

05;11

О возможности контролируемой ориентации нематического жидкого кристалла на кремнии, обработанном фокусированным пучком ионов Ga

© С.И. Кучеев, Ю.С. Тучина

Белгородский государственный университет,
308015 Белгород, Россия
e-mail: skucheev@yahoo.com

(Поступило в Редакцию 5 августа 2009 г.)

Приведены предварительные результаты исследования ориентации нематического жидкого кристалла 5СВ на поверхности монокристаллического кремния, обработанного фокусированным пучком ионов Ga с энергией 30 keV. Показано, что гомеотропная или наклонная ориентация нематика может быть получена контролируемым образом в зависимости от дозы облучения. Продемонстрирована возможность получения разных рисунков поверхности с требуемой ориентацией нематика микронного разрешения, которые задаются растром ионного пучка.

Кремний благодаря своим технологическим и физическим свойствам часто используется в качестве многофункциональной „платформы“ при разработке и изготовлении жидкокристаллических приборов: микродисплеев, пространственно-временных модуляторов света, дифракционных приборов и т.д. В связи с этим актуальной задачей остается разработка методов получения контролируемой ориентации молекул жидкого кристалла на поверхности кремния с микронным и субмикронным разрешением.

Методы ориентации, основанные на ионной [1], плазменной [2] обработке поверхности, косом напылении SiO₂ [3], в которых используются потоки низкоэнергетических (до 1 keV) ионов или нейтральных атомов, малоприменимы для этих целей из-за необходимости масок сквозного типа с вышеуказанным разрешением, что само по себе представляет сложную проблему. Фотоориентации [4] присущи недостатки, связанные с необходимостью высокотемпературной обработки подложек, со светочувствительностью полимерных покрытий, особенно в условиях эксплуатации микроприборов в проекционных системах, в которых поверхность подвергается воздействию сильного светового потока. Методы ориентации, основанные на скрайбировании поверхности острием атомного силового микроскопа (АСМ) [5], локальном окислении [6], потенциально могут позволить решить проблему достижения микронного разрешения, однако по имеющимся литературным данным, не дают воспроизводимых результатов. Более того, метод [5] необходимо отнести к контактным методам, которые имеют ряд известных недостатков.

Хорошо известно, что фокусированные пучки ионов галлия в последнее время становятся востребованным инструментом в микрооптоэлектронике [7] для обработки и визуализации поверхности с нанометровым разрешением. В связи с несомненной перспективностью использования фокусированных пучков ионов в данной работе была рассмотрена возможность получения кон-

тролируемой ориентации жидкого кристалла на поверхности кремния с помощью фокусированного ионного пучка Ga.

В эксперименте использовался монокристаллический кремний *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением 4.5 Ω · см. Поверхность кремния обрабатывалась фокусированным пучком ионов Ga с энергией 30 keV и током 3 nA в двойном (электроны, ионы) сканирующем микроскопе (РЭМ) FEI Quanta 200 3D. В качестве реперных меток на поверхности кремния были использованы прямоугольные *n*⁺-легированные „карманы“.

С использованием растрового движения ионного пучка на образце кремния было сформировано шесть перекрывающихся одинаковых участков прямоугольной формы (350 × 300 μm) с разной дозой облучения. Далее образец кремния был использован в качестве подложки в жидкокристаллической ячейке „сэндвич“-типа. Поверхность, противоположная кремниевой подложке, была обработана раствором лецитина для формирования гомеотропной (нормальной) ориентации молекул жидкого кристалла. Использовался нематик 5СВ, который был заправлен в ячейку толщиной 5 μm в изотропной фазе. Рис. 1 демонстрирует изображение фрагмента жидкокристаллической ячейки с упомянутыми участками на поверхности кремния.

Анализ ориентации нематика, проведенный с помощью поляризационного микроскопа показал, что ориентация на облученных поверхностях кремния существенно зависит от дозы облучения. Если на поверхности, противоположной кремниевой подложке, имеет место гомеотропная ориентация, доза облучения первого участка является недостаточной для изменения исходной гомеотропной ориентации нематика на поверхности кремния. С увеличением дозы облучения (участки 2, 3, 4, 5) количество дисклинационных линий (темные извилистые линии) уменьшается. Принимая во внимание, что дисклинационные линии — это места, где преимущественное направление длинных осей молекул в нематической фазе изменяет свое направление,

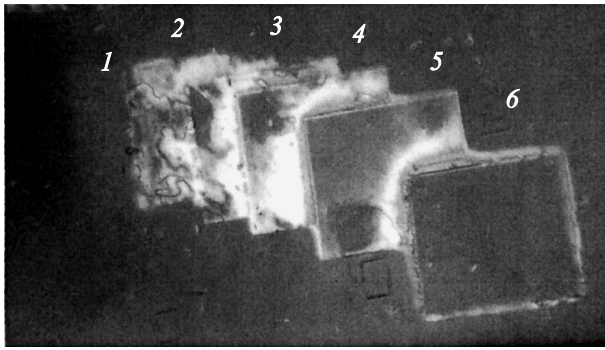


Рис. 1. Фрагмент жидкокристаллической ячейки с кремниевой подложкой, облученной фокусированным ионным пучком в растровом режиме. Доза облучения участков, ion/cm^2 : 1 — $3.1 \cdot 10^{14}$; 2 — $9.3 \cdot 10^{14}$; 3 — $1.86 \cdot 10^{15}$; 4 — $3.72 \cdot 10^{15}$; 5 — $7.44 \cdot 10^{15}$; 6 — $1.48 \cdot 10^{16}$.

следует, что упорядоченность ориентации молекул в слое жидкого кристалла возрастает при увеличении дозы облучения. Пятый участок, за исключением граничных областей, можно характеризовать почти однородной наклонной ориентацией нематика (особенно в области перекрытия с четвертым участком). Анализ шестого участка говорит о формировании на нем гомеотропной ориентации нематика. Таким образом, начиная с первого участка до шестого ориентация нематика на поверхности кремния изменяется от исходной гомеотропной до конечной, также гомеотропной, проходя через стадии наклонной ориентации с разной степенью неоднородности.

С целью более детального исследования получающейся ориентации нематика далее поверхность кремния облучалась в режиме „spot“. В таком режиме ионный пучок на поверхности кремния фокусируется в пятно. Однако всегда имеет место гауссов „хвост“ [8] в радиальном распределении ионов по сечению пучка. Благодаря непрерывному характеру этого распределения однократное облучение поверхности в режиме „spot“ позволяет перекрыть широкий спектр доз облучения.

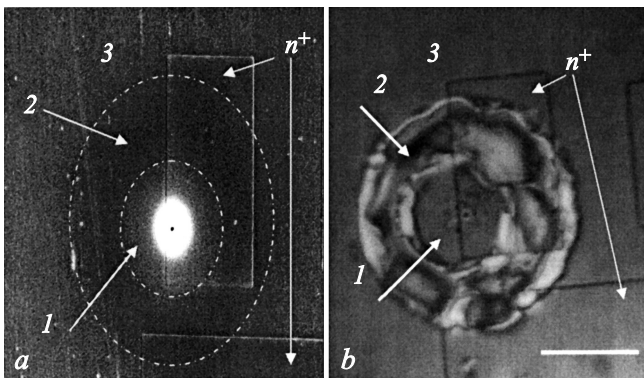


Рис. 2. *a* — РЭМ-изображение (под углом) поверхности кремния, обработанного ионным пучком в режиме „spot“. Время экспозиции 300 с. *b* — изображение слоя нематика на поверхности облученного кремния. Метка — $120 \mu\text{m}$.

Рис. 2, *a* представляет типичное РЭМ-изображение поверхности кремния после обработки ионным пучком в режиме „spot“ (нормальное падение). Анализ изображения позволяет выделить два характерных типа поверхности облученного кремния. На всех РЭМ-изображениях можно выделить поверхность (1), имеющую светлый фон, которая расположена ближе к кратеру (черная точка в центре области 1), и поверхность (2), которая имеет фон более темный, чем фон поверхности обработанной недостаточной дозой (3). Отметим, что фон светлой области (1) неоднороден, к центру интенсивность светлого фона значительно возрастает. Две пунктирные линии на рис. 2, *a* отделяют первую область от второй, и вторую область — от необработанной (недостаточно обработанной) поверхности кремния (3) соответственно.

Из литературных данных известно, что в результате внедрения ускоренных ионов Ga в приповерхностные слои кремния, последний приобретает аморфные свойства. Аморфизация поверхности начинается приблизительно с дозы порядка 10^{14}cm^{-2} (30 keV) [9]. Поэтому допустим, что светлый фон, обработанной ионным пучком поверхности кремния (область 1 на РЭМ-изображении, рис. 2, *a*), обусловлен проявлением аморфных свойств этого участка поверхности.

Рис. 2, *b* демонстрирует поляризационное изображение слоя нематика, который был нанесен на указанную выше поверхность кремния. Хорошо видно, что результатом взаимодействия ионного пучка с поверхностью кремния является формирование двух областей с разной ориентацией нематика. Это области с гомеотропной (стрелка 1) и наклонной (стрелка 2) ориентациями соответственно (см. рис. 2, *b*). Отметим, что наклонная ориентация нематика в области (2) неоднородна. Граница между гомеотропной и наклонной ориентациями достаточно резкая (рис. 2, *b*) и в точности повторяет границу (отмечена пунктиром) между соответствующими областями 1 и 2, которые наблюдаются на РЭМ-изображении (рис. 2, *a*). Другими словами, поверхность кремния, имеющая светлый фон на РЭМ-изображениях, вызывает гомеотропную ориентацию нематика, а поверхность с темным фоном (на РЭМ-изображениях) вызывает наклонную ориентацию. Отметим хорошую воспроизводимость гомеотропной и наклонной ориентации нематика на поверхности кремния при многократном удалении и нанесении жидкокристаллического материала (очистка поверхности кремния от жидкого кристалла осуществлялась органическими растворителями — изопропиловый спирт, ацетон, демитилформамид).

На рис. 3 представлены изображения слоя нематика на поверхности кремния, который был облучен в режиме „spot“ при наклонном падении ионного пучка. Хорошо видно, что области с измененной ориентацией нематика, как гомеотропной (1), так и наклонной (2) с некоторым числом дисклинационных линий (пример одной из дисклинационных линий дан на рис. 3, *a*), представляют собой эллиптические зоны. Эллиптичность зон ориентации позволяет исключить механизм ориентации нематика

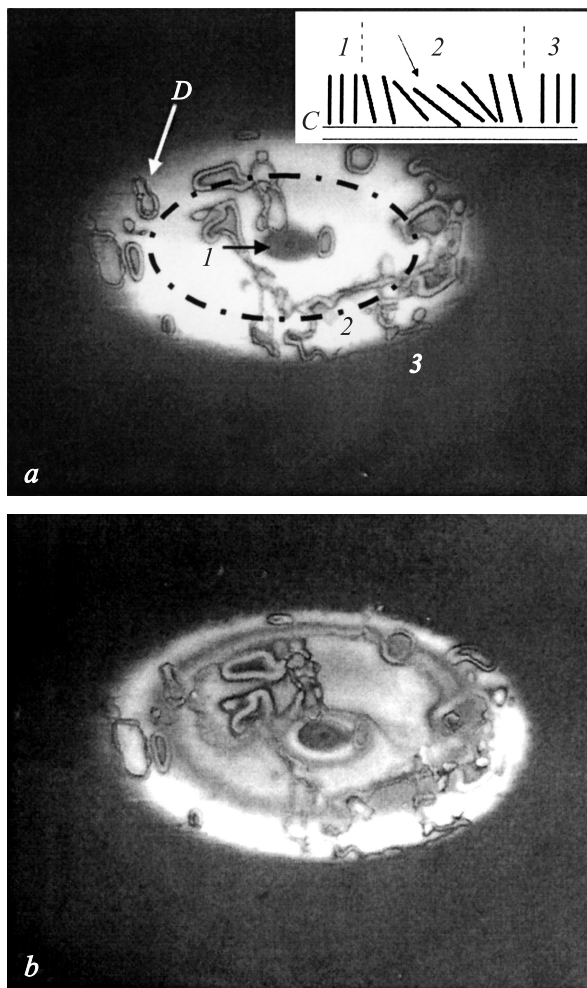


Рис. 3. Ориентация нематика на поверхности кремния в области наклонного облучения ионным пучком в режиме „spot“. Время экспозиции 100 s. *D* — дисклинационная линия. Отсутствие (*a*) и появление (*b*) псевдоцветной окраски эллиптических зон соответственно. Вставка: схематическое представление ориентации молекул нематика на поверхности кремния. *C* — зона кратера. *1, 2, 3* — гомеотропная, наклонная и исходная гомеотропная ориентация соответственно.

на напыленном слое, который принципиально мог бы сформироваться в результате напыления при выбросе частиц материала подложки из кратера (как из точечного источника) под действием фокусированного ионного пучка. В последнем случае зоны измененной ориентации имели бы кольцевую структуру, что, как видно в эксперименте, не наблюдается. Изучение поверхности кремния с помощью АСМ (Integra NT-MDT) показано, что изменение рельефа поверхности кремния за счет разрушения и распыления материала подложки под действием фокусированного ионного пучка имеет место только в непосредственной близости (менее $10 \mu\text{m}$) от кратера. На остальной поверхности кремния изменений рельефа с помощью АСМ зарегистрировано не было.

Качественно можно показать, что угол преднаклона молекул нематика в области наклонной ориентации

изменяется с расстоянием от центра и при некоторой дозе облучения принимает минимальное значение. Механически перемещая жидкокристаллический материал в области измененной ориентации, можно уменьшить толщину слоя нематика таким образом, что оставшийся слой в поляризованном свете будет иметь светлый фон (область 2), но без интерференционного псевдоцветного окрашивания, причем темный фон области (1) гомеотропной ориентации не изменяется при любой толщине нематика. Такая ситуация отображена на рис. 3, *a*. Отсутствие интерференции означает, что толщина жидкокристаллического (двулучепреломляющего) слоя такова, что разности оптического хода недостаточно для выполнения условий интерференции между обыкновенным и необыкновенным лучами. При обратном натекании жидкого кристалла толщина слоя постепенно возрастает и наступает момент, когда условие интерференции начинает выполняться. На рис. 3, *a* пунктиром отмечена область, в которой первоначально начинает появляться псевдоцветное окрашивание нематика. Это означает, что в этот момент по периметру отмеченного эллипса имеет место максимальное значение оптической задержки между обыкновенным и необыкновенным лучами. Это в свою очередь означает, что в этой области жидкого кристалла угол преднаклона (схематически отмечено стрелкой на вставке рис. 3, *a*) должен иметь минимальное значение. При дальнейшем увеличении толщины жидкокристаллического слоя оптическая разность хода продолжает возрастать, поэтому условия интерференции начинают выполняться последовательно друг за другом в других эллиптических зонах, отстоящих от места первого эллипса (см. рис. 3, *b*). Отметим, что число дисклинационных линий в области наклонной ориентации (2) (рис. 3), так же как и в случае растрового облучения поверхности кремния (рис. 1), уменьшается при увеличении дозы от периферии к центру.

Необходимо заметить, что четкие границы областей гомеотропной и наклонной ориентации нематика (рис. 2, *b, 3*) на облученном кремнии в режиме „spot“, по-видимому, указывают на пороговый характер изменения ориентации нематика при варьировании дозы облучения.

Основным фактором, который, по-видимому, ответствен 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 (рис. 2). Другой фактор (при меньшей дозе облучения), который, по-видимому, ответствен за наклонную ориентацию нематика, обусловлен гидрофильностью/гидрофобностью поверхности кремния. Кремний благодаря имеющимся на его поверхности гидроксильным группам [10] имеет тенденцию ориентировать полярный нематик 5СВ гомеотропно. Вследствие облучения поверхности имеет место адсорбция ионов Са и

частичное химическое замещение гидроксильных групп на ионы Ga [11] с соответствующей частичной потерей гидрофильности и соответственно тенденцией ориентировать нематик гомеотропно.

Таким образом, экспериментально продемонстрировано, что гомеотропная или наклонная ориентация нематика 5СВ на поверхности кремния может быть получена с помощью обработки поверхности пучком ионов Ga с соответствующей дозой облучения, при этом угол преднаклона в области наклонной ориентации варьируется в некоторых пределах, проходя через минимальное значение. Рисунок поверхности с микронным разрешением и с требуемой ориентацией нематика задается растром ионного пучка.

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

Список литературы

- [1] Sun Z.M., Engels J.M., Dozov I., Durand G. // J. Phys. II France. 1994. Vol. 4. P. 59–73.
- [2] Yaroshchuk O., Zakrevskyy Yu., Dobrovolskiy A., Pavlov S. // Proc. SPIE> 2001. Vol. 4418. P. 49–53.
- [3] Monkade M., Boix M., Durand G. // Europhys. Lett. 1988. Vol. 5. P. 697–701.
- [4] Schadt M., Schmidt K., Kozinkov V., Chigrinov V. // Jpn. J. Appl. Phys. 1992. Vol. 31. N 7. Pt. 1. P. 2155–2164.
- [5] Ruetschi M., Grutter P., Funfschilling J., Guntherodt H.J. Science. 1994. Vol. 265. P. 512–514.
- [6] Lin T.C., Chao C.Y. // Jpn. J. Appl. Phys. 2008. Vol. 47. N 6. P. 4583–4585.
- [7] MoberlyChan W.J., Adams D.P., Aziz M.J., Hobler G., Schenkel Th. MRS Bulletin. 2007. Vol. 32. P. 424–432.
- [8] Gumming K.D., Harriot L.R., Chi G.C., Ostermayer F.W. // Proc. SPIE. 1986. Vol. 632. P. 93–98.
- [9] Jones K.S., Cyulai J. Ion Implantation Science and Technology / Ed. by J.F. Ziegler. Yorktown: Ion Implantation Technology Co, 1996. P. 261–292.
- [10] Kim J.B., Kim K.C., Ahn H.J., Hwang B.H., Hyun D.Ch., Baik H.K. // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 90. P. 043 515.
- [11] Zhang X.G. Electrochemistry of Silicon and Its Oxide. NY: Kluwer Academic–Plenum Publishers, 2001. 61 p.