. – Vol. 16. – P. 1–25.
2. Experimental Observation of Linear and Nonlinear Optical Bloch Oscillations / R. Morandotti, U. Peschel, J.S. Aitchinson et al. // *Phys. Rev. Lett.* – 1999. – № 83. – P. 4756.
3. Visual Observation of Zener Tunneling / H. Trompeter, Th. Pertsch, F. Lederer et al. // *Phys. Rev. Lett.* – 2006. – Vol. 96. – P. 023901.

4. Experimental observation of Rabi oscillations in photonic lattices / K. Shandarova, Ch.E. Rüter, D. Kip et al. // Phys. Rev. Lett. – 2009. – № 102. – P. 123905.
 5. Андреев А.В. Коллективное спонтанное излучение (сверхизлучения Дике) / А.В. Андреев, В.И. Емельянов, Ю.А. Ильинский // Успехи физических наук. – 1980. – Т. 131, № 4. – С. 653–694.
 6. Optical superradiance in a $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$ crystal / V.A. Zuikov, A.A. Kalachev, V.V. Samartsev, A.M. Shegeda // Laser Physics. – 1999. – P. 951.
 7. Alternative technique for laser cooling with superradiance / G. Nemova, R. Kashyap // Phys. Rev. – 2011. – № 83. – P. 013404.
 8. Линейная и нелинейная дифракция световых пучков в фоторефрактивных фотонных решетках и сверхрешетках в ниобате лития / П.А. Тренихин, Д.А. Козорезов, К. Хаунхорст и др. // Доклады ТУСУРа. – 2010. – Вып. 2 (22). – С. 84–87.
 9. Линейное и нелинейное распространение световых пучков в двумерных фоторефрактивных фотонных решетках в ниобате лития / К.В. Шандарова, В.М. Шандаров, Е.В. Смирнов и др. // Изв. вузов. Физика. – 2006. – № 9. – С. 58–62.
-

Тренихин Павел Александрович

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

Шандаров Владимир Михайлович

Д-р физ.-мат. наук., профессор каф. СВЧ и КР ТУСУРа
Тел.: (382-2) 70-15-18
Эл. почта: ShandarovVM@svch.rk.tusur.ru

Фэнг Чен

PhD, prof. of Shandong University, China
Эл. почта: feng.chen75@gmail.com

Trenikhin P.A., Shandarov V.M., Chen F.

Investigation of possible longitudinal optical modulation of one-dimensional photorefractive photonic lattices in lithium niobate

The possibility of the longitudinal spatial optical modulation of parameters of one-dimensional photorefractive photonic lattices optically induced in lithium niobate crystal has been experimentally studied and discussed.

Keywords: superradiance, one beams scheme, photorefractive crystal.
