

УДК 548.0

ВЛИЯНИЕ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТНОЕ СЦЕПЛЕНИЕ НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА, КОНТАКТИРУЮЩЕГО С ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПОДЛОЖКОЙ

А.О. АРАКЕЛЯН, В.М. АРУТЮНЯН, А.Л. МАРГАРЯН,
В.А. МЕЛИКСЕТАН, *Н.В. ТАБИРЯН

Ереванский государственный университет

* BEAM Co., Florida, USA

(Поступила в редакцию 18 сентября 2002 г.)

Исследовано явление гигантской оптической нелинейности в жидкокристаллической ячейке, одна из подложек которой представляла собой фоточувствительную полупроводниковую пластину. Рассмотрено влияние температуры, внешнего электрического поля и интенсивности светового облучения на нелинейные характеристики и показано, что наличие полупроводника приводит к повышению чувствительности ячейки, обусловленному уменьшением энергии сцепления молекул жидкого кристалла с полупроводниковой подложкой. Обнаруженные закономерности позволяют предположить, что обнаруженное уменьшение энергии сцепления связано с перезарядкой поверхностных состояний полупроводника при световой генерации.

1. Введение

Исследования границы раздела полупроводник – жидкий кристалл (ГРПЖК) весьма актуальны с прикладной точки зрения, поскольку оба составляющих ее компонента являются одними из наиболее широко используемых материалов для разнообразных практических применений. Очень заманчивым представляется комплексное использование свойств этих двух материалов в единой структуре, что должно, естественно, существенно обогатить функциональные возможности последней. Такие структуры уже нашли свое применение в качестве пространственных модуляторов света, принцип действия которых основан на следующем явлении: при освещении полупроводниковой подложки записывающим лучом, ввиду уменьшения ее сопротивления, происходит перераспределение приложенного к структуре внешнего смещения с соответствующим увеличением падения потенциала на жидком кристалле (ЖК). Последнее приводит к формированию какого-либо ориентационного эффекта в ЖК, в результате чего изменяется интенсивность считыва-

вающего луча, проходящего через ячейку или отражающегося от нее в зависимости от типа ячейки. Хотя в вышеприведенном примере используются только самые общеизвестные и широко используемые эффекты (фотопроводимость полупроводников и ориентационные эффекты в ЖК), тем не менее имеется уже большое число разнообразных модуляторов (см., например, [1]) и интенсивно продолжается разработка новых, что, конечно же, обусловлено бурным развитием фотоники и тенденцией к переходу к оптическим средствам информации.

Следует подчеркнуть, однако, что возможности практического использования ГРПЖК могут быть значительно расширены, для чего необходимы детальные исследования различных свойств этой структуры (особенно при наличии таких внешних воздействий, как лазерный луч и электрическое поле). На наш взгляд, особое внимание следует уделить процессам, происходящим в тонком приконтактном (интерфейсном) слое, тем более, что, как правило, за действие разнообразных структур на базе полупроводников (р-п переход, гетеропереход, диод Шоттки, МДП и МОП структуры и т.д.) ответственны в первую очередь именно явления, происходящие непосредственно на границе раздела. Более того, поскольку в случае ГРПЖК возможно проявление новых эффектов, связанных с особенностями ориентации ЖК на поверхности полупроводниковой подложки, исследования процессов, происходящих при световом воздействии в интерфейсном слое, являются особенно актуальными. В частности, представляет интерес исследование влияния условий сцепления молекул ЖК с твердой поверхностью на гигантскую оптическую нелинейность (ГОН), обусловленную переориентацией директора ЖК под действием световых полей [2,3], поскольку, как было отмечено в [4], эти условия могут существенно повлиять на величину нелинейного набега фазы.

Отметим также, что кроме чисто научного интереса, обусловленного возможностью выяснения механизмов связывания ЖК с твердой кристаллической подложкой, такие исследования интересны и с прикладной точки зрения. Действительно, в [5-7] было предложено использовать явление ГОН в ЖК для диагностики характеристик лазерного луча. Следовательно, использование дополнительных возможностей регулирования процессом переориентации может привести как к понижению порога чувствительности соответствующих датчиков, так и к расширению их функциональных возможностей.

Эксперимент

С целью выяснения влияния электрических полей и поглощения света в приповерхностной области полупроводника на эффект ГОН в структуре ГРПЖК нами были исследованы характеристики эффекта в

случае ячейки с одной обычной подложкой из стекла, покрытого тонким слоем ИТО (оксид индия и олова), и подложкой из полупроводниковой монокристалла. В качестве фоточувствительной полупроводниковой подложки был использован GaAs, область собственного поглощения которого ($E_g=1,45$ эВ) находится в хорошем соответствии с длиной волны используемого нами He-Ne лазера. Поскольку в случае массивной полупроводниковой подложки невозможно зарегистрировать образующиеся в результате явления самофокусировки интерференционные кольца или угловую расходимость лазерного луча в режиме его прохождения через ЖК ячейку (нелинейный элемент), нами была собрана установка, позволяющая проводить измерения в режиме отраженного луча (рис.1).

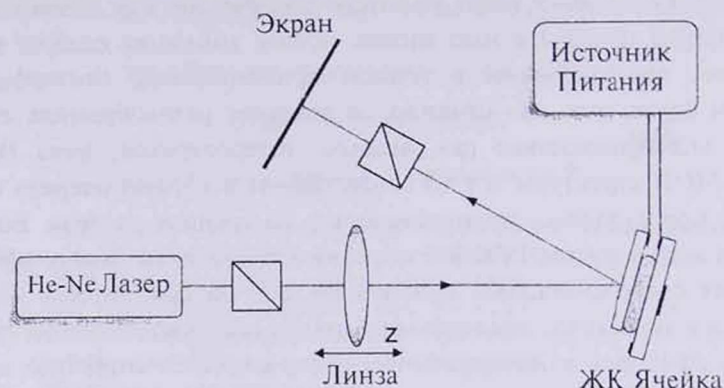


Рис.1. Схема наблюдения эффекта ГОН в режиме отраженного луча.

В качестве ЖК использовался нематик (НЖК) марки Е-48 с добавлением красителя AQ-2, толщина ячейки задавалась специальной прокладкой и составляла 36 мкм, поверхность подложек была обработана с целью получения гомеотропной ориентации. Ячейка позволяла прикладывать электрическое поле вдоль структуры, поскольку на стеклянной подложке имелось ИТО покрытие, а на тыльную сторону полупроводниковой подложки был нанесен специальный контакт.

Обсуждение результатов

При приложении к ячейке переменного электрического поля частотой ~ 1 кГц число колец и угол расходимости (см. рис.2а,б) монотонно уменьшаются с ростом амплитуды колебаний, что легко можно интерпретировать следующим образом: в отсутствие поля происходит переориентация директора ЖК под действием лазерного луча, приводя к эффекту ГОН.

Прикладываемое вдоль первоначальной (гомеотропной) ориентации директора поле начинает препятствовать переориентации, вызываемой полем световой волны и в результате при определенном значении

приложенного напряжения приводит к полному подавлению эффекта ГОН. Подчеркнем также, что с понижением температуры наблюдается довольно интенсивный рост числа колец и угла расходимости, а также значений поля, при котором происходит подавление ГОН (рис.3). Такое

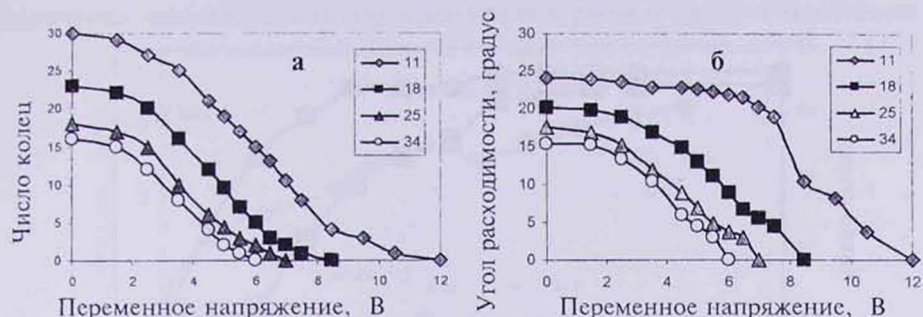


Рис.2. Зависимости числа колец (а) и угла расходимости (б) от переменного ($U=1\text{кВ}$) внешнего поля при различных температурах ячейки: 7=11, 18, 25, 34 °C.

поведение находится в полном согласии с тем, что с понижением температуры резко возрастает анизотропия диэлектрической проницаемости ЖК, а, следовательно, и нелинейный набег фазы. В случае полупроводниковой подложки наблюдается довольно существенное возрастание нелинейного набег фазы и число колец при 7°C достигает 37, что в несколько раз больше, чем в случае ячейки с аналогичными параметрами, но с обычными подложками из ИТО стекла. Особое внимание, однако, следует обратить на то обстоятельство, что скорость роста числа колец с понижением температуры в случае полупроводниковой подложки также существенно выше, чем у обычной ячейки. Последнее, по-видимому, обусловлено уменьшением энергии сцепления молекул ЖК с поверхностью кристалла, причем не исключено, что такое уменьшение может быть индуцировано светом.

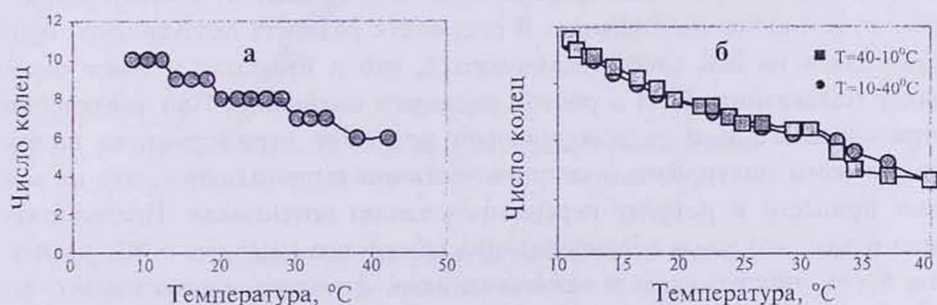


Рис.3. Зависимость числа колец от температуры для обычной ячейки (а) и ячейки на базе ГРПЖК (б) (кривые для ГРПЖК получены как при монотонном повышении, так и монотонном понижении температуры).

Интересной особенностью наблюдаемых характеристик является то, что при приложении постоянного поля вдоль структуры GaAs-ЖК-ИТО ход изменения числа колец от внешнего смещения зависит от полярности последнего (рис.4), что не является характерным для ЖК.

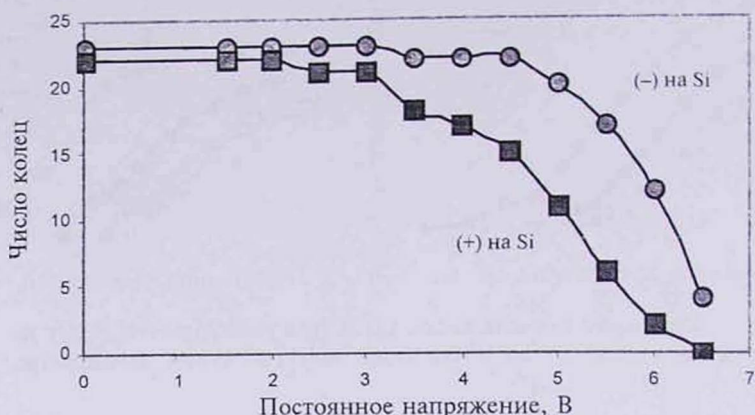


Рис.4. Зависимости числа колец от постоянного внешнего поля при различных полярностях последнего.

Поскольку в исследуемой ячейке используется легированный красителем жидкий кристалл, то его сопротивление относительно невелико и, следовательно, приложенное внешнее напряжение распределяется между слоем ЖК и областью пространственного заряда полупроводника. Как будет показано ниже, при отсутствии внешнего смещения зоны полупроводника у контакта с ЖК изогнуты вверх, т.е. формируется обедненная область с соответственно большим сопротивлением. С увеличением положительного потенциала на тыловом контакте полупроводниковой подложки приповерхностный изгиб зон увеличивается и при определенном потенциале возможно осуществление режима инверсии. С наступлением инверсии сопротивление области пространственного заряда резко уменьшается, приводя, соответственно, к перераспределению внешнего напряжения. В результате разность потенциалов, приходящаяся на ЖК слой, увеличивается, что и приводит к более быстрому подавлению ГОН с ростом внешнего смещения. При увеличении приложенного к полупроводниковой подложке отрицательного потенциала зоны полупроводника лишь частично выпрямляются, что не может привести к резкому перераспределению потенциала. Предположение о том, что зоны полупроводника вблизи его контакта с ЖК изогнуты вверх, подтверждается исследованиями фототока, протекающего через межфазную границу раздела при освещении. Действительно, как видно из рис.5, где показана зависимость абсолютных значений фототока от внешнего напряжения при освещении структуры монохроматичес-

ким светом с длиной волны 800 нм, фототок растет при увеличении положительного потенциала на полупроводниковой подложке и спадает при отрицательном. Последнее обусловлено тем, что число генерированных светом и принимающих участие в фототоке дырок возрастает при увеличении напряженности поля вблизи поверхности ввиду уменьшения

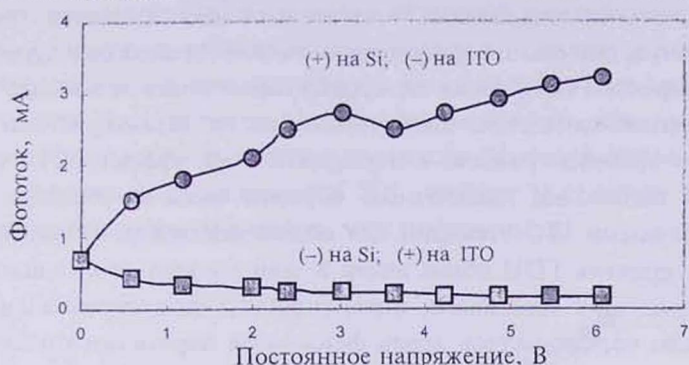


Рис. 5. Абсолютные значения фототока через структуру ГРПЖК при освещении монохроматическим светом с длиной волны 800 нм ($T=300\text{K}$).

потерь на рекомбинацию. Такое поведение фототока позволяет сделать вывод о том, что при формировании контакта полупроводник – ЖК зоны полупроводника изогнуты вверх. Отметим, что, как и в случае исследованной ранее полупроводниковой подложки из Si [8], наблюдаемый фототок обусловлен собственным поглощением GaAs, о чем свидетельствуют спектральные характеристики фототока, полученные при различных внешних смещениях (рис. 6).

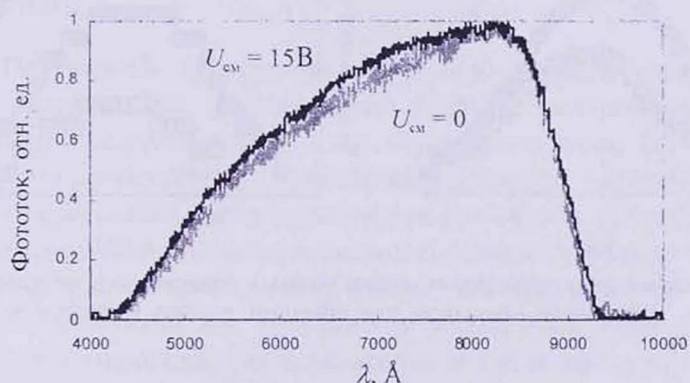


Рис. 6. Спектральные зависимости фототока через границу раздела GaAs – ЖК при различных внешних смещениях ($U_{см}$). $T=300\text{K}$.

Вышеприведенные результаты свидетельствуют о том, что при контакте ЖК с полупроводником вблизи поверхности последнего формируется двойной слой, что приводит к выводу о преобладающей роли

механизма полярного взаимодействия между "болтающимися связями" поверхностных атомов полупроводника и молекулами ЖК. Следовательно, можно предположить, что изменение зарядового состояния поверхности полупроводника должно привести к изменению условий связывания на поверхности и, соответственно, к изменению энергии сцепления ЖК с твердотельной подложкой. Учет же того обстоятельства, что контакт со светочувствительной полупроводниковой подложкой приводит к усилению эффекта ГОН, делает целесообразным более детальные исследования влияния освещения полупроводника на характеристики переходного слоя границы раздела и в результате на эффект ГОН. С этой целью нами полностью идентичным образом была изготовлена также ячейка с обычными ИТО стеклами для сопоставления результатов измерений характеристик ГОН обеих ячеек в зависимости от интенсивности лазерного луча. Для изменения интенсивности жидкокристаллические ячейки просто перемещались вдоль фокальной перетяжки гауссовского пучка, а соответствующая каждому положению ячейки интенсивность рассчитывалась согласно общепринятой методике (см. [2]). Полученные с использованием вышеописанной методики результаты свидетельствуют о существенном влиянии полупроводниковой подложки на эффект переориентации. Действительно, как видно из рис.7, на котором показаны зависимости угла расходимости и числа колец от удаления ячейки от фокальной плоскости для обычной ячейки и ячейки на базе ГРПЖК, соответственно, в последнем случае эффект ГОН проявляется значительно более интенсивно, чем в случае обычной ячейки.

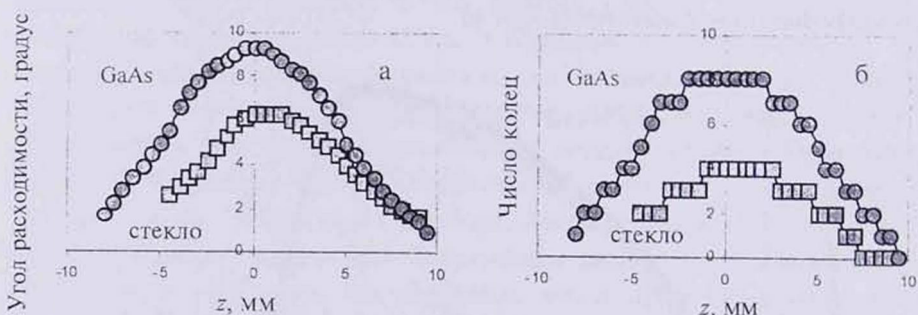


Рис.7. Угловая расходимость и число колец в зависимости от удаления ячейки от фокальной плоскости для обычной ячейки и ячейки на базе ГРПЖК.

Более того, из рис.8, на котором показаны рассчитанные зависимости угла расходимости от интенсивности излучения, следует, что в случае ГРПЖК имеет место не просто непосредственное увеличение степени нелинейности по сравнению с обычной ячейкой, но и наблюдается существенное различие в темпах роста нелинейного набега фаз с увеличением интенсивности облучения. Действительно, если для обыч-

ной ячейки в полном согласии с теорией [2,3] наблюдается практически линейный рост, то в случае ячейки на базе ГРПЖК также наблюдается близкий к линейному, но более быстрый рост, причем с ростом интенсивности заметно также некоторое увеличение темпа роста угловой расходимости. Обнаруженные закономерности однозначно свидетельствуют о существенном влиянии, которое оказывает наличие полупроводника на наблюдаемую в структуре нелинейность, причем следует подчеркнуть, что поскольку оно приводит к росту нелинейного набега фазы, то может найти практическое применение, например, при разработке датчиков профиля интенсивности лазерного луча, основанных на использовании эффекта нелинейности в ЖК ячейках [4-6] ввиду возможности существенного снижения порога чувствительности.

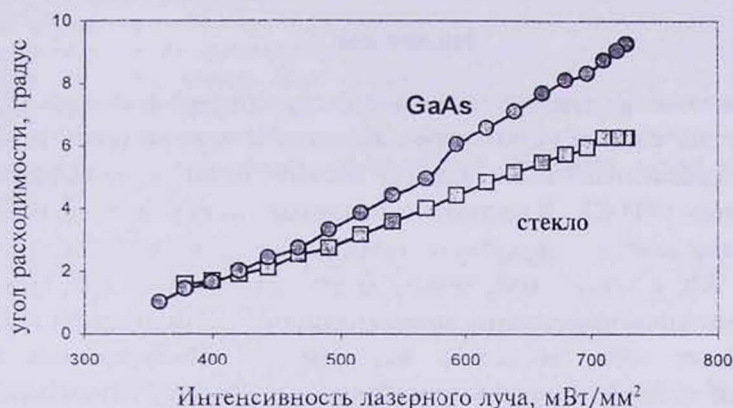


Рис.8. Угловая расходимость эффекта ГОН в зависимости от интенсивности лазерного излучения для обычной ячейки и ячейки на базе ГРПЖК.

Полученные закономерности можно интерпретировать следующим образом. При формировании контакта полупроводника с ЖК происходит накопление заряда как на поверхностных, так и на собственно "интерфейсных" (т.е. возникающих именно в результате формирования переходного слоя) электронных состояниях, в результате чего в приповерхностном слое полупроводника возникает область пространственного заряда. Отметим, что о накопления заряда в "интерфейсном" слое свидетельствуют как зависимости абсолютных значений фототока от внешнего смещения, так и зависимости числа колец от постоянного внешнего смещения, полученные при изменении полярности последнего (см. рис.4). Таким образом, можно полагать, что механизм сцепления молекул ЖК с поверхностью кристаллического полупроводника имеет полярную природу и, следовательно, отличается от случая обычного стекла, причем, согласно анализу рис.8 с учетом развитой в [4] теории, значение энергии сцепления в случае полупроводниковой подложки

меньше. При освещении полупроводника светом из области собственного поглощения в нем генерируются электроны и дырки, которые, пространственно разделяясь полем приповерхностной области пространственного заряда, могут привести к формированию поверхностной фото э.д.с., т.е. к перезарядке поверхностных или "интерфейсных" состояний. Изменение зарядового состояния контактирующей с ЖК поверхности полупроводника может привести к изменению энергии сцепления молекул ЖК с поверхностными атомами полупроводника при полярном механизме их взаимодействия [9,10]. Мы полагаем, что именно такая индуцированная светом перезарядка и является ответственной за экспериментально наблюдаемое увеличение темпа роста угловой расходимости с ростом интенсивности света, что в результате приводит к существенному росту нелинейного набега фазы.

Заключение

В заключение следует подчеркнуть, что проведенные исследования полностью подтверждают предположение о важной роли, которую играет "интерфейсный" слой, и могут открыть новые возможности для использования ГРПЖК. В частности, например, разнообразные подсветки полупроводниковой подложки, приводящие к изменению энергии сцепления ЖК с подложкой, можно будет использовать для осуществления управления процессами, происходящими на межфазной границе раздела. Более того, детальные исследования обнаруженных закономерностей несомненно будут способствовать лучшему пониманию механизмов взаимодействия ЖК молекул с атомами твердой кристаллической подложки. Очень актуальными с этой точки зрения представляются исследования с другими парами полупроводник – ЖК, изучение влияния обработки поверхности полупроводниковой подложки, исследование спектральных характеристик фото э.д.с., фотоемкости, фототока через границу раздела и т.д.

Авторы выражают признательность Б. Я. Зельдовичу за полезное обсуждение. Исследования А.О.Аракеляна, В.М.Арутюняна, А.Л.Маргаряна и В.А.Меликсетяна проводились в рамках гранта ISTC A-321.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.А.Васильев и др. Пространственные модуляторы света. М., изд. "Радио", 1987.
2. Б.Я.Зельдович, Н.В.Табириян. УФН, **147**, 633 (1985).
3. N.V.Tabiryan, B.Ya.Zel'dovich. Mol. Cryst. Liquid Cryst., **62**, 237 (1980).
4. Б.Я.Зельдович, Н.В.Табириян. ЖЭТФ, **19**, 2388 (1980).
5. T.Vogeler, M.Kreuzer, N.V.Tabiryan, T.Tschudi. Mol. Cryst. Liquid Cryst., **251**, 159 (1994).
6. T.Vogeler, T.Tschudi, N.V.Tabiryan, B.Zel'dovich. US Patent №5,621,525, 1997.
7. N.V.Tabiryan, T.Vogeler, T.Tschudi, B.Ya.Zel'dovich. Journal of Nonlinear Optical

Physics and Materials, 4, 843 (1995).

8. А.Л.Маргарян, В.А.Меликсетян. Материалы III Национальной конф. "Полупроводниковая Электроника". Армения, Севан, 8-12 сентября 2001, с.17.
9. Л.М. Блинов и др. УФН, 152, 449 (1987).
10. Н.Yokoyama, in Handbook on Liquid Crystal Research. Eds. P.Collings and J. Patel. Oxford Univ. Press., p.179, 1997.

ԼՈՒՍԱՅԻՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴԻՉ
ՀԱՐԹԱԿԻ ՀԵՏ ԿՈՆՏԱԿՏԻ ԲԵՐՎԱԾ ՆԵՄԱՏԻԿ ՀԵՂՈՒԿ ԲՅՈՒՐԵՂԻ
ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹԱՅԻՆ ԿԱՊԻ ՎՐԱ

Ա.Հ. ԱՌԱՔԵԼՅԱՆ, Վ.Մ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Հ.Լ. ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ,
Վ.Մ. ՄԵԼԻՔՍԵՏՅԱՆ, Ն.Վ. ԹԱԲԻՐՅԱՆ

Ուսումնասիրված է հսկա օպտիկական ոչ գծայնության երևույթը հեղուկ բյուրեղային բջջում, որի տակդիրներից մեկը իրենից ներկայացնում է կիսահաղորդչային բիթեղ: Դիտարկված են ջերմաստիճանի, արտաքին էլեկտրական դաշտի և լույսի ինտենսիվության ազդեցությունները ոչ գծային բնութագրերի վրա: Ցույց է տրված, որ կիսահաղորդչի առկայությունը բերում է հեղուկ բյուրեղի մոլեկուլի կիսահաղորդչի մակերևույթի հետ կապի էներգիայի փոքրացմանը պայմանավորված բջջի զգայունության ավելացման: Ստացված օրինաչափությունները բույլ են տալիս ենթադրել, որ կապի էներգիայի դիտված փոքրացումը պայմանավորված է կիսահաղորդչի մակերևույթային վիճակների լույսով առաջացված վերափոխվողությամբ:

LIGHT IRRADIATION EFFECT ON THE SURFACE ANCHORING
OF A NEMATIC LIQUID CRYSTAL CONTACTING
WITH A SEMICONDUCTOR SUBSTRATE

A.O. ARAKELYAN, V.M. AROUTIOUNIAN, H.L. MARGARYAN,
V.A. MELIKSETYAN, N.V. TABIRIAN

The phenomenon of giant optical non-linearity in a liquid crystal cell, one substrate of which is a photosensitive semiconductor wafer, is investigated. The temperature, external electric field and light irradiation intensity influence on non-linear characteristics is considered and it is shown that the semiconductor presence leads to the cell sensitivity increase conditioned by the decrease in the anchoring energy of LC molecules with the semiconductor substrate. The discovered regularities allow us to suppose that the observed decrease in the anchoring energy is caused by the semiconductor surface states recharging at light generation.