

УДК 620.1.72:532.783

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ КРЕМНИЯ, ОБРАБОТАННОГО СФОКУСИРОВАННЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ Ga В НЕМАТИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ

И.С.Кучеев, Ю.С.Тучина

Белгородский государственный университет,

Студенческая 14, Белгород 308007, Россия, e-mail: kucheev@bsu.edu.ru

Экспериментально продемонстрирована возможность визуализации участков поверхности кремния подвергшихся воздействию фокусированных пучков ионов Ga в нематической ячейке. При малых дозах облучения визуализация основана на перераспределении приложенного к ячейке напряжения между жидкокристаллическим слоем и кремнием, в поверхностном слое которого облученные участки обладают повышенной проводимостью по сравнению с высокоомным обедненным слоем кремния необлученных участков. С ростом дозы облучения визуализация осуществляется благодаря изменению исходной ориентации нематика на поверхности обработанного ионами кремния. Предполагается, что гомеотропная ориентация вызвана проявлением аморфных свойств облученного кремния, а наклонная ориентация обусловлена изменением гидрофильных/гидрофобных свойств поверхности облученного кремния.

Ключевые слова: нематик, кремний, сфокусированный ионный пучок, полевой эффект, ионы.

1. Введение. Хорошо известно, что фокусированные ионные системы (FIB) широко используются при разработке микро/наноструктур [1,2,3], в нанолитографии [4], для изготовления сенсоров в биологических исследованиях [5, 6]. Разработка новых приборов и новых процессов, которые включают в себя FIB системы требуют и новые методы регистрации взаимодействия ионных пучков с поверхностью. Очевидно, если дозы облучения таковы, что под действием ионного пучка происходит разрушение и распыление материала подложки, регистрация (визуализация) таких изменений поверхности не вызывает трудностей и может быть осуществлена традиционными методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Однако задача регистрации взаимодействия ионов с поверхностью усложняется при малых дозах облучения, при которых нет явного изменения рельефа поверхности и при этом области облучения имеют микроскопические размеры. Особенно это касается поверхности кремния, наиболее технологичного и наиболее широко используемого материала в качестве многофункциональных "платформ" в разработке микро/оптоэлектронных приборов. Это

обусловлено тем, что при проникновении незначительного числа высокоэнергетических ионов в приповерхностные слои кремния формируются зарядовые ловушки, что сопровождается увеличением поверхностной проводимости, и, следовательно, ухудшаются параметры приборов. В связи с несомненной перспективностью использования фокусированных пучков ионов, в данной работе была рассмотрена возможность регистрации жидким кристаллом поверхности кремния, который подвергся воздействию ионных пучков Ga.

Эксперимент. В эксперименте использовался монокристаллический кремний p - типа проводимости с удельным сопротивлением 4,5 Ом·см. Облучение выполнялось пучком фокусированных ионов Ga с энергией 30 кэВ в двойном (электроны, ионы) микроскопе FEI Quanta 200 3D. Облучение кремния производилось в растровом или точечном режимах.

В растровом режиме, при токе пучка 10 pA и времени экспозиции 10 секунд, на поверхности кремния была облучена прямоугольная с размерами 180×150 мкм. После ионного облучения, в этом же микроскопе, поверхность была исследована в электронном сканирующем режиме (РЭМ). Изменений поверхности кремния в области ионного облучения выявлено не было. Облученный образец кремния исследовался атомным силовым микроскопом (Integra NT-MDT). Каких-либо изменений рельефа на поверхности также не было обнаружено.

Далее образец кремния был использован в качестве подложки в жидкокристаллической ячейке сэндвич типа. Противоположная кремниевой подложки поверхность представляла собой стеклянную пластинку с прозрачным проводящим слоем окиси индия, который в свою очередь, был покрыт полиамидной пленкой, натертой в одном направлении для задания планарной ориентации молекул жидкого кристалла. Толщина слоя жидкого кристалла задавалась фторопластовыми прокладками и составляла 5 мкм. Использовался нематический жидкий кристалл 5СВ, который заправлялся в ячейку в изотропной фазе. После перехода жидкого кристалла в нематическую фазу были проведены поляризационные исследования сформировавшейся текстуры жидкого кристалла. Анализ сформировавшейся ориентации нематика показал, что последняя является однородной и признаков влияния облученной поверхности кремния на ориентацию молекул не обнаружено, рис.1а.

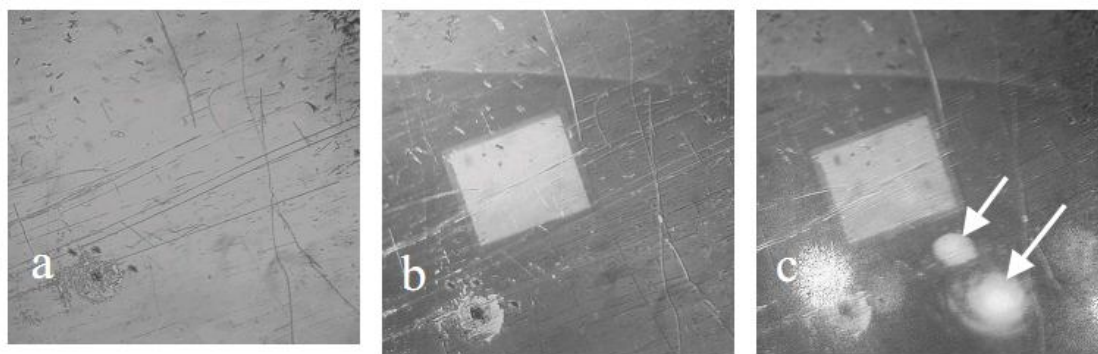


Рис.1. а) исходная ориентация нематика в ячейке, б) визуализация облучённого участка кремния в ячейке, с) переориентация нематика в области лазерных пятен на поверхности кремния; напряжение, В: а) – 0, б) – 2,8, с) – 2,8; частота 400 Гц.

Визуализация облученного участка кремния может осуществляться при возбуждении ячейки переменным напряжением, рис.1б, причем визуализация наступает не мгновенно после приложения напряжения, а с некоторой временной задержкой после момента включения напряжения. Рис.2 демонстрирует зависимость времени задержки от величины приложенного напряжения. Хорошо видно, что задержка длится от нескольких секунд при малых напряжениях и достигает нескольких десятых секунды при увеличении напряжения. Учитывая, что классическая реакция нематика на внешнее напряжение составляет несколько десятых секунды [7], мы связываем процесс визуализации с зарядовыми процессами, протекающими в слое нематика. В результате накопления ионного заряда в слое нематика у поверхности кремния, последняя обедняется основными носителями заряда благодаря эффекту поля. Поэтому приповерхностный слой кремния становится высокоомным и, следовательно, в результате перераспределения напряжения между кремнием и слоем нематика, часть приложенного к ячейке напряжения падает на высокоомном слое в кремнии. Однако в области кремния, облученного ионным пучком, высокоомный слой не формируется. Это обусловлено тем, что облученная ионами поверхность кремния имеет повышенную проводимость благодаря возникшим ловушкам носителей заряда. Вследствие такого перераспределения напряжения, к слою нематика, который располагается над облученным участком поверхности кремния, прикладывается большее напряжение, чем к слою нематика над обедненной поверхностью кремния. Поэтому нематик над облученной областью кремния переориентирован в большей

степени, чем над не облученной поверхностью. Наличие или отсутствие обедненного высокоомного слоя в кремнии достоверно проверяется с помощью возбуждения структуры лазерным (He-Ne, 0,63 мкм) лучем. В области лазерного пятна на поверхности кремния, в случае обеднения поверхности, будет иметь место переориентация нематика (рис.1в, области переориентации отмечены стрелками). Если участок поверхности кремния не обеднен, как это имеет место в случае облучения его ионным пучком, переориентация в области лазерного пятна не происходит.

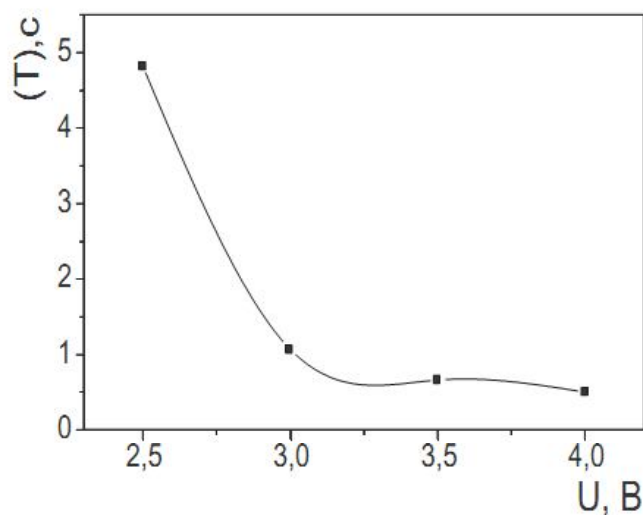


Рис.2. Зависимость времени задержки (Т) начала визуализации облученной поверхности кремния в жидкокристаллической ячейке от величины приложенного напряжения U. Частота 400 Гц.

Далее доза облучения поверхности кремния была увеличена, а режим облучения был выбран точечным, при котором ионный пучок фокусируется в точку. Однако, из-за неустраняемого расплывания пучка имеет место гауссовское распределение ионов по сечению пучка. Поэтому максимальное разрушение материала подложки будет иметь место в кратере, а прилегающая поверхность кремния будет облучаться дозой зависящей от расстояния до кратера. В качестве реперной метки был выбран прямоугольный p^+ карман. Исследование поверхности кремния с помощью РЭМ, после облучения ионным пучком в точечном режиме, показало, что есть некоторые изменения поверхности кремния в области облучения. К таким изменениям поверхности можно отнести появление светлого (1) и темного (2) кольцевых участков соответственно, рис.3а. Кратер на РЭМ изображении виден как черная точка

в центре области 1. Необходимо отметить, что контраст РЭМ изображений, на которых визуализируются области 1 и 2, без принятия дополнительных мер (например, выбор оптимального угла наблюдения) чрезвычайно низкий. Далее на облученный образец кремния наносился слой жидкого кристалла. Поляризационные исследования показали, что поверхность кремния, имеющая светлый фон на РЭМ изображении, вызывает формирование гомеотропной ориентации нематика (1), а поверхность, имеющая темный фон на РЭМ изображении вызывает наклонную ориентацию нематика (2), рис.3б.

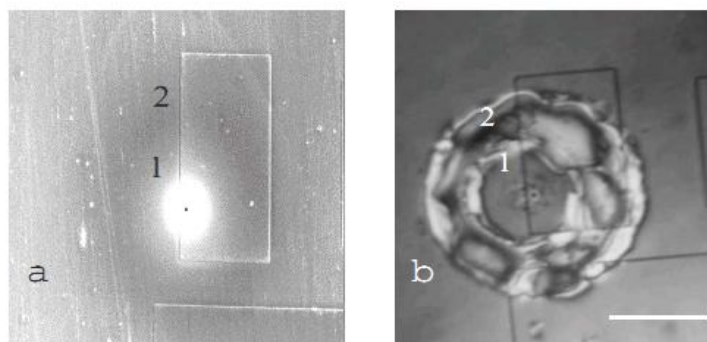


Рис.3. а) РЭМ изображение поверхности (под углом 52 град.) поверхности кремния, облученное ионным пучком, сфокусированным в точку; время экспозиции 5 минут; ток ионного пучка 0,3нА; б) ориентация нематика на поверхности кремния в области облучения (тот же участок, что и на рис.1а); метка – 120 мкм.

Основной фактор, который, по-видимому, ответственен за формирование гомеотропной ориентации нематика, является аморфное состояние поверхности кремния, которое появляется после облучения ее ионным пучком с соответствующей дозой. На это качественно указывает упомянутая выше хорошая корреляция между появлением гомеотропной текстуры нематика и светлого фона этой же поверхности кремния на РЭМ изображении. Другой фактор, который, по-видимому, ответственен за наклонную ориентацию нематика, обусловлен гидрофильностью/гидрофобностью поверхности кремния. Кремний, благодаря имеющимся на его поверхности гидроксильным группам [8] имеет тенденцию ориентировать полярный нематик 5СВ гомеотропно. Вследствие облучения поверхности имеет место адсорбция ионов Ga и частичное химическое замещение гидроксильных групп на ионы Ga [9], с соответствующей частичной потерей гидрофильности и, соответственно, тенденцией ориентировать нематик гомеотропно.

3. Заключение. Таким образом, в работе показано, что участки поверхности кремния, облученные ионным пучком Ga регистрируются с помощью нематического жидкого кристалла. Для малых доз облучения, при которых нет изменения исходной ориентации нематика на поверхности кремния, визуализация основана на регистрации изменения поверхностной проводимости кремния. Визуализация при более высоких дозах облучения поверхности кремния осуществляется благодаря изменению исходной ориентации нематика и формированию гомеотропной или наклонной ориентации в зависимости от дозы облучения.

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

Литература

1. Matsui S. // Nucl.Instrum. Methods.B. – 2007. – 25. – P.7758.
2. Assayag G.B. et al // J.Vac.Sci.Technol.B. – 1995. – 13. – P.2772.
3. T.Hoshino // J.Vac.Sci.Technol.B. – 2006. – 24;6. – P.2538-2543.
4. C.Satriano, S.Carnazza, A.Licciardello // J.Vac.Sci.Technol. A. – 2003. – 21;4. – P.1145-1151.
5. S. Arscott, D.Troadec // Nanotechnology. – 2005. – 16. – P.2295-2302.
6. K. Arshak, M.Mihov // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. – 2005. – 7;1. – P.193-198.
7. Блинов Л.М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов / Л.М.Блинов. – М.:Наука, 1978. – 84с.
8. Kim J.B., Kim K.C., Ahn H.J., Hwang B.H., Hyun D.Ch., Baik H.K. // Appl. Phys. Lett. – 2007. – 90. – P.3515.
9. Zhang X.G. Electrochemistry of Silicon and Its Oxide / X.G.Zhang. – New York: Klumer Academic Press/Plenum Publishers, 2001. – 61p.

VISUALIZATION OF SILICON SURFACE TREATED BY FOCUSED BEAM OF Ga IONS IN NEMATIC CELL

S.I.Kucheev, Yu.S.Tuchina

Belgorod State University,

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

We demonstrate the visualization possibility of silicon surface treated by focused ion beam in nematic cell. Using small dose of irradiation, the visualization is based on the redistribution of applied voltage between the depleted silicon surface and the liquid crystal layer. By the dose increasing, the visualization is attained due to the change of initial alignment of liquid crystal. It is supposed that homeotrop alignment is caused by the amorphous surface of irradiated silicon and the tilted alignment of liquid crystal is induced by the change of hydrophilic properties of surface.

Key words: nematic, silicon, focused ion beam, field effect, ions.