

СОЛИТОНОПОДОБНЫЕ СТРУКТУРЫ В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$

© 2004 г. Е. А. Письменная***; В. Матусевич**, А. Кислинг**, Р. Коваршик**

* Белорусский государственный университет, Минск, Белоруссия

** Институт прикладной оптики Университета Фридриха Шиллера, г. Йена, Германия
E-mail: pismenna@tut.by, oik@rz.uni-jena.de

Экспериментально исследовано временное развитие процессов самофокусировки и образования экранирующего солитона в оптически активном фоторефрактивном кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (ВТО) двух типов сечения в зависимости от подаваемого на кристалл напряжения и присутствия дополнительного фонового освещения. Показана возможность получения стабильного солитона в кристалле ВТО сечения $[11\bar{1}][112][\bar{1}10]$.

Коды OCIS: 270.5530.

Поступила в редакцию 23.12.2003.

Фоторефрактивные пространственные солитоны впервые были предсказаны в 1992 г. [1], и их активное изучение как теоретическое, так и экспериментальное, продолжается до сих пор [2–5]. Такой интерес объясняется возможностью образования солитонов за счет фоторефрактивного эффекта уже при интенсивностях лазерного пучка порядка десятков или сотен милливатт на квадратный сантиметр, тогда как для получения солитонов керровского типа необходимы интенсивности света порядка мегаватт на квадратный сантиметр.

Пространственные солитоны образуются, когда эффект самофокусировки, обусловленный нелинейным изменением показателя преломления среды, в точности компенсирует дифракционную расходимость пучка. На сегодняшний момент теоретически и экспериментально показано существование фоторефрактивных солитонов различного типа: квазистационарные (одно- и двумерные светлые, темные, вихревые), стационарные (так называемые “скрининг” или экранирующие, одно- и двумерные), фотовольтаические (существуют в кристаллах, обладающих сильным фотовольтаическим эффектом, например, в ниобате лития), векторные [6]. Наконец, в недавних публикациях предсказано существование в фоторефрактивных диссипативных системах светлых и темных голографических солитонов [4, 5], имеющих фиксированную ширину и амплитуду, которые полностью определяются параметрами системы.

Были продемонстрированы возможности использования солитонов для оптического переключения [7] и создания волноводных структур [2, 6], способных проводить свет, превосходящий по интенсивности солитонобразующий луч.

Интересными фоторефрактивными материалами являются оптически активные среды. Присутствие оптической активности значительно усложняет рассмотрение процессов распространения излучения

[8, 9]. Показано, что в кристаллах, сильно вращающих плоскость поляризации света ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$), невозможно получить стабильный экранирующий солитон [9], а с кристаллами ВТО можно работать, используя малые интенсивности света и высокие напряжения, правильно выбирая геометрию эксперимента [9]. В этом случае возможно получение солитона, близкого к стационарному.

Теоретический анализ и эксперименты с $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ [10] показали, что явление самофокусировки проявляется более ярко при внешнем поле, параллельном кристаллографическому направлению $[1\bar{1}\bar{1}]$, чем при поле, направленном вдоль направлений $[1\bar{1}0]$ и $[00\bar{1}]$, которые являются традиционными.

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению временного развития солитоноподобных структур в фоторефрактивных кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ двух разрезов – $[11\bar{1}][112][\bar{1}10]$ и $[001][1\bar{1}0][110]$ – в зависимости от подаваемого на кристалл напряжения и присутствия дополнительного фонового освещения.

1. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Источником излучения, формирующего солитон, служил He-Ne-лазер (633 нм). Поляризация лазерного излучения контролировалась с помощью поляризатора P и пластинки $\lambda/2$, его интенсивность изменялась системой фильтров F .

При необходимости изменения фонового освещения в качестве источника однородного немонахроматического некогерентного излучения использовалась галогеновая лампа. Дополнительное освещение попадало на кристалл параллельно лазерному лучу, для чего использовалась призма PP . Фокусы линз L_1 и L_2 совмещены для того, чтобы после второй линзы выходил параллельный пучок света.

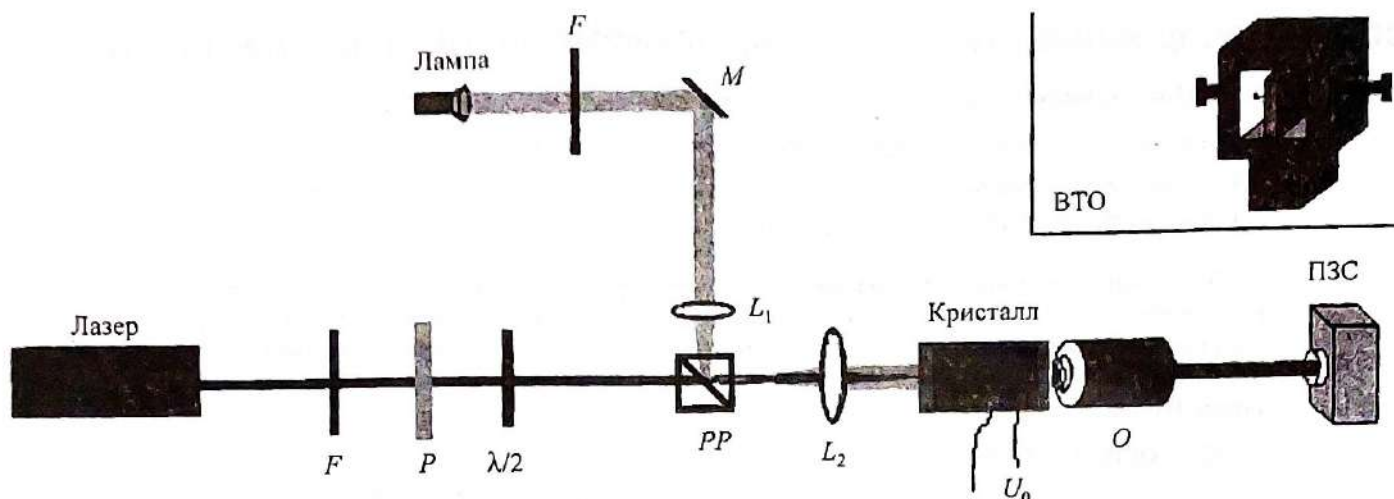


Рис. 1. Экспериментальная установка. В правом верхнем углу показан общий вид кристалла (примечания в тексте).

Лазерный луч фокусировался на переднюю грань кристалла второй линзой ($F = 60$ мм) таким образом, чтобы перетяжка луча находилась перед кристаллом на расстоянии 1 мм. Значения входного диаметра пучка составляли 40–50 мкм в различных опытах.

Интенсивность лазера измерялась микропроцессорным детектором для лазерного излучения “Ophir Laserstar”, который позволяет работать в широком диапазоне значений интенсивностей (0,05 нВт – 30 мВт) и автоматически учитывает зависимость аппаратной функции от длины волны. Фоновое освещение в лаборатории при проведении работ не превышало 2 нВт.

Для получения изображения с задней грани кристалла использовался объектив микроскопа со стандартным увеличением $20\times$. Перед проведением основных экспериментов была проведена градуировка, показавшая, что реальное получаемое увеличение составляет $17\times$.

Увеличенное изображение после приемного объектива попадало на вход ПЗС-камеры. Изображение, полученное камерой, численно анализировалось на компьютере с использованием программы “Laser Beam Analyzer” (Model LBA-400PC Spiricon Inc.). В теоретическом описании фоторефрактивных солитонов значение имеет только отношение интенсивностей $r = I_{\max}/I_d$ (отношение максимальной интенсивности солитона к сумме фоновой и темновой засветки), что дает возможность работать с относительными единицами интенсивностей, с которыми работает и камера. При минимальном освещении камерой регистрировалась интенсивность в 25 отн. ед., которая принималась за начало отсчета. Все экспериментальные значения интенсивностей, полученные с помощью ПЗС-камеры, приведены также в относительных единицах и без учета начального значения (абсолютные показания прибора). При численных расчетах необходимо принимать во внимание поправку $\Delta I = -25$ отн. ед.

Работа проводилась с двумя различными типами разрезов ВТО кристалла. Кристалл первого типа – это ВТО разреза $([001][\bar{1}\bar{1}0][110])$ с размером $1\times 6\times 20$ мм, разрез второго типа $([1\bar{1}\bar{1}][112][\bar{1}10])$ – $0,89\times 5,46\times 21,24$ мм. При этом солитон распространялся вдоль самой длинной стороны кристалла, а внешнее поле прилагалось вдоль кристаллографических осей $[001]$ и $[11\bar{1}]$ соответственно.

2. Экспериментальные результаты и обсуждение

2.1. Фокусировка пучка

Было изучено развитие профиля солитона во времени (рис. 2) в кристалле ВТО первого типа. Видно, что в направлении X (вдоль внешнего поля) фокусировка намного сильнее, тогда как в Y -сечении (перпендикулярно внешнему полю) пучок остается довольно широким. Это свидетельствует о том, что мы имеем дело с $(1+1)D$ -солитоном. Из рис. 2а видно, что фокусировка начинается для широкой части пучка и вследствие этого процесса на периферии распределения интенсивность начинает падать и остается только узкий пик в середине.

2.2. Влияние величины внешнего напряжения на развитие солитона

Нами были выполнены 2 серии экспериментов с кристаллом первого типа для двух различных интенсивностей лазера 1,2 и 3 мВт/см². Измерялся временной интервал от начала эксперимента (запуска луча) до достижения максимальной интенсивности солитона в зависимости от величины приложенного внешнего электрического поля (см. рис. 3а; параметры системы: интенсивность фона 2 нВт/см², поляризация входного пучка параллельно полю; погреш-

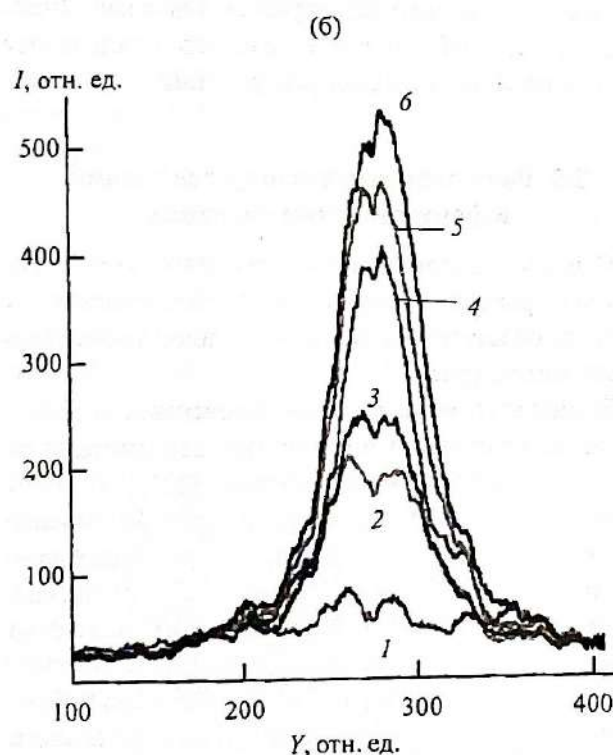
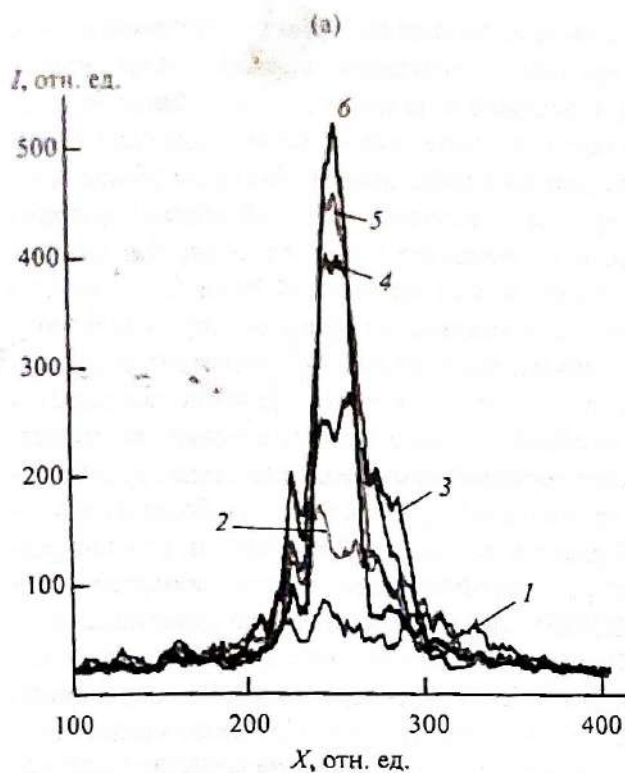


Рис. 2. Изменение профилей солитона во времени. Рост: 1 – 0, 2 – 2, 3 – 3, 4 – 6, 5 – 9, 6 – 11 мин. Отн. единица по оси абсцисс соответствует 0,76 мкм.

ность определения времени составляет 0,5 мин; при напряжениях, меньших чем 2500 В, солитон не образуется). Таким образом, видно, что очень большое напряжение угнетает достижение максимума и вообще процесс фокусировки в целом, причем зависимость между временем до максимума и напряжением практически линейная.

При малом напряжении солитон формируется быстрее, однако, с другой стороны, при очень малых

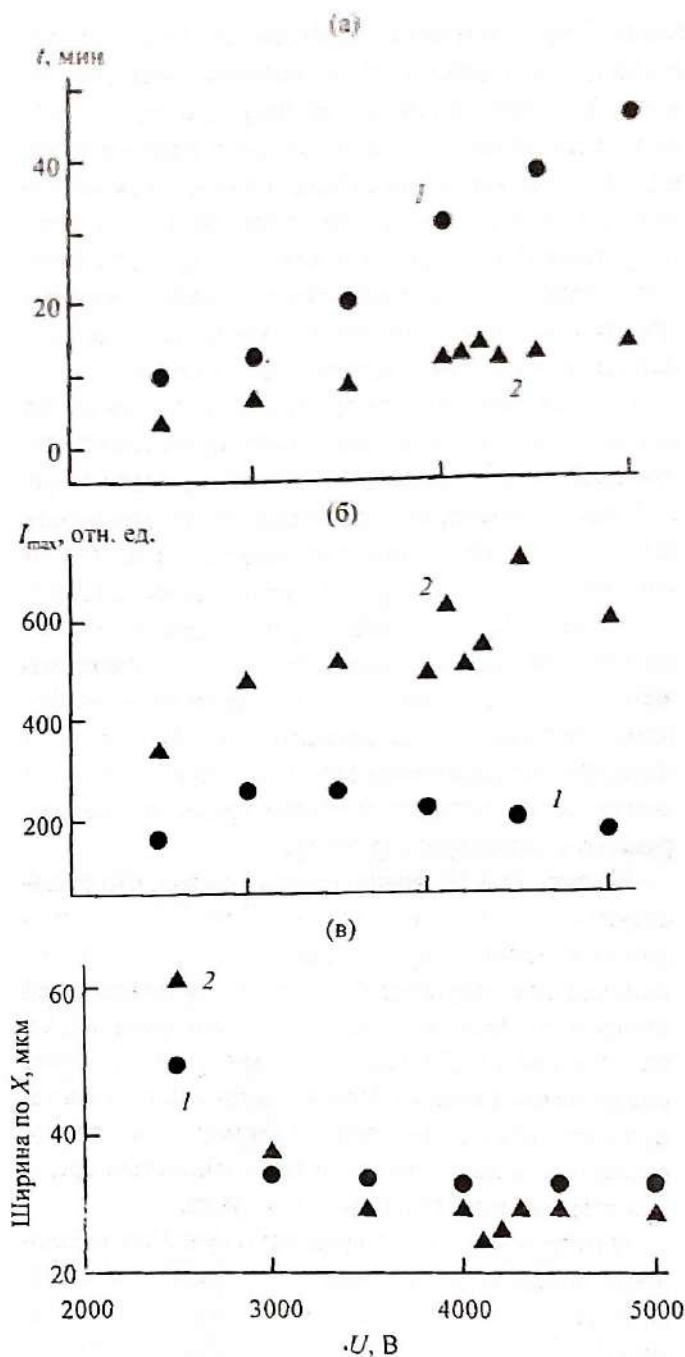


Рис. 3. Зависимости параметров солитона от приложенного напряжения для различных входных интенсивностей. а – время достижения максимальной интенсивности выходящего из кристалла света. б – достигаемая максимальная интенсивность выходящего из кристалла света. в – ширина выходящего из кристалла пучка в момент максимальной фокусировки. 1 = 1,2 (1), 3 мВт/см² (2).

напряжениях солитон вообще не формируется, а только наблюдается незначительная подфокусировка пучка. Явление угнетения процесса формирования солитона высоким напряжением становится понятным, если учесть, что мы имеем дело с экранирующим солитоном, для образования которого внешнее поле должно быть значительно уменьшено в области солитонного канала. Ясно, что для экранировки более высокого поля необходимо большее количество сво-

бодных зарядов и большее время их перераспределения при одинаковой интенсивности света. Наклон к оси X зависимостей на рис. 3а различен для разных интенсивностей света. Влияние поля на луч с малой интенсивностью гораздо сильнее, чем на интенсивный пучок света, что может объясняться количеством создающихся в единицу времени зарядов — менее интенсивный луч возбуждает меньше электронов, соответственно медленнее идет процесс фокусировки и экранирования внешнего поля.

Следует заметить, что получающиеся в результате самофокусировки солитоны также могут очень различаться по интенсивности. Поэтому мы рассмотрели такой параметр, как максимальная интенсивность солитона при различных напряжениях (рис. 3б), от которого зависит важный теоретический параметр солитона $r = I_{\max}/I_d$. Можно предположить, что вид зависимостей для различных интенсивностей света должен быть одинаковым, но для проверки этого необходимо приложить поле, большее чем 5000 В/мм. Однако при использовании высоких напряжений резко возрастает вероятность пробоев в среде, которые разрушают солитонную структуру.

Из рис. 3а и 3б можно сделать вывод, что существует некоторая оптимальная область параметров для получения солитона. Дальнейшее повышение напряжения нарушает баланс между дифракцией пучка и его фокусировкой вследствие нелинейных свойств среды. Другими словами, у нас не будет солитона как такового. При недостаточном напряжении самофокусировка также будет отсутствовать, что объясняется недостаточной нелинейностью среды для компенсации расходимости пучка.

В области больших напряжений случайная погрешность определения времени и максимальной интенсивности значительно увеличивается (в районе напряжений до 4000 В для времени ошибка составляет 0,5 мин) и ростом погрешности можно объяснить разброс точек в области 4000–5000 В (рис. 3б) для более интенсивного пучка.

Одним из важных параметров сфокусированного пучка является его ширина. В результате исследования ширины солитона при различных напряжениях (рис. 3в) установлено, что диаметр солитона практически не зависит от приложенного напряжения в случае, если последнее больше некоторого порога (в нашем случае около 3500 В). Можно сказать, что фокусировка более интенсивного луча более сильная, но пороговое напряжение для получения солитона больше. (Размеры солитона указаны для $I = I_{\max}/e^2$.)

Независимость от напряжения может рассматриваться как одно из доказательств того, что мы наблюдали действительно солитон, а не просто процесс самофокусировки, поскольку экранирующий

солитон значительно ослабляет электрическое поле внутри себя по сравнению с ближайшими регионами [11], и внешнее поле имеет слабое влияние на солитон после его образования. Однако для формирования солитона необходимо, чтобы среда обладала некоторой достаточной нелинейностью (которая зависит от внешнего поля), что объясняет наличие некоторого порога напряжений. Различие порога для разных интенсивностей пучка может, по-видимому, быть объяснено, если учесть, что при распространении луча в среде некоторая его часть рассеивается на неоднородностях и этот рассеянный свет является составляющей фоновое освещение, причем более интенсивный луч будет иметь и более интенсивный рассеянный фон, таким образом, условия распространения этих пучков (с интенсивностями 1, 2 и 3 мВт/см²) оказываются не вполне одинаковыми.

Интересно сравнить между собой поведение ширины пучка и интенсивности при напряжениях выше 3500 В (рис. 3в и 3б). При практически неизменной ширине пучка значения максимальной интенсивности заметно варьируются. Такое несоответствие изменений говорит о том, что пучок теряет гауссов профиль при распространении.

2.3. Роль дополнительного освещения в формировании солитона

С целью экспериментального изучения роли подсветки в процессе самофокусировки лазерного пучка фоновое освещение изменялось с помощью галогеновой лампы (рис. 1).

Зависимость максимальной интенсивности сфокусированного пучка от времени при дополнительном освещении для кристалла сечения ([001] [110] [110]) показана на рис. 4а (параметры системы: напряжение на кристалле 4500 В, интенсивность входящего пучка 3 мВт/см², интенсивность подсветки $I_d = 80$ отн. ед.).

Видно, что в случае дополнительной подсветки кристалла процесс формирования солитона становится периодическим. После распада солитона наблюдается новая фокусировка. Для более детального описания явления была проведена серия регистраций максимальной интенсивности выходящего пучка через интервал времени в 5 с (рис. 4б) в том же опыте, результаты которого представлены на рис. 4а. Можно заметить, что формирование и распад солитона носят вполне законченный характер (есть последовательно монотонные стадии образования и разрушения). Однако перед самым началом очередной самофокусировки интенсивность выходящего пучка резко падает, после чего идет формирование солитона. Такое сильное уменьшение интенсивности выходящего света может быть связано с некоторым электрическим процессом (пробоем) в среде, вследствие

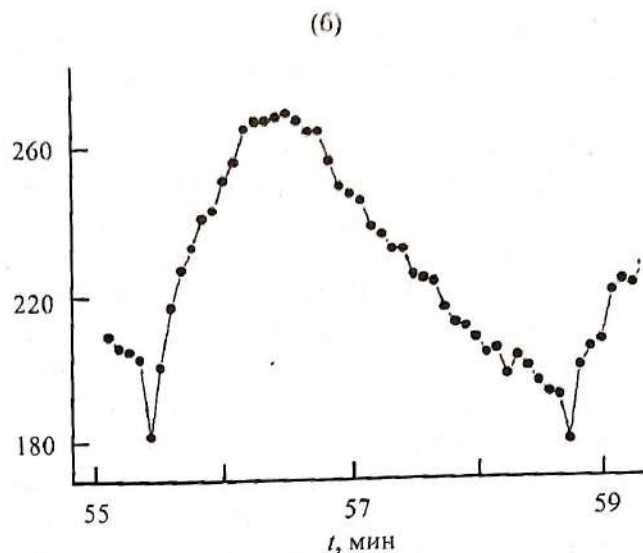
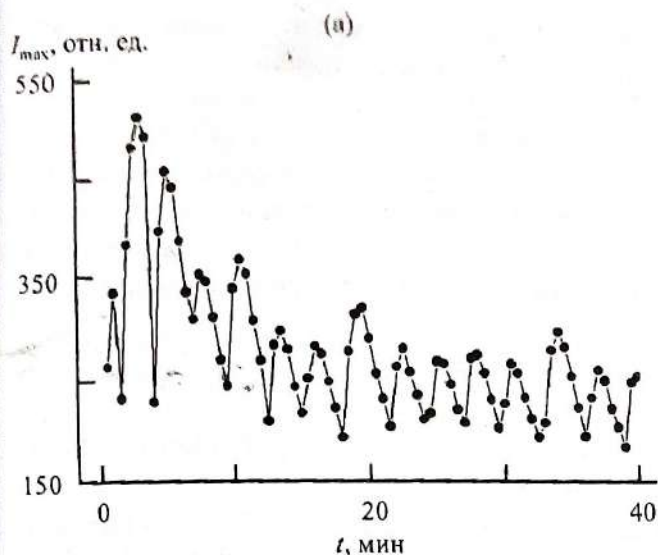


Рис. 4. Изменение максимальной интенсивности выходящего из кристалла света во времени. Основной опыт (а). Один цикл формирования и распада солитона, продолжение опыта (б). Кристалл первого типа.

которого резко разрушается часть сформированной в среде структуры (солитонного канала или, в данном случае, структуры, сформированной после распада солитона) и, соответственно, свет становится сильно рассеянным, что приводит к падению интенсивности. В случае с добавочным освещением, вероятно, происходит не только разрушение имеющейся структуры, но и частичное стирание последствий разрушения и распада солитона, что возвращает среду в состояние, близкое к первоначальному, когда становится возможной новая фокусировка. Однако, так как равномерность зарядов в среде восстанавливается только частично, последующие солитоны менее интенсивны (рис. 4а).

Косвенно связь начала формирования солитона с некоторым электрическим пробоем может быть подтверждена фактом, что частота таких пробоев выше при большем напряжении, а при постоянном напряжении выше при более интенсивной подсветке, так как электрический процесс должен напрямую зависеть от количества свободных зарядов, сформированных фоновым освещением, и от внешнего напряжения. И такие факты действительно были обнаружены экспериментально.

Стоит также отметить, что в присутствии дополнительного освещения формирование солитона происходит быстрее, что вызвано, по-видимому, большим количеством свободных зарядов, образующихся

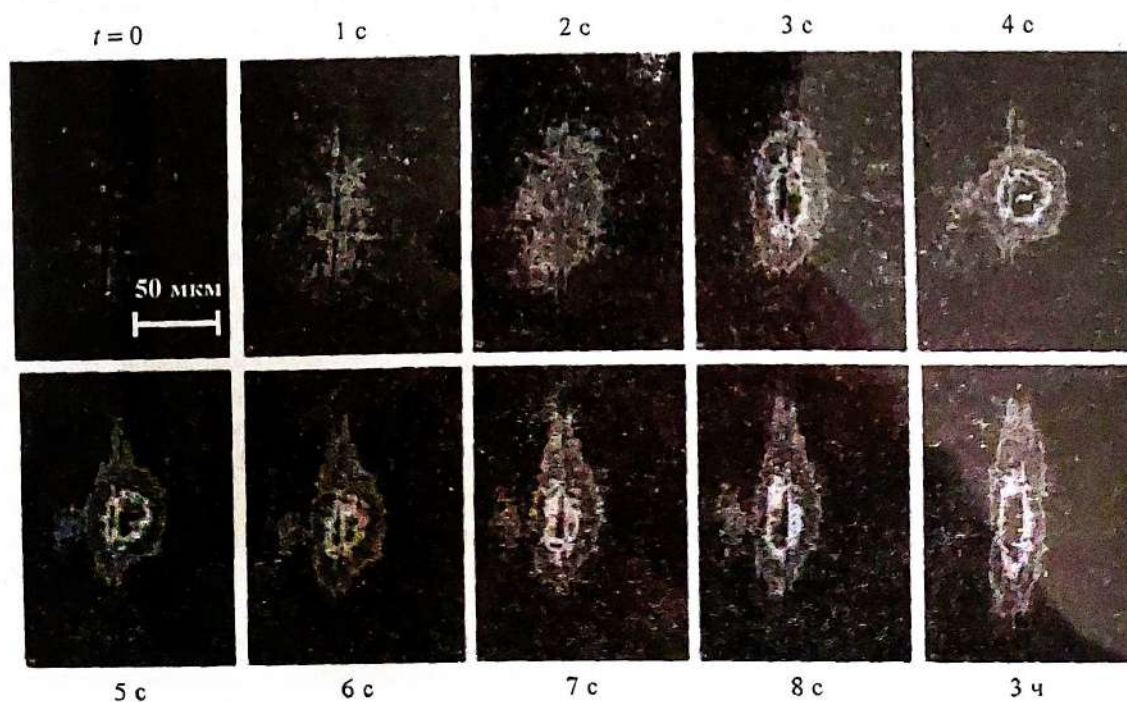


Рис. 5. Процесс формирования солитона в присутствии дополнительного освещения на ранних этапах развития и заключительный кадр опыта. Кристалл второго типа.

в единицу времени, соответственно их перераспределение и оформление канала происходит с большей скоростью.

Также были проведены исследования с кристаллом, который имеет сечение $([11\bar{1}][112][\bar{1}10])$. Для данного кристалла в присутствии дополнительного освещения наблюдалась стабильная солитонная структура в течение 3 ч. При этом напряжение на кристалле $U = 2600$ В ($E = 2920$ В/мм), интенсивность дополнительного освещения $I_d = 195$ отн. ед., интенсивность лазерного луча $I_{\text{лаз}} = 24$ мВт/см². Входящий пучок имел горизонтальную поляризацию.

Процесс формирования солитона на ранних этапах и заключительный кадр опыта представлены на рис. 5. Солитон имел эллиптическую форму с размерами $d_x = 42$ мкм, $d_y = 166$ мкм – одномерный солитон. Параметр r в ходе опыта имел значение порядка 5,9–6,0.

Таким образом, дополнительное некогерентное освещение может оказывать стабилизирующую роль на солитон, вероятно, стирая возможные наведенные фоторефрактивные решетки, образующиеся при рассеянии лазерного излучения на дефектах кристалла.

3. Выводы

В данной работе экспериментально исследовано влияние величины приложенного напряжения и присутствия дополнительного освещения на образование солитона, рассмотрено временное поведение солитонообразных структур, предложены условия получения стабильного солитона. В частности, исследовано время формирования солитона для различных значений внешнего поля и различных интенсивностей входного пучка. Установлено, что при увеличении приложенного напряжения к кристаллу в случае отсутствия дополнительного освещения время фокусировки возрастает. Для малых интенсивностей пучка эта зависимость проявляется гораздо сильнее.

Получены зависимости изменения максимальной интенсивности солитона со временем от напряжения на кристалле в случае дополнительного фонового освещения. Показано, что в присутствии добавочной подсветки процессы формирования и разрушения солитонной структуры могут чередо-

ваться. Допущена возможность влияния эффектов электрической природы (пробой).

Показана возможность получения стабильного солитона в кристалле с разрезом типа $([11\bar{1}][112][\bar{1}10])$.

Письменная Е.А. выражает благодарность Министерству образования Тюрингии за предоставленную возможность выполнения научной работы в Йенском университете им. Фридриха Шиллера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Segev M., Crosignani B., Yariv A., Fischer B. Spatial solitons in photorefractive media // *Phys. Rev. Lett.* 1992. V. 68. № 7. P. 923–926.
2. Petter J., Denz C. Guiding and dividing waves with photorefractive solitons // *Opt. Commun.* 2001. V. 188. P. 55–61.
3. Petter J., Schröder J., Träger D., Denz C. Optical control of arrays of photorefractive screening solitons // *Opt. Lett.* 2003 V. 28. № 6. P. 438–440.
4. Cohen O., Carmon T., Segev M., Odoulov S. Holographic solitons // *Opt. Lett.* 2002. V. 27. № 22. P. 2031–2033.
5. Liu J. Holographic solitons in photorefractive dissipative systems // *Opt. Lett.* 2003. V. 28. № 22. P. 2237–2239.
6. Morin M., Duree G., Salamo G., Segev M. Waveguides formed by quasi-steady-state photorefractive spatial solitons // *Opt. Lett.* 1995. V. 20. № 20. P. 2066–2069.
7. Iturbe Castillo M.D., Marquez Aguilar A.P., Sanchez-Mondragon J.J., Stepanov S., Vyslouch V. Spatial solitons in photorefractive $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ with drift mechanism of nonlinearity // *Appl. Phys. Lett.* 1994. V. 64. № 4. P. 408–410.
8. Sing S.R., Christodoulides D.N. Effect of optical activity on photorefractive spatial solitons in a biased $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ crystal // *JOSA. B.* 1996. V. 13. № 4. P. 719–724.
9. Krolkowski W., Akhmediev N., Andersen D.R., Luther-Davies B. Effect of natural optical activity on the propagation of photorefractive solitons // *Opt. Commun.* 1996. V. 132. P. 179–189.
10. Шепелевич В.В., Коваршик Р., Кисслинг А., Матусевич В., Голуб А.А. Влияние оптической активности на самофокусировку световых пучков в кубических фоторефрактивных кристаллах // *Квант. электрон.* 2003. Т. 33. № 5. С. 446–450.
11. Segev M., Vallez G.C., Crosignani B., DiPorto P., Yariv A. Steady-state spatial screening solitons in photorefractive materials with external applied field // *Phys. Rev. Lett.* 1994. V. 73. № 24. P. 3211–3214.