



УДК 620.1.72:532.783

ОБЕДНЕНИЕ КРЕМНИЯ, ОБЛУЧЕННОГО ФОКУСИРОВАННЫМ ПУЧКОМ ИОНОВ Ga В СТРУКТУРЕ Si/НЕМАТИК/ЭЛЕКТРОД**И.Ю. Гончаров, Д.А. Колесников, С.И. Кучеев,
Е.И. Омельченко, Ю.С. Тучина**Белгородский государственный университет,
ул. Студенческая 14, Белгород, 308007, Россия, e-mail: kucheev@bsu.edu.ru

Аннотация. Обработка поверхности кремния *n*-типа проводимости фокусированным ионным пучком галлия (30 кэВ) приводит к изменению пороговых напряжений светочувствительности и обеднения поверхности кремния в структуре Si/нематик/электрод. Облученная на глубину 20-30 нм ионами галлия поверхность кремния ведет себя по отношению к ниже расположенным слоям, как отрицательно заряженный «квазиэлектрод», форма и заряд которого задается растром ионного пучка и дозой облучения соответственно. Продемонстрирована принципиальная возможность электрического управления (включение, выключение) периодическим распределением директора в жидком кристалле (ЖК-решетка), рисунок участков которого определяется условиями облучения (доза, растр) и соотношением между шириной обедненного слоя в кремнии и глубиной высоколегированных n^+ -карманов, причем периодичность последних задает шаг решетки в ЖК.

Ключевые слова: фокусированный ионный пучок, кремний, жидкокристаллическая решетка.

1. Введение. Структура типа кремний/жидкий кристалл/электрод является базовым элементом некоторых типов оптически управляемых жидкокристаллических модуляторов света [1]. В случае использования низко(средне)омного кремния, необходимым условием функционирования таких структур в качестве модуляторов света является формирование динамического обеднения основными носителями заряда приповерхностного слоя кремния благодаря эффекту поля, который индуцируется электрическим полем электрода.

Для расширения функциональных возможностей такого типа модуляторов, в которых амплитудная или фазовая модуляция света, проходящего через слой жидкого кристалла (ЖК) осуществляется за счет электрически управляемого двулучепреломления [2], необходимы методы, позволяющие варьировать пороговое напряжение соответствующих электрооптических эффектов в ЖК для реализации конкретных оптических схем. Например, в представляемой работе это формирование рисунка участка ячейки с периодической переориентацией ЖК (решетка в ЖК) требуемой формы.

Обычно, задачи связанные с варьированием порога эффекта поля в МДП структурах решаются легированием поверхности полупроводника. Однако в случае сложного профиля легирования это становится трудоемкой задачей из-за необходимости проведения многочисленных масочных и термодиффузионных операций.



Хорошо известно, что фокусированные ионные системы (FIB) широко используются при разработке микро/наноструктур, в нанолитографии, для изготовления сенсоров в биологических исследованиях и т.д., благодаря присущей FIB многофункциональности [3, 4]. FIB позволяют имплантировать в поверхностные слои твердого тела с наноразмерным разрешением необходимые дозы ионов с требуемой энергией.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование возможности использования фокусированных ионных пучков галлия сканирующего ионного микроскопа для решения задачи безмасочного варьирования порога обеднения кремния в структуре Si/нематик/электрод.

2. Эксперимент. В эксперименте, в качестве подложки в ЖК ячейках (прототип модулятора света), использовался образец монокристаллического кремния *n*-типа проводимости с удельным сопротивлением около 20 ом·см. Облучение ионами Ga осуществлялось в двойной (электроны/ионы) сканирующей системе Quanta 200 3D в растровом режиме при токе пучка 10 pA с энергией ионов 30 keV. На исходной поверхности кремния было получено 4 прямоугольных области размером 200·170 мкм каждая с дозами облучения (1) – $1,3 \cdot 10^{11}$; (2) – $4 \cdot 10^{11}$; (3) – $1,4 \cdot 10^{12}$; (4) – $4,2 \cdot 10^{12}$ ион/см² соответственно. Поверхность кремния после облучения ионами не подвергалась отжигу, а также какой-либо специальной обработке для формирования предпочтительной ориентации молекул ЖК.

Верхним электродом ЖК ячейки сэндвич типа служила стеклянная пластинка с пленкой окиси индия (ITO) и пленкой полиимида, натертой в одном направлении для формирования планарной ориентации молекул ЖК. ЖК 5CB заправлялся капиллярным образом в изотропной фазе. Толщина ЖК слоя 5 мкм задавалась фторопластовыми прокладками. К ячейке прикладывалось управляющее напряжение U_C , включающее переменную составляющую U частотой 100 кГц и постоянное смещение U_{DC} , полярность которого задавалась относительно кремниевой подложки. Стартовое значение U_{DC} во всех экспериментах было – 5 В и далее изменялось с шагом 0,1 В в сторону положительной полярности.

Формирование обеднённого основными носителями заряда приповерхностного слоя кремния регистрировалось по появлению светочувствительности ЖК ячейки. Факт светочувствительности в конкретном месте ЖК ячейки определялся при воздействии на поверхность кремния в этом месте лазерным излучением (He-Ne 0,63 мкм). В этом случае в области лазерного пятна на поверхности кремния в ячейке имеет место дополнительная переориентация ЖК.

На рис. 1 представлены кривые, соответствующие порогам появления светочувствительности ячейки над исходной поверхностью кремния (0) и облученными участками кремния (1-4) в трех (а, б, в) свежесобранных ячейках. Из рисунка видно, что порог светочувствительности (появление обеднения) в конкретной ЖК ячейке над соответствующим облученным участком зависит от его дозы облучения. С увеличением дозы облучения участка, светочувствительность ячейки в этом месте появляется при больших отрицательных значениях U_{DC} .

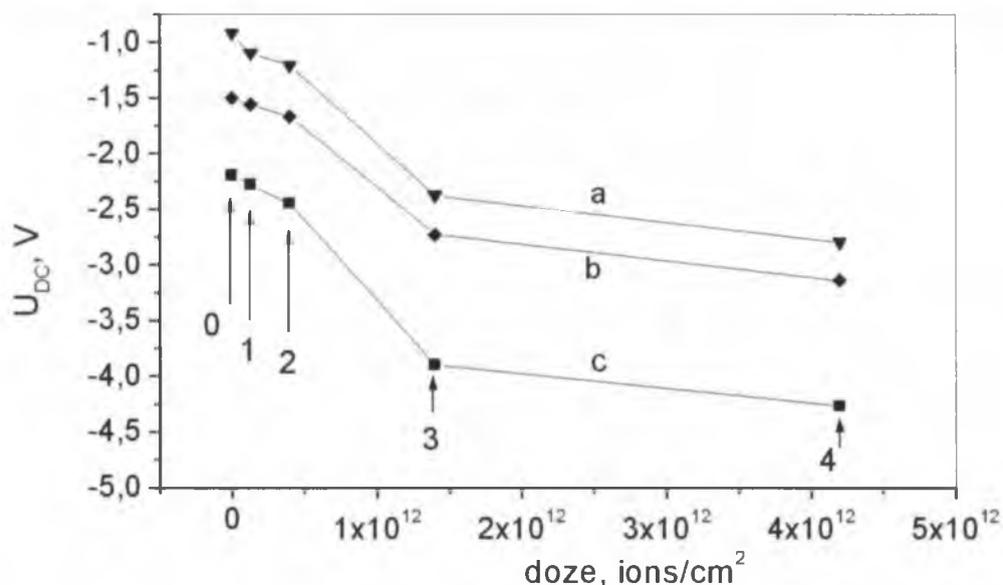


Рис. 1. Зависимость порога светочувствительности ЖК ячейки над участками (0-4) поверхности кремния от дозы их облучения при $U = 5,5$ В.

Другим хорошо заметным результатом нашего эксперимента является не воспроизводимость порога светочувствительности над одними и теми же облученными участками (и над исходной поверхностью кремния) в разных ячейках. Мы полагаем, что на порог светочувствительности (обеднения) могут влиять ряд неконтролируемых процессов, среди которых наибольшее значение, по-видимому, оказывают имеющие место при очистке и нанесении ЖК материала на поверхность кремния абсорбция и десорбция заряженных ионов и (или) дипольных молекул, которые своим электрическим полем способствуют обеднению или обогащению поверхности кремния.

С целью прямого подтверждения, что облучение поверхности кремния ионами влияет на процесс формирования обедненного слоя, в другой серии экспериментов в ЖК ячейках использовался образец кремния, на поверхности которого методами фотолитографии и диффузии мышьяка была изготовлена периодическая структура, представляющая собой высоколегированные n^+ карманы (10^{19} 1/см³) в виде полосок шириной 4 мкм и расстоянием между ними около 15 мкм и глубиной легирования приблизительно равной 1-1,5 мкм (см. рис. 2) [5].

Измерение рельефа с помощью атомного силового микроскопа (АСМ) (Integra NT-MDT) показало, что перепад рельефа поверхности над n^+ -карманами составляет около 2 – 3 нм, рис. 2. Это означает, что: 1) влиянием рельефа поверхности на ориентацию ЖК молекул и 2) дифракцией при облучении такой поверхности когерентным светом можно пренебречь. Далее поверхность кремния с n^+ -карманами была обработана фокусированным ионным пучком (10 пА, 30 keV) с дозами $1,3 \cdot 10^{13}$ (поверхность А) и $1,1 \cdot 10^{14}$



ион/см² (поверхность Am) в растровом режиме. Облучение последней дозой привело к аморфизации поверхности кремния (Am), которое хорошо различимо как в растровый электронный микроскоп, так и в оптический микроскоп из-за рассеяния света на аморфной поверхности (см. рис. 3).

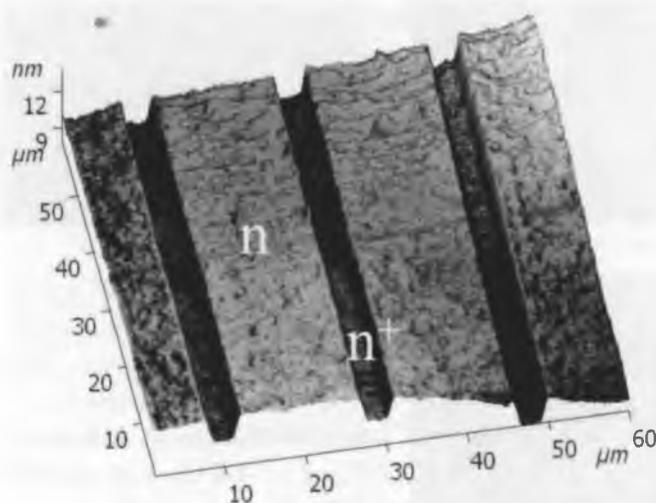


Рис. 2. АСМ изображение поверхности кремния *n*-типа проводимости с *n*⁺ карманами.

В такой ЖК ячейке с *n*⁺-карманами на поверхности кремния, наравне с светочувствительностью, доступна информация (качественная) о локализации обеднённого слоя в некоторых пределах, которые грубо определяются глубиной *n*⁺ карманов, по появлению периодической переориентации ЖК, которая повторяет расположение *n*⁺-карманов на поверхности кремния. Появление периодической переориентации (решетки в ЖК) обусловлено периодическим потенциалом на поверхности кремния, связанное с тем, что на *n*⁺-карманах падение напряжения значительно меньше из-за их высокого легирования, по сравнению с нелегированными участками поверхности, где имеет место падение напряжения благодаря обеднению, при этом граница обеднения *L* располагается в пределах глубины *n*⁺-кармана. Если решетка в ЖК не формируется, то это означает, что: 1) нет обеднения (при этом ячейка в данном месте не светочувствительна) или 2) граница обеднения *L* локализована ниже дна *n*⁺-карманов.

На рис. 3 представлены изображения одного и того же участка ЖК ячейки с облученной выше упомянутыми двумя дозами поверхностью кремния. При соответствующей величине смещения U_{DC1} облученная поверхность (область А) с высоким контрастом декорируется появлением решетки в ЖК слое (*L* располагается в пределах глубины *n*⁺-карманов, рис. 4а), при этом участок ЖК ячейки В (не облученный ионами) остается не светочувствительным (обеднение отсутствует), и соответственно, решетка в ЖК над участком В не формируется, рис. 4а. Изменение смещения в сторону положительных значений до U_{DC2} вызывает появление обедненного слоя *L* на участке В, что одновременно сопровождается светочувствительностью и появлением решетки в ЖК над этим участком, рис. 3с и 4б. Отметим, что над аморфной поверхностью кремния



(Am) решетка в ЖК также регистрируется, но с очень слабым контрастом, как при положительных, так и отрицательных величинах смещения U_{DC} .

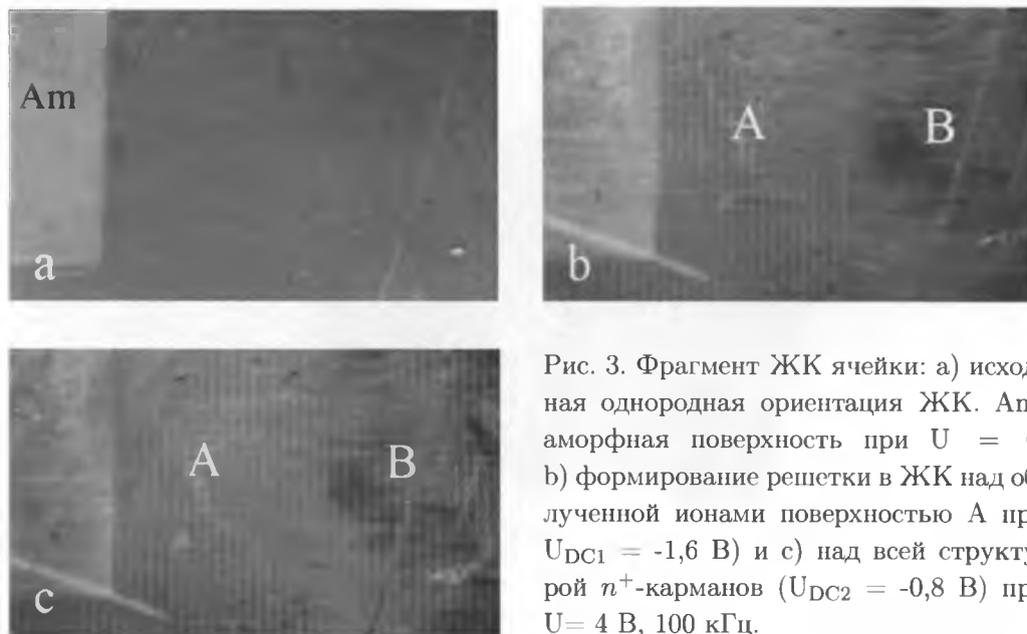


Рис. 3. Фрагмент ЖК ячейки: а) исходная однородная ориентация ЖК. Ам-аморфная поверхность при $U = 0$, б) формирование решетки в ЖК над облученной ионами поверхностью А при $U_{DC1} = -1,6$ В) и с) над всей структурой n^+ -карманов ($U_{DC2} = -0,8$ В) при $U = 4$ В, 100 кГц.

Мы не можем связать наблюдаемую зависимость порога светочувствительности от дозы облучения с проявлением акцепторных свойств имплантированных ионов галлия в кремний, из-за того, что образец кремния не отжигался. Более того, имеет место факт светочувствительности ЖК ячейки над аморфными (после облучения ионами) участками кремния, которая наблюдается при всех смещениях U_{DC} исследованных в данной работе (от -5 В до $+5$ В). Это подчеркивает, что механизм влияния облучения ионами никак не связан с легированием поверхности кремния.

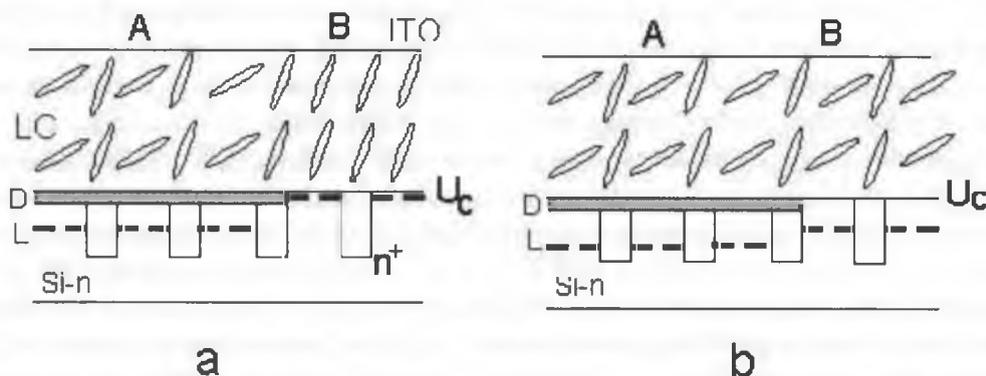


Рис. 4. Формирование решетки в ЖК над облученной поверхностью кремния при U_{DC1} (а) и над всей структурой n^+ -карманов при U_{DC2} (б), где L — граница обедненного слоя, D — дефектный слой и $U_{DC1} < U_{DC2}$.



Анализ порогов светочувствительности (обеднения) в ЖК ячейке позволяет утверждать, что наноразмерный дефектный слой D (рис. 4) поверхности кремния глубиной 20-30 нм (согласно оценки с помощью [6]), образующийся при внедрении ионов в кремний, оказывает влияние на нижележащий кремний в качестве отрицательно заряженного «квазиэлектрода», вызывая обеднение кремни n -типа проводимости, при этом рисунок и заряд этого «квазиэлектрода» задается растром обработки поверхности фокусированным ионным пучком и дозой облучения соответственно.

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 / М.: Радио и связь, 1986.
2. Блинов Л.М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов / М.: Наука, 1978. – 384 с.
3. Arscott S., Troadec D. // Nanotechnology. – 2005. – 16. – P.2295-2302.
4. Arshak K., Mihov M. // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. – 2005. – 7;1. – P.193-198.
5. Gritsenko M.I., Kucheev S.I. // Mol. Cryst and Liquid Cryst. – 2005. – 426. – P.103-110.
6. [http: www.SRIM.org](http://www.SRIM.org)

DEPLETION OF SILICON TREATED BY Ga FOCUSED ION BEAM IN Si/NEAMTIC/ELECTROD STRUCTURE

I.Yu. Goncharov, D.A. Kolesnikov, S.I. Kucheev,
E.I. Omelchenko, Yu.S. Tuchina

Belgorod State University,
Studencheskaya St. 14, Belgorod, 308014, Russia, e-mail: skucheev@yahoo.com

Abstract. The treatment of silicon surface by Ga focused ion beam (30 keV) changes the threshold of photosensitivity in Si/nematic/ITO device. The silicon surface irradiated by Ga ions on the 20-30 nm depth behaviors as negative charged virtual electrode. The form and the charge of this electrode are defined by the raster of the ion beam and the irradiation dose. It has been shown the principal possibility of the electric control of director periodical distribution within liquid crystal layer (liquid crystal grating) which is defined by the depletion layer size and the depth of n^+ -pockets in Si substrate.

Key words: focused ion beam, silicon, liquid crystal grating.