



УДК 620.1.72:532.783

ЭЛЕКТРООПТИКА НЕМАТИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ, ОБРАБОТАННОГО ПЛАЗМОЙ

С.И. Кучеев, Ю.С. Тучина

Белгородский государственный университет,
ул. Студенческая, 14, Белгород, 308015, Россия, e-mail: kucheev@bsu.edu.ru

Аннотация. В работе исследуется переориентация нематика и светочувствительность структуры кремний/нематик/прозрачный электрод(ИТО) с обработанным плазмой кремнием. Показано, что пороговые напряжения переориентации нематика и светочувствительности увеличиваются с ростом дозы облучения плазмой поверхности кремния. Предполагается, что изменение пороговых напряжений переориентации и светочувствительности связано с формированием наноразмерной плёнки окиси кремния на поверхности кремния, что, в свою очередь, вызывает дополнительную адсорбцию ионов на этой поверхности и, как следствие, формирование объёмного заряда в жидком кристалле.

Ключевые слова: нематик, кремний, светочувствительность, пороговое напряжение, переориентация.

1. Введение. В модуляторах света на основе структур типа Si/SiO₂/жидкий кристалл/ИТО [1], доминирующих на сегодняшний момент времени, диэлектрическая плёнка SiO₂ существенно ограничивает их функциональные возможности, т.к. управление ими может осуществляться только за счёт внешнего напряжения. Исключение диэлектрического слоя из выше указанной структуры и, следовательно, использование структуры типа Si/жидкий кристалл/ИТО позволяет расширить функциональные возможности модуляторов за счёт изменения поверхностной проводимости кремния полем накапливаемого в жидком кристалле ионного заряда, а также утечкой тока через границу кремний/жидкий кристалл. Однако, для реализации такого типа модуляторов света, необходимо решить ряд задач, связанных с контролируемым и хорошо воспроизводимым формированием обеднённого основными носителями заряда приповерхностного слоя в кремнии. В предлагаемой работе рассмотрено влияние обработки поверхности кремния плазмой на такие важные характеристики модулятора света, как пороговое напряжение переориентации нематика и светочувствительность, которые непосредственным образом связаны с обеднением поверхности кремния.

Другой стороной решаемых задач может быть использование идеи модуляции поверхностной проводимости кремния и реализации электрооптических свойств жидких кристаллов в неразрушающем контроле поверхности кремния, подвергнутого технологической обработке.

2. Эксперимент. В экспериментах использовался монокристаллический кремний p-типа проводимости с удельным сопротивлением около 4,5 Ом·см. Перед обработкой плазмой поверхность кремния была протравлена плавиковой кислотой с целью удаления пассивирующего слоя окиси кремния. Обработка поверхности кремния плазмой (75% аргон, 25% кислород, $E \leq 12$ эВ) производилась с помощью установки PLASMA

CLEANER MODEL 1020 Fischione Instruments. Используя алюминиевую фольгу в качестве экрана, в процессе обработки были получены участки поверхности кремния подвергнутые различным дозам облучения плазмой (полоски шириной около 5 мм каждая с временем действия плазмы 0, 5, 10, и 25 минут соответственно). Обработанный выше указанным способом кремниевый образец был использован в качестве нижней подложки в ячейке сэндвич типа, в которую был заправлен нематический жидкий кристалл ЖК 1282. Толщина ЖК-слоя составляла 5 мкм. Начальная ориентация нематика на кремнии не задавалась. Верхней подложкой ячейки служила стеклянная пластина с проводящим слоем ИТО, на который была нанесена полиимидная плёнка. Натертая в одном направлении полиимидная плёнка задает жёсткую планарную ориентацию молекул ЖК на верхней подложке в том же направлении. Изучение исходной ориентации ЖК проводилось с помощью поляризационного микроскопа. Установлено, что области ячейки, которые соответствуют разным дозам обработки плазмой в поляризованном свете неразличимы между собой. Однако, на границах между областями кремния с разной дозой обработки в слое ЖК наблюдаются дисклинационные линии [2]. Различие между облученными участками обнаруживается при прикладывании к ячейке переменного (или постоянного) напряжения. В диапазоне частот > 104 Гц, благодаря различию пороговых напряжений переориентации нематика, хорошо различима граница между облучённой и необлучённой поверхностями кремния, рис. 1.

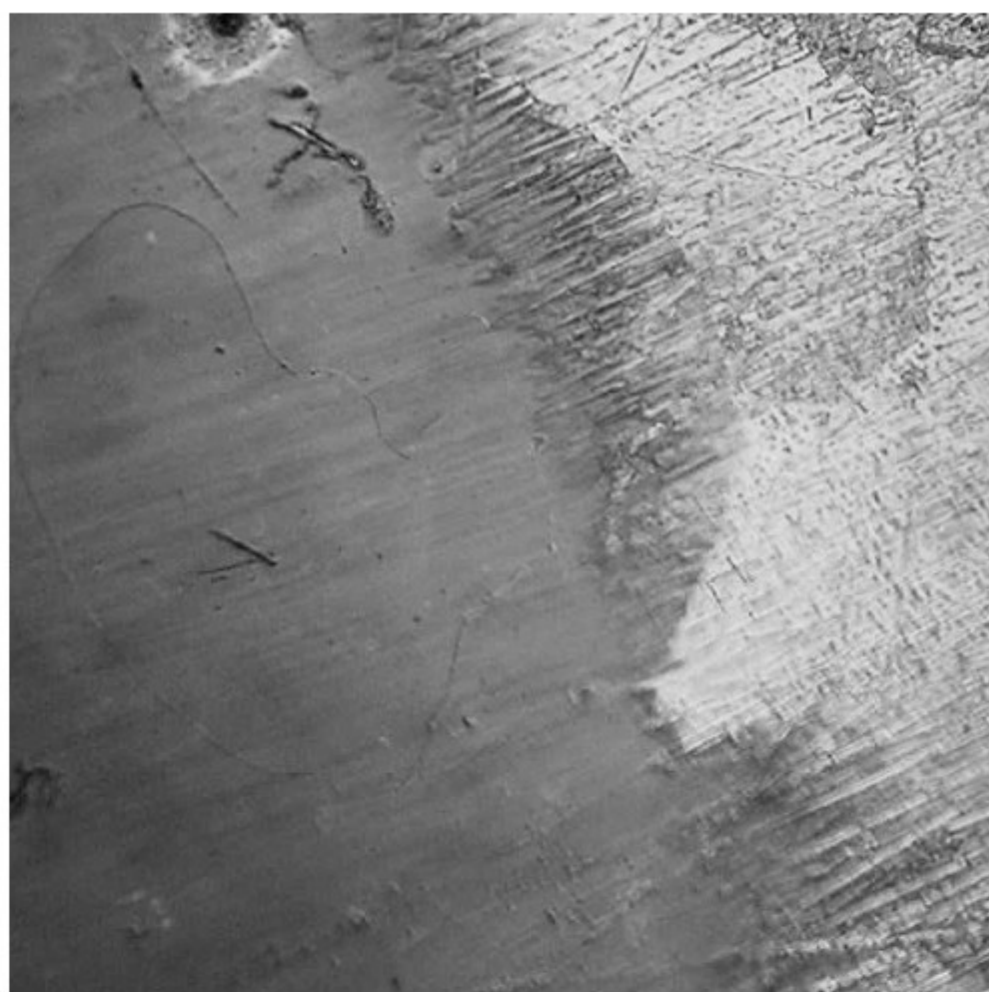


Рис. 1.

В переориентированном состоянии текстура нематика над необработанным участком кремния выглядит мозаично, тогда как над обработанной поверхностью фон псевдоокрашивания слоя ЖК в большей степени однородный за исключением граничных областей. Однородность текстуры позволяет предположить, что молекулы ЖК на поверхности кремния, подвергнутой воздействию плазмы в среднем ориентированы однородно. Рис. 2 демонстрирует зависимость порогового напряжения переориентации нематика в ячейке. Из приведенных кривых хорошо видно, что пороговые напряжения переориентации нематика до частоты 104 Гц для всех облучённых плазмой полосок кремния и необлучённой поверхности кремния, практически совпадают между собой,

а выше этой частоты, видны заметные различия в пороге между облучённой и необлучённой поверхностями кремния.

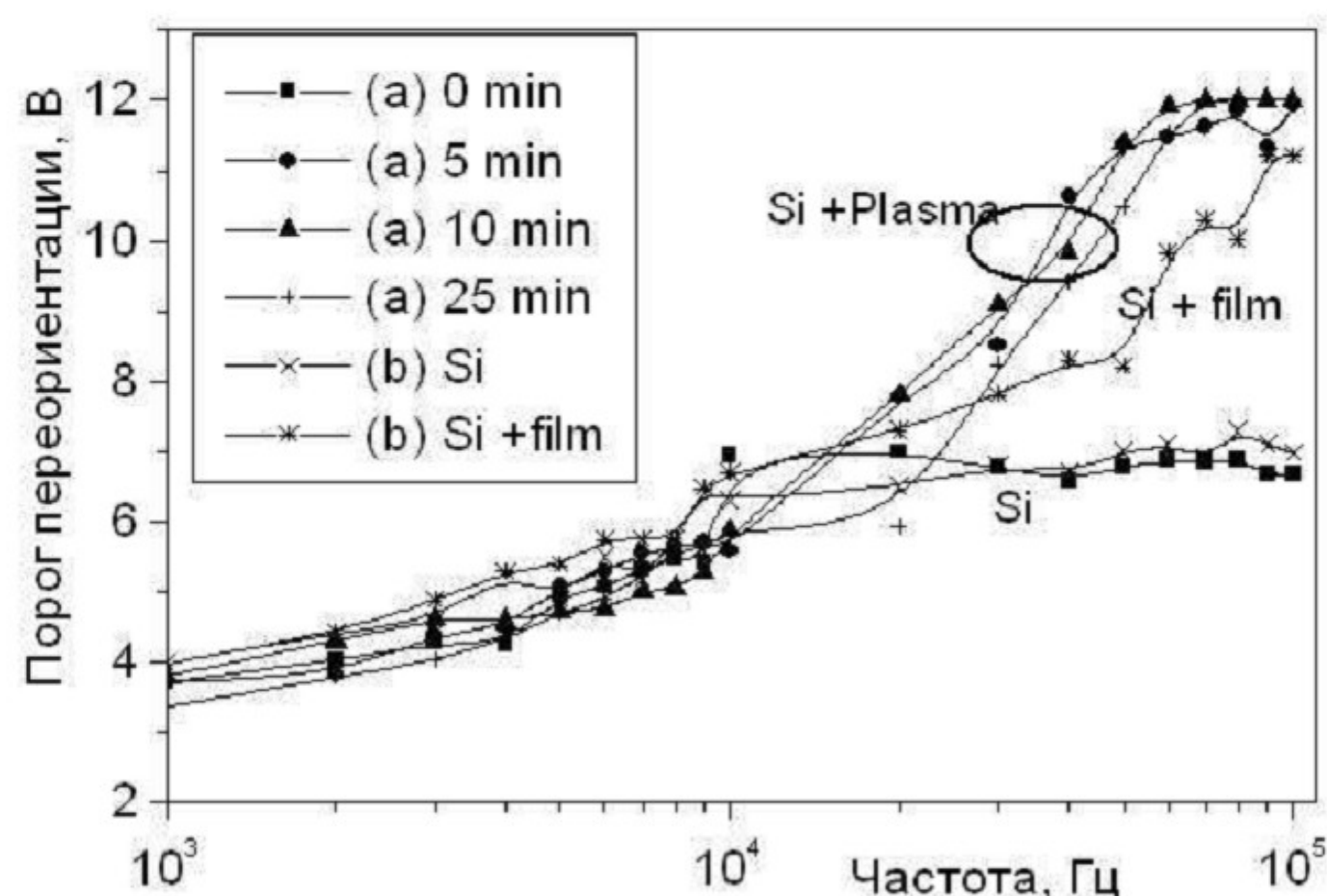


Рис. 2.

Из анализа динамики установления равновесного состояния переориентации нематика следует, что при частоте ниже 10^4 Гц переориентация устанавливается практически мгновенно при включении ступеньки тестирующего напряжения, тогда как при частотах выше указанной величины заметна временная задержка. Данный экспериментальный факт непосредственно указывает на протекающие процессы накопления и формирования объёмного заряда в слое ЖК. Несмотря на то, что чёткого соответствия между величиной пороговых напряжений и временем обработки плазмой соответствующего участка кремния установить затруднительно, с точки зрения визуализации, эти области разрешаются при напряжениях выше пороговых. Такое декорирование облучённых поверхностей кремния в ячейке объясняется следующим образом. При напряжениях близких к пороговым (и при допороговых) вкладом приповерхностного слоя ЖК в суммарное двулучепреломление можно пренебречь по сравнению с вкладом от объёма, на который оказывает основное влияние жёсткое сцепление на верхней подложке. Поэтому облученные области кремния не визуализируются. При воздействии поля выше порогового, двулучепреломление объёма практически становится равным нулю (благодаря гомеотропной ориентации нематика), поэтому вклад в общее двулучепреломление слоя ЖК обусловлен именно приповерхностным (у кремния) слоем ЖК, где имеются различия в исходной ориентации нематика на облученных поверхностях кремния.

Принимая во внимание, что измерение порогового напряжения производилось в условиях достаточно сильной засветки ячейки осветительной системой микроскопа, можно исключить формирование высокоомного обеднённого приповерхностного слоя [3] в кремнии и, следовательно, пренебречь соответствующим падением напряжения на этом слое.

Учитывая, что в плазме присутствует кислород, мы связываем изменение пороговых напряжений с формированием окисной плёнки на поверхности кремния. Исследование поверхности кремния РЭМ, косвенно (по характерному светлomu фону, который дают диэлектрические поверхности), позволяет допустить присутствие окисной плёнки на обработанной плазмой поверхности кремния, рис. 3.



Рис. 3.

Другим косвенным доказательством влияния окисной плёнки (целенаправленно полученной) на пороговые напряжения переориентации нематика служат результаты следующего эксперимента. В жидкокристаллической ячейке при анодном смещении [4] относительно кремния на его поверхности был сформирован участок диэлектрической наноразмерной плёнки (также хорошо регистрируемой РЭМ). Далее, на основе этого образца кремния была собрана ЖК ячейка толщиной 5 мкм с жёсткими планарными условиями на верхней подложке. Измерение пороговых напряжений переориентации нематика показало, что над плёнкой (и чистым кремнием) характер изменения порогового напряжения от частоты (кривые Si и Si + film, рис. 2) аналогичен поведению кривых над кремнием, обработанным плазмой, рис. 2.

Исследование переориентации нематика при действии постоянного напряжения в структуре на основе кремния, обработанного плазмой показало, что такая переориентация имеет существенно несимметричный характер. При положительном смещении относительно кремния порог переориентации наблюдается при напряжении около 5 В над необработанной плазмой поверхностью кремния и около 8 В – над кремнием, обработанным плазмой соответственно, т.е. имеется заметное увеличение порога. При отрицательном смещении, порог над необработанным кремнием примерно равен 10 В, а над обработанным плазмой он превосходит 15 В. Мы связываем несимметричность пороговых напряжений при разной полярности и различие в величине над облучённой и необлучённой поверхностями при одной и той же полярности с формированием электрического поля объёмного заряда в ЖК-слое, который обусловлен ионной адсорбцией на окисной плёнке.

Далее исследовалась светочувствительность нематической ячейки, собранной на основе кремния, обработанного плазмой в условиях слабой внешней засветки оптическим микроскопом. Под светочувствительностью участка ячейки принимается реакция ориентированного жидкого кристалла в ответ на освещение этого участка ячейки. В работе, для контроля светочувствительности, использовался He-Ne (0,6 мкм) лазер. Наличие светочувствительности фрагмента ячейки является прямым доказательством формирования в этом месте ячейки обеднённого основными носителями заряда слоя в кремнии. В работе контролировались два хорошо различимых друг от друга проявления (вида) светочувствительности ячейки. Первый (пятнистый (S)) вид соответствует переориентации нематика с достаточно высоким разрешением. Он повторяет распределение интенсивности света в падающем на кремний световом луче. Второй (общий (O)) вид, при котором имеет место переориентация нематика на сравнительно больших участках ячейки, т.е. без детального декорирования распределения интенсивности в луче света. В исследуемой ячейке (S) светочувствительность следует за (O) светочувствительностью при увеличении как напряжения, так и частоты. Необходимо отметить, что светочувствительность обоих типов в данной ячейке достаточно слабая.



Рис. 4.

Отличие светочувствительности в случае (S) от случая (O) обусловлено шириной обеднённого слоя в кремнии. В (S)-случае ширина обеднённого слоя меньше, чем во втором – (O)-случае. На это косвенно указывает следующий экспериментальный результат, фиксируемый в рассматриваемой ячейке, который связан с визуализацией дефектов (трещин) на поверхности кремния. Установлено, что, при некоторой частоте тестирующего напряжения, на поверхности конкретного облучённого участка кремния, в случае (S) светочувствительность переходит в светочувствительность (O)-случая, и при этом также меняется характер визуализации трещин на поверхности кремния. При светочувствительности (S) типа, визуализация трещин осуществляется благодаря узкой полоске переориентированного нематика вдоль трещин [5], а при светочувствительности (O) типа визуализация может быть достигнута только за счёт дополнительного неоднородного освещения поверхности кремния в окрестности трещины. В последнем случае необходимость неоднородного освещения поверхности кремния связана с достижением максимально возможной разницы (в плоскости ячейки) между электрическим



сопротивлением поверхности кремния (за счёт генерации неравновесных носителей) по разные стороны от трещины, рис. 4. Это как раз и указывает на то, что начальная (без световой генерации) ширина обеднения слоя сравнима (или больше) с глубиной трещины.

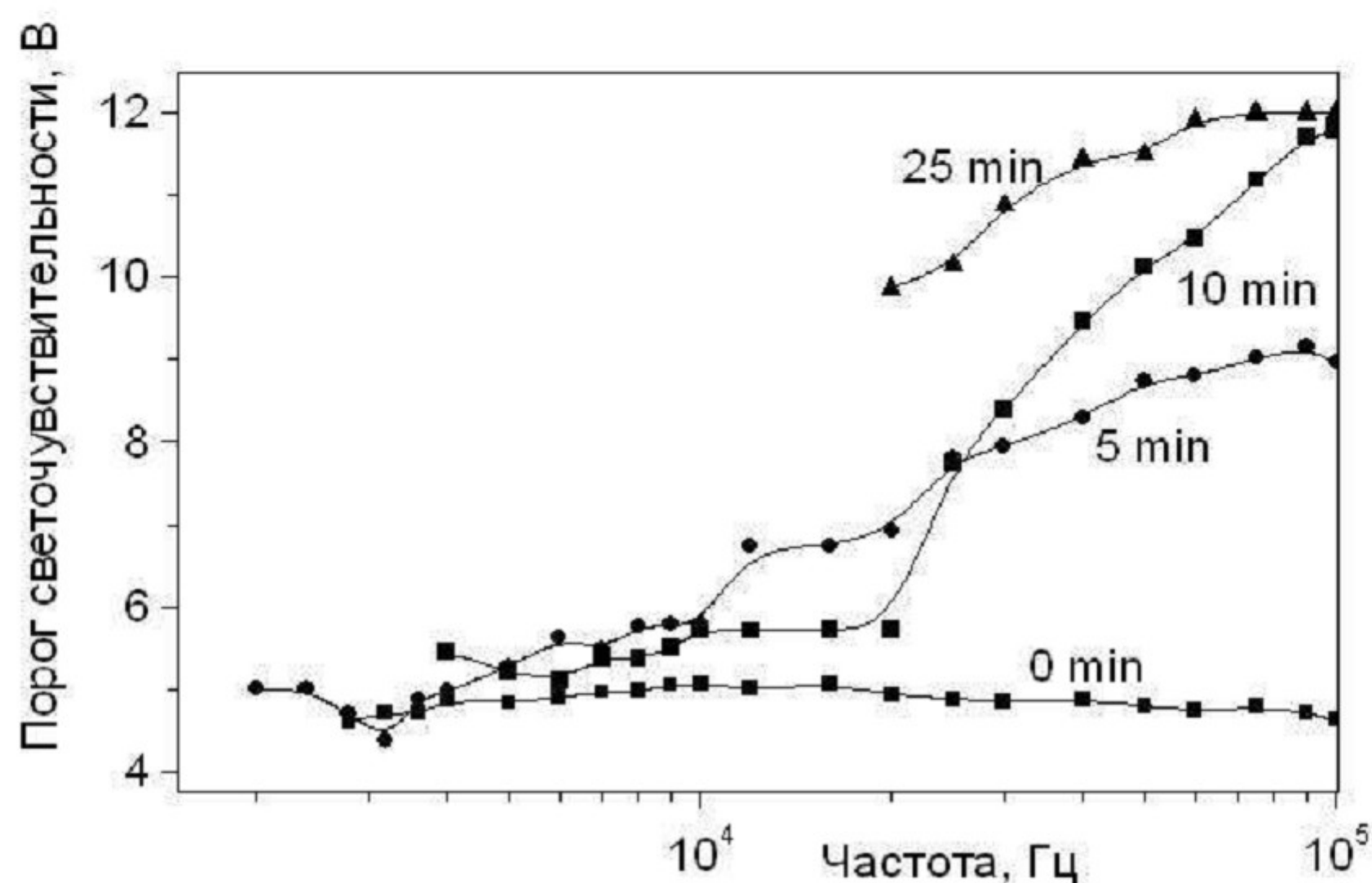


Рис. 5.

На рис. 5 представлена зависимость порога светочувствительности от частоты тестирующего напряжения для разных участков поверхности кремния. Хорошо просматривается общий характер поведения пороговых напряжений для разных поверхностей кремния. Для частот выше 10^4 Гц видно, что с ростом времени обработки плазмой поверхности кремния увеличивается пороговое напряжение светочувствительности, а также начинают появляться различия в порогах светочувствительности участков кремния с разной дозой облучения плазмой. Следует также отметить, что для необработанной поверхности кремния величина порога появления светочувствительности практически остается неизменной (рис. 5). С качественной точки зрения поведение порога светочувствительности аналогично поведению кривых порогового напряжения переориентации.

Принимая во внимание, что энергия ионов Ar^+ в плазме недостаточна для создания поверхностных дефектов кристаллической решетки, которые могли бы быть центрами поверхностных (донорных или акцепторных) состояний, мы связываем сдвиг пороговых напряжений светочувствительности в сторону увеличения с формированием встроенного в окисел заряда или/и, как указывалось выше, с ионной адсорбцией на наноразмерной окисной плёнке. Адсорбированные заряды эффективно влияют на процесс как формирования поля объёмного заряда, так и, благодаря эффекту поля, на поверхностную проводимость кремния. Отметим, что при локальном освещении поверхности кремния (как облучённого, так и необлучённого плазмой) лазерным излучением в исследуемой ячейке не регистрируется зарождение доменной переориентации [6] ни при каких условиях электрического возбуждения ячейки. Это косвенно подтверждает факт инверсии



типа проводимости кремния после обработки плазмой. На факт инверсии указывают также результаты исследования светочувствительности ячейки при возбуждении её постоянным напряжением. Установлено, что светочувствительность наблюдается только при полярности $+U$ относительно кремния.

3. Выводы. Обработка поверхности кремния плазмой, содержащей кислород, приводит к изменению пороговых напряжений переориентации нематика и светочувствительности в структуре Si/нематик/ITO. С ростом дозы облучения пороговые напряжения переориентации и светочувствительность увеличиваются в диапазоне частот выше 104 Гц. Увеличение пороговых напряжений связывается с формированием электрического поля объёмного заряда, формирующегося вследствие дополнительной ионной адсорбции на окисной плёнке. Благодаря эффекту поля, адсорбированный заряд также вызывает изменение поверхностной проводимости кремния. Другой стороной полученных результатов является демонстрация возможности визуализации в нематической ячейке участков поверхности кремния обработанных плазмой, что может быть использовано в неразрушающем контроле поверхности кремния, подвергнутому процессам технологической обработки.

Авторы выражают благодарность за предоставленную возможность использовать оборудование центра коллективного пользования БелГУ.

Литература

1. Сихарулидзе Д.Г., Чилая Г.С. Преобразователи изображений типа МДП – электрооптический материал / Д.Г. Сихарулидзе. – М.: Радио и связь, 1986.
2. Блинов Л.М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов / Л.М. Блинов. – М.: Наука, 1978. – 384 с.
3. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем / Р. Маллер. – пер. с англ. М.:Мир, 1989. – 630 с.
4. Gritsenko N.I., Kucheev S.I., Litvin P.M. Passivation of silicon surface by ultrathin dielectric film in M/Si/nematic/ITO structures // *Semicond. Phys., Quant.Elect.and Optoelect.* – 2004. – 7;2. – P.154-156.
5. Бухели Е.П., Кучеев С.И. Детектирование нано-размерных механических дефектов на поверхности кремния в нематической ячейке // *Научные ведомости БелГУ, Сер. Физика, Математика.* – 2008. – 9(49);14. – С.193-197.
6. Кучеев С.И., Тучина Ю.С. Доменная переориентация нематика в структуре Si/нематик/ITO // *Научные Ведомости БелГУ, Сер. Физика, Математика.* – 2010. – 11(82);19. – С.95-100.



ELECTROOPTICS OF NEMATIC CELL BASED ON SILICON TREATED BY PLASMA

S.I. Kucheev, Yu.S. Tuchina

Belgorod State University,
Studencheskaya St., 14, Belgorod, 308007, Russia, e-mail: kucheev@bsu.edu.ru

Abstract. The reorientation of nematic liquid crystal and light sensitivity of silicon/nematic/ITO structure with the plasma treated silicon are investigated. It is shown that the threshold voltages of reorientation and light sensitivity increase in accordance with the growth of plasma irradiation dose. For this, it is supposed that the change of threshold voltages of reorientation and light sensitivity is connected with the formation of nano-dimension oxide film on silicon surface that induces in turn the additional ion adsorption on surface and, as the sequence, it leads to the space charge formation in liquid crystal layer.

Key words: nematic liquid crystal, silicon, light sensitivity, threshold voltage, reorientation.