

УДК 548.0

ВЛИЯНИЕ ИНТЕРФЕЙСНОГО СЛОЯ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ПОЛУПРОВОДНИК – ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ НА ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ

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

Ереванский государственный университет

*BEAM Co., Florida, USA

(Поступила в редакцию 2 октября 2002 г.)

Исследованы особенности ориентационных эффектов, обусловленные формированием интерфейсного слоя на границе раздела полупроводник – жидкий кристалл. Наличие полупроводниковой подложки приводит к увеличению набега фаз и некоторому изменению времен ориентации и релаксации при обычном переходе Фредерикса. Обнаружен новый ориентационный эффект, возникающий при формировании электрического поля вдоль поверхности полупроводниковой подложки. Хотя обнаруженный и обычный ориентационные эффекты могут происходить одновременно, однако наличие одного эффекта оказывает влияние на временные характеристики другого.

Введение

Граница раздела полупроводник-жидкий кристалл (ГРПЖК) представляет из себя очень интересную и перспективную структуру как с научной, так и с прикладной точек зрения, тем более, что оба составляющих ее компонента являются одними из наиболее широко используемых материалов для разнообразных практических применений. Роль полупроводников (ПП) в современной технике трудно переоценить, так как сегодня базовым материалом подавляющего большинства элементов радиоэлектроники, микро- и оптоэлектроники являются полупроводники. Причем используются разнообразные типы твердотельных переходов, исследование каждого из которых привело к революционным изменениям в физике полупроводников и современной микроэлектронике.

Очень многообразными являются и практические приложения жидких кристаллов (ЖК) – от недорогих дисплеев, основанных на электрооптическом эффекте в ЖК, разнообразных датчиков (сейсмо- и ИК-сенсоры) до элементов современной фотоники. Такая многоплановость

использования ПП и ЖК в технике обусловлена тем обстоятельством, что как те, так и другие среды очень чувствительны к таким внешним воздействиям, как электрическое поле и световое излучение, тем более, что сегодня практически весь мониторинг современной техники основан на использовании электрических и световых сигналов. Таким образом, очень заманчивым представляется комплексное использование свойств этих двух материалов в единой структуре, что должно, естественно, существенно обогатить ее функциональные возможности. При этом роль тонкого переходного (интерфейсного) слоя, образующегося на ГРПЖК, представляется очень важной, о чем свидетельствует например обнаруженное в [1] возрастание степени гигантской оптической нелинейности [2], или возникновение на ней эффекта аномального фотонапряжения [3]. Одной из наиболее существенных особенностей границы раздела (ГР) следует считать то, что во многих случаях образуются условия, позволяющие формирование тонких переходных слоев, характеризующихся двумерной электронной проводимостью, т.е. такой области, где движение электрона вдоль одной из координат ограничено [4].

Рассмотрение проблемы разнообразных переходных слоев, как сугубо твердотельных, так и образующихся на переходе твердое тело–жидкость, довольно сложно, поскольку микроскопическая структура границы раздела точно не известна. В случае твердотельных гетеропереходов возможно более или менее точное ее описание в рамках приближения эффективной массы, при моделировании переходной области таким образом, чтобы сгладить атомную структуру. В случае же перехода твердое тело–жидкость положение усугубляется, поскольку для жидкой среды приближение эффективной массы неприемлемо, и если для описания перехода полупроводник–электролит и применялись модели, где электролиту приписывалась зонная структура [5], то в случае ЖК энергетический спектр электронных состояний, насколько нам известно, вообще не рассматривался, что неудивительно ввиду сложности микроскопического строения этой среды. Можно констатировать, однако, что носители заряда у этой ГР движутся в поле довольно сложного потенциала. С одной стороны границы раздела на носители действует поле полупроводникового кристалла, характеризующееся трехмерной трансляционной инвариантностью, на которое накладывается медленно изменяющееся электрическое поле, формирующееся у поверхности полупроводника при контакте с ЖК и зависящее от приложенного извне напряжения. С другой стороны на электроны действует поле, создаваемое молекулами ЖК. На самой же ГР на носители действует поле реконструированного слоя, возникшего при связывании "болтающихся связей" поверхностных атомов полупроводника с молекулами ЖК. Влияние этого переходного слоя, по-видимому, должно сказываться при таких исследованиях ГРПЖК, когда параметры переходного слоя могут изменяться

в результате специальных воздействий электрическими полями или светом. Настоящая статья посвящена исследованию ориентационных характеристик жидкокристаллических ячеек, одна из подложек которой представляет из себя полупроводниковый монокристаллический Si.

Эксперимент

Обычно при исследовании пороговых и надпороговых характеристик (эффекта Фредерикса) жидкокристаллических ячеек используется метод прохождения лазерного луча через жидкокристаллическую ячейку и скрещенные соответственным образом поляризаторы, при наличии внешнего электрического смещения, которое и вызывает переориентацию молекул ЖК. Однако, при исследовании ЖК ячеек с подложкой из полупроводникового монокристалла вышеупомянутый метод неприемлем ввиду непрозрачности массивного полупроводникового электрода. Следовательно, для исследования таких ячеек необходимо разработать схему эксперимента, позволяющего регистрировать пороговый эффект с помощью отраженного светового пробного луча. С этой целью была собрана следующая оптическая система, представленная на рис.1.

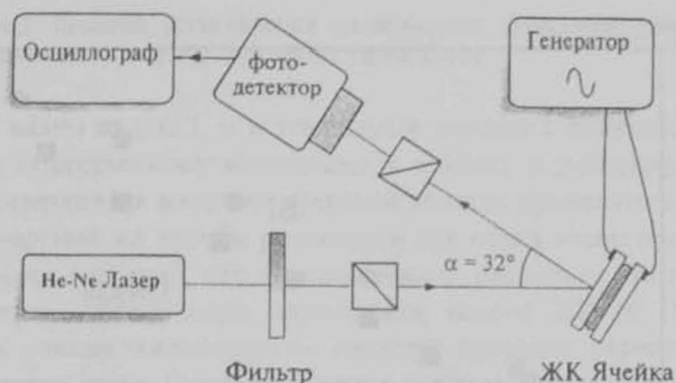


Рис.1. Оптическая схема для измерений надпороговых характеристик.

Луч He-Ne лазера с длиной волны 632,8 нм, проходя через поляризатор, падал на ЖК ячейку. Угол между вектором поляризации и директором ячейки составлял 45° , а угол между направлением луча и нормалью к поверхности ячейки составлял $\sim 32^\circ$. Луч, проходя через ЖК слой ячейки, падал на поверхность полупроводника и, отражаясь от нее после прохождения через второй поляризатор, направление поляризации которого было скрещено с направлением поляризации первого, принимался фотоприемником. Полученный сигнал регистрировался с помощью осциллографа. С использованием звукового генератора на

контакты ячейки подавался электрический сигнал с синусоидальной формой и частотой 1 кГц. С помощью вышеописанной системы для сопоставления результатов были исследованы как ЖК ячейка с двумя обычными стеклянными подложками с индий-олово оксидным (ИТО) тонким слоем, так и ячейка, одна из подложек которой представляла из себя обычное ИТО стекло, тогда как другая – полупроводниковый низкоомный монокристаллический кремний. Поверхности обеих подложек ячейки были обработаны таким образом, чтобы обеспечить планарную ориентацию молекул ЖК как более подходящую для наблюдения пороговых эффектов. Отметим, что выбор относительно низкоомного полупроводника был обусловлен тем, чтобы прикладываемое к структуре смещение в основном падало бы на жидкокристаллический слой. Зазор между ИТО слоем и полупроводниковой подложкой составлял 36 мкм и заполнялся нематическим жидким кристаллом (НЖК) марки E-48.

Обсуждение результатов

Проведенные исследования показали, что порог статической переориентации для обоих типов ячеек практически одинаков и составляет примерно 2,65 В. Измеренное значение фазового набег в зависимости от приложенного напряжения (надпороговая стационарная структура) для обоих типов ячеек приведено на рис.2.

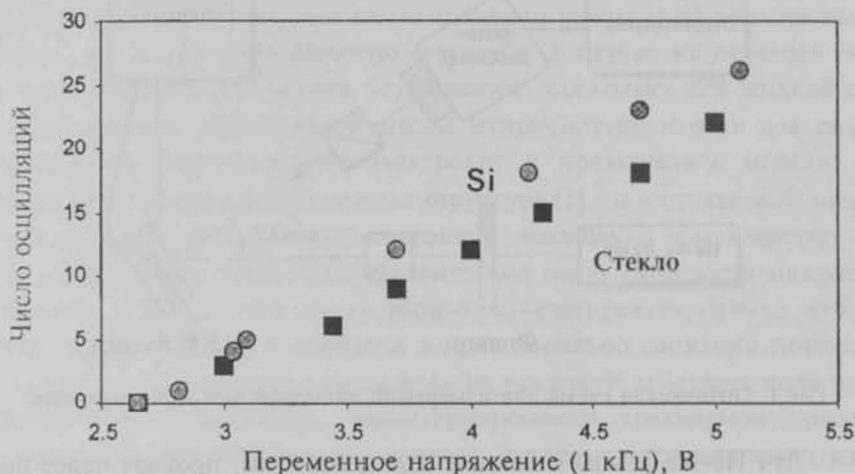


Рис.2. Зависимость числа осцилляций N (фазового набег $\Delta\Phi=2\pi N$) от внешнего смещения.

Несмотря на то, что пороговое напряжение в случае обоих ячеек одинаковое, тем не менее, имеется существенное отличие в поведении надпороговых стационарных характеристик. Действительно, как видно из рис.2, набег фазы ($\Delta\Phi$) в случае ячейки с полупроводниковой подложкой превышает $\Delta\Phi$ для обычной ячейки, причем с ростом напряже-

ния это отличие увеличивается и достигает 8π при значении $V_{\text{ext}}=5$ В. Отметим, что такое различие фазовых набегов соответствует довольно большому увеличению угла переориентации в случае контакта ЖК с полупроводником.

Были исследованы и сопоставлены также времена установления и релаксации стационарной переориентации для обоих вышеупомянутых ячеек (рис.3).

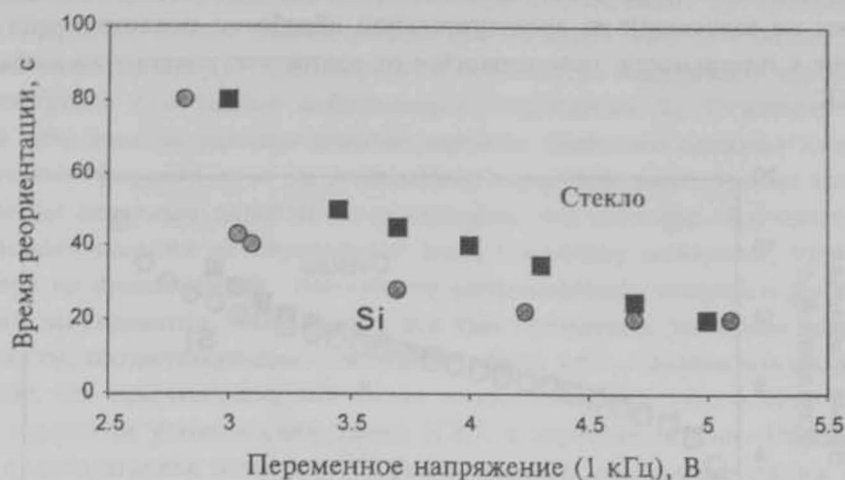


Рис.3. Времена установления стационарной переориентации в зависимости от V_{ext} для обоих типов ячеек.

Как видно из рис.3, и в этом случае контакт с полупроводником приводит к существенному изменению, а именно, к уменьшению времен переориентации в довольно широкой области приложенного напряжения. Измерения же времен релаксации для обоих ячеек практически не различаются (~ 25 сек), что не удивительно, поскольку эти времена в первую очередь обусловлены параметрами самого ЖК [6]. Были сопоставлены также динамические свойства процесса переориентации для обоих типов ячеек. Соответствующие результаты приведены на рис.4 и 5.

Таким образом, проведенные нами предварительные исследования позволили не только установить возможность наблюдения порогового эффекта на структуре полупроводник-ЖК в режиме отраженного луча, но и выявили заметную разницу в характеристиках, получаемых при использовании полупроводниковой подложки. Действительно, в последнем случае наблюдаются не только рост набег фаз, но и заметное изменение характерных времен процесса переориентации. Мы полагаем, что наблюдаемые отличия при прочих равных условиях обусловлены изменением условий связывания молекул НЖК с твердотельной подложкой. Такое поведение, на наш взгляд, может быть связано с тем, что

в случае полупроводниковой подложки существенную роль играет поверхностный заряд, образующийся при формировании ГРПЖК и приводящий в итоге к увеличению роли полярной связи, которая в свою очередь может оказывать существенное влияние на энергию сцепления молекул НЖК с твердой кристаллической поверхностью [7]. Более того, как было показано в [8], при полярном механизме связывания НЖК на поверхности твердой подложки образуется примыкающий к ней монослой нематика, директор которого имеет характерный и практически не зависящий от предварительной обработки подложки угол наклона к поверхности, отличающийся от соответствующего угла в объеме НЖК.

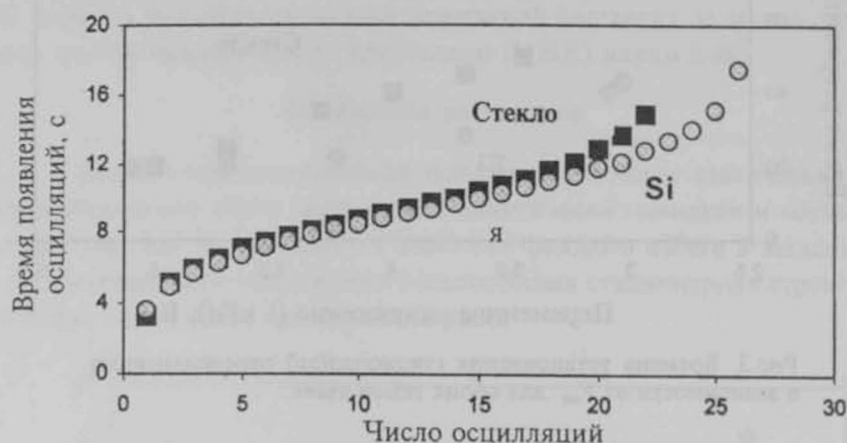


Рис. 4. Времена появления осцилляций для обычной ячейки и ячейки на базе ГРПЖК.

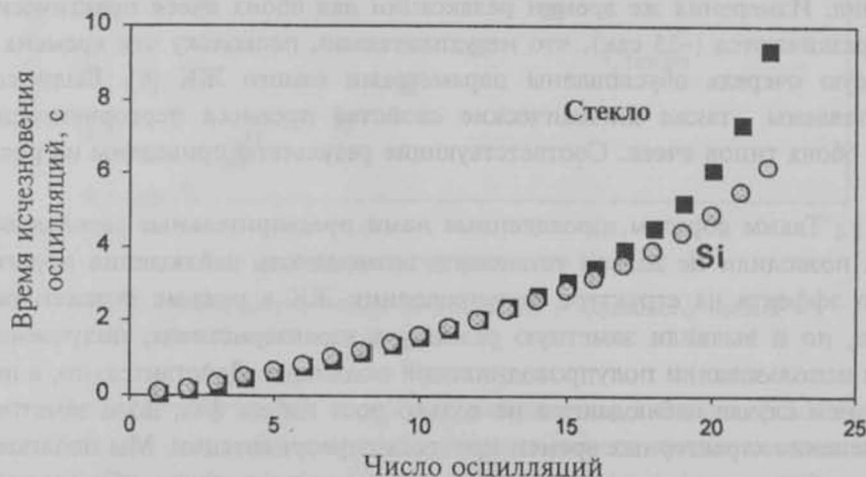


Рис. 5. Времена исчезновения осцилляций для обычной ячейки и ячейки на базе ГРПЖК.

В качестве факторов, которые могли бы привести к изменению состояния поверхности полупроводника и, следовательно, к изменению условий осуществления полярных связей, могут выступать световое возбуждение или электрические поля. Действительно, генерированные светом в области пространственного заряда полупроводника неравновесные носители заряда могут привести к формированию поверхностной фотоэ.д.с., т.е. фактически к перезарядке на поверхности. В качестве возбуждающего полупроводник излучения при исследовании ориентационных эффектов можно рассматривать сам пробный луч, тем более, что длина волны (632,8 нм) используемого нами лазера находится в хорошем соответствии с областью собственного поглощения Si. Отметим, что хотя нам пока не удалось зарегистрировать заметного влияния интенсивности лазерного луча на измеряемые характеристики, тем не менее было бы неверным однозначно утверждать, что световое облучение не оказывает влияния на переходный слой, поскольку возможно, что несмотря на существенное понижение интенсивности лазерного луча во время эксперимента, ее значения все еще превышали значения интенсивности, соответствующие насыщению фото э.д.с. Следовательно, возможно, что при меньших значениях интенсивности светового возбуждения изменятся условия связывания НЖК в переходном слое. Отметим, что предполагаемая возможность регулирования энергии сцепления ЖК световым лучом может иметь практическое значение при разработке пространственных модуляторов на базе ГРПЖК.

"Поверхностная ориентация"

Представляет интерес также исследование роли электрических полей, приложенных вдоль поверхности полупроводника с помощью специальных контактов, напыленных соответственно с разных сторон находящейся за пределами ячейки поверхности полупроводника. Подчеркнем, что влияние такого поля может быть особенно существенным именно в случае подложек, предварительно обработанных с целью получения планарной ориентации, поскольку направленное вдоль поверхности полупроводника поле в этом случае может оказать существенное воздействие на прилегающий к поверхности монослой нематика. Действительно, исследования, проведенные с двумя ячейками, одна из подложек которых представляла собой обычное покрытое ИТО стекло, тогда как вторая была изготовлена из различных монокристаллов Si, показали, что приложение продольного поля также приводит к переориентации НЖК и, соответственно, к фазовому набегу. Отметим, что наблюдаемый эффект имеет пороговый характер, однако, как значение порога, так и число осцилляций в обоих случаях различны, как это видно из рис.6, где приведены зависимости числа осцилляций от величины "поверх-

ностного" поля, а характерная осциллограмма нарастания и спада переориентации для одной из ячеек представлена на рис.7.

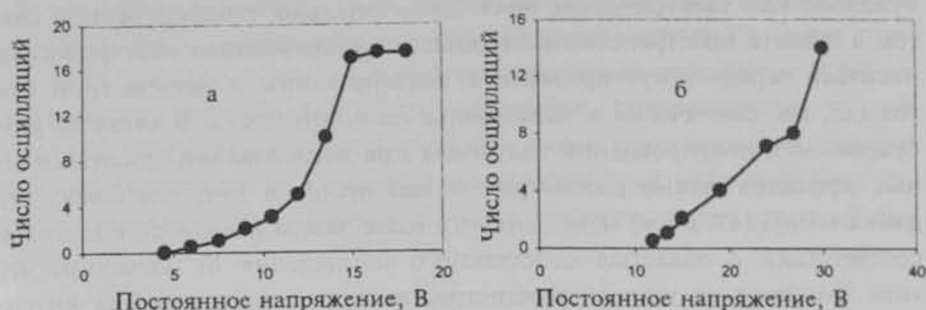


Рис.6. Число осцилляций в зависимости от величины "поверхностного" поля для двух ячеек с различными подложками из Si.

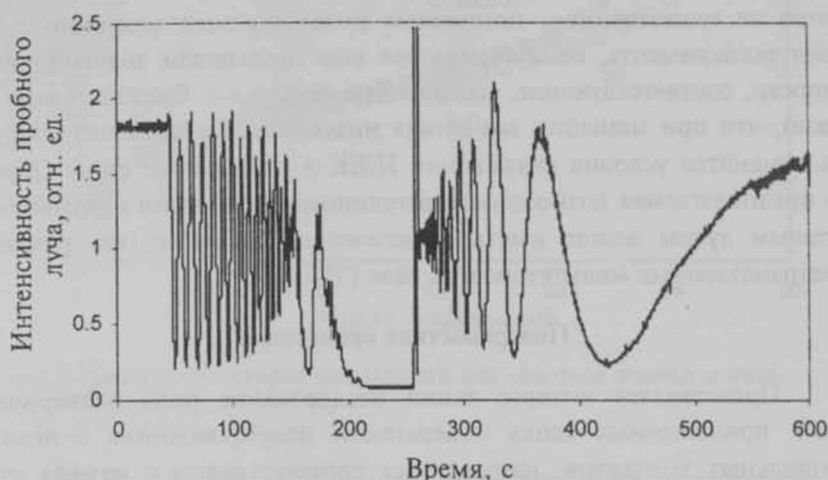


Рис.7. Динамическая характеристика ячейки с подложкой из Si при приложении продольного "поверхностного" поля; $V=18$ В.

Здесь следует отметить, что такое поведение может быть обусловлено самыми разными причинами; в частности, это может быть связано с тем, что при напылении контактов на поверхности разных полупроводниковых образцов контактные сопротивления не получаются идентичными, или же неодинакова поверхностная проводимость полупроводников, в результате чего значения напряженностей поля вдоль поверхности могут оказаться существенно различными при одной и той же разности потенциалов, приложенной к контактам. Возможно также, что в зависимости от состояния поверхности полупроводника молекулы НЖК в интерфейсном слое упорядочиваются неидентичным образом, что и приводит к изменениям параметров переориентации. Подчеркнем однако, что даже независимо от того, какая из вышеперечисленных при-

чин является основной, можно сделать вывод о крайне важной роли, которую играют особенности интерфейсного слоя в процессе переориентации. Здесь следует особо отметить, что в пользу поверхностной природы эффекта, наблюдаемого при приложении постоянного поля вдоль поверхности ПП подложки, свидетельствуют и существенно различные характерные времена переориентации и последующей релаксации, наблюдающиеся при описанном эффекте в сравнении с соответствующими временами переориентации при обычном объемном эффекте. Действительно, значения характерных времен переориентации в первую очередь определяются вязкоупругими свойствами НЖК, а, следовательно, то обстоятельство, что наблюдающиеся характерные времена различаются почти на порядок, может быть обусловлено лишь существенным различием сил межмолекулярного взаимодействия между объемными молекулами НЖК и, соответственно, между молекулами НЖК и поверхностными атомами ПП. Более того, о принципиально различной природе обоих эффектов переориентации свидетельствует то обстоятельство, что более быстрый эффект обычной объемной поляризации происходит независимо и на фоне переориентации, обусловленной направленным вдоль поверхности полем, которую мы далее будем называть "поверхностной переориентацией". Действительно, это очевидно из осциллограммы, представленной на рис.8 и полученной следующим образом: сначала прикладывалось постоянное "поверхностное" поле ~ 15 В и после установления "поверхностной переориентации" было приложено переменное поле ~ 7 В между ИТО и тыловым контактом к полупроводнику для обеспечения объемной переориентации. После установления обеих переориентаций сначала отключается более медленное "поверхностное" поле, а затем и объемное. В результате на фоне осцилляций, обусловленных "поверхностной переориентацией", на релаксационной характеристике хорошо видны осцилляции объемного эффекта (показанные также отдельно на фрагменте к рис.8).

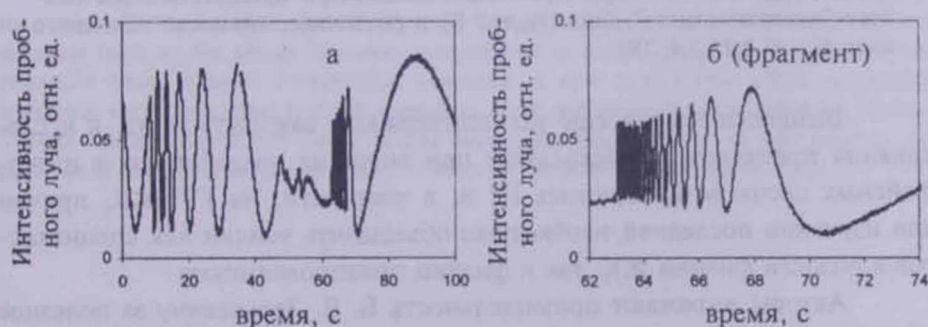


Рис.8. Динамические характеристики при приложении постоянного продольного и переменного поперечного полей.

Таким образом, можно утверждать, что оба эффекта происходят независимо друг от друга, и если механизм объемного эффекта хорошо известен и исследован, то механизм "поверхностной переориентации" предстоит еще детально исследовать, причем в первую очередь следует обратить внимание на контролируемое состояние поверхности полупроводника. Несмотря на то, что оба эффекта переориентации имеют разную природу, они тем не менее оказывают определенное влияние друг на друга, что вообще не удивительно, поскольку состояние интерфейсного слоя существенно для обоих эффектов, каждый из которых, в свою очередь, влияет на состояние интерфейсного слоя. Действительно, при одновременном приложении как объемного переменного поля, так и постоянного "поверхностного" поля динамическая картина наблюдаемых процессов переориентации существенно изменяется (рис.9). Отметим, в частности, существенное влияние объемного поля на характерные времена "поверхностной переориентации", которые, как следует из анализа рис.9, уменьшаются с ростом объемного поля до достижения им порогового значения, затем несколько возрастают вблизи порога и вновь резко уменьшаются при установлении объемной переориентации.

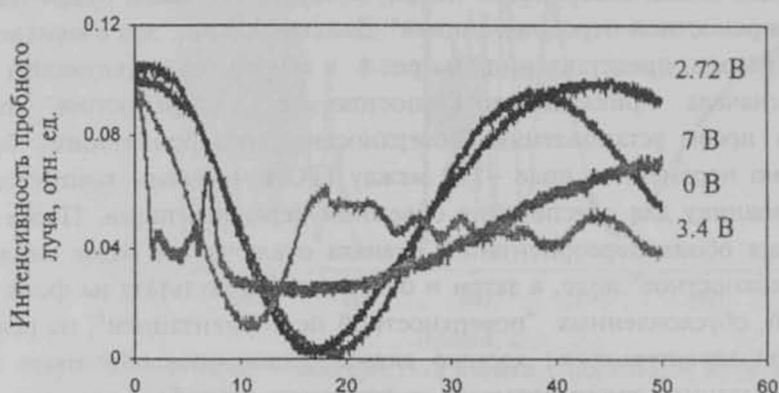


Рис.9. Динамические характеристики ГРПЖК при приложении постоянного "поверхностного" поля ($V_{DC}=15$ В) и различных значений объемного поля V_{AC} (0, 2,72, 3,4, 7В).

Вышеизложенное еще раз подтверждает важность учета и исследования процессов, происходящих при внешних воздействиях в интерфейсных слоях разнообразных ГР и, в частности, на ГРПЖК, причем для изучения последней необходимо объединить усилия как специалистов в области физики ЖК, так и физики полупроводников.

Авторы выражают признательность Б. Я. Зельдовичу за полезное обсуждение.

Исследования А.О.Аракеляна, В.М.Арутюняна, А.Л.Маргаряна и В.А.Меликсетяна проводились при поддержке гранта ISTC A-321.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.О.Аракелян и др. Известия НАН Армении, Физика, 37, 354 (2002).
2. Б.Я.Зельдович, Н.В.Табириян. УФН, 147, 633 (1985).
3. Р.Б. Алавердян и др. ЖТФ, 56, 1843 (1986).
4. Т.Аидо, А.Фаулер, Ф.Стерн. Электронные свойства двумерных систем. М., Мир, 1985.
5. В.М.Арутюнян. Оптические свойства в полупроводниковых фотокатализаторах и возможности их применений. В сб. "Фотокаталитическое преобразование солнечной энергии. Гетерогенные, гомогенные и структурно-ориентированные системы", Новосибирск, Наука, 1991, с.228-294.
6. Л.М.Блинов. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М., Наука, 1978.
7. Л.М.Блинов, Е.И.Кац, А.А.Сонин. УФН, 152, 449 (1987).
8. H.Yokoyama, in Handbook on Liquid Crystal Research. Eds. P.Collings and J. Patel. Oxford Univ. Press, p.179, 1997.

ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴԻՉ-ՀԵՂՈՒԿ ԲՅՈՒՐԵՂ ՄԻՋՍԱՀԱՄԱՆԱՅԻՆ ՇԵՐՏԻ ԱՉԴԵՅՈՒԹՅՈՒՆԸ ԿՈՂՄՆՈՐՈՇԱՅԻՆ ԷՖԵԿՏՆԵՐԻ ՎՐԱ

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

Ուսումնասիրված են կիսահաղորդիչ-հեղուկ բյուրեղ միջսահմանային շերտով պայմանավորված կողմնորոշային էֆեկտների առանձնահատկությունները: Կիսահաղորդիչ տակդիրի առկայությունը բերում է փուլային շեղման ավելացման, ինչպես նաև կողմնորոշման և ռելաքսացիայի ժամանակների որոշակի փոփոխության Ֆրեդերիքսի սովորական անցման դեպքում: Հայտնաբերված է նոր կողմնորոշային էֆեկտ, որն առաջանում է կիսահաղորդիչ տակդիրին կիրառված երկայնական էլեկտրական դաշտի ազդեցության ժամանակ: Չնայած նրան, որ հայտնաբերված և սովորական կողմնորոշային էֆեկտները կարող են տեղի ունենալ միաժամանակ, այնուամենայնիվ մի էֆեկտի առկայությունը բերում է մյուսի ժամանակային բնութագրերի փոփոխության:

INFLUENCE OF A SEMICONDUCTOR-LIQUID CRYSTAL INTERFACIAL LAYER ON THE ORIENTATIONAL EFFECTS

A.H. ARAKELYAN, V.M. AROUTIOUNIAN, H.L. MARGARYAN, V.A. MELIKSETYAN,
S.R. NERSISYAN, N.V. TABIRIAN

The peculiarities of orientational effects conditioned by the interface layer formation on the semiconductor-liquid crystal interface, are investigated. The presence of a semiconductor substrate leads to the phase incursion increase and to some change in reorientation and relaxation times at usual Freedericksz transition. A new orientational effect is revealed appearing during the electric field formation along the semiconductor substrate surface. Though the discovered and usual effects take place independently of one another, the presence of one effect has an essential influence on the other's time characteristics.