

Е. А. Мельникова, Ю. И. Миксюк, А. Л. Толстик, О. Г. Вишневская
ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ СОЛИТОНЫ В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ
КРИСТАЛЛАХ $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$

Проблема пространственной локализации световых полей в нелинейной среде (пространственных солитонов) привлекает постоянно растущий интерес исследователей, открывая новые возможности управления параметрами лазерного излучения и формирования оптических волноводных структур с заданными свойствами. Пространственные солитоны представляют собой устойчивые самоканализирующиеся световые пучки в среде с самофокусирующей нелинейностью показателя преломления, для которых дифракционное расширение пучка компенсируется его нелинейным сжатием [1, 2]. Использование фоторефрактивных материалов позволило получать солитоны при субмикроваттной мощности светового потока [3, 4], проводить эксперименты по взаимодействию солитонов в объемной среде [5, 6], осуществлять ввод / вывод света из многомодового в одномодовое волокно [7] и др. Созданные при распространении солитонов в фоторефрактивных кристаллах волноводы перспективны для применения в перестраиваемых направленных ответвителях, светоделителях [8], устройствах переключения волноводов, что расширяет возможности оптической обработки и передачи информации [9].

В представленной работе экспериментально установлены пороговые значения напряженности электрического поля и предельные значения мощности светового пучка, определяющие условия наблюдения стабильных пространственных солитонов, а так же исследована динамика пространственного распределения интенсивности на выходе кристалла в зависимости от мощности пучка и приложенного электрического напряжения.

Использовались фоторефрактивные кристаллы $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (ВТО) и $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO), относящиеся к группе симметрии 23 кубической сингонии, характеризующиеся линейным электрооптическим эффектом. Кристаллы этого класса в отсутствие внешнего электрического поля являются оптически изотропными и обладают высоким электрооптическим коэффициентом ($r_{41}=r_{52}=r_{63} \sim 5 \cdot 10^{-10}$ см·В⁻¹). Кристаллы характеризуются хорошей светочувствительностью и высокой подвижностью носителей заряда, что позволяет достигать малых времен нелинейного отклика при низких интенсивностях лазерного излучения и делает их привлекательными для различных применений в качестве сред для голографической записи информации с возможностью перезаписи, а также сред для формирования пространственных солитонов и оптических волноводов.

Фоторефрактивные эффекты в кристаллах силленитов связаны с формированием в них поля пространственного заряда под воздействием неоднородного освещения и с модуляцией этим полем показателя преломления среды вследствие линейного электрооптического эффекта. Значительная светочувствительность в видимой области спектра позволила создать в данных средах низкоинтенсивные пространственные солитоны с использованием нановатного излучения гелий-неонового лазера. В то же время, кристаллы силленитов обладают заметной оптической активностью (22 град/мм – для силиката висмута и 6 град/мм – для титаната висмута), что усложняет процесс формирования пространственных солитонов.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В качестве источника излучения использовался гелий-неоновый лазер 1, работающий в непрерывном режиме генерации на длине волны 632,8 нм. Интенсивность и поляризация лазерного излучения регулировались с помощью системы светофильтров 2 и двух вращающихся поляризаторов 3. Для создания пространственных солитонов лазерный пучок фокусировался линзой 4 с фокусным расстоянием $f = 32$ мм вблизи входной грани кристалла 5. С помощью объектива 6 с фокусным расстоянием $f_0 = 35$ мм изображение пучка на задней грани кристалла переносилось на ПЗС матрицу 7 (разрешение 8 мкм/пиксель).

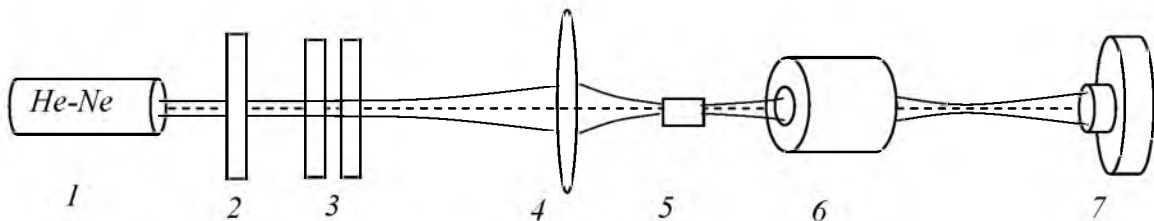


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – гелий-неоновый лазер; 2 – светофильтр, 3 – поляризаторы, 4 – линза, 5 – фоторефрактивный кристалл, 6 – объектив, 7 – камера

Для регистрации пространственных солитонов использовалась методика, на основе которой в приближении гауссовых световых пучков анализировалось положение перетяжки в объеме кристалла. При образовании солитона сфокусированный лазерный пучок распространяется внутри кристалла не дифрагируя, вследствие чего перетяжка, образованная внутри кристалла, переносится на заднюю грань кристалла.

В работе использовался фоторефрактивный кристалл ВТО с размерами $1,8 \times 4,75 \times 8,83$ мм. Световой пучок распространялся вдоль большой грани кристалла (кристаллографическая ось $[1,1,0]$). Перпендикулярно

кристаллографической оси $[1,1,0]$ в направлении $[1,\bar{1},1]$ было приложено внешнее постоянное электрическое поле. При этом поляризация светового пучка совпадала с направлением электрического поля.

Типичная картина пространственного распределения интенсивности лазерного пучка на передней и задней гранях фоторефрактивного кристалла при различных условиях эксперимента представлена на рис.2. Лазерный пучок, сфокусированный в кристалл (*a*), по мере прохождения по нелинейной среде уширяется вследствие дифракции (*б*). При включении внешнего электрического поля лазерный пучок начинает заметно сжиматься в направлении поля, интенсивность его резко возрастает и формируется пространственный солитон (*в*). После достижения минимального размера ширина пучка некоторое время остается постоянной, затем пучок начинает расширяться и солитонная структура разрушается (*г*).

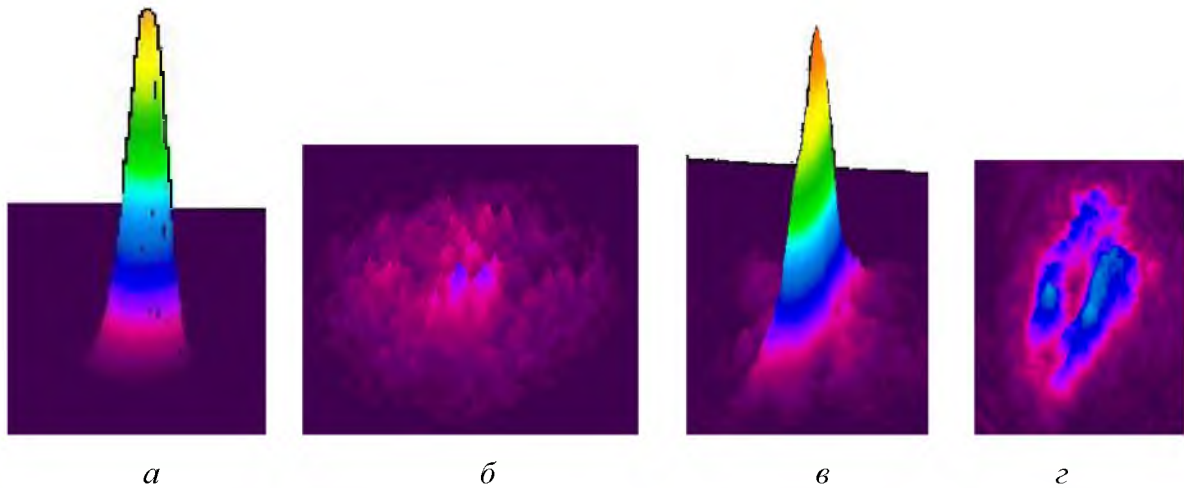


Рис. 2. Распределение интенсивности на передней (*a*) и задней (*б – г*) гранях фоторефрактивного кристалла при напряжении 0 кВ (*б*) и 4 кВ (*в, г*) в момент формирования пространственного солитона (*в*) и его распада (*г*)

Экспериментально установлено, что наблюдаемый эффект самофокусировки существенно зависит от величины приложенного к кристаллу внешнего электрического поля и интенсивности светового пучка. На рис. 3 представлены зависимости динамики изменения поперечного размера светового пучка на выходе кристалла при различных значениях приложенного к кристаллу напряжения и фиксированной мощности лазерного пучка $P = 30$ нВт. Видно, что при увеличении напряженности электрического поля эффект самофокусировки проявляется сильнее, причем увеличивается и время стабильности солитонной структуры. Так, например, если при напряжении 1 кВ структура оставалась стабильной

всего полторы минуты, то при напряжении 2 кВ – уже 5 минут, а при напряжении 2,5 кВ, соответствующему напряженности электрического поля в кристалле $14 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}$, пространственный солитон сохранялся в течение десятка минут.

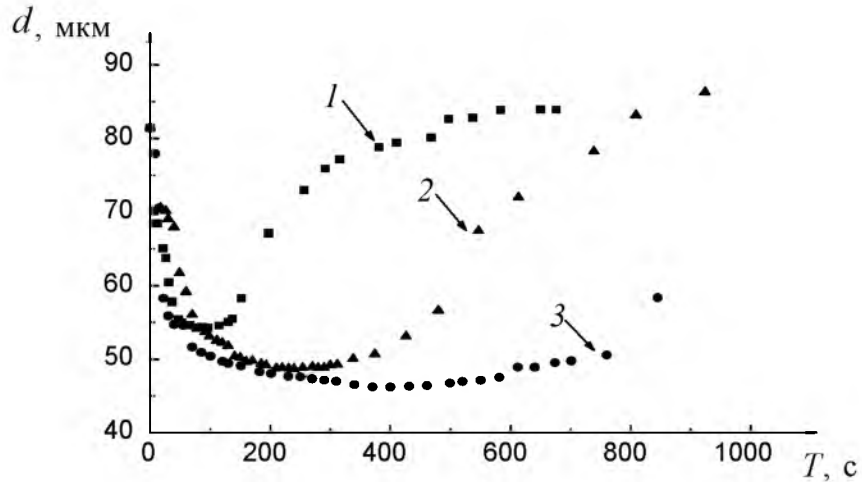


Рис. 3. Зависимости полуширины лазерного пучка на выходе из кристалла от времени при внешнем напряжении $U = 1$ (1), 2 (2), 2,5 кВ (3) и мощности пучка 30 нВт

Кроме того, как видно из рис. 3, увеличение электрического напряжения приводит к увеличению времени установления солитонной структуры. Такую закономерность можно объяснить с позиции формирования экранирующего солитона, для образования которого внешнее электрическое поле должно быть значительно уменьшено в области солитонного канала. Для экранировки более высокого поля необходимо большее количество свободных зарядов и, следовательно, большее время их перераспределения.

Зависимость минимального размера лазерного пучка па выходе из кристалла от приложенного к кристаллу напряжения представлена на рис. 4. Данные свидетельствуют о существовании критического минимального значения напряжения, необходимого для наблюдения солитонной структуры. Видно, что увеличение приложенного к кристаллу напряжения до 1 кВ приводит к резкому уменьшению размера пучка на выходе кристалла от 80 до 50 мкм, затем при увеличении напряжения до 3 кВ минимальный размер пучка уменьшается до 40 мкм, после чего остается практически неизменным. Таким образом, о формировании солитонной структуры можно говорить при внешних напряжениях, превы-

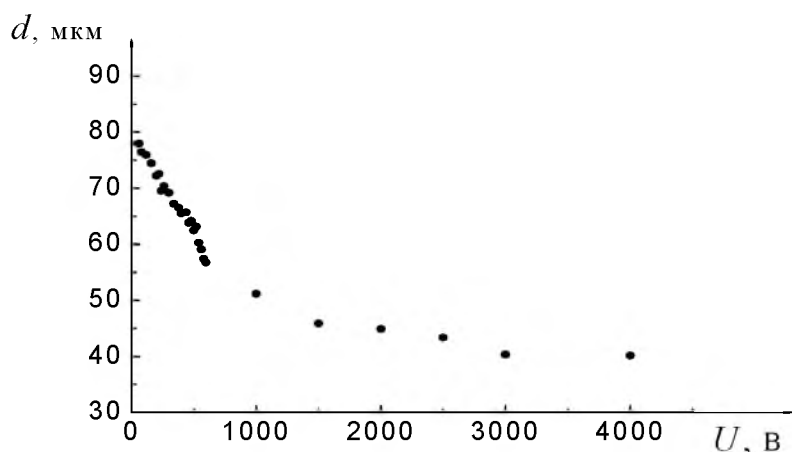


Рис. 4. Зависимости минимального размера лазерного пучка на задней грани кристалла от напряжения при мощности светового пучка $P = 30$ нВт

шающих определенное пороговое значение, порядка 1 кВ, которое отвечает напряженности электрического поля ~ 5 кВ·см⁻¹.

Заметим также, что на формирование пространственных солитонов существенное влияние оказывает мощность светового пучка. При увеличении мощности лазерного излучения время образования солитона и время его стабильной фазы существенно уменьшаются. Как видно из рис. 3 и рис. 5, эффективное формирование солитонов наблюдается при весьма небольших мощностях лазерного излучения, порядка десятков и сотен нановатт. При более высокой мощности, порядка мкВт, время стабильности солитонной структуры составляет всего десяток секунд, а при мощности, превышающей 10 мкВт, эффект самофокусировки сменяется

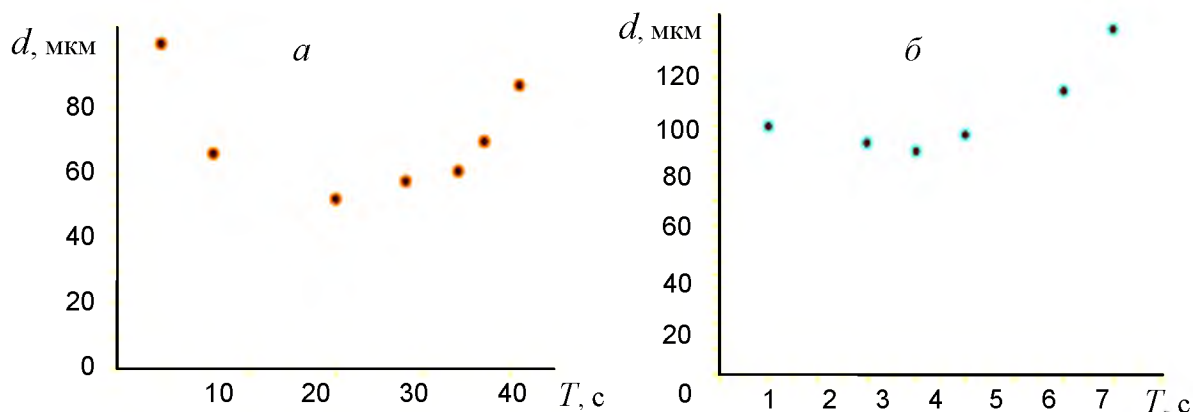


Рис. 5. Зависимости полуширины лазерного пучка на выходе кристалла от времени при напряжении $U = 2,5$ кВ и мощности $P = 1$ (а) и 10 мкВт (б)

дефокусировкой. Разрушение солитонной структуры пучка при увеличении мощности лазерного излучения можно объяснить включением тепловых эффектов, связанных с нагревом кристалла.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили определить условия существования низкоинтенсивных фото-рефрактивных солитонов в кристаллах семейства силленитов. Показано, что формирование пространственных солитонов имеет место при значениях напряженности внешнего электрического поля, превышающих $5 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}$, при этом солитонные структуры наблюдаются в диапазоне мощности лазерного излучения от 10 нВт до 1 мкВт. При более высоких значениях мощности эффект самофокусировки сменялся тепловой дефокусировкой. Установлены зависимости времени формирования пространственного солитона и его стабильной фазы от величины приложенного электрического поля и мощности светового пучка. Показано, что время стабильности солитонной структуры возрастает при увеличении приложенного к кристаллу напряжения и монотонно уменьшается при увеличении мощности лазерного излучения.

Литература

1. *Ахманов С. А., Сухоруков А. П., Хохлов Р. В.* Самофокусировка и дифракция света в нелинейной среде // УФН. 1967. Т. 93, № 1. С. 19–70.
2. *Segev M., Crosignani B., Yariv A., Fischer B.* Spatial solitons in photorefractive media // Phys. Rev. Lett. 1992. Vol. 68, № 7. P. 923–926.
3. *Kip D.* Photorefractive waveguides in oxide crystals: fabrication, properties, and applications // Appl. Phys. B. 1998. Vol. 67. P. 131–150.
4. *Agishev I. N., Pismennaya K. A., Kiessling A., Tolstik A. L.* Multiwave mixing and soliton-like structures in photorefractive crystals // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2004. V. 7, № 3. P. 291–297.
5. *Krolikowski W., Saffman M., Luther-Davies B., Denz C.* Anomalous interaction of spatial solitons in photorefractive media // Phys. Rev. Lett. 1998. Vol. 80, № 15. P. 3240–3243.
6. *Шепелевич В. В., Голуб А. А., Коваршик Р. и др.* Взаимодействие экранирующих солитонов в кубических оптически активных фоторефрактивных кристаллах // Квантовая электроника. 2005. Т. 35, № 3. С. 351–355.
7. *Chiou A. E. T., Yeh P., Yang C., Gu C.* Photorefractive spatial mode converter for multimode-to-single-mode fiber-optic coupling // Opt. Lett. 1995. Vol. 20. P. 1125–1127.
8. *Guo A., Henry M., Salamo G. J. et al.* Fixing multiple waveguides induced by photorefractive solitons: directional couplers and beam splitters // Opt. Lett. 2001. Vol. 26, № 7. P. 1274–1276.
9. *Петров М. П., Степанов С. И., Хоменко А. В.* Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука, 1992. 320 с.