

Визуализация в жидкокристаллической ячейке распределения заряда, имплантированного в SiO₂/Si фокусированным ионным пучком

Колесников Д. А.^{ORCID}, Кучеев С. И.^{ORCID}

(Статья представлена членом редакционной коллегии Носковым А. В.)

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

kolesnikov_d@bsuedu.ru, kucheev@bsuedu.ru

Аннотация. Экспериментально показано, что в жидкокристаллической ячейке, в которой одна из подложек является структурой SiO₂/Si с имплантированным зарядом в пленке SiO₂ с помощью фокусированного пучка ионов Ga⁺ в сканирующем электронно-ионном микроскопе, возможна визуализация распределения этого заряда при использовании эффекта Фредерикса. Визуализация облученных участков SiO₂ без дополнительной обработки поверхности, становится возможной благодаря различию в двулучепреломлении жидкого кристалла (ЖК) над участками с разной дозой облучения. Установлено, что облучение SiO₂ дозой ~ 10¹¹ ион/см² вызывает формирование наклонной ориентации молекул ЖК 5CB на поверхности SiO₂. Визуализация облученных участков поверхности SiO₂ в ячейке с планарной ориентацией ЖК основывается на различии двулучепреломления ЖК над участками с разной дозой облучения, которое возникает вследствие перераспределения приложенного к ячейке напряжения между ЖК и структурой SiO₂/Si, из-за образования обедненного приповерхностного слоя в кремнии. На формирование обеднённого слоя влияют электрическое поле имплантированного заряда в SiO₂, и, как предполагается, токи утечек в Si через дефекты плёнки SiO₂. Оценка минимальной дозы облучения SiO₂, регистрируемой в планарной ЖК-ячейке, даёт величину ~ 2 * 10⁶ ион/см².

Ключевые слова: фокусированные ионные пучки, имплантированный заряд в окисле, эффект Фредерикса

Для цитирования: Колесников Д.А., Кучеев С.И. Визуализация в жидкокристаллической ячейке распределения заряда, имплантированного в SiO₂/Si фокусированным ионным пучком. *Прикладная математика & Физика*. 2026;58(2):195–205. DOI 10.52575/2687-0959-2026-58-2-195-205 EDN GEDVPL

Original Research

Distribution Imaging of Charge Implanted into SiO₂/Si using a Focused Ion Beam by a Liquid Crystal Cell

Dmitry A. Kolesnikov^{ORCID} Sergey I. Kucheev^{ORCID}

(Article submitted by a member of the editorial board Noskov A. V.)

Belgorod National Research University,
85 Pobedy St., Belgorod 308015, Russia

kolesnikov_d@bsuedu.ru, kucheev@bsuedu.ru

Abstract. It has been experimentally demonstrated that in a liquid crystal cell in which one of the substrates is a SiO₂/Si structure with an implanted charge in the SiO₂ film by means of a focused Ga⁺ ion beam in a scanning ion microscope imaging of this charge distribution is possible using the Fredericksz effect. Visualization of irradiated SiO₂ areas without additional surface treatment is made possible by the difference in the birefringence of the liquid crystal over areas with different irradiation doses. It was found that irradiation of SiO₂ with a dose of ~ 10¹¹ ions/cm² causes the formation of an inclined orientation of 5CB liquid crystal molecules on the SiO₂ surface. Visualization of irradiated SiO₂ surface areas in a cell with a planar liquid crystal orientation obtained by polyimide covering is based on the difference in the birefringence of the liquid crystal over areas with different irradiation doses. This difference arises from the redistribution of the voltage applied to the cell between the liquid crystal and the SiO₂/Si structure due to the formation of a depletion layer near the surface of silicon. The formation of the depletion layer is influenced by the electric field of the implanted charge in SiO₂ and, presumably, by leakage currents in Si through defects in the SiO₂ film. An estimate of the minimum irradiation dose of SiO₂ detected in a planar liquid crystal cell yields a value of ~ 2*10⁶ ions/cm².

Keywords: FIB, Charge Implanted in Oxide, Fredericksz Effect

For citation: Kolesnikov DA., Kucheev SI. Distribution Imaging of Charge Implanted into SiO₂/Si using a Focused Ion Beam by a Liquid Crystal Cell. *Applied Mathematics & Physics*. 2026;58(2):195–205. (In Russ.). DOI 10.52575/2687-0959-2026-58-2-195-205 EDN GEDVPL

1. Введение. Электрические заряды, локализованные в плёнке SiO₂ структуры SiO₂/Si (в объёме, на межфазной границе SiO₂/Si или на поверхности SiO₂) играют ключевую роль в функционировании

полупроводниковых приборов, в которых реализуется эффект поля [1]. Всесторонний анализ параметров локализации этого электрического заряда является неотъемлемым этапом совершенствования существующих или создания новых приборов, а также, не разрушающей инспекции отказов полупроводниковых изделий. При этом именно визуализация распределения электрических зарядов в плоскости диэлектрической пленки SiO_2 может представлять наибольший интерес при решении задач в разработке сенсоров химико-биологических сред. В таких приборах на границе SiO_2 с «мягкой» средой может иметь место адсорбция ионов [2] или их накопление и перераспределение в приповерхностном слое (в двойном электрическом слое), электрическое поле которых может влиять на поверхностную проводимость кремния в структуре SiO_2/Si [3, 4, 5]. С этой точки зрения визуализация распределения электрического заряда, осуществляемая за счет оптических (электрооптических) свойств «мягкой» среды будет рассматриваться как оптический способ получения информации с сенсора, в плоскости которого в слое «мягкой» среды протекают соответствующие физико-химико-биологические процессы. В таком варианте функционирования сенсор становится пространственно временным модулятором света, в котором происходит модуляция (амплитудная и/или фазовая) считывающей световой волны, с преимуществом в виде параллельного характера обработки и предоставления визуальной информации о протекающих процессах, в отличие от существующих сенсоров, функционирующих на эффекте поля, в которых главным элементом является ионно чувствительный полевой транзистор [6, 7] с последовательными электрическими преобразованиями. Принимая во внимание, что в сенсоре должен быть контакт с «мягкой» средой, а в качестве перспективных кандидатов «чувствительных» сред рассматриваются жидкие кристаллы [8, 9], становится очевидным, что методы, которые разработаны для изучения распределения электрических зарядов в диэлектриках с открытой поверхностью, такие как, например, метод вольт-фарадных характеристик, метод растровой электронной (ионной) микроскопии не применимы для данной цели из-за необходимости этапов предподготовки поверхности диэлектрика в виде термического напыления электропроводящих покрытий или помещения исследуемой структуры в вакуум, при которых существенно изменяются условия на поверхности. Картину распределения электрического заряда в плоскости диэлектрика могут обеспечить методы, представляющие собой разновидности атомной силовой микроскопии [10, 11], обладающие большой чувствительностью и высоким латеральным разрешением. Однако с точки зрения использования в сенсорных устройствах эти методы имеют существенные недостатки, а именно: (1) время-затратное сканирование поверхности кантилвером, (2) высокая чувствительность к механическим воздействиям, (3) сложное, дорогое и не компактное оборудование, которое не подразумевает его использование на удалении в изменяющихся окружающих условиях. Целью работы является демонстрация возможности визуализировать распределение имплантированного заряда в плоскости диэлектрической плёнки SiO_2 в структуре SiO_2/Si , используя эффект Фредерикса в нематическом ЖК.

2. Эксперимент. Структура Si/SiO_2 , которая использовалась в работе в качестве тестовой, представляла собой подложку монокристаллического кремния (Si) p – типа проводимости с удельным сопротивлением $4,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ с термически выращенной пленкой окиси кремния (SiO_2) толщиной 100 нм. Имплантирование электрического заряда в пленку SiO_2 с заданным распределением в её плоскости выполнялось сфокусированным ионным пучком в дуальном (электроны/ионы) сканирующем микроскопе Quanta 200 3D. Облучение осуществлялось ионами галлия (Ga^+) с энергией 30 кэВ под углом 0° к нормали.

Растр сканирования составлял 1024×884 пикселей. Доза облучения задавалась числом полных растров прохождения ионного пучка по поверхности выбранного участка пленки SiO_2 , его площадью, временем облучения единичного пикселя (dwell time), и током ионного пучка (1 нА). Области облучения представляли собой прямоугольные участки поверхности пленки SiO_2 , вложенные последовательно друг в друга с уменьшающимися размерами. Каждый последующий вложенный участок облучался с увеличенной дозой. Для шести участков поверхности пленки SiO_2 доза облучения контролировалась. Дозы облучения (ион/см²) этих участков, начиная с 1-го, были следующими: 1-й – 6.6×10^7 ; 2-й – 4.2×10^8 ; 3-й – 7.36×10^9 ; 4-й – 1.7×10^{11} ; 5-й – 3.1×10^{12} ; 6-й – 3.67×10^{13} . Принимая во внимание, что дозы облучения участков изменяются практически на один порядок, суммированием доз из-за перекрытия площадей облучения пренебрегали.

На рис. 1а представлено изображение фрагмента поверхности пленки SiO_2 после её облучения, которое получено в оптический микроскоп. Видно, что облученные участки пленки на данном изображении практически не визуализируются. После значительного увеличения контраста участки (4, 5 и 6), которые соответствуют наибольшим дозами облучения, становятся визуально разрешёнными, рис. 1б.

Визуализацию этих участков можно объяснить наличием дефектов в пленке SiO_2 , возникшим в результате ионного облучения, на которых происходит дополнительное рассеяние света, причем, чем больше доза облучения, тем большее рассеяние света. Однако такой закономерности подчиняются только 4-й и 5-й участки (рис. 1б).

Для 6-го участка такая закономерность не выполняется несмотря на то, что доза облучения 6-го участка больше дозы облучения 4-го и 5-го участков. На 6-м участке визуально не наблюдается какое-либо

рассеяние света (рис. 1b). Месторасположение этого участка регистрируется на контрасте с предыдущим 5-м участком.

На рис. 1c представлено оптическое изображение поверхности SiO_2 с облученными участками, полученное методом конденсации водяного пара. Из приведенной иллюстрации видно, что облученные участки визуализируются за счет декорирования границ между ними, и визуализация начинается с границы 2-го участка. Граница 1-го участка этим методом не обнаруживается, а 5-й и 6-й участки не разрешаются на фоне 4-го участка. Декорирование участков этим методом может служить дополнительным аргументом в пользу присутствия электрических зарядов разной величины на разных участках поверхности SiO_2 .

На рис. 1d приведено изображение поверхности SiO_2 , охватывающее все шесть облученных участков, которое получено в режиме сканирования сфокусированным ионным пучком. Параметры сканирования ионным пучком поверхности SiO_2 при получении этого снимка были такими же, как для 1-го участка, за исключением увеличенной площади. Из приведенной иллюстрации видно, что уровень почернения визуализируемых участков (в среднем) увеличивается с ростом номера участка, что качественно согласуется с фактом увеличения дозы в эксперименте по облучению. Участки 5 и 6 не разрешаются на фоне 4-го участка. Последний факт можно рассматривать как проявление недостатков метода растровой ионной микроскопии, которые связаны с электрической зарядкой как объема, так и поверхности диэлектрика SiO_2 . Имеющиеся отклонения в степени почернения от среднего, например, некоторых фрагментов поверхности 1-го и 2-го участков, или фрагмента F на поверхности 2-го участка могут быть связаны с исходным загрязнением поверхности SiO_2 перед облучением, но более вероятно, связаны с дополнительными и не продолжительными актами облучения при «настройках» ионного пучка. «Настройки» включали в себя ступенчатые изменения формы и местоположения сканов поверхности (отличающиеся от вышеупомянутых шести участков), происходившие при «привязке» ионного пучка к реперной метке на поверхности SiO_2 .

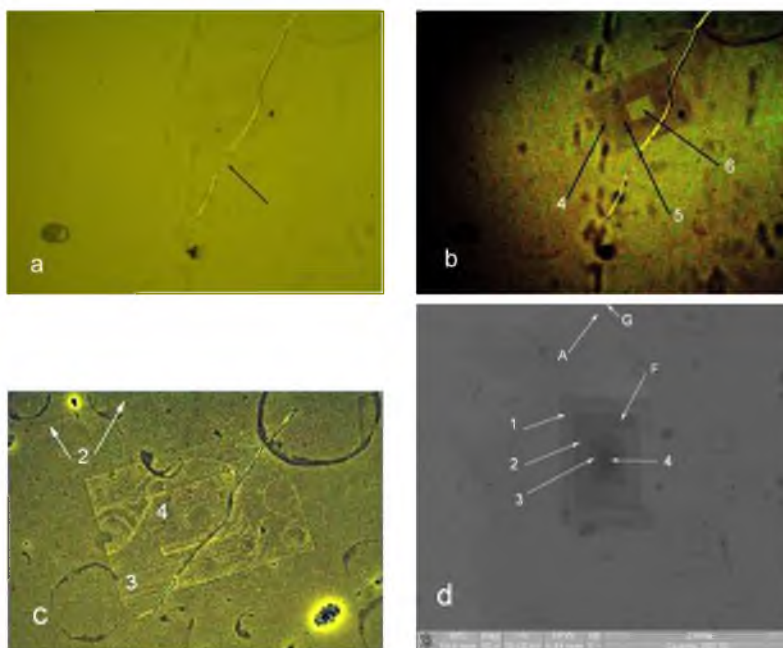


Рис. 1. Поверхность пленки SiO_2 с облученными участками. а) Оптическое изображение (исходное). Стрелкой отмечена царапина на пленке SiO_2 , выполняющая роль реперной метки. Масштаб – 200 мкм. б) Оптическое изображение того-же участка пленки SiO_2 после 3-кратного увеличения контраста. в) Визуализация облученных участков пленки SiO_2 методом конденсации водяного пара. г) Снимок поверхности SiO_2 , полученный сфокусированным ионным пучком. F – прямоугольный фрагмент на 2-м участке. «A» – фрагмент поверхности SiO_2 на краю снимка. «G» – граница снимка

Fig. 1. The surface of the SiO_2 film with irradiated areas. a) Optical image (original). The arrow indicates a scratch on the SiO_2 film, which serves as a reference mark. Scale – 200 mkm. b) Optical image of the same area of the SiO_2 film after triple increasing the contrast. c) Visualization of irradiated areas of the SiO_2 film by the water vapor condensation method. d) Image of the SiO_2 surface obtained with a focused ion beam. F – rectangular fragment in the 2-nd area. "A" – fragment of the SiO_2 surface at the edge of the image. "G" – border of the image

Далее в экспериментах структура SiO_2/Si была использована в качестве нижней подложки в жидко-кристаллической ячейке. В этих экспериментах поверхность SiO_2 структуры после облучения ионным пучком кроме очистки диметилформамидом не подвергалась какой-либо дополнительной специальной обработке с целью получения предпочтительной ориентации молекул ЖК. Верхним электродом в

ЖК-ячейке служила пленка окиси индия (ITO) на стеклянной пластинке. На поверхность ITO наносилась плёнка полиимида, которая натиралась в одном направлении. Это обеспечивало однородную планарную ориентацию молекул ЖК на этой поверхности. Толщина ЖК 5СВ была 10 мкм. Наблюдение проводилось в поляризационный микроскоп со скрещенными поляризаторами в отраженном режиме. К ЖК-ячейке прикладывалось управляющее переменное напряжение U_{ac} .

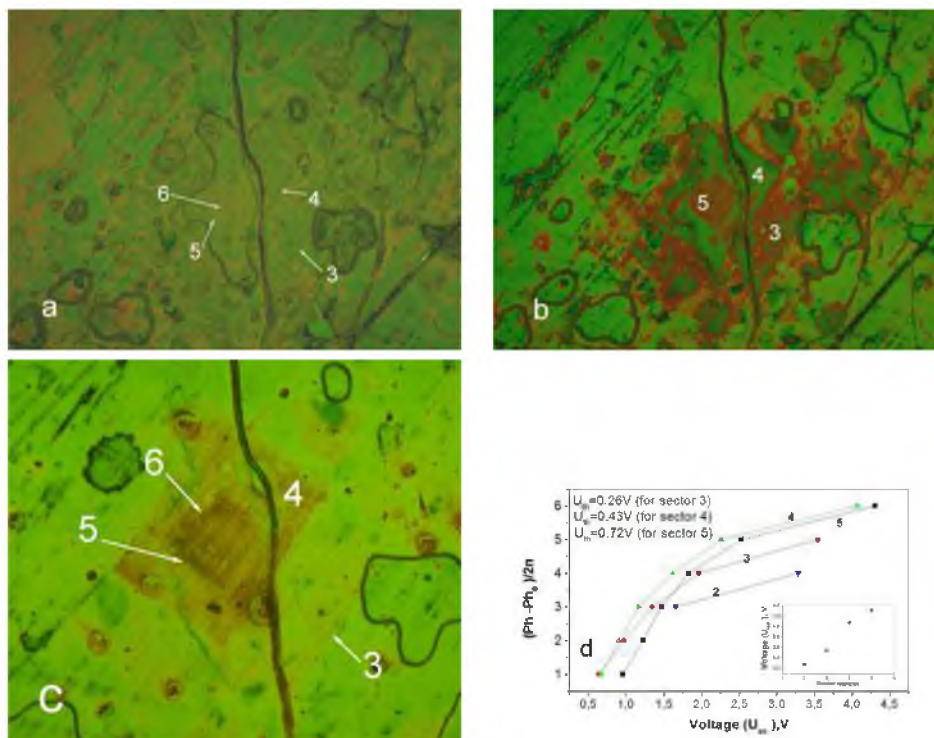


Рис. 2. Поляризационное изображение фрагмента ЖК-ячейки с облученными участками пленки SiO_2 . Частота 60 кГц. Напряжение U_{ac} , В: а) – 0; б) – 2.02; в) – 5.03. д) Зависимость фазовой задержки от приложенного к ЖК-ячейке напряжения U_{ac} . (2, 3, 4, 5) – номера участков пленки SiO_2 . Вставка: Зависимость напряжения U_{last} от номера участка. Fig. 2. Polarization image of a fragment of an LC cell with irradiated areas of the SiO_2 film. Frequency 60 kHz. Voltage U_{ac} , V: а) – 0; б) – 2.02; в) – 5.03. д) Dependence of the phase retardance on the voltage U_{ac} applied to the LC cell. (2, 3, 4, 5) – numbers of areas of the SiO_2 film. Inset: Dependence of voltage U_{last} on the area number

На рис. 2а представлено поляризационное изображение ЖК-ячейки с облученными участками пленки SiO_2 (без приложенного к ячейке управляющего напряжения). Видно, что 3-й, 4-й, 5-й и 6-й участки слабоконтрастно проявляют себя за счет фрагментарного декорирования границ между собой. Границы участков 1 и 2 не регистрируются. Принимая во внимание однородность ориентации молекул ЖК на верхнем электроде ITO, факт визуализации указанных выше участков можно объяснить тем, что углы преднаклона молекул ЖК над этими участками SiO_2 в ЖК-ячейке отличаются друг от друга.

При прикладывании к ЖК-ячейке напряжения U_{ac} контраст картины визуализации облученных участков SiO_2 значительно увеличивается. Это связано с изменением фазовой задержки между обыкновенным и необыкновенным лучами в результате переориентации молекул ЖК над участками, и как следствие, псевдоокрашиванием слоя ЖК в поляризованном свете. В качестве примера на рис. 2б отображена картина визуализации 3-го, 4-го и 5-го участков на фоне друг друга.

Известно, что зависимость пропускания света ЖК-слоем от приложенного напряжения в эффекте Фредерикса имеет осциллирующий вид [12], причём в последовательности максимумов интенсивности интерференции монохроматического света последний максимум наиболее широкий и хорошо отделен по величине напряжения (далее U_{last}) от значений напряжений, соответствующих предыдущим максимумам. По максимумам пропускания монохроматического света через ЖК-слой была построена зависимость фазовой задержки (Ph) (относительно начальной (Ph_0)) от приложенного напряжения U_{ac} для визуализируемых участков SiO_2 , рис. 2д. Из приведенных кривых следует, что с ростом порядкового номера участка (для 3-го, 4-го и 5-го) возрастает пороговое напряжение (U_{th} , рис. 2д) переориентации молекул ЖК в эффекте Фредерикса, а также возрастает напряжение U_{last} (вставка на рис. 2д). Для управляющих напряжений U_{ac} , близких к U_{last} (как выше, так и ниже), вследствие отделения максимумов интерференции поляризованного света друг от друга, наблюдается хорошее оптическое разрешение участков с разной дозой облучения. Благодаря этому, например, стало возможным разрешить 2-й участок, который не разрешался при малых (пороговых) напряжениях, а 6-й участок визуализировать более контрастно (рис. 2с). Повышение порогового напряжения эффекта Фредерикса (U_{th} , рис. 2д), а также

напряжения последнего максимума интерференции U_{last} (вставка на рис. 2d) на облученных участках SiO_2 можно объяснить увеличением энергии сцепления молекул ЖК-с поверхностью SiO_2 с ростом дозы облучения.

Следует отметить следующее: при прикладывании к ячейке управляющего напряжения относительная фазовая задержка ЖК-слоя между участками с разной дозой облучения уверенно лежит в диапазоне 2π , рис. 2с. Такой величины фазовой задержки вполне достаточно для фазовой модуляции волнового фронта световой волны в плоскости ЖК-ячейки, причем в случае использования когерентной волны в качестве считывающей, преимуществом такой модуляции (за счет вариации энергии сцепления молекул ЖК-дозой облучения) будет отсутствие дифракции света на границах между участками SiO_2 .

Факт влияния ионного облучения поверхности SiO_2 на ориентацию молекул ЖК на этой поверхности иллюстрируется на рис. 3. На изображении показана облученная поверхность SiO_2 с оставшимся слоем жидкого кристалла 5CB после аккуратной разборки ЖК-ячейки. Хорошо видно, что на поверхности 4-го участка имеет место наклонная ориентация молекул 5CB, тогда как над остальной поверхностью SiO_2 , подвергнутой другим (как большими, так и меньшими) дозам облучения, близкая к нормальной (гомеотропная). Заметим, что визуализируемая с помощью слоя ЖК граница 4-го участка с соседними 3-м и 5-м участками резкая. Это указывает на пороговый эффект влияния дозы облучения G^+ на ориентацию молекул 5CB на поверхности термического SiO_2 . Аналогичный экспериментальный факт о зависимости ориентации молекул 5CB на поверхности кремния от дозы облучения ионами Ga^+ сообщался ранее [13]. По всей видимости совпадающее поведение ориентации молекул 5CB, как на поверхности SiO_2 (в данной работе), так и на поверхности кремния в [13] связано с тем, что поверхность кремния покрыта плёнкой естественного окисла.

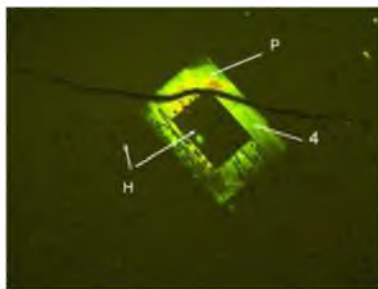


Рис. 3. Поляризационное изображение фрагмента пленки SiO_2 с жидким кристаллом 5CB без покровного стекла.

P – планарная (наклонная) на 4-м участке и H – нормальная ориентации ЖК на остальной поверхности пленки SiO_2 соответственно

Fig. 3. Polarization image of a SiO_2 film fragment with a 5CB liquid crystal without a cover glass. P is the planar (tilted) orientation over the 4th area and H is the normal orientation of the LC on the remaining surface of the SiO_2 film respectively

Близкая к нормальной ориентация молекул ЖК в ячейке, очевидно, уменьшает двулучепреломление ЖК-слоя, и тем самым уменьшает «чувствительность» описываемого метода визуализации. Поэтому с целью увеличения двулучепреломления ЖК-слоя, а также исключения влияния имплантированного в SiO_2 электрического заряда на сцепление молекул ЖК-с подложкой, далее в экспериментах облученная поверхность SiO_2 была покрыта полиимидной пленкой.

На рис. 4а представлено поляризационное изображения ЖК-ячейки с планарными граничными условиями в окрестности реперной метки на поверхности SiO_2 без приложения к ней управляющего напряжения. На приведенной иллюстрации видно, что облученные участки пленки SiO_2 не визуализируются. Это подтверждает, что имплантированный в SiO_2 электрический заряд из-за наличия полиимидной пленки на поверхности SiO_2 не оказывает влияния на исходную ориентацию молекул ЖК.

Визуализация облученных участков пленки SiO_2 осуществляется при прикладывании к ЖК-ячейке управляющего напряжения, которое для ниже описываемой группы экспериментов представляло собой суперпозицию переменной составляющей U_{ac} и постоянной составляющей U_{dc} , «нижний» и «верхний» пределы которой были -6В и $+6\text{В}$ соответственно. Полярность постоянного напряжения (смещение) U_{dc} отсчитывалась относительно Si подложки.

На рис. 4b-d представлены типичные картины визуализации всех облученных участков поверхности SiO_2 с имплантированным зарядом при прикладывании управляющего напряжения. Когда в процессе возрастания смещения U_{dc} от «нижнего» предела его полярность становится положительной, начинают визуализироваться участки 1, 2 и 3 последовательно друг за другом, начиная с 1-го, рис. 4b. Когда появляется граница 2-го участка, включая фрагмент F, перестает быть видимым 1-й участок (рис. 4с), а когда появляется 3-й участок перестает визуализироваться 2-й участок (вставка в рис. 4с). Такая закономерность в появлении картинок визуализации выполняется только для первых (1, 2 и 3) участков. Визуализация 4, 5 и 6-го участков осуществляется за счет контраста на фоне соседних участков.

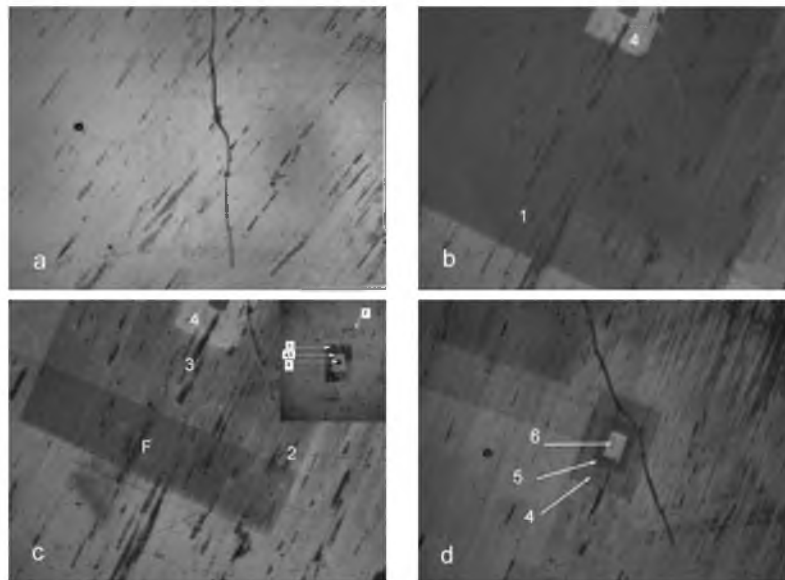


Рис. 4. Визуализация облученных участков SiO_2 в ячейке с планарной ориентацией жидкого кристалла 5CB. Частота 100 кГц. Напряжение U_{ac} , В: а) – 0; б) – 2.69; в) – 2.69; д) – 5.03. Напряжение U_{dc} , В: а) – 0; б) – +2.19; в) – +3.11; д) – +2.09. в) На вставке: визуализация 3-го и 6-го участков на фоне 4-го и 5-го соответственно. Толщина ЖК-слоя 5 мкм.

Частота 104 кГц. $U_{ac} = 3.8$ В. $U_{dc} = +5.1$ В

Fig. 4. Visualization of irradiated areas of SiO_2 in a cell with planar orientation of the 5CB liquid crystal. Frequency 100 kHz. Voltage U_{ac} , V: a) – 0; b) – 2.69; c) – 2.69; d) – 5.03. Voltage U_{dc} , V: a) – 0; b) – +2.19; c) – +3.11; d) – +2.09. c) Inset: Visualization of the 3rd and 6th areas against the background of the 4th and 5th, respectively. The thickness of the LC layer is 5 mkm. Frequency 104 kHz. $U_{ac} = 3.8$ V. $U_{dc} = +5.1$ V

Визуализация какого-либо участка SiO_2 при соответствующем значении смещения U_{dc} на фоне соседнего участка обусловлена появлением разницы в напряжениях, падающих на ЖК-слой над этими участками. Это различие в напряжениях возникает вследствие формирования под пленками SiO_2 соответствующих участков приповерхностного слоя в кремнии, обеднённого основными носителями заряда, причем на обеднение поверхности кремния влияет как смещение U_{dc} , так и имплантированный в SiO_2 заряд вследствие эффекта поля. На обедненном слое в кремнии имеет место дополнительное падение управляющего напряжения.

Формирование приповерхностного обеднённого слоя в кремнии регистрировалось по факту наличия или отсутствия светочувствительности ЖК-ячейки в окрестности исследуемого участка поверхности SiO_2 при действии управляющего напряжения. Под светочувствительностью какого-либо фрагмента ЖК-ячейки подразумевается наличие электрооптической реакции ЖК в области этого фрагмента ячейки, которая происходит в окрестности пятна сфокусированного лазерного излучения (He-Ne лазер, 0.63 мкм) при его включении. Наблюдаемую светочувствительность можно было условно разделить по характеру «отображения» слоев ЖК распределения интенсивности света на поверхности кремния на два типа: «слабую» (SL) и «дифракционную» (SD), а также полное её отсутствие (NS). В первом случае переориентация ЖК в плоскости ячейки происходит без резких границ между зонами переориентированного ЖК, и, следовательно, такой электрооптический ответ ЖК-слоя не «отображает» имеющееся в плоскости поверхности кремния распределение интенсивности лазерного излучения. Вторым (SD) тип светочувствительности характеризуется резкими границами между зонами переориентированного ЖК. В этом случае картина распределения зон переориентации ЖК контрастно повторяет распределение интенсивности света на поверхности кремния. Последовательность изменения типов светочувствительности с ростом U_{dc} от «нижнего» к «верхнему» пределу следующая: SL $\rightarrow$ SD $\rightarrow$ NS. Такая последовательность смены типов светочувствительности в ЖК-ячейке имеет место для любой поверхности SiO_2 (включая не облученные), за исключением 6-го участка. Принимая во внимание, что в ЖК-ячейке используется кремний p-типа проводимости, можно считать, что с ростом U_{dc} толщина обеднённого слоя уменьшается [14], и полностью исчезает, когда светочувствительность пропадает.

Рис. 5 отображает смену характерных картин проявления типов светочувствительности, наблюдаемую при изменении U_{dc} от «нижнего» до «верхнего» пределов. При отрицательном смещении U_{dc} любой фрагмент ЖК-ячейки демонстрирует светочувствительность SL типа за исключением 6-го участка, на котором светочувствительность SD типа, рис. 5а. Над этим участком SiO_2 электрооптический ответ слоя ЖК «отображает» распределение интенсивности лазерного излучения на поверхности кремния, вид которого соответствует дифракционным кольцам (с небольшим искажением «колец» в «эллипсы» вследствие падения лазерного луча на поверхность кремния не по нормали, а под углом ~ 45 град.).

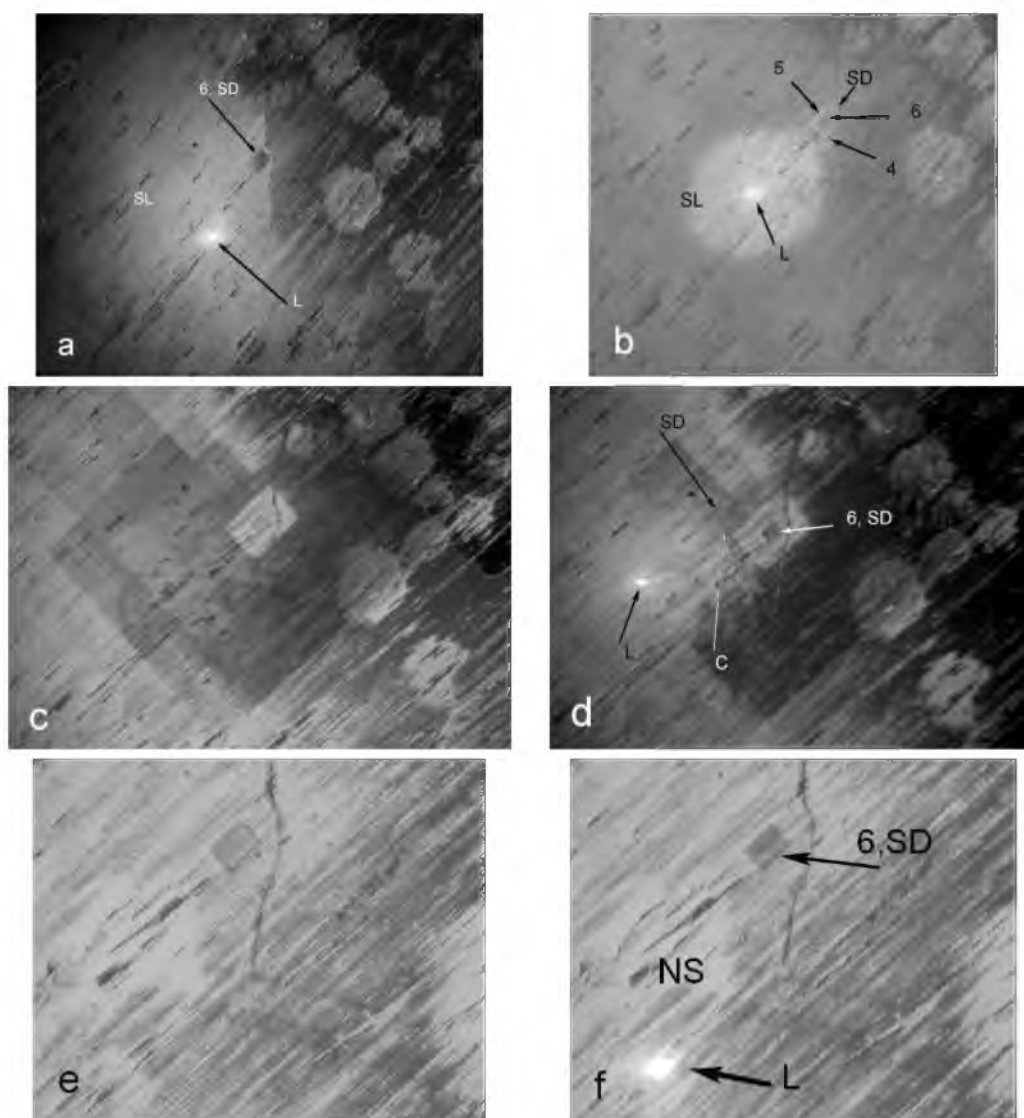


Рис. 5. Тип светочувствительности в окрестности участков пленки SiO_2 . L – пятно сфокусированного лазерного излучения на поверхности Si. Частота 100 кГц. $U_{ac} = 4\text{В}$. Напряжение U_{dc} , В: а) – -5.8 ; б) – $+1.35$; в), д) – $+2.6$; е), ф) – $+6.1$

Fig. 5. Type of photosensitivity in the vicinity of SiO_2 film areas. L is the spot of focused laser radiation on the Si surface. Frequency 100 kHz. $U_{ac} = 4\text{ V}$. Voltage U_{dc} , V: а) – -5.8 ; б) – $+1.35$; в), д) – $+2.6$; е), ф) – $+6.1$

После смены полярности U_{dc} на положительное значение, SD тип светочувствительности обнаруживается на 4-м и 5-м участках, но при этом, в остальных областях ЖК-ячейки остается SL тип, рис. 5б. Принимая во внимание, что вокруг лазерного пятна (L, рис. 5б) вблизи и на удалении от него распределение интенсивности света на поверхности Si имеет симметрию близкую к осевой, а SD тип светочувствительности регистрируется только над участками (4, 5 и 6) (рис. 5б), причем на хорошо заметном удалении от пятна (L), можно считать очевидным, что под этими участками SiO_2 толщина обеднённого слоя в кремнии меньше, чем в других частях поверхности кремния.

Дальнейший рост смещения U_{dc} приводит к смене светочувствительности SL типа на SD тип на участках 1, 2, и 3, а светочувствительность на участках 4 и 5 пропадает, рис. 5д. При этих значениях U_{dc} участки 1, 2, и 3 становятся визуализируемыми, рис. 5д, причем электрооптический ответ ЖК на лазерное излучение на этих участках хорошо «отображает» распределение интенсивности света на кремнии в виде фрагментов колец (С, рис. 5д).

При увеличении смещения U_{dc} до «верхнего» предела вся ЖК-ячейка теряет светочувствительность, за исключением 6-го участка, рис. 5еф. На 6-м участке остается SD тип светочувствительности. Таким образом, по результатам исследования светочувствительности ЖК-ячейки следует, что факт визуализации какого-либо облученного участка SiO_2 совпадает с установлением в данном месте ЖК-ячейки светочувствительности SD типа, а влияние имплантированного в SiO_2 заряда на обеднение кремния в этом случае проявляется максимально.

Зависимость смещения U_{dc} , которому соответствует переход $\text{SD} \rightarrow \text{NS}$ светочувствительности от дозы облучения участков SiO_2 , представлена на рис. 6. По характеру изменения этой зависимости от дозы облучения все участки можно разделить на 3 группы. В первую группу входят 1-й, 2-й и 3-й

участки, а также фрагмент «А» поверхности SiO_2 (рис. 1d,7a). Во вторую группу входят 4-й и 5-й участки. К 3-й группе можно отнести 6-й участок.

Для первой группы участков поверхности SiO_2 дозы облучения условно можно считать малыми. Для этой группы на обеднение поверхности кремния влияет только электрическое поле положительно заряженного имплантированного в SiO_2 заряда ионов Ga^+ . Для этих участков качественно выполняется эффект компенсации поля имплантированного заряда электрическим полем смещения U_{dc} . Наблюдается удовлетворительная линейная аппроксимация зависимости U_{dc} от дозы облучения, рис. 6.

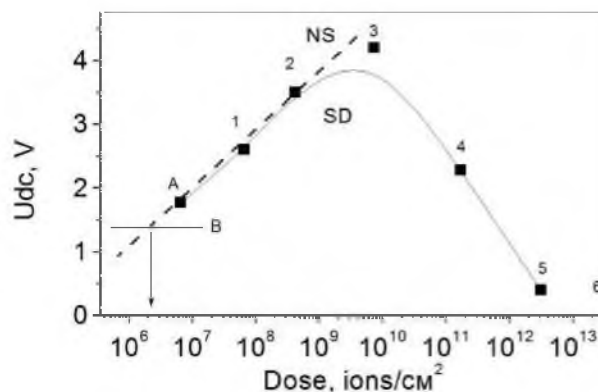


Рис. 6. Зависимость смещения U_{dc} перехода $\text{SD} \rightarrow \text{NS}$ от дозы облученного участка SiO_2 . «А» соответствует дозе облучения при индивидуальных проходах ионного пучка (снимок рис. 1d); «В» – порог визуализации прямоугольников «В» в ЖК-ячейке (рис. 7b)

Fig. 6. Dependence of the bias U_{dc} of the $\text{SD} \rightarrow \text{NS}$ transition on the irradiated dose of the SiO_2 areas. “А” corresponds to the irradiation dose of individual passes of the ion beam (image in Fig. 1d); “В” is the visualization threshold of rectangles “В” in the LC cell (Fig. 7b)

Для второй группы участков (дозы облучения условно можно считать средними) поведение светочувствительности от смещения U_{dc} противоположное: переход $\text{SD} > \text{NS}$ при росте U_{dc} наступает раньше на участке с большей дозой облучения (5-й участок), а затем на участке с меньшей дозой (4-й участок). Такой ход зависимости U_{dc} от дозы облучения можно объяснить следующим образом. С увеличением дозы облучения растет имплантированный положительный заряд, но одновременно нелинейно растет концентрация ловушек электронов [15] на дефектах SiO_2 . Электрическое поле локализованного на ловушках отрицательного заряда электронов компенсирует влияние имплантированного положительного заряда ионов Ga^+ .

Для третьей группы (6-й участок) дозы облучения пленки SiO_2 условно можно считать большими. К последствиям облучения большой дозой можно отнести: (1) светочувствительность SD типа 6-го участка для всех положительных и отрицательных значений смещения U_{dc} , а также (2) явное отсутствие рассеяния света на этом участке (рис. 1b). Для таких доз облучения пленки SiO_2 , по всей видимости, добавляется эффект утечки в Si положительного заряда (дырок) по дефектам в SiO_2 [16, 17, 18]. Ток утечки при отрицательном смещении U_{dc} поддерживает малую толщину обеднённого слоя в кремнии, необходимую для SD типа светочувствительности.

О высоком разрешении, с точки зрения метода оптической микроскопии и чувствительности описываемого ЖК метода визуализации распределения имплантированного заряда в диэлектрике SiO_2 , указывают следующие экспериментальные факты. На рис. 7а представлено изображение фрагмента ЖК-ячейки, которое соответствует участку «А» в окрестности границы «С» полного раstra финального снимка (на рис. 1d отмечен буквой «А»). Хорошо видно, что в ЖК-ячейке визуализируются отдельные единичные проходы ионного пучка по поверхности SiO_2 с разрешением ~ 7 мкм/(линия).

На рис. 7b представлено поляризационное изображение в ЖК-ячейке поверхности SiO_2 , на которой были выполнены сканы в виде прямоугольников «В» при «настройке» ионного пучка. Длительность облучения указанных участков SiO_2 в данном случае не фиксировалась, но визуализация этих прямоугольных сканов осуществляется при $U_{dc} = +1.35\text{В}$, что меньше смещения U_{dc} визуализации области «А», (рис. 7a). По пересечению линейной аппроксимации смещения U_{dc} от дозы с порогом визуализации участка «В» (рис. 6) получается доза облучения $\sim 2 \cdot 10^6$ ион/см². Эту величину дозы облучения SiO_2 , по всей видимости, можно рассматривать (для данного эксперимента по облучению), как оценку наименьшей дозы, которую возможно зарегистрировать в ЖК-ячейке.

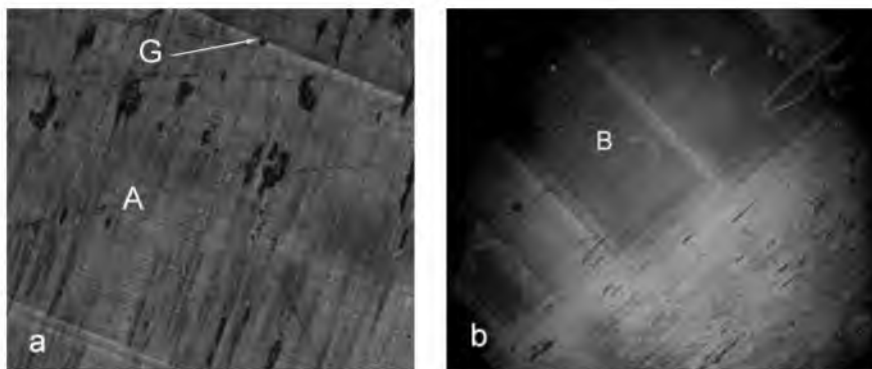


Рис. 7. Визуализация в ЖК-ячейке поверхностей SiO_2 , облученных малыми дозами.

Частота 100 кГц. $U_{ac} = 4\text{В}$. а) Визуализация в ЖК-ячейке индивидуальных проходов ионного пучка по поверхности SiO_2 в окрестности фрагмента «А» поверхности SiO_2 возле края «Г» снимка, отображенного на рис. 1d. $U_{dc} = 1,77\text{В}$.

б) Визуализация прямоугольников «В» на SiO_2 , сформированных при «настройках» ионного пучка. $U_{dc} = 1,35\text{В}$
 Fig. 7. Visualization of SiO_2 surfaces irradiated with low doses in an LC cell. Frequency 100 kHz. $U_{ac} = 4\text{ V}$. a) Visualization in an LC cell of individual passes of the ion beam on the SiO_2 surface in the vicinity of fragment “A” of the SiO_2 surface located near the edge “G” of the image shown in Fig. 1d. $U_{dc} = 1.77\text{ V}$. b) Visualization of rectangles “B” on SiO_2 formed during “adjustments” of the ion beam. $U_{dc} = 1.35\text{ V}$

3. Заключение. Таким образом, экспериментально показано, что в ЖК-ячейке, в которой одна из подложек является структурой SiO_2/Si с имплантированным зарядом в пленке SiO_2 с помощью сфокусированного пучка ионов галлия в сканирующем ионном микроскопе возможна визуализация в плоскости ячейки распределения этого заряда посредством эффекта Фредерикса. Исследовались два варианта использования структуры SiO_2/Si : (1) без дополнительной обработки облученной поверхности SiO_2 для получения предпочтительной ориентации молекул ЖК, и (2) с нанесением на облученную поверхность SiO_2 полиимидной пленки, которая выполняла две функции, а именно, исключение непосредственного влияния имплантированного заряда на ориентацию молекул ЖК и формирование планарной ориентации молекул ЖК. В первом варианте использования структуры визуализация облученных участков SiO_2 становится возможной благодаря различию в двулучепреломлении ЖК на участках с разной дозой облучения. Установлена зависимость порогового напряжения эффекта Фредерикса и напряжения последнего максимума пропускания ЖК-слоя при интерференции поляризованного света от дозы облучения. Во-втором случае визуализация облученных участков поверхности SiO_2 с полиимидным покрытием осуществляется благодаря перераспределению приложенного к ЖК-ячейке напряжения между слоем ЖК и структурой SiO_2/Si , которое вызвано появлением обеднённого приповерхностного слоя в кремнии. Исследование светочувствительности ЖК-ячейки позволяет предположить, что на обеднение кремния оказывают влияние электрическое поле имплантированного заряда в SiO_2 , а также при больших дозах облучения токи утечек в Si через дефектные участки пленки SiO_2 .

Список литературы

1. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. Пер.с англ. М.:Мир; 1989. 433 с.
2. Huang Y., Bhowmik A., Bos P.J. Characterization of ionic impurities adsorbed onto a 5^0 SiOx alignment film. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2012;51:031701-031711. DOI: 10.1143/JJAP.51.031701
3. Choi J., Lee H.H., Ahn J., Seo S.H., Shin J.K. Differential-mode biosensor using dual extended gate metal oxide semiconductor field effect transistors. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2012;51:06FG05-06FG10. DOI: 10.1143/JJAP.51.06FG05
4. Кучеев С.И. Переключение ориентации нематика обусловленное диффузией фосфолипида в МДП структуре. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Математика. Физика*. 2016;27(248)45:115–120.
5. Захвалинский В.С., Кучеев С.И., Межаков Н.Н., Перервенко Э.О., Пиллюк Е.А. Ионная адсорбция и ориентация нематика на карбиде кремния в нематической ячейке. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Математика. Физика*. 2014;25(196)37:138–142.
6. Hajmirzaheydarali M., Sadeghipari M., Akbari M., Shahsafi A., Mohajerzadeh S. Nano-textured high sensitivity ion sensitive field effect transistors. *Journal of Applied Physics*. 2016;119:054303-054311. DOI:10.1063/1.4940915
7. Jang H.J., Cho W.J. Fabrication of high performance ion-sensitive field-effect transistors using an engineered sensing membrane for bio-sensor application. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2012;51:02BL05-02BL09. DOI:10.1143/JJAP.51.02BL05
8. Choudhary A., George T.F., Li G. Conjugation of nanomaterials and nematic liquid crystals for futuristic applications and biosensors. *Biosensors*. 2018;8:69–86. DOI:10.3390/bios8030069

9. Валетова Е.А., Колесников Д.А., Кучеев С.И. Адсорбция и переориентация нематика на наноразмерной углеродной плёнке, индуцированная парами органических растворителей. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Математика. Физика.* 2017;50(1):64–72.
10. Lyubchenko Yu. Direct AFM visualization of the nanoscale dynamics of biomolecular complexes. *Journal of Physics D: Applied Physics.* 2018;51:403001–403018. DOI: 10.1088/1361-6463/aad898
11. Kim J., Choi M.H., Jung G.E., Ferhan A.R., Cho N.J., Cho S.J. Dimensional comparison between amplitude-modulation atomic force microscopy and scanning ion conductance microscopy of biological samples. *Japanese Journal of Applied Physics.* 2016;55:08NB18–08NB23. DOI:10.7567/JJAP.55.08NB18
12. Blinov L.M., Chigrinov V.G. *Electrooptic Effects in Liquid Crystal Materials.* New York: Springer; 1993. 464 p.
13. Кучеев С.И., Тучина Ю. С. О возможности контролируемой ориентации нематического жидкого кристалла на кремнии, обработанном фокусированным пучком ионов Ga. *Журнал технической физики.* 2010;80(6):131–134. DOI:10.1134/S1063784210060253
14. Гончаров И.Ю., Колесников Д.А., Кучеев С.И., Омельченко Е.И., Тучина Ю.С. Обеднение кремния, облученного фокусированным пучком ионов Ga в структуре Si/нематик/электрод. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Математика. Физика.* 2012;23(142):122–127.
15. Hoffman A., Andrienko I., Jamieson D.N., Prawer S. Electron trapping and detrapping in ion-beam-damaged diamond surfaces. *Applied Physics Letters.* 2005;86:044103–044106.
16. Рау Э.И., Татаринцев А.А., Зыкова Е.Ю., Иваненко И.П., Купреенко С.Ю., Миннебаев К.Ф., Хайдаров А.А. Электронно-лучевая зарядка диэлектриков, предварительно облученных ионами и электронами средних энергий. *Физика твердого тела.* 2017;59(8):1504–1513.
17. Cornet N., Goeuriot D., Guerret-Piecourt C., Juve D., Treheux D., Touzin M., Fitting H.J. Electron beam charging of insulators with surface layer and leakage currents. *Journal of Applied Physics.* 2008;103:064110–064123.
18. Schuegraf K.F., Hu C. Metal–oxide–semiconductor field effect transistor substrate current during Fowler Nordheim tunneling stress and silicon dioxide reliability. *Journal of Applied Physics.* 1994;76:3695–3700. DOI:10.1063/1.357438

References

1. Muller R., Kamins T. *Device electronics for integrated circuits.* New York, Wiley; 1986. 433 p.
2. Huang Y., Bhowmik A., Bos P.J. Characterization of ionic impurities adsorbed onto a 5⁰ SiOx alignment film. *Japanese Journal of Applied Physics.* 2012;51:031701–031711. DOI: 10.1143/JJAP.51.031701
3. Choi J., Lee H.H., Ahn J., Seo S.H., Shin J.K. Differential-mode biosensor using dual extended gate metal oxide semiconductor field effect transistors. *Japanese Journal of Applied Physics.* 2012;51:06FG05–06FG10. DOI: 10.1143/JJAP.51.06FG05
4. Kucheev S.I. Pereklucheniye orientatsiyi nematika obuslovlennoe diffuziyey fosfolipida v MDP strukture [Switching orientation of nematic due to phospholipid diffusion in the MIS structure]. *Belgorod State University Scientific bulletin. Mathem. Physics.* 2016;27(248):115–120. (In Russian)
5. Zahvalinski V.S., Kucheev S.I., Mezhaikov N.N., Perervenko E.O., Piluk E.A. Ionnaya adsorbsiya i orientatsiya namatika na karbite kremiya v nematicheskoi yacheike [The ionic adsorption and the orientation of the nematic on the silicon carbide in the nematic cell]. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Mathem. Physics.* 2014;25(196):138–142. (In Russian)
6. Hajmirzaheydarali M., Sadeghipari M., Akbari M., Shahsafi A., Mohajerzadeh S. Nano-textured high sensitivity ion sensitive field effect transistors. *Journal of Applied Physics.* 2016;119:054303–054311. DOI:10.1063/1.4940915
7. Jang H.J., Cho W.J. Fabrication of high performance ion-sensitive field-effect transistors using an engineered sensing membrane for bio-sensor application. *Japanese Journal of Applied Physics.* 2012;51:02BL05–02BL09. DOI:10.1143/JJAP.51.02BL05
8. Choudhary A., George T.F., Li G. Conjugation of nanomaterials and nematic liquid crystals for futuristic applications and biosensors. *Biosensors.* 2018;8:69–86. DOI:10.3390/bios8030069
9. Valetova E.A., Kolesnikov D.A., Kucheev S.I. Adsorbsiya i pereorientatsiya nematika na nanorazmernoy uglerodnoy plyonke, indutsirovannaya parami organicheskikh rastvoriteley [Adsorption and reorientation of a nematic on a nanoscale carbon film induced by vapors of organic solvents]. *Belgorod State University Scientific bulletin. Mathem. Physics.* 2017;50(1):64–72. (In Russian)
10. Lyubchenko Yu. Direct AFM visualization of the nanoscale dynamics of biomolecular complexes. *Journal of Physics D: Applied Physics.* 2018;51:403001–403018. DOI: 10.1088/1361-6463/aad898
11. Kim J., Choi M.H., Jung G.E., Ferhan A.R., Cho N.J., Cho S.J. Dimensional comparison between amplitude-modulation atomic force microscopy and scanning ion conductance microscopy of biological samples. *Japanese Journal of Applied Physics.* 2016;55:08NB18–08NB23. DOI:10.7567/JJAP.55.08NB18
12. Blinov L.M., Chigrinov V.G. *Electrooptic Effects in Liquid Crystal Materials.* New York: Springer; 1993. 464 p.
13. Kucheev S.I., Tuchina Yu.S. On the control of the nematic orientation on the silicon surface processed by a focused gallium ion beam. *Technical Physics.* 2010;55(6):883–886. DOI: 10.1134/S1063784210060253

14. Goncharov IYu., Kolesnikov DA., Kucheev SI., Omelchenko EI., Tuchina YuS. Obednenie kremniya, obluchennogo fokusirovannim puchkom ionov Ga v strukture Si/nematik/electrod[Depletion of silicon treated by Ga focused ion beam in Si/nematic/electrod structure]. *Belgorod State University Scientific bulletin. Mathem. Physics*. 2012;23(142)29:122-127. (In Russian)
15. Hoffman A., Andrienko I., Jamieson DN., Prawer S. Electron trapping and detrapping in ion-beam-damaged diamond surfaces. *Applied Physics Letters*. 2005;86:044103-044106.
16. Rau EI., Tatarintsev AA., Zyкова EYu., Ivanenko IP., Kupreenko SYu., Minnebaev KF., Khaidarov AA. Electron-beam charging of dielectrics preirradiated with moderate-energy ions and electrons. *Physics of the Solid State*. 2017;59(8):1526–1535. DOI:10.21883/FTT.2017.08.44749.460
17. Cornet N., Goeuriot D., Guerret-Piecourt C., Juve D., Treheux D., Touzin M., Fitting HJ. Electron beam charging of insulators with surface layer and leakage currents. *Journal of Applied Physics*. 2008;103:064110-064123.
18. Schuegraf KF., Hu C. Metal–oxide–semiconductor field effect transistor substrate current during Fowler Nordheim tunneling stress and silicon dioxide reliability. *Journal of Applied Physics*. 1994;76:3695–3700. DOI:10.1063/1.357438

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 26.02.2026

Received February 26, 2026

Поступила после рецензирования 05.03.2026

Revised March 5, 2026

Принята к публикации 11.05.2026

Accepted May 11, 2026

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Колесников Дмитрий Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории перспективных материалов и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Кучеев Сергей Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry A. Kolesnikov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Advanced Materials and Technologies, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Sergey I. Kucheev – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical and Experimental Physics, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

К содержанию