

РАСПАД ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА НА РЕГУЛЯРНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ РЕФРАКТИВНЫХ СТРУКТУР В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

Л.М. ЦАРУКЯН*

Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

*e-mail: lustsarukyan@gmail.com

(Поступила в редакцию 16 апреля 2021 г.)

Продemonстрирован распад непрерывного лазерного луча с длиной волны 632.8 нм на регулярные оптические изображения при распространении в фоторефрактивном кристалле ниобата лития, легированного железом (LN:Fe). В эксперименте мощность лазерного пучка варьировалась в диапазоне 0.02–10 мВт и были использованы кристаллы LN:Fe с длиной 4 мм и 10 мм. Временная эволюция профиля лазерного луча на выходной поверхности кристалла LN:Fe показала разделение гауссова луча на два пучка и затем формирование регулярных оптических 2D изображений микрометрического масштаба. Увеличение мощности входного луча существенно ускоряет формирование регулярных оптических изображений. Регулярные оптические изображения с вращательной симметрией второго порядка индуцируют квазикристаллические фотонные структуры в кристалле LN:Fe. Обсуждается физическая модель для объяснения экспериментальных результатов.

1. Введение

В классической оптической голографии формирование рефрактивных решеток осуществляется пространственно-модулированными оптическими пучками [1,2]. Освещение фоторефрактивной среды модулированным по интенсивности светом вызывает соответствующее изменение показателя преломления и формирование рефрактивной решетки. Модуляция интенсивности обычно достигается в отдельных двухлучевых [3] или многолучевых [4] интерференционных схемах, а также с использованием техники масок [5], комбинированной интерференционно-масочной техники [6] или пространственных модуляторов света [7]. Очень перспективным является использование недифрагирующих световых пучков для формирования фотонных решеток [8,9]. Недифрагирующие пучки обеспечивают формирование нерасплывающихся и высококонтрастных объемных решеток благодаря их характерной особенности распространения в свободном пространстве без изменения распределения интенсивности в поперечной плоскости.

Взаимодействие одиночного интенсивного гауссова оптического пучка с нелинейной средой может вызывать эффекты самовоздействия. Среди них эффекты самофокусировки и самодефокусировки лазерного луча происходят в зависимости от положительного или отрицательного изменения показателя преломления в среде. Точный баланс между самофокусировкой и линейной дифракцией оптического луча приводит к образованию нерасходящихся самолокализованных лучей, которые известны как пространственные оптические солитоны. Оптические солитоны являются предметом интенсивных исследований в нелинейной оптике, поскольку имеют хорошую аналогию с волноводными структурами и перспективны для адресной передачи оптической информации и востребованы для различных применений в оптических коммуникационных системах и полностью оптических устройствах [10,11].

Примерами перспективных голографических материалов являются фоторефрактивные кристаллы [2,12,13], жидкие кристаллы [14,15] и композитные полимерные материалы [16,17]. Среди фоторефрактивных кристаллов легированные кристаллы ниобата лития (LN) являются предметом интенсивного изучения в качестве материалов для голографических применений благодаря их превосходным фоторефрактивным свойствам [2]. Фоторефрактивные свойства кристаллов LN изучались методом Z-сканирования в многочисленных работах (см. работы [18,19] и ссылки в них). Эти исследования продемонстрировали индуцированное светом отрицательное изменение показателя преломления в кристалле LN. Такая особенность кристалла LN может обеспечить самодефокусировку, а также образование «темных» солитонов для конкретных условий эксперимента [20,21]. Отсутствие самофокусировки в кристаллах LN дает хорошую возможность выявить другие эффекты самовоздействия, такие как формирование регулярных изображений в лазерном луче, взаимодействующем с кристаллом ниобата лития.

Модификация одиночного лазерного луча, прошедшего через нелегированный фоторефрактивный волновод ниобата лития, наблюдалась в работах [22,23] и были изучены нелинейные эффекты самодефокусировки, одномерного распада пучка и временной нестабильности для диапазона интенсивностей света $10^3\text{--}5\times 10^7$ Вт/м².

Явление формирования регулярных оптических 2D изображений в микрометрическом масштабе под действием лазерного луча мощностью 0.5 мВт, прошедшего через фоторефрактивный кристалл ниобата лития легированного железом (LN:Fe), было описано в работах [24,25]. Особенностью эксперимента была достаточно низкая мощность оптического луча на уровне милливатт, которая обеспечивала медленную эволюцию нелинейных процессов в кристалле и позволяла наблюдать все детали эволюции распределения интенсивности в луче. Результаты объяснялись индуцированием лазерным излучением комплексной нелинейной линзы в среде, которая вызывает дефокусировку луча из его центра и фокусировку на периферии. Взаимная интерференция лучей с разными фазами

приводит к формированию регулярных оптических 2D изображений микрометрического масштаба.

Регулярные оптические изображения внутри кристалла, в свою очередь, могут привести к формированию рефрактивной структуры в кристалле LN:Fe. Однако для эффективной записи рефрактивных структур в течение реального времени освещения требуется относительно большая мощность лазерного луча. Таким образом, изучение особенностей формирования световых изображений при больших мощностях лазерного луча, распространяющегося через фоторефрактивный кристалл LN:Fe, является актуальной задачей.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований формирования регулярных оптических 2D изображений микрометрического масштаба в кристалле LN:Fe для более широкого диапазона мощности лазера от 0.02 до 10 мВт. Результаты экспериментов показывают, что увеличение мощности входного пучка существенно ускоряет формирование регулярных оптических изображений. Найдены оптимальные параметры лазерного луча для формирования оптических изображений и, одновременно, эффективной записи рефрактивных структур в кристалле LN:Fe. Квазикристаллические рефрактивные структуры, сформированные в кристалле LN:Fe, тестировались методом оптического пробного луча.

2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка для изучения формирования регулярных оптических 2D изображений микрометрического масштаба в одиночном гауссовом пучке, распространяющемся через кристалл LN:Fe, аналогична установке использованной и подробно описанной в работе [24].

В качестве источника излучения использовался одномодовый гелий-неоновый лазер (ThorlabsHP-100) с длиной волны 632.8 нм и максимальной мощностью 10 мВт. В экспериментах использовался образец LN:Fe кристалла с концентрацией 0.03 вес.% Fe и размерами $4.2 \times 4.4 \times 10 \text{ мм}^3$ и $4.2 \times 4.4 \times 4 \text{ мм}^3$ ($X \times Y \times Z$). Лазерный луч фокусировался короткофокусным объективом (3.8 \times) до размера $\sim 72 \text{ мкм}$ на входной грани кристалла LN:Fe, который был помещен на трансляционный столик. Лазерный луч имел обыкновенную (o) -поляризацию относительно кристаллографической оси C кристалла LN:Fe. Профиль распространяющегося вперед лазерного луча на выходной грани кристалла проецировался линзой на вход CMOS-камеры, подключенной к компьютеру, что обеспечивало регистрацию и измерения временной эволюции поперечного профиля луча.

Для исследования эволюции профиля оптического пучка и формирования регулярных изображений важно иметь гауссовый профиль пучка на входе в кристалл. Профили лазерного луча на входной и выходной гранях кристалла измерялись оптическим профилометром (BP-106-VIS). Профили измерялись по

направлениям X и Y (оптическая ось C кристалла) и показали хорошую аппроксимацию функцией Гаусса. Измерения проводились для очень низкой мощности лазерного луча 20 мкВт, чтобы избежать каких-либо нелинейных искажений луча. Измеренные значения полной ширины на полувысоте (FWHM) пучка вдоль оси Y на входе и выходе кристалла показаны на рис.1 и составили 72 мкм и 124 мкм соответственно. Аналогичный результат был получен для X -компоненты профиля лазерного луча.

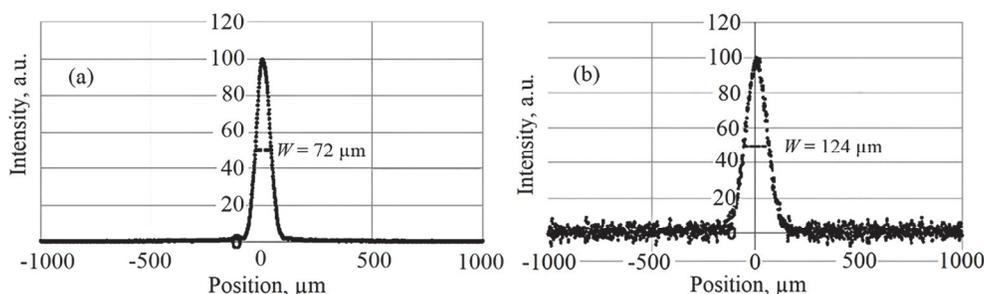


Рис.1. Поперечные профили входного пучка, сфокусированного на переднюю грань кристалла (а), и выходного пучка на задней грани кристалла (б). Профили пучка показывают результаты измерений при сканировании вдоль направления Y (оптическая ось C) кристалла. Лазерный луч имеет мощность 20 мкВт. Профили хорошо аппроксимируются функцией Гаусса.

3. Экспериментальные результаты и обсуждения

3.1. Распад лазерного пучка на регулярные оптические изображения при прохождении через кристалл $LN:Fe$

На рис. 2 показано временное изменение профиля лазерного луча на выходной поверхности кристалла длиной 10 мм для входной мощности луча 0.08 мВт. Интенсивность пучка оценивается в 2×10^4 Вт/м².

Эволюция во времени демонстрирует расщепление прошедшего через кристалл гауссова луча (рис. 2а) на два пучка (рис. 2б-е) вдоль оси C кристалла в

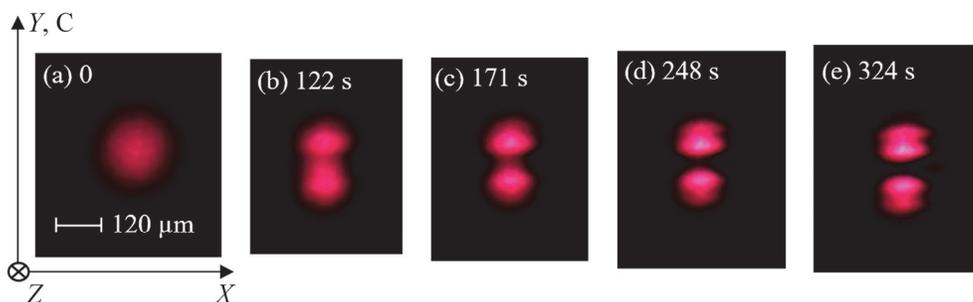


Рис.2. Эволюция во времени профиля o -поляризованного лазерного луча на выходной грани кристалла $LN:Fe$ длиной 10 мм при мощности входного луча 0.08 мВт.

течение временного интервала 122–324 с, с более выраженным разделением пучков с течением времени. Рис. 2d,e демонстрируют также тенденцию дальнейшего расщепления каждого пучка на два фрагмента.

На рис. 3 показаны поперечные распределения выходного пучка вдоль направлений X и Y в момент времени $t = 0$ (а) и расщепленных пучков в момент $t = 248$ с (б). Размеры расщепленных пучков вдоль оси C кристалла, измеренные на половине максимума контуров пучка, равны 56 мкм при $t = 248$ с (рис. 3б), что примерно в два раза меньше по сравнению с размером 124 мкм выходного пучка при $t = 0$ (рис. 3а). При этом интенсивность каждого расщепленного пучка примерно в 2 раза больше, чем интенсивность выходного пучка при $t = 0$. Таким образом, пространственная эволюция пучка ограничивается не только расщеплением, но и локализацией расщепленных пучков в фокальные пятна.

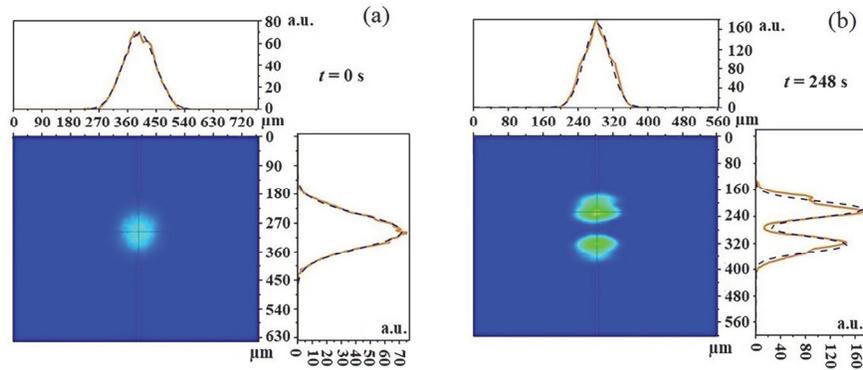


Рис.3. Компьютерная обработка изображений, показанных на рис. 2а и 2d, с использованием программы Origin путем сканирования профилей пучка по горизонтальному X и вертикальному Y (ось C кристалла) направлениям. Измеренные контуры выходного пучка при $t = 0$ и разделенных пучков при $t = 248$ с близко аппроксимируются функцией Гаусса (штриховые кривые). Поперечные размеры расщепленных пучков, измеренные на половине максимума контуров пучка в направлении Y (ось C кристалла), равны 56 мкм (б), что примерно в два раза меньше по сравнению с размером выходного пучка в 124 мкм при $t = 0$ (а). Интенсивности расщепленных пучков (показанные в произвольных единицах) примерно в 2 раза больше, чем интенсивность выходного пучка при $t = 0$.

Эволюция во времени поперечного профиля лазерного пучка мощностью 10 мВт прошедшего через кристалл длиной 10 мм показана на рис.4. Расщепление входного гауссова пучка (рис.4а) на два луча (рис.4б) происходит через 1 с развития фоторефрактивных процессов в кристалле. Дальнейшая эволюция показывает формирование регулярных оптических 2D изображений микрометрического масштаба (рис. 4с-ф) в течение 10 с. Зарегистрированные изображения хорошо воспроизводятся при фиксированной мощности входного лазерного луча.

Результаты экспериментов по эволюции профиля лазерного пучка на выходе кристалла LN:Fe толщиной 10 мм в зависимости от мощности входящего

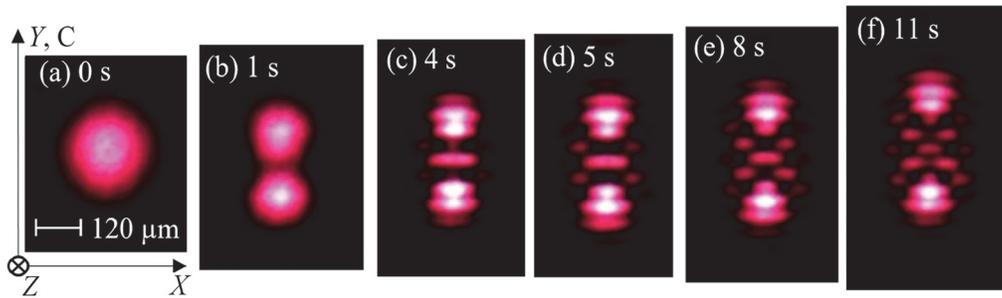


Рис.4. Эволюция во времени профиля *o*-поляризованного лазерного луча на выходной грани кристалла LN длиной 10 мм при мощности входного луча 10 мВт.

пучка в диапазоне 0.02–2 мВт при фиксированном времени освещения $t = 211$ с представлены на рис.5. Увеличение мощности входного пучка обеспечивает формирование более сложных регулярных оптических изображений при фиксированном времени освещения.

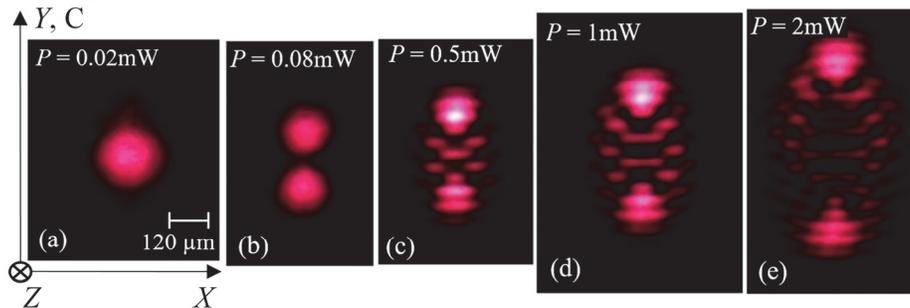


Рис.5. Эволюция профиля *o*-поляризованного лазерного луча на выходе кристалла LN с увеличением мощности входного луча в диапазоне 0.02–2 мВт при фиксированном времени освещения 211 с.

Сравнение рис. 4 и 5 показывает, что ярко выраженное регулярное оптическое изображение, сформированная за 8 с при мощности луча 10 мВт (рис.4е), было сформировано при существенно более длительном освещении 211 при мощности лазерного луча 0.5 мВт (рис.5с). Таким образом, увеличение мощности входного луча до 10 мВт существенно ускоряет формирование регулярных оптических изображений.

3.2. Запись квазикристаллической рефрактивной решетки в кристалле LN:Fe и ее тестирование пробным пучком

Оптические изображения с вращательной симметрией второго порядка, созданные в фоторефрактивном кристалле (рис. 4с-ф, и 5с-е), вызывают соответствующее изменение показателя преломления и регистрируют рефрактивную решетку внутри кристалла. Полученное результирующее распределение показателя преломления внутри кристалла LN будет представлять собой квазикристаллическую фотонную структуру с вращательной симметрией второго порядка.

Запись 2D квазикристаллической рефрактивной структуры в микрометрическом масштабе в кристалле LN:Fe длиной 4 мм была выполнена гауссовым пучком с длиной волны 632.8 нм, *o*-поляризацией и мощностью 5 мВт в течение 28 с. На рис.6а показано соответствующее оптическое изображение, сформированное лазерным лучом на выходной грани кристалла через 28 секунд. Такая картина формируется через ~15 с эволюции процесса и практически не меняется до 28 с. Можно предположить, что это оптическое изображение вносит основной вклад в процесс записи рефрактивной структуры и воспроизводится как соответствующее распределение показателя преломления внутри фоторефрактивного кристалла. Относительно небольшая длина кристалла (4 мм) позволяла проводить оптическое тестирование записанной рефрактивной структуры методом зондирующего луча без заметного поглощения и искажения дифрагированного луча. На рис.6б показана дифракционная картина в дальней зоне, полученная тестирующим оптическим пучком мощностью 2 мкВт от записанной квазикристаллической решетки. Время жизни сформированных квазикристаллических структур составляет несколько месяцев благодаря высокому сопротивлению кристалла LN:Fe.

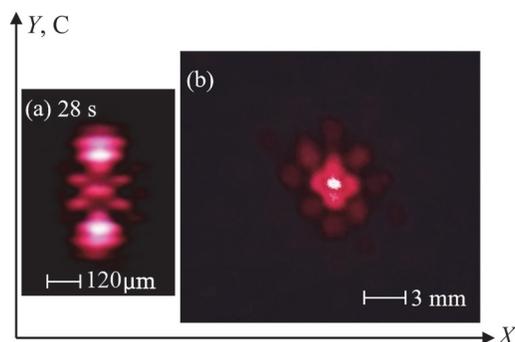


Рис.6. (а) Оптическое изображение лазерного луча с длиной волны 632.8 нм и мощностью 5 мВт на выходной поверхности кристалла LN:Fe длиной 4 мм, после 28 с облучения. (б) Дифракционная картина в дальней зоне, полученная с помощью пробного луча мощностью 2 мкВт от рефрактивной структуры в кристалле.

3.3. Физическая модель формирования оптических изображений

Физический механизм создания голографических решеток в фоторефрактивных материалах основан на электрооптическом эффекте. В кристаллах LN:Fe ионы железа находятся в двух валентных состояниях: Fe^{2+} и Fe^{3+} . Когда кристалл LN:Fe освещается светом, электроны из центров Fe^{2+} возбуждаются в зону проводимости (рис.7а), где они мигрируют и могут быть захвачены центрами Fe^{3+} в неосвещенных зонах кристалла. Перераспределение зарядов создает внутреннее электрическое поле пространственного разделения заряда E_{SC} , которое, в свою очередь, изменяет обыкновенную (n_o) и необыкновенную (n_e) показатели преломления среды за счет электрооптического эффекта: $\Delta n_o = -0.5n_o^3r_{13}E_{\text{SC}}$ и

$\Delta n_e = -0.5n_e^3 r_{33} E_{SC}$, где r_{13} и r_{33} – электрооптические коэффициенты, E_{SC} – компонента электрического поля пространственного разделения зарядов вдоль оси C^+ кристалла и $n_o = 2.28$, $n_e = 2.19$, $r_{13} = 9.1 \times 10^{-12} \text{ м} \cdot \text{В}^{-1}$ и $r_{33} = 30.9 \times 10^{-12} \text{ м} \cdot \text{В}^{-1}$ для длины волны 633 нм [26–28]. Величина плотности фототока вдоль оси C кристалла за счет объемного фотовольтаического эффекта определяется как $J_{PV} = k\alpha I$, где I – интенсивность света, k – коэффициент, зависящий от природы поглощающих центров и длины волны света и α – коэффициент поглощения [27]. Поле пространственного разделения зарядов из-за фотовольтаического эффекта определяется по формуле: $E_{SC} = k\alpha I/\sigma$, где σ – фотопроводимость освещенной части кристалла.

В кристалле LN:Fe вероятности переноса заряда в направлениях $\pm C$ различны из-за внутренней структуры кристалла LN:Fe [27]. При возбуждении светом электроны движутся в предпочтительном направлении C^+ . На рис.7а изображена энергетическая диаграмма для ионизации и дальнейшего перераспределения зарядов для кристалла одним активным центром. На рис.7б схематически показан лазерный луч с гауссовым профилем, а на рис.7с схематически показано распределение индуцированного светом электрического поля пространственного разделения зарядов относительно лазерного луча [18,28]. На рис.7д представлено соответствующее изменение показателя преломления вдоль оси C под действием света [28].

Таким образом, освещение кристалла LN:Fe лазерным лучом с гауссовым профилем приводит к специфическому светоиндуцированному комплексному изменению показателя преломления с глубоким центральным минимумом $\Delta n < 0$ (отрицательная линза) и боковыми максимумами $\Delta n > 0$ (положительные линзы) вдоль оси C^+ кристалла [18,27,28]. Отклонение света в область с большим показателем преломления вызывает серию бифуркаций пучка на ранней стадии фоторефрактивного процесса (рис.2,4,5). Светоиндуцированная комплексная линза вызывает дефокусировку луча от его центра и фокусировку на периферии. Взаимная интерференция лучей с разными фазами на пересечении лучей приводит к

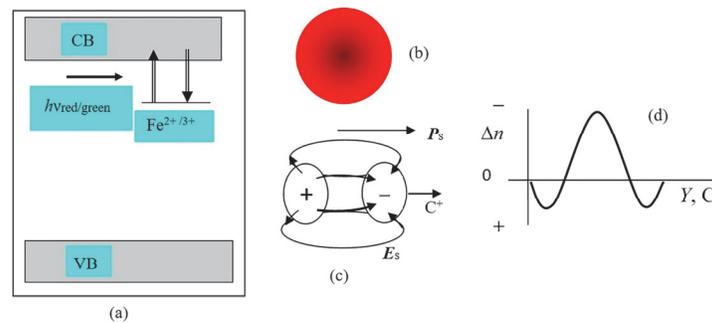


Рис.7. (а) Зонная диаграмма для кристалла с одним активным центром. VB – валентная зона, СВ – зона проводимости. (б) Схема лазерного луча с гауссовым профилем. (в) Схема распределения электрического поля пространственного разделения зарядов, индуцированного светом. P_s – показывает направление спонтанной поляризации кристалла. (д) Схематическое представление изменения показателя преломления Δn под действием света.

формированию регулярных оптических изображений (рис.4,5). Соответствующее изменение показателя преломления формирует рефрактивную решетку внутри кристалла, которая является квазикристаллической фотонной структурой, поскольку не имеет трансляционной симметрии, но имеет вращательную симметрию второго порядка.

Особенностью проведенного эксперимента является формирование двумерных регулярных оптических изображений, состоящих из световых пятен микрометрического масштаба, симметрично расположенных относительно центра светового изображения. Изображение имеет вращательную симметрию второго порядка относительно направления Z распространения луча. На рис. 4с-f показаны регулярные изображения, сформированные в кристалле LN:Fe лазерным излучением на длине волны 632.8 нм и интенсивности $\sim 10^5$ Вт/м². Для сравнения в работе [23] распространение одиночного луча на длине волны 532 нм через волновод LN приводило к одномерному распаду оптического луча на световые пятна, расположенные симметрично относительно центра луча. В нелегированном кристалле лития ниобата [23] сформированный профиль показателя преломления быстро исчезает после выключения лазерного луча, тогда как в нашем эксперименте с кристаллом LN:Fe время жизни сформированных квазикристаллических структур составляет несколько месяцев.

Изменение показателя преломления в среде под действием света является физической основой наблюдаемой модификации профиля лазерного луча при распространении через LN:Fe кристалл и разработанного интерференционного механизма формирования регулярных оптических изображений.

Численное моделирование светоиндуцированной модификации показателя преломления в кристалле LN:Fe и формирование регулярных оптических 2D изображений микрометрического масштаба в зависимости от мощности и поляризации лазерного луча представлено в работе [25]. Моделирование проводилось на основе разработанной модели двух фотоактивных центров для кристалла LN:Fe [26,29–31], где и центры обусловленные ионами железа, и поляроны рассматриваются как фотоактивные центры. В кристалле LN:Fe дополнительные фотоактивные центры были идентифицированы как малые поляроны – квазичастицы локализованные на внутренних дефектах кристалла Nb_{Li} , которые имеют поглощение вблизи длины волны 500 нм и активизируются светом ($Nb_{Li}^{4+} \leftrightarrow Nb_{Li}^{5+} + e^-$) [29,30]. Под действием света поляроны совершают прыжковые перемещения между соседними дефектами Nb_{Li} в кристалле, что приводит к перераспределению зарядов и дает вклад в фотовольтаическое поле E_{sc} [30].

Распределение изменения показателя преломления Δn , смоделированное и численно рассчитанное в работе [25] хорошо совпадает с изменением показателя преломления Δn , схематически представленном на рис.7d и экспериментально измеренным в работе [28]. Моделирование, проведенное в работе [25] выявляет также интерференционный характер формируемых регулярных изображений при распространении излучения в среде, на поздних стадиях фоторефрактивного процесса (рис.4,5).

4. Заключение

Продемонстрировано формирование регулярных оптических 2D изображений микрометрического масштаба в одиночном лазерном луче, распространяющемся через фоторефрактивный кристалл LN:Fe. Экспериментальные результаты для лазерного луча с мощностью 0.02–10 мВт демонстрируют, что увеличение мощности входного луча до 10 мВт существенно ускоряет формирование регулярных оптических изображений. Эффективное формирование рефрактивных структур в кристалле LN:Fe происходит при световой мощности 5–10 мВт и времени записи в несколько десятков секунд приемлемых для практических применений. Регулярные оптические структуры с вращательной симметрией, сформированные в лазерном пучке при его распространении внутри кристалла, вызывают соответствующее изменение показателя преломления и записывают квазикристаллическую фотонную решетку в фоторефрактивном кристалле. Важно отметить, что квазикристаллические фотонные структуры имеют долгое время жизни в кристалле (несколько месяцев в темноте) из-за высокого сопротивления кристалла LN:Fe, что делает их перспективными для практических применений. Формирование регулярных оптических структур в лазерном пучке и одновременная запись рефрактивных решеток в фоторефрактивном кристалле LN:Fe открывает новый подход для оптической голографии с одним лазерным пучком.

Работа поддержана грантом Международного научно-технического центра (МНТЦ), проект А-2130. Автор благодарит доктора физ.-мат. наук Эдварда Коканяна за предоставление кристаллов LN:Fe в рамках проекта МНТЦ А-2130. Автор благодарен профессору Матье Шове (Mathieu Chauvet), профессору Фабрису Дево (Fabrice Devaux) (Институт FEMTO-ST, Университет Franche-Comte, Безансон, Франция) и доктору физ.-мат наук Рафаэлю Дрампяну (Институт физических исследований Национальной академии наук Армении) за многочисленные и плодотворные обсуждения экспериментальных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **R.J. Collier, Ch.B. Buckhard, L.H. Lin.** Optical holography, New York: Academic Press, 1971.
2. **P. Günter, J.P. Huignard.** Photorefractive Materials and Their Applications III, Springer Series in Optical Sciences, vol. 115, New York, 2007.
3. **N.D. Lai, W.P. Liang, J.H. Lin, C.C. Hsu, C.H. Lin.** Opt. Express, **13**, 9605 (2005).
4. **N.D. Lai, J.H. Lin, Y.Y. Huang, Ch.Ch. Hsu.** Opt. Express, **22**, 10746 (2006).
5. **W.-H. Lee.** Computer generated holograms: Techniques and applications, Progress in Optics, North-Holland, XVI, chapter 3, p. 121, 1978.
6. **A. Badalyan, R. Hovsepyan, P. Mantashyan, V. Mekhitaryan, R. Drampyan.** Appl. Phys. B, **116**, 97 (2014).
7. **N. Chattaripiban, E.A. Rogers, D. Cofield, W.T. Hill, R. Roy.** Opt. Lett., **28**, 2183 (2003).
8. **P. Rose, M. Boguslawski, C. Denz.** New J. Physics, **14**, 033018 (2012).
9. **A. Badalyan, R. Hovsepyan, P. Mantashyan, V. Mekhitaryan, R. Drampyan.** Eur. Phys. J. D, **68**, 82 (2014).
10. **S. Trillo, W.E. Torruellas.** Spatial solitons, Berlin: Springer-Verlag, 2001.

11. **Yu.S. Kivshar, G.P. Agrawal.** Optical Solitons, New York: Academic Press, 2003.
12. **C. Denz, M. Schwab, C. Weirnau.** Transverse-pattern Formation in Photorefractive Optics, Berlin: Springer, 2003.
13. **R.A. Rupp.** Appl. Phys. A, **55**, 2 (1992).
14. **I.C. Khoo.** Liquid Crystals: Physical Properties and Nonlinear Optical Phenomena, New York: Wiley, 1995.
15. **F. Simoni.** Nonlinear Optical Properties of Liquid Crystals, Singapore: World Scientific, 1997.
16. **P. Cheben, M.L. Calvo.** Appl. Phys. Lett., **78**, 1490 (2011).
17. **F. Del Monte, P. Cheben, O. Martinez-Matos, J.A. Rodrigo, M.L. Calvo.** Adv. Mater., **18**, 2014 (2006).
18. **Q.W. Song, Ch.-P. Zhang, P.J. Talbot.** Applied Optics, **32**(35), 7266 (1993).
19. **S.M. Kostritskii, M. Aillerie.** J. Appl. Phys., **111**, 103504 (2012).
20. **M. Taya, M.C. Bashaw, M.M. Fejer, M. Segev, G.C. Valley.** Phys. Rev. A, **52**, 3095 (1995).
21. **M. Chauvet.** J. Opt. Soc. Am. B, **20**(12), 2515 (2003).
22. **J. Villarroel, J. Carnicero, F. Luedtke, M. Carrascosa, A. Garcia-Cabanes, J.M. Cabrera, A. Alcazar, B. Ramiro.** Opt. Express, **18**, 20852 (2010).
23. **J. Villarroel, O. Caballero-Caraero, B. Ramiro, A. Alcazar, A. Garcia-Cabanes, M. Carrascosa.** Opt. Materials, **33**, 103 (2010).
24. **L.M. Tsarukyan, A.M. Badalyan, R.K. Hovsepyan, R.Kh. Drampyan.** Proc. SPIE, **11030**, 1103017 (2019).
25. **L. Tsarukyan, A. Badalyan, F. Devaux, M. Chauvet, R. Drampyan.** Opt. Commun., **478**, 126396 (2021).
26. **F. Devaux, J. Safioui, M. Chauvet, R. Passier.** Phys. Rev A, **81**, 013825 (2010).
27. **A.M. Glass, D. von der Linde, T.J. Negran.** Appl. Phys. Lett., **25**, 233 (1974).
28. **F.S. Chen.** J. Appl. Phys., **40**, 389 (1969).
29. **F. Jermann, J. Otten.** J. Opt. Soc. Am. B, **10**, 2085 (1993).
30. **M. Imlau, H. Badorreck, Ch. Merschjann.** Appl. Phys. Rev., **2**, 040606 (2015).
31. **L. Tsarukyan, R. Hovsepyan, R. Drampyan.** Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications, **40**, 100793 (2020).

LASER BEAM BREAK-UP TO REGULAR OPTICAL PATTERNS
AND REFRACTIVE STRUCTURES FORMATION IN A
PHOTOREFRACTIVE LITHIUM NIOBATE CRYSTAL

L.M. TSARUKYAN

Break-up of a cw 632.8 nm wavelength laser beam to regular optical patterns during propagation through a photorefractive iron doped lithium niobate (LN:Fe) crystal is demonstrated. The power of the laser beam is varied in the range of 0.02–10 mW and 4mm and 10 mm lengths LN:Fe crystals are used in the experiments. Time evolution of the laser beam profile at the output face of the LN:Fe crystal showed the splitting of a Gaussian beam into two lobes and then formation of 2D micrometric scale regular optical patterns. The input beam power increase essentially speeds-up the regular optical pattern formation. 2-fold rotation symmetry regular optical patterns induct the quasi-crystalline photonic structures in LN:Fe crystal. A physical model to explain the experimental results is discussed.