

# Изменение показателя преломления фоторефрактивного кристалла при формировании пространственного экранированного солитона

С.А.Ассельборн, Н.Д.Кундикова, И.В.Новиков

*Исследовано изменение показателя преломления в фоторефрактивном кристалле ниобата бария-натрия с приложенным знакопеременным электрическим полем при распространении в нем промодулированного по интенсивности когерентного излучения. Экспериментально показано, что изменение показателя преломления при достижении солитонного режима в фоторефрактивном кристалле с малым нелокальным откликом не зависит от амплитуды внешнего поля и глубины модуляции интенсивности излучения.*

**Ключевые слова:** фоторефрактивный кристалл, пространственный солитон, самовоздействие света, изменение показателя преломления среды.

Интерес к исследованию условий формирования и свойствам оптических пространственных солитонов в фоторефрактивных средах связан с тем, что для реализации нелинейных эффектов в фоторефрактивной среде необходимо излучение с интенсивностью всего 100 мВт/см<sup>2</sup>, что значительно меньше значений, необходимых, например, для керровских сред. Низкая необходимая мощность излучения обуславливает и их активное применение в оптических системах связи [1].

В зависимости от механизма формирования различают несколько видов солитонов: квазистационарные [2], экранированные [3], векторные, фотовольтаические и композитные. В настоящее время активно исследуются фоторефрактивные экранированные солитоны [4].

Явления, связанные с формированием солитонного режима в переменном поле, в отличие от постоянного электрического поля, до конца не исследованы, хотя использование переменного внешнего поля, по сравнению с постоянным, позволяет избежать влияния внутренней неоднородности проводимости кристалла и неоднородности его фоновой засветки на экранировку внешнего поля. В работе [5] качественно рассмотрен механизм самовоздействия света в фоторефрактивном кристалле с приложенным знакопеременным электрическим полем при синхронной модуляции интенсивности излучения и исследована пространственная фазовая самомодуляция когерентного излучения в кристалле Ва<sub>2</sub>НаNb<sub>5</sub>O<sub>15</sub> (BNN). Позднее в этом кристалле наблюдалось явление самофокусировки [6]. Аналитическое выражение для пространственного заряда в фоторефрактивном кристалле с приложенным знакопеременным электрическим полем при синхронной модуляции интенсивности излучения получено в [7]. Впервые фоторефрактивный солитон в кристалле с приложенным знакопеременным электрическим

полем при синхронной модуляции интенсивности излучения наблюдался в работе [8], а в [9] приведены результаты исследования влияния нелинейных откликов фоторефрактивной среды на формирование солитонного режима. Экспериментальное исследование изменения показателя преломления в процессе формирования солитонного режима до сих пор не проводилось.

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование изменения показателя преломления при распространении промодулированного по интенсивности когерентного излучения в фоторефрактивном кристалле с приложенным знакопеременным электрическим полем.

Для проведения экспериментальных исследований был выбран кристалл BNN. Длина кристалла в направлении распространения лазерного пучка составляла 3.5 мм, а в направлении внешнего электрического поля – 3 мм. Исследование характера изменения показателя преломления проводилось на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 1.

Излучение He–Ne-лазера 1 с длиной волны  $\lambda = 633$  нм и мощностью 12 мВт, используемое для формирования солитонного режима, проходило через жидкокристаллическую ячейку 4, помещенную между двумя скрещенными поляризаторами 3. Жидкокристаллическая ячейка под-

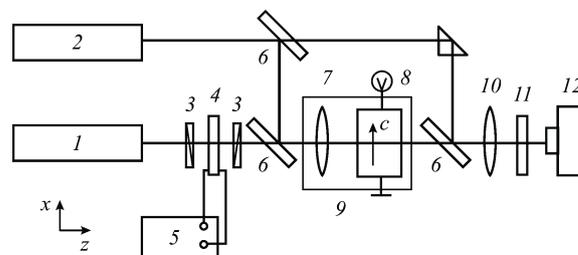


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – He–Ne-лазер; 2 – He–Cd-лазер; 3 – скрещенные поляризаторы; 4 – жидкокристаллическая ячейка; 5 – генератор низких частот; 6 – полупрозрачные зеркала; 7 – короткофокусная линза; 8 – фоторефрактивный кристалл; 9 – подвижный столик; 10 – объектив; 11 – синие-зеленый фильтр; 12 – ПЗС-матрица; *c* – оптическая ось кристалла.

С.А.Ассельборн, Н.Д.Кундикова, И.В.Новиков. Вузско-академический отдел нелинейной оптики Института электрофизики УрО РАН и Южно-Уральского государственного университета, Россия, 454080 Челябинск, просп. Ленина, 76; e-mail: igor\_n@physicon.susu.ac.ru

Поступила в редакцию 23 октября 2009 г.

ключалась к генератору низких частот 5 (ГНЧ), который давал сигнал в форме меандра с частотой 50 Гц, что позволяло модулировать интенсивность проходящего излучения с этой частотой. Для синхронизации фазы модуляции излучения He–Ne-лазера с фазой внешнего переменного электрического поля создавалась задержка на ГНЧ. Фокусирующая линза 7 и кристалл 8 находились на платформе 9, которая могла двигаться в направлении распространения пучка (ось  $z$ ). Лазерный пучок фокусировался линзой 7 с фокусным расстоянием 47 мм на кристалл так, чтобы перетяжка совпадала с передней (входной) гранью кристалла.

Для исследования характера изменения показателя преломления кристалла при формировании солитонного режима применялся He–Cd-лазер 2 с длиной волны излучения 433 нм и мощностью 10 мВт. Пучок излучения этого лазера делился на два пучка с примерно одинаковыми интенсивностями для достижения лучшего контраста интерференционной картины, получаемой в интерферометре Маха–Цендера. Использование в работе двух лазеров с разными длинами волн излучения позволяло с помощью сине-зеленого фильтра, установленного перед ПЗС-матрицей, регистрировать интерференционную картину, формируемую только излучением He–Cd-лазера. Для синхронизации фазы модуляции излучений He–Ne и He–Cd-лазеров с частотой внешнего электрического поля создавалась задержка на ГНЧ.

На рис.2 представлены изображения интерференционных картин в кристалле BNN при прохождении через него излучения с  $\lambda = 633$  нм и глубиной модуляции интенсивности  $m = 0.73$  без приложения внешнего переменного электрического поля и во внешнем поле с амплитудой  $E = 6$  кВ/см. Чтобы избежать влияния изменения показателя преломления на  $\lambda = 433$  нм, обусловленного линейным электрооптическим эффектом, изображение интерференционной картины регистрировалось сразу после выключения внешнего электрического поля.

Из рис.2 следует, что при включении внешнего поля происходит неоднородное искривление интерференционных линий в области самофокусирующегося пучка, на периферии сдвиг интерференционных полос отсутствует. Максимальное смещение полос наблюдается в центре самофокусирующегося пучка и возрастает с увеличением амплитуды внешнего поля. Изменение показателя преломления в зависимости от сдвига интерференционных линий определялось из выражения  $\Delta n = h\lambda/L$ , где  $h$  – относительное смещение интерференционных полос, а  $L$  – длина кристалла в направлении распространения пучка.

Исследования изменения показателя преломления проводились при глубине модуляции интенсивности  $m = 0.73, 0.78, 0.86, 0.91$  и 1. На рис.3 приведены зависимости мак-

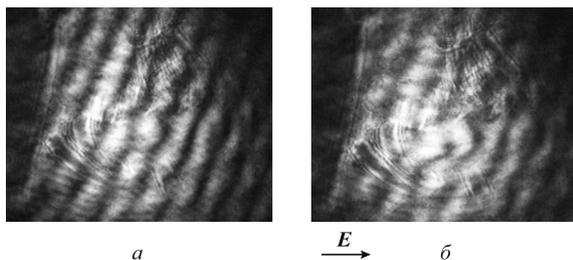


Рис.2. Изображение интерференционных картин в кристалле BNN на  $\lambda = 433$  нм при глубине модуляции интенсивности  $m = 0.73$  и амплитуде внешнего электрического поля  $E = 0$  (а) и 6 кВ/см (б).

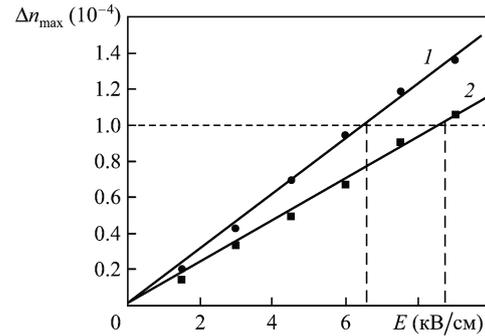


Рис.3. Зависимости максимального изменения показателя преломления от амплитуды внешнего поля при глубине модуляции интенсивности излучения  $m = 1$  (1) и 0.78 (2). Сплошные линии – линейная аппроксимация.

симального изменения показателя преломления от амплитуды внешнего поля  $E$  при  $m = 1$  и 0.78.

Из рис.3 следует, что максимальное изменение показателя преломления в процессе самофокусировки возрастает с ростом амплитуды поля  $E$  и глубины модуляции  $m$ . Как было показано в [9], солитонный режим достигается при  $E = 6.3$  кВ/см и  $m = 1$ , а также при  $E = 8.4$  кВ/см и  $m = 0.78$ . Видно, что максимальное изменение показателя преломления  $\Delta n_{\max}$  при формировании солитонного режима в обоих случаях составляет  $\sim (1 \pm 0.05) \times 10^{-4}$  и не зависит от амплитуды внешнего поля  $E$  и глубины модуляции интенсивности самофокусирующегося пучка  $m$ . В соответствии с результатами работы [7] определяющее характер изменения показателя преломления поле  $E_{sc}$  пространственного заряда в фоторефрактивном кристалле с приложенным знакопеременным электрическим полем при синхронной модуляции интенсивности излучения имеет локальную ( $E_{sc}^L \propto Em$ ) и нелокальную ( $E_{sc}^{NL} \propto L_c$ ) составляющие. В исследуемом кристалле дрейфовая длина электрона  $L_c = \mu\tau_r E$ , где  $\mu$  – подвижность носителей заряда, а  $\tau_r$  – время их рекомбинации;  $\mu\tau_r \approx 2.7 \times 10^{-13}$  м<sup>2</sup>/В [10]. В соответствии с результатами работы [9] при такой дрейфовой длине электрона нелокальная составляющая не оказывает влияния на формирование солитонного режима. Если использовать для  $E$  и  $m$  значения, при которых достигается солитонный режим в настоящей работе, то оказывается, что  $Em = (6 \pm 0.3)$  кВ/см. Поскольку  $\Delta n \propto E_{sc}$ , то соответствующее достижению солитонного режима изменение показателя преломления  $\Delta n_{sol} \propto Em$  и, следовательно, не зависит от  $E$  и  $m$ . Таким образом, полученный результат еще раз подтверждает, что в данном кристалле основную роль в формировании солитонного режима играет локальный нелинейный отклик.

Максимальное изменение показателя преломления  $\Delta n_{\max}$  при формировании солитонного режима можно оценить следующим образом. Предположим, что изменение показателя преломления имеет ступенчатый профиль (как в волноводе). Если приравнять угол дифракции луча внутри вещества и критический угол волновода, то получим  $\Delta n_{\max} = [0.61\lambda/(n_1 D)]^2 n_1 / 2$ , где  $D$  – диаметр пучка, определяемый как ширина пучка по уровню  $1/e$  от интенсивности в максимуме, а  $n_1$  – показатель преломления кристалла BNN на  $\lambda = 633$  нм. Подставляя  $D = 21$  мкм и  $n_1 = 2.2$ , получаем  $\Delta n_{\max} = 0.77 \times 10^{-4}$ . Найденные оценочные значения находятся в хорошем соответствии с экспериментальными результатами.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально определено изменение показателя преломления в кристалле при различных амплитудах внешнего поля  $E$  и глубинах модуляции интенсивности самофокусирующегося пучка  $m$ . Показано, что изменение показателя преломления в фоторефрактивном кристалле с малым нелокальным откликом при достижении солитонного режима одинаково при любых амплитудах внешнего поля и глубинах модуляции интенсивности излучения.

1. Garcia-Quirino G., Iturbe-Castillo M., Vysloukh V., Sanchez-Mondragon J., Stepanov S., Lugo-Martinez G., Torres-Cisneros G. *Opt. Lett.*, **22**, 154 (1997).
2. Segev M., Crosignani B., Yariv A., Fischer B. *Phys. Rev.*, **68**, 923 (1992).
3. Shin M., Leach P., Segev M., Garrett M., Salamo G., Valley G. *Opt. Lett.*, **21**, 324 (1996).
4. Sheu F., Shih M. *J. Opt. A.: Pure Appl. Opt.*, **9**, 271 (2007).
5. Зельдович Б.Я., Катаевский Н.Г., Кундикова Н.Д., Наумова И.И. *Квантовая электроника*, **22**, 1116 (1995).
6. Аникеев В.В., Большаков М.В., Кундикова Н.Д., Лобачев А.В., Наумова И.И. *Труды конф. «Фундаментальные проблемы оптики»* (С.-Петербург, 2000, с. 130).
7. Фролова М.Н., Шандаров С.М., Бородин М.В. *Квантовая электроника*, **32**, 45 (2002).
8. Ассельборн С.А., Кундикова Н.Д., Новиков И.В. *Письма в ЖТФ*, **34**, 50 (2008).
9. Ассельборн С.А., Кундикова Н.Д., Новиков И.В. *Квантовая электроника*, **38**, 859 (2008).
10. Гольцер И.В., Зельдович Б.Я., Кундикова Н.Д., Наумова И.И. *Квантовая электроника*, **20**, 817 (1993).