

## ДЕТЕКТИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ В НЕМАТИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ

Е. П. Бухели, С. И. Кучеев

Белгородский государственный университет.  
Студенческая 14, г Белгород 308007, Россия, e-mail: kuchehev@bsu.edu.ru

Экспериментально продемонстрирована возможность детектировать месторасположение nano-размерных механических дефектов поверхности кремния в нематической ячейке поляризационным оптическим микроскопом. Визуализация месторасположения дефекта осуществляется за счет изменения ориентации жидкого кристалла в узкой полоске в окрестности дефекта. Механизм визуализации связан с обеднением поверхности кремния основными носителями заряда под действием электрического поля ионного заряда, накопленного в жидком кристалле и соответствующим перераспределением напряжения приложенного к ячейке между слоем жидкого кристалла и обедненным слоем в кремнии.

**Ключевые слова:** нематик, кремний, визуализация дефектов, эффект поля, ионы в нематике.

### Введение

Одним из видов механических дефектов поверхности кремния являются микро(нано) размерные трещины, царапины, которые могут образовываться при механической обработке поверхности. С увеличением степени интеграции кремниевых приборов nano-размерные дефекты могут значительно уменьшить выход годных. Поэтому к поверхности кремния предъявляются высокие требования, и соответственно, разработка методов контроля поверхности кремния остается актуальной задачей.

Хорошо известны такие высокоразрешающие методы исследования поверхности, как РЭМ (растровая электронная микроскопия), АСМ (атомно-силовая микроскопия). Физические принципы лежащие в основе этих методов хорошо известны, например, в РЭМ получение изображения поверхности основано на особенностях возникновения вторичных электронов, в АСМ изображение строится в соответствии с величиной взаимодействия nano острия с поверхностью. Существенным недостатком оптической микроскопии является дифракционное ограничение, не позволяющее регистрировать дефекты с размерами порядка (и менее) длины волны света. В данной работе в основу физического механизма визуализации nano-размерных дефектов поверхности кремния (их месторасположения) положены особенности формирования обедненного приповерхностного слоя в кремнии в окрестности дефекта. Благодаря соответствующему электрооптическому отклику жидкокристаллического слоя в жидкокристаллической ячейке появляется возможность позиционировать дефекты поверхности при большом поле зрения оптического микроскопа.

### Эксперимент

В эксперименте исследовалась поверхность монокристаллического кремния p-типа проводимости с удельным сопротивлением 4,5 Ом × см. Поверхность кремния была изучена с помощью РЭМ Quanta 200 3D с целью поиска nano-размерных дефектов (царапин) в окрестности реперной области (СН), которая была предварительно сформирована в виде прямоугольной углеродной пленки размером 100×175 мкм с помощью электронного луча, [1], рис. 1. Необходимо отметить, что микро, а тем более nano-размерные царапины представляют из себя малоконтрастные объекты для наблюдения при данном (сравнимым с увеличением оптического микроскопа) увеличении РЭМ.

Поэтому требуется использовать или большее увеличение РЭМ или использовать другие принципы визуализации, например визуализация в ионном луче. Однако при этом начинает проявляться проблема поиска месторасположения нано-размерного дефекта поверхности.

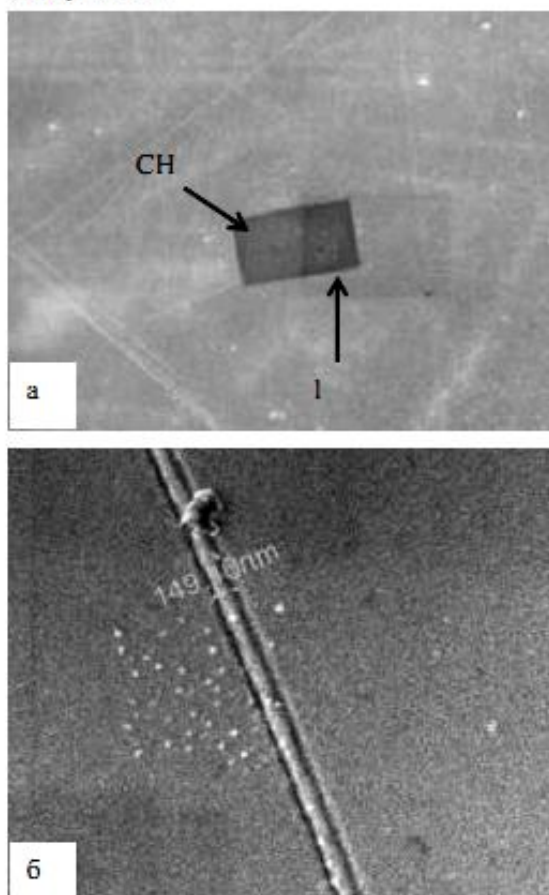


Рис. 1 а) РЭМ ( $300\times$ ) изображение поверхности кремния в окрестности реперной (СН) области.

б) РЭМ ( $50000\times$ ) изображение нано-размерной двойной царапины шириной  $\sim 150$  нм.

Стрелка 1 – ориентировочное месторасположение царапины

Далее образец кремния был использован в качестве подложки в жидкокристаллической ячейке сэндвич типа. Референтной поверхностью в жидкокристаллической ячейке служила поверхность окиси индия (ИТО) с полиимидной пленкой, натертой в одном направлении, которая задавала планарную ориентацию молекул жидкого кристалла. Толщина слоя жидкого кристалла поддерживалась фторопластовыми прокладками и составляла 5 мкм. Использовался нематический жидкий кристалл 5СВ, который заправлялся в ячейку в изотропной фазе за счет капиллярных сил.

Визуализация месторасположения микро(нано)-размерных дефектов в нематической ячейке осуществляется при прикладывании к ячейке переменного напряжения. С целью изучения механизма визуализации переменное напряжение подавалось на ячейку следующим образом. Первоначально плавно увеличивалось от 0 В до напряжения, которое соответствует переходу Фредерикса. Далее изменялось ступенчато, увеличиваясь каждый раз на 0,1 вольта. При каждом последующем значении напряжения ячейка выдерживалась до момента начала визуализации дефекта. После этого ячейка электрически закорачивалась на 20 минут, а затем напряжение вновь увеличивалось на 0,1 вольта от предыдущего значения и проводилось новое измерение момента времени начала визуализации

дефекта. Электрическое закорачивание ячейки требовалось для релаксации объемного заряда. В ходе эксперимента контролировалась светочувствительность интересующего участка нематической ячейки. С этой целью данный участок ячейки освещался He-Ne (0,63 мкм) лазером. Переориентация нематика в области лазерного пятна на поверхности кремния указывала на то, что в данном месте ячейки в приповерхностном слое кремния формируется обедненный основными носителями заряда слой [2].

Рис. 2 демонстрирует визуализацию микро (нано)-размерных дефектов в нематической ячейке. Визуализация наступает после соответствующей временной выдержки нематической ячейки под действием данной величины напряжения (см. рис. 3 кривая 1). Хорошо видно, что визуализация месторасположения механических дефектов осуществляется благодаря изменению ориентации нематика в узкой полоске прилегаю-

щей к данному дефекту (см. рис. 1, в). Одновременно с началом визуализации дефектов появляется светочувствительность ячейки. Однако в области непосредственно прилегающей к дефекту (в области полосок) светочувствительность ячейки отсутствует.

Заметно явное преимущество в контрасте изображения полученного в нематической ячейке по сравнению с изображением полученным в РЭМ при сравнимых увеличениях (рис. 1, а и рис. 2, б). Более того, на рис. 2 стрелка 2 указывает на дефект, который уверенно визуализируется в нематической ячейке, однако не был разрешен с помощью РЭМ. По всей видимости, в данном случае проявился недостаток РЭМ, связанный с зарядкой исследуемой поверхности электронным лучом и соответствующим подпылением этого заряженного участка углеродной пленкой [3], что ухудшает контрастность изображения.

Рис. 3 (кривая 1) демонстрирует типичную зависимость периода времени действия напряжения приложенного к ячейке, которое необходимо для начала визуализации наноразмерного дефекта. Принимая во внимание, что временная задержка между моментом включения напряжения и началом визуализации трещин (рис.2 кривая 1) значительно превышает характерное время классической реакции нематика на внешнее поле [4], мы связываем механизм визуализации дефекта с накоплением ионных зарядов в жидком кристалле и влиянием этих зарядов на поверхностную проводимость кремния посредством электрического поля (эффект поля). Вследствии электрической несимметричности жидкокристаллической ячейки (разные материалы по типу проводимости, разные электрохимические реакции на границах кремний/жидкий кристалл и ИТО/жидкий кристалл, а также наличие контакта металл/кремний) переменное напряжение, приложенное к ячейке частично выпрямляется. Это вызывает дрейф ионов в жидком кристалле. Накапливающийся ионный заряд у поверхности кремния, благодаря эффекту поля, вы-

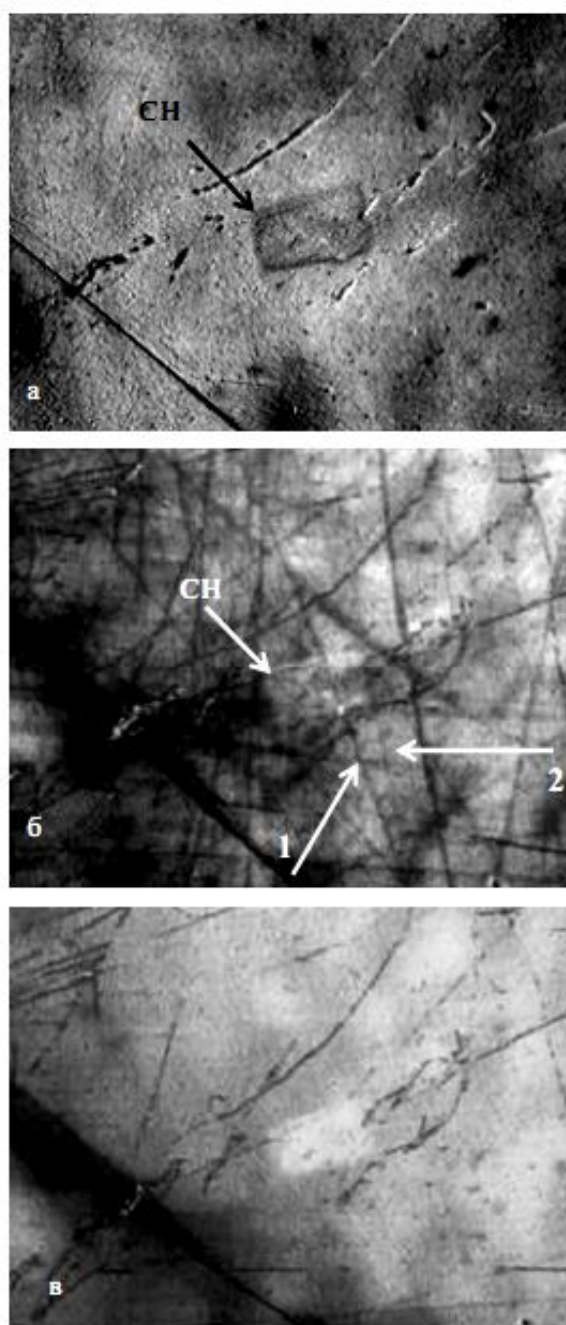


Рис.2. Визуализация микро(нано)размерных дефектов поверхности кремния в нематической ячейке. Напряжение, В: а-0; б-2,1; в-3,1. Частота  $2 \cdot 10^4$  Гц.

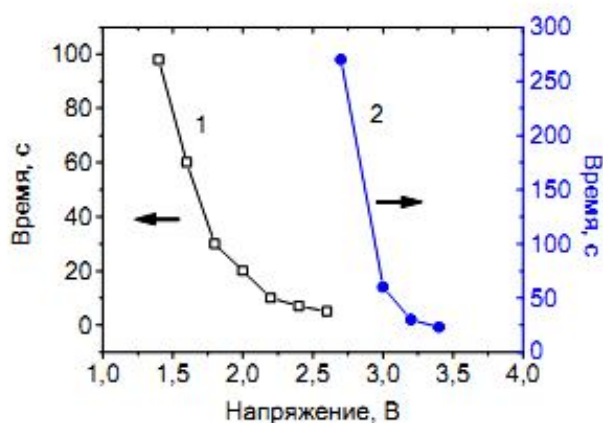


Рис.3. 1 – Требуемая длительность действия напряжения приложенного к ячейке для начала визуализации nano-размерного дефекта.  
2 – Типичная зависимость периода времени визуализации дефекта от приложенного напряжения.  
Частота  $2 \cdot 10^4$  Гц.

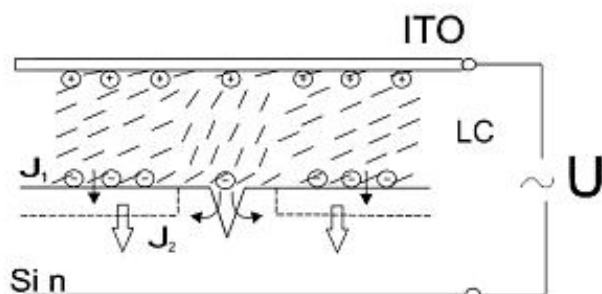


Рис.4. Переориентация нематика в окрестности дефекта поверхности кремния.  
Пунктирная линия – граница обедненного приповерхностного слоя;  
 $J_1$  – ток утечки из жидкого кристалла в кремний;  
 $J_2$  – ток оттока от поверхности основных носителей заряда в кремнии

также и в области дефектов. Исчезновение визуализации дефектов (но при наличии светочувствительности ячейки), означает, что 1) процесс накопления заряда происходит весь период времени пока действует напряжение и 2) толщина обедненного слоя увеличивается и оказывается больше чем глубина микро (нано)-размерных дефектов.

#### Заключение

Таким образом, в работе показано, что nano-размерные дефекты поверхности кремния могут быть визуализированы оптическим микроскопом в нематической ячейке. Механизм визуализации связан с обеднением поверхности кремния под действием электрического поля ионного заряда накапливающегося в жидком кристалле у поверх-

зывает формирование высокоомного обедненного основными носителями заряда приповерхностного слоя, рис. 4. На этом высокоомном слое падает часть внешнего напряжения. Однако в области дефекта поверхность кремния более развита, поэтому токи утечки  $J_1$  преобладают над токами оттока  $J_2$  носителей в объем кремния, что препятствует (частично или полностью) формированию обедненного слоя. Поэтому в непосредственной окрестности дефекта приложенное напряжение к ячейке падает в основном на слое жк, вызывая дополнительную (к уже имеющейся по всей ячейке) переориентацию нематика, рис. 4. В области дефекта светочувствительность не регистрируется, что подтверждает отсутствие в этом месте обедненного слоя в кремнии, рис. 4.

На рис. 3 кривая 2 демонстрирует зависимость времени визуализации дефекта от величины напряжения прикладываемого к ячейке. На приведенной кривой видно, что начиная приблизительно с 2,75 В временной интервал, в течении которого имеет место визуализация дефектов начинает резко сокращаться. По истечении этого временного интервала визуализация дефектов исчезает, рис. 1 г, однако светочувствительность ячейки остается. Светочувствительность ячейки появляется

ности кремния. Благодаря более развитой поверхности дефекта обеднение в этом месте поверхности отсутствует, поэтому приложенное к ячейке напряжение в области дефекта почти полностью падает на слое жк. Переориентированный нематик в окрестности дефекта визуализирует месторасположение этого дефекта на поверхности кремния в поляризованном свете. Очевидным преимуществом метода является возможность охватывать большое поле исследуемой поверхности оптическим микроскопом. Метод отличается простотой и не требует дорогостоящего оборудования, но при этом одновременно демонстрирует высокий контраст и чувствительность при сравнимых увеличениях РЭМ и оптического микроскопа.

Авторы благодарят Центр коллективного пользования оборудованием Белгородского государственного университета за предоставленную возможность исследовать образцы с помощью РЭМ. Работа частично выполнена в рамках внутривузовского гранта Белгородского государственного университета.

#### Литература

1. Kucheev S. I., Litvin P.M., Tkach V.N., Chigrinov V.G. EuroDisplay'2007, p. 302-305.
2. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем: Пер.с англ. М.: Мир, 1989. - 630 с.
3. Д. Голдстейн, Х. Яковиц. Практическая растровая электронная микроскопия. М.: Мир, 1978, 250 с.
4. Л. М. Блинов. Электро-и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука, 1978, 335с.

## DETECTION OF NANO-SCALING MECHANICAL DEFECTS ON SILICON SURFACE IN NEMATIC CELL

E.P. Bucheli, S.I. Kucheev

Belgorod State University  
Studencheskaya 14 str, Belgorod 308007, Russian Federation

The possibility to detect the nano-scaling mechanical defects on silicon surface in nematic cell with polarizing microscopy is demonstrated experimentally. The visualization of local position of defects is due to the change of liquid crystal molecules orientation within thin bond in the vicinity of the defects. Physical mechanism of visualization is associated with silicon surface depletion by major charge carriers under electric field of ions collected in liquid crystal and with subsequent redistribution of applied voltage between liquid crystal and depleted layers.

**Key words:** nematic, silicon, visualization of defects, field effect, ions in nematic.