

УДК 535:621.372.8

А.Н. Парханюк, А.О. Маркин, В.М. Шандаров, Ф. Чен

Пироэлектрическая компенсация дифракции световых пучков в кристаллах ниобата лития

Экспериментально исследуются особенности дифракции световых пучков в кристаллах ниобата лития в условиях их однородного нагрева/

Ключевые слова: пироэлектрический эффект, дифракция, пространственное самовоздействие, фоторефрактивный эффект.

В современной физике и технике достаточно широко используются пироэлектрические материалы (пироэлектрики), обладающие электрической поляризацией при отсутствии внешнего электрического поля. Пироэлектрики можно выделить из многообразия кристаллических диэлектриков по симметричному признаку: их симметрия должна быть достаточно низкой, чтобы в кристалле осталось хотя бы одно направление, которое не меняет знака под действием элементов симметрии. Такие особенные направления называют полярными осями кристалла [1]. Пироэлектрики находят широкое применение в качестве основы для сенсорных элементов различного назначения, детекторов излучения, датчиков теплотеметрических приборов. В настоящее время обсуждается возможность применения некоторых видов пироэлектриков для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. С точки зрения применения подобных материалов в нелинейной оптике и приборах современной фотоники особый интерес представляет идея компенсации дифракционного расплывания световых пучков и формирования так называемых пиролиитонов, т.е. пространственных оптических солитонов, существующих в пироэлектрических материалах [2]. Реализация пиролиитонных режимов дает еще одну возможность управления параметрами световых полей в дополнение к известным нелинейно-оптическому, электрооптическому и акустооптическому подходам. Целью данной работы явилось исследование особенностей дифракции световых пучков в фоторефрактивном ниобате лития (LiNbO_3) в условиях вклада пироэлектрического эффекта.

Основная суть пироэлектрического эффекта заключается в способности кристалла изменять свою спонтанную поляризацию при изменении температуры. Величину пироэффекта можно характеризовать величиной изменения спонтанной поляризации ΔP_s , пропорциональной изменению температуры ΔT $\Delta P_s = p \Delta T$ [2].

Таким образом, пироэлектрический эффект в кристаллах описывается пироэлектрическим вектором \mathbf{p} . Если грани кристалла, перпендикулярные пироэлектрической оси, не замкнуты, то пироэлектрическим эффектом внутри него может быть создано электрическое поле с высокой напряженностью. Изменение электрического поля E_{py} при нагревании кристалла из-за изменения спонтанной поляризации определяется соотношением

$$E_{py} = \Delta E = -\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r} \frac{dP_s}{dT} \Delta T,$$

где ϵ_0 и ϵ_r – диэлектрическая проницаемость вакуума и относительная диэлектрическая проницаемость материала соответственно [3]. Изменение температуры приводит к изменению спонтанной поляризации и изменению электрического поля E_{py} . Это аналогично тому, как если бы внешнее электрическое поле было приложено к кристаллу. Все это поясняет концепцию пироэлектрического пространственного солитона, формирующегося в кристалле, в котором имеется однородное пироэлектрическое поле E_{py} . Световое поле генерирует носители электрических зарядов, пространственное перераспределение которых приводит к экранированию электрического поля в освещенной области и к возможности индуцированной самоканализации светового пучка [4].

На рис. 1 представлена схема эксперимента. Излучение непрерывного твердотельного лазера YAG:Nd^{3+} с удвоением частоты ($\lambda = 532$ нм) и выходной мощностью до 50 мВт с помощью линзы 2 фокусируется на входную плоскость кристаллического образца LiNbO_3 4, размещенного на подложке нагревателя. В качестве нагревателя использовался элемент Пельтье 5. С помощью нагревателя температура исследуемого образца могла повышаться до 95 °С. Температура исследуемого об-

разца контролируется термопарой. Поляризация света соответствует необыкновенной волне в кристалле. Изображение входной или выходной грани образца с помощью линзы 6 проецируется на анализатор световых пучков (ПЗС-камеру) 7. Микрометрический столик 3 позволяет смещать исследуемый образец в поперечном направлении относительно светового пучка.

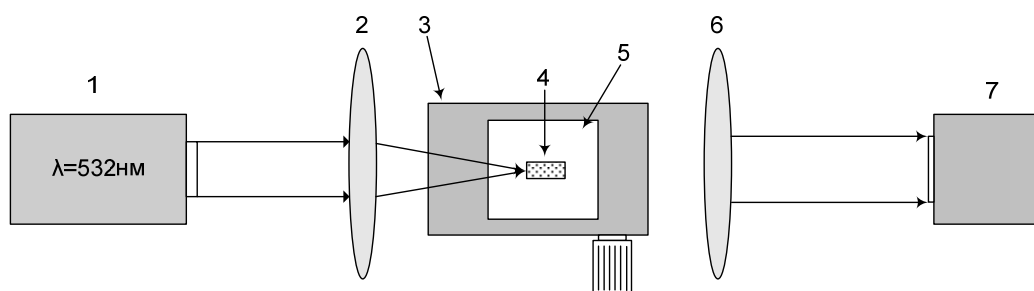


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – твердотельный лазер YAG:Nd³⁺; 2 – фокусирующая линза; 3 – микрометрический столик; 4 – образец LiNbO₃; 5 – нагревательный элемент; 6 – фокусирующая линза; 7 – ПЗС-камера

В экспериментах исследовалась линейная и нелинейная дифракция световых пучков в образцах номинально чистого ниобата лития с размером 11 мм в направлении распространения света (ось X). Вдоль направления полярной оси (направление пироэлектрического эффекта, ось Z) образцы имели размеры 5 и 10 мм. Изображения световых полей, представленные на рис. 2, иллюстрируют поле светового пучка на входной (см. рис. 2, а) и выходной (см. рис. 2, б) гранях образца LiNbO₃. Отметим, что хотя этот образец считается номинально чистым, фоторефрактивный эффект в нем проявляется достаточно сильно. Диаметр светового пучка на выходной плоскости кристалла значительно больше, чем на входной плоскости, что обусловлено линейной дифракцией света (в данном эксперименте мощность светового пучка была менее 1 мВт, и фоторефрактивные искажения его поля не наблюдались).

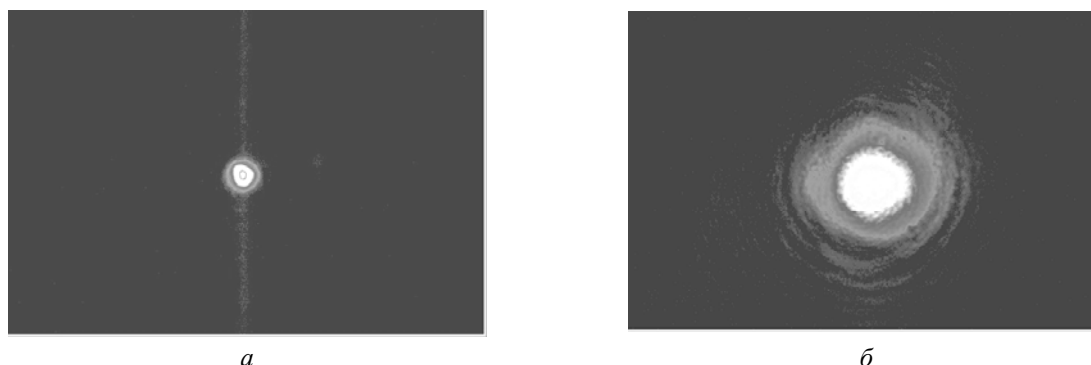


Рис. 2. Картина световых полей на входной (а) и выходной (б) гранях кристалла, мощность оптического излучения 0,9 мВт, диаметр входного пучка 30 мкм

Фоторефрактивная нелинейность в LiNbO₃ носит самодефокусирующий характер, поэтому в освещенной области показатель преломления материала уменьшается, т.е. в ней формируется динамическая нелинейная отрицательная линза, увеличивающая дифракционную расходимость пучка в направлении транспорта носителей заряда (полярная ось кристалла). Это иллюстрируется изображением на рис. 3, а, соответствующим световому полю на выходной плоскости кристалла (5 мм вдоль оси Z), спустя 5 мин после «включения» светового пучка. Для компенсации искажений поля пучка, обусловленных фоторефрактивным эффектом, с момента, соответствующего фиксации изображения (см. рис. 3, а), образец нагревался с помощью элемента Пельтье. По мере однородного (или близкого к однородному) нагрева кристалла наблюдается уменьшение дифракционной расходимости светового пучка (рис. 3, б, в) и по истечении времени порядка 17 мин наблюдается полная компенсация дифракционной расходимости пучка (рис. 3, г). Следует отметить, что скомпенсированными оказались как линейная, так и нелинейная дифракции пучка. В ходе данного эксперимента температура кристалла изменилась на 49°.

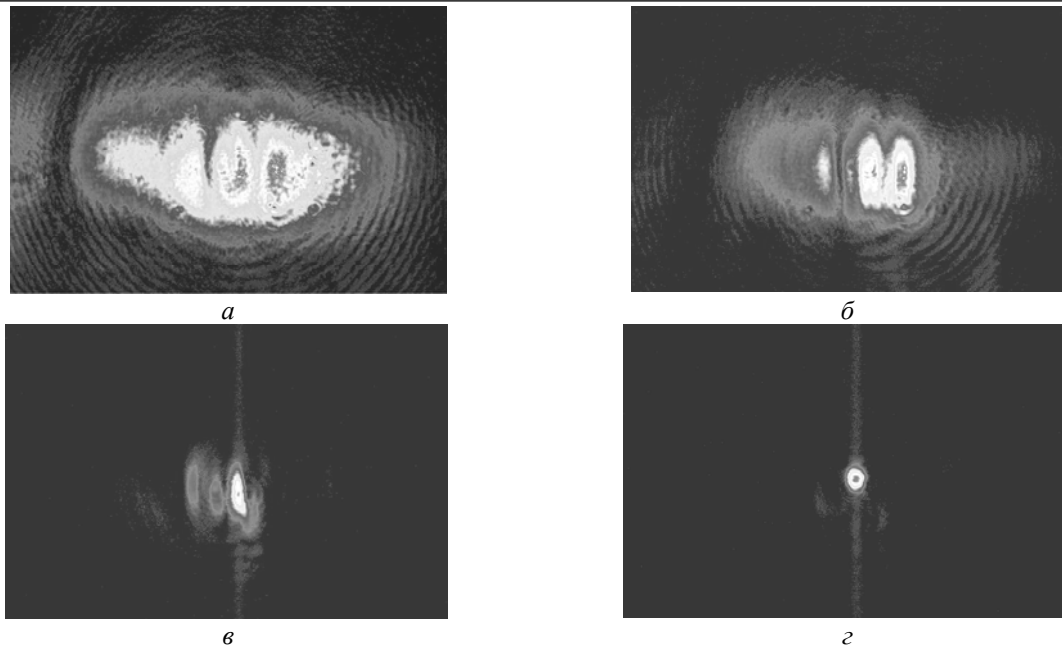


Рис. 3. Картины световых полей на выходной грани образца: *a* – $t = 0$ мин, температура образца 21 °С; *б* – $t = 2$ мин, температура образца 30 °С; *в* – $t = 7$ мин, температура образца 45 °С; *г* – $t = 17$ мин, температура образца 70 °С, мощность оптического излучения 0,9 мВт, диаметр входного пучка 30 мкм

Подобный же эксперимент проводился с кристаллическим образцом с размером 10 мм вдоль оси Z . Его результаты иллюстрируются изображениями на рис. 4. В данном случае можно видеть, что при одинаковом изменении температуры образца наблюдается компенсация лишь нелинейной дифракции светового поля, обусловленной фоторефрактивным эффектом в LiNbO_3 . Различие в количественных результатах обсуждаемых экспериментов связано с разницей размеров образцов вдоль пьезоэлектрической оси. Очевидно, что напряженность электрического поля, обусловленного появлением пьезоэлектрических зарядов на гранях кристалла, перпендикулярных полярной оси, будет при той же величине заряда тем больше, чем меньше размер кристалла в этом направлении.

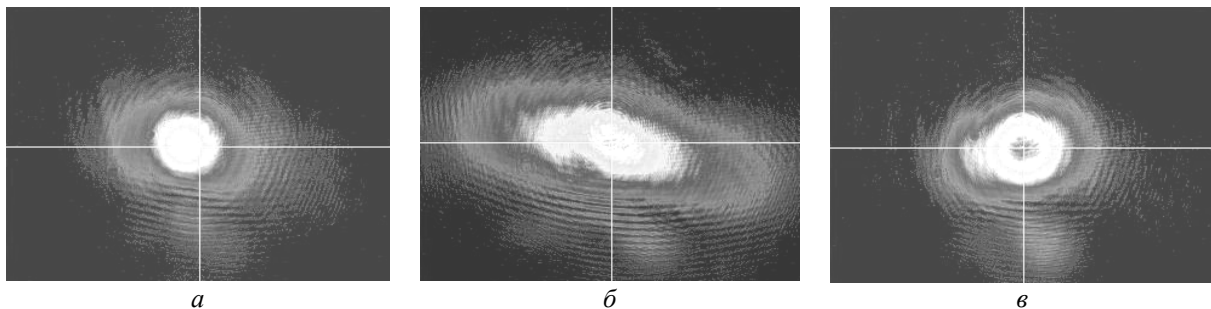


Рис. 4. Картины световых полей на выходной грани образца: без нагревания (слева) и с нагреванием (справа): *a* – $t = 0$ мин, температура образца 23 °С; *б* – $t = 2$ мин, температура образца 33 °С; *в* – $t = 4$ мин, температура образца 49 °С

Таким образом, результаты экспериментов продемонстрировали возможность существенной компенсации дифракционного расплывания световых пучков, в том числе возможность реализации режима их бездифракционного распространения, при вкладе пьезоэлектрического эффекта в кристаллических образцах ниобата лития.

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 No 1111120063 NSFC).

Литература

1. Струков Б.А. Пьезоэлектрические материалы: свойства и применения // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 5. – С. 96–101.

2. Safioui J. Pyroliton: pyroelectric spatial soliton / Jassem Safioui, Fabrice Devaux, Mathieu Chauvet // *Optics express*. – 2009. – Vol. 17, № 24. – P. 22209–22216.

3. Желудев И.С. Физика кристаллических диэлектриков. – М.: Наука, 1968. – 463 с.

4. Safioui J. Pyroelectric photorefractive spatial solitons/ J. Safioui, F. Devaux, K.P. Huy // *Photorefractive Materials, Effects, and Devices Control of Light and Matter*. – Bad Honnef, Germany: 2009. – P. 209–211.

Парханюк Александр Николаевич

Магистр каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧ и КР) ТУСУРа

Тел.: 8-952-886-70-35

Эл. почта: xfrjhbс@mail.ru

Маркин Александр Олегович

Студент 4-го курса, каф. СВЧ и КР ТУСУРа

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

Чен Фэнг

Доктор философии (PhD), профессор Шаньдунского университета, КНР

Эл. почта: feng.chen75@gmail.com

Маркин Александр Олегович

Студент 4-го курса каф. СВЧ и КР ТУСУРа

Parkhanyuk A.N., Markeen A.O., Shandarov V.M., Chen F.

Pyroelectric compensation of a light beam diffraction in lithium niobate crystals

The features of the light beam diffraction in lithium niobate crystals at homogeneous heating of crystal samples are experimentally investigated.

Keywords: pyroelectric effects, diffraction, spatial self-action, photorefractive damage.
