

УДК 620.1.72:532.783

DOI 10.18413/2075-4639-2019-51-2-311-322

**ОРИЕНТАЦИЯ НЕМАТИКА 5CB И ФОТОЁМКОСТНЫЕ СВОЙСТВА
СТРУКТУРЫ Si/НЕМАТИК/ИТО С ПЛЁНКОЙ a-Si****ORIENTATION OF NEMATIC 5CB AND PHOTO CAPACITIVE PROPERTIES
OF Si/NEMATIC/ITO STRUCTURE WITH a-Si**

**В.С. Захвалинский, С.И. Кучеев, Е.А. Пилюк, Г.В. Родригез,
Е.Ю. Рыжикова, В.А. Бондаренко**
**V.S. Zahvalinskii, S.I. Kucheev, E.A. Piljuk, G.V. Rodrigues,
E.Yu. Rizhikova, V.A. Bondarenko**

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

Belgorod National Research University,
85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia

E-mail: kucheev@bsu.edu.ru

Аннотация

Экспериментально исследуются ориентация нематика 5CB на пленках аморфного кремния (a-Si), полученных магнетронным методом, и фотоёмкостные свойства структуры Si/нематик/ИТО как прототипа оптически адресуемого жидкокристаллического модулятора света методом падения напряжения при её фотовозбуждении фокусированным лазерным излучением (He-Ne 0,6 мкм). Показано, что ориентация нематика 5CB получается гомеотропной на плёнках a-Si, напыленных как на поверхность монокристаллического кремния, так и на поверхность окиси кремния. Установлено, что при магнетронном напылении плёнок a-Si, ZnO, Si₃N₄ с использованием масок, выполненных как из кремния, так и металлических, формируется однородная планарная ориентация нематика в виде полосы на той части поверхности подложки, которая в процессе напыления была под маской на некотором расстоянии от края маски. Предполагается, что планарная ориентация нематика формируется на плёнке, которая получилась в результате распыления материала под косым углом в микрозазор между подложкой и маской. Метод падения напряжения позволяет исследовать: (1) формирование обеднения поверхности кремния, (2) влияние на обеднение поверхности постоянного смещения и частоты управляющего напряжения, а также регистрировать наличие на поверхности кремния наноразмерной пленки a-Si, при этом тестирующее напряжение, в отличие от мостовых методов, может быть в широком диапазоне величин, включая напряжение, соответствующее порогу Фредерикса. Дана интерпретация разделения зависимостей падения напряжения от частоты на два диапазона: низкочастотный и высокочастотный соответственно, что связывается с процессами переноса и накопления ионных зарядов в слое жидкого кристалла. Показано согласие результатов экспериментов по методу порога исчезновения светочувствительности, в которых визуально регистрируется реакция ЖК на облучение структуры активным светом, и результатов по методу падения напряжения.

Abstract

The orientation of nematic 5CB on films of amorphous silicon (a-Si) obtained by the magnetron method and photo-capacitive properties of the Si/nematic/ITO structure, as a prototype of an optically addressed liquid-crystal light modulator, is investigated experimentally by its photoexcitation by focused laser radiation (He-Ne 0.6 μm). It has been shown that the orientation of the nematic 5CB is obtained homeotropic on a-Si films deposited both on the surface of single-crystalline silicon and on the surface of silicon oxide. It was established that during the magnetron sputtering of a-Si, ZnO, Si₃N₄ films using masks made of both silicon and metal, a uniform planar orientation of the nematic is formed in the form of a strip for some depth from the mask edge on that part of the substrate surface, which during the



deposition was masked. It is assumed that the planar orientation of the nematic is formed on the film that was obtained by deposition of the material at an oblique angle into the microgap between the substrate and the mask. The voltage drop method allows to investigate: (1) the formation of silicon surface depletion, (2) the effect on the surface depletion of a constant bias and frequency of the control voltage, as well as the presence of a-Si nanoscale film on silicon surface, while testing voltage, in contrast to bridge methods, may be in a wide range of values, including the voltage corresponding to the Fredericks threshold. An interpretation is given of the separation of the dependences of the voltage drop on frequency into two ranges: low frequency and high frequency, respectively, which is associated with the transfer and accumulation of ionic charges in a layer of liquid crystal. The agreement of the results of experiments on the method of photosensitivity disappearance threshold, in which the visual reaction of the liquid crystal layer to the irradiation of the structure with active light are recorded and the results by the method of voltage drop is shown.

Ключевые слова: жидкокристаллический модулятор света, кремний, обеднение.

Keywords: liquid crystal modulator of light, silicon, depletion.

Введение

Одним из перспективных видов оптических приборов, предназначенных для обработки оптической информации, являются жидкокристаллические модуляторы света [Lasarev et al., 2007], среди которых можно выделить группу оптически адресуемых модуляторов, архитектурно наиболее подходящих для параллельной обработки оптической информации [Васильев, 1987]. Основа функционирования такого типа модуляторов света лежит в формировании пространственного распределения директора в жидком кристалле в соответствии с распределением поверхностной проводимости полупроводника. Такое распределение задаётся записывающим светом, а амплитудная и/или фазовая модуляция считывающего света осуществляется слоем жидкого кристалла. На сегодня наибольшее распространение получили модуляторы на основе МДП структур [Yang, 2006.], в которых существенным элементом является диэлектрическая плёнка. Она выполняет как минимум две функции, а именно, электрическую развязку по постоянному току и роль диэлектрического зеркала для оптической развязки записывающего и считывающего света.

Структуры Si/нематик/прозрачный электрод на основе «промышленного» кремния также демонстрируют перспективность использования в качестве оптически адресуемых модуляторов света [Кучеев, 2010]. В отличие от МДП структур, в этой структуре отсутствие диэлектрической пленки позволяет расширить функциональные возможности модулятора. Такое расширение обусловлено включением в группу параметров управления модулятора подвижной ионной подсистемы [Gritsenko, 2003] в жидком кристалле, формирующуюся вследствие поляризации, переноса, инжекции ионных носителей [Кучеев, 2016], а также переноса заряда через границу кремний/жк с непосредственным влиянием на поверхностную концентрацию носителей в полупроводнике. Пример параллельной обработки оптического изображения (дифракционная картинка) структурой Si/нематик/прозрачный электрод, которая связана с ионными процессами в нематике, отображен на рис. 1, когда движущееся по поверхности кремния изображение визуализируется (рис. 1а), но это же самое изображение «исчезает» (рис. 1б), если оно не движется по поверхности полупроводника.

В отличие от модуляторов света на основе МДП, для которых ёмкостные свойства детально изучены [Muller, 2003], и их слабосигнальные характеристики фактически перенесены на функционирование жидкокристаллических модуляторов, для вышеупомянутых структур типа Si/нематик/прозрачный электрод описание их ёмкостных свойств в литературе практически нет. Это обусловлено следующим. Из-за того, что структура Si/нематик/прозрачный электрод как прототип оптически адресуемого модулятора света в общем случае представляет собой совокупность последовательно

соединённых функциональных слоев, среди которых есть жк слой, рабочее напряжение модулятора должно быть не менее нескольких вольт, что необходимо для переориентации молекул жидкого кристалла [Blinov, 1993]. Поэтому исследование ёмкостных свойств (если таковые имеются при рабочих напряжениях) структуры Si/нематик/прозрачный электрод мостовыми методами затруднительно, т.к. в последних используется тестирующее напряжение менее 1 В. Кроме этого, при отсутствии изолирующего слоя на границе Si/нематик имеет место утечка электрических зарядов, что препятствует балансировке ёмкостного моста. Вследствие этого, в предлагаемой работе изучение фотоёмкостных свойств структуры Si/нематик/прозрачный электрод осуществлялось методом падения напряжения при подключении структуры к генератору переменного напряжения и локальном освещении её светом. С целью автоматизации съёма большого количества показаний с регистрирующего прибора была написана программа для РС на языке LabView 7.1 Pro.

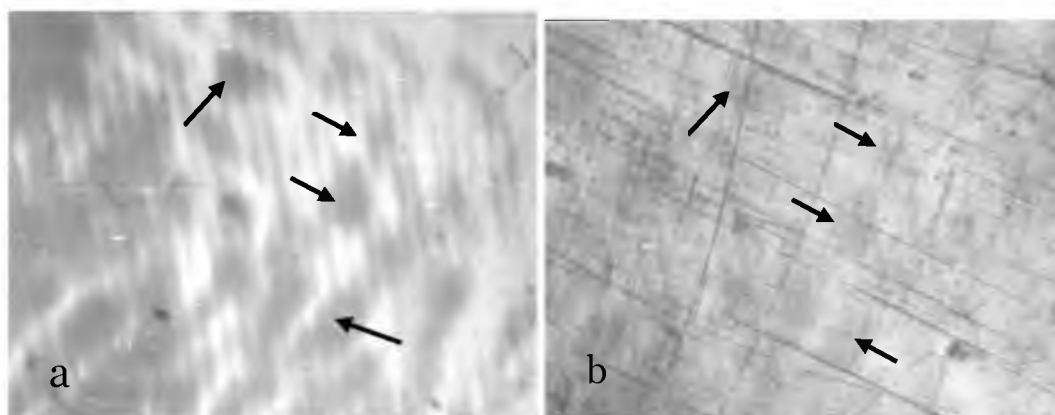


Рис. 1. Визуализация в структуре Si/5CB/ITO дифракционной картины: а – дифракционная картина движется по поверхности кремния; б – исчезновение визуализации дифракционной картины при её остановке. Стрелки указывают на одни и те же фрагменты дифракционной картины

Fig. 1. Visualization in the Si/5CB/ITO structure of diffraction pattern: a – the diffraction pattern moves along the silicon surface, b – the “disappearance” of the visualization of the diffraction pattern when it stops. The arrows indicate the same fragments of the diffraction pattern

Эксперимент

В работе использовалась тонкоплёночная структура типа Si/нематик/прозрачный электрод, схематично отображенная на рис. 2а. В качестве светочувствительной подложки использовался монокристаллический кремний р-типа проводимости с удельным сопротивлением около 4,5 Ом*см. В качестве жк материала был использован нематический жидкий кристалл 5CB. Прозрачным электродом служила пленка окиси индия (ITO), на поверхности которой была нанесена полиимидная плёнка, которая задаёт планарную ориентацию молекул жидкого кристалла (рис. 2а). Толщина жк слоя определялась фторопластовыми прокладками и составляла около 5 мкм. Структура Si/нематик/ITO управлялась переменным напряжением (U_{ac}) с постоянным смещением (U_{dc}), полярность которого определялась относительно кремниевой подложки.

С целью изменения граничных условий на поверхности кремния, а именно – изменения ориентации директора и поверхностной проводимости, на части поверхности монокристаллического кремния магнетронным методом напылялась плёнка кремния. Учитывая, что при магнетронном распылении мишени, в качестве которой используется монокристаллический кремний, температура подложки не превышала 30 °С, предполагается, что напыленная кремниевая пленка представляет собой плёнку аморфного кремния (a-Si) с небольшим количеством вкраплений нанокристаллического



кремния ($nc - Si$) [Zakhvalinskii et al., 2014; Zakhvalinskii, Piljuk et al., 2014]. Перед процессом напыления пленки $a-Si$ поверхность подложки кремния подвергалась травлению плавиковой кислотой с целью удаления пассивирующего термического окисла, ранее находившегося на поверхности кремния, и последующей промывке дистиллированной водой. Условия напыления, а именно: время напыления – 3 минуты, мощность – 30 Вт, расстояние между мишенью и подложкой – 8 см, давление $Ar \sim 0,6$ Па, позволяли получать пленки $a-Si$ толщиной около 10 нм [Zakhvalinskii, 2015].

Исследования ориентации нематика на плёнках $a-Si$, которые были напылены как на поверхность монокристаллического кремния, так и на поверхность термической окиси кремния показали, что в обоих случаях на пленке $a-Si$ формируется гомеотропная ориентация нематика 5CB, рис. 2b, f. Отметим, что напыленные магнетронным методом пленки карбида кремния [Захвалинский, 2014], нитрида кремния [Кучеев, 2017.], окиси цинка (см. рис. 2d) при тех же условиях напыления также дают гомеотропную ориентацию нематика 5CB.

Было установлено, что при напылении вышеуказанных плёнок (SiC , Si_3N_4 , ZnO и $a-Si$) с использованием масок, закрывающих часть поверхности подложки, хорошо воспроизводится планарная/наклонная однородная ориентации нематика на поверхности подложки в узкой полосе (схематично отмечено P, рис. 2a). Особенностью расположения этой полосы планарной ориентации нематика является то, что она находится на поверхности подложки там, где ранее (в процессе напыления) находилась прижимная маска. Это подтверждается в разных экспериментах, ряд которых приведен ниже. Рис. 2b демонстрирует планарную (отмечено P) ориентацию 5CB по границе бывшего расположения маски на подложке при напылении $a-Si$. Рис. 2c в свою очередь демонстрирует фрагмент поверхности образца кремния, который был использован в качестве маски. На полированной поверхности маски виден скол (2). Сравнение особенности формы скола на краю маски и формы области планарной ориентации (P) нематика позволяет сделать вывод, что планарная ориентация нематика сформирована на поверхности подложки в глубине своего рода микрополости, которая образуется между плоскостью подложки и сводом скола на краю маски (вставка, рис. 2b). Отметим, что подобные полосы планарной ориентации нематика на границе маски наблюдаются при магнетронном напылении и других материалов – карбида кремния, нитрида кремния (рис. 2e), окиси цинка (рис. 2f).

С целью более точного установления границ области изменения ориентации нематика было проведено напыление $a-Si$ через калиброванные отверстия в металлической маске, а материалом подложки была выбрана поверхность окиси кремния. Последняя перед напылением подвергалась только очистке органическими растворителями. Такой тип поверхности при достаточно длительной выдержке после указанной выше обработки обычно дает некоторую исходную наклонную неоднородную ориентацию нематика, напоминающую «паутину» (W, рис. 2f). В такой геометрии незначительные вариации наклона директора, вызванные изменением физико-химических свойств поверхности после процесса напыления, надёжно регистрируются по изменению интерференционных цветов. Использование вышеупомянутой маски и определение реальных размеров поверхностей с разной ориентацией нематика подтверждают, что интересующее нас появление планарной ориентации действительно происходит на поверхности подложки, которая ранее была под маской (P, рис. 2f), тогда как на плёнках $a-Si$, напыленных непосредственно через отверстия (с сохранением соответствующих размеров) формируется гомеотропная ориентации (H), рис. 2f. Предварительный анализ появления планарной/наклонной ориентации нематика по кромке поверхности подложки ранее закрытой маской позволяет предположить, что планарная/наклонная ориентация нематика индуцируется на поверхности кремния (а также окиси кремния) вследствие напыления материала под косым углом [Monkade, 1988] в микрозазор под маской, что возможно происходит за счет распыления материала маски бомбардирующими атомами, рис. 2d.

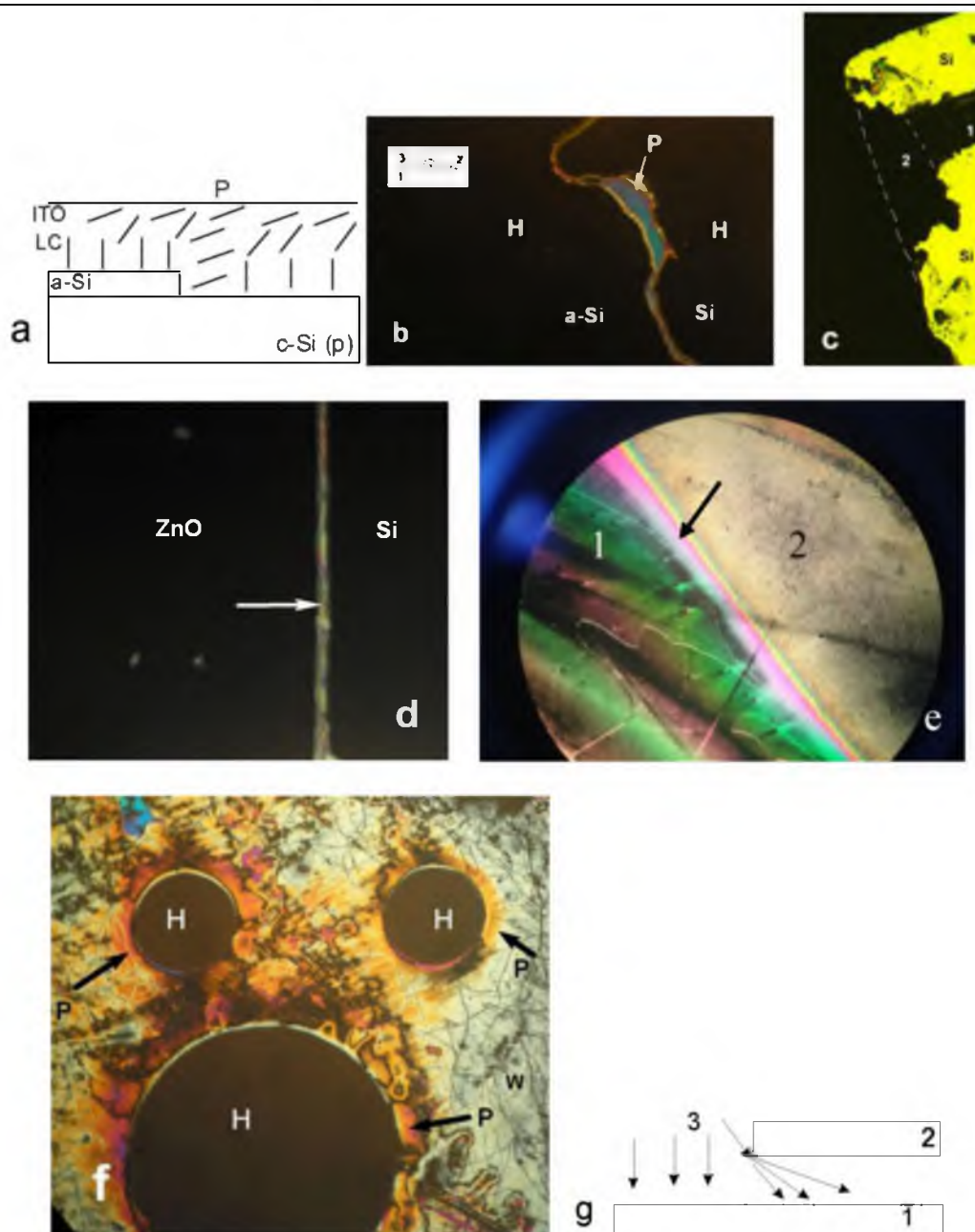


Рис. 2. Структура прототипа модулятора света и ориентация нематика 5CB.
 а – Схематичное представление структуры Si/нематик/ITO. P – область планарной (наклонной) ориентации нематика. b – Гомеотропная (H) ориентация нематика 5CB со свободной поверхностью на плёнке a-Si и поверхности Si (в процессе напыления была закрыта маской (кремниевая пластина толщиной 350 мкм)). P – полоска планарной ориентации нематика на границе пленка a-Si и поверхность Si (соответствует местоположению микрозазора). Вставка: 1 – Si подложка, 2 – маска со сколом, 3 – микрозазор. c – Изображение (зеркальное) фрагмента (угол) кремниевой (Si) маски. Царапина (1) на полированной поверхности кремния, переходящая в скол (2) на краю маски. d – Гомеотропная ориентация 5CB на плёнке окиси цинка (ZnO). Стрелка – планарная ориентация на границе ZnO – Si, где ранее при напылении ZnO была граница маски. e – Ориентация 5CB на плёнке нитрида кремния (2) и поверхности кремния (1). Стрелка – полоска планарной ориентации нематика 5CB. f – Гомеотропная (H) ориентация нематика 5CB с открытой поверхностью на пленках a-Si в форме кругов, которые напылены через отверстия в металлической маске. P – планарная ориентация. W – ориентация нематика в виде «паутины» на поверхности SiO₂. g – Микрозазор между c – Si подложкой (1) и маской (2). 3 – поток напыляемого материала. Рисунок не в масштабе



Fig. 2. The structure of the prototype of the light modulator and the orientation of the nematic 5CB. a – Schematic representation of the structure of Si/nematic/ITO. P is the region of the planar (oblique) orientation of the nematic. b – Homeotropic (H) orientation of a nematic 5CB with a free surface on a – Si film and Si surface (during sputtering had been covered by a mask (silicon plate 350 μm thick)). P is the strip of planar orientation of the nematic at the interface of a – Si film and the Si surface (corresponding to the microgap location). Insert: 1 – Si substrate, 2 – mask with chipping, 3 – microgap. c – Image (mirror) of a fragment (corner) of a silicon (Si) mask. Scratch (1) on the polished silicon surface turning into a chip (2) on the edge of the mask. d - Homeotropic orientation 5CB on a film of zinc oxide (ZnO). The arrow is a planar orientation of nematic on the ZnO – Si interface, where the mask had been during ZnO deposition. e – Orientation 5CB on the film of silicon nitride (2) and the surface of silicon (1). The arrow is a strip of planar orientation of nematic 5CB. f – Homeotropic (H) orientation of nematic 5CB with an open surface on a-Si films in the form of circles deposited through holes in a metal mask. P – planar orientation. W is the nematic orientation in the form of a “web” on the surface of SiO_2 . g – micro gap between c-Si substrate (1) and mask (2). 3 – the flow of the deposited material. Figure is not to scale

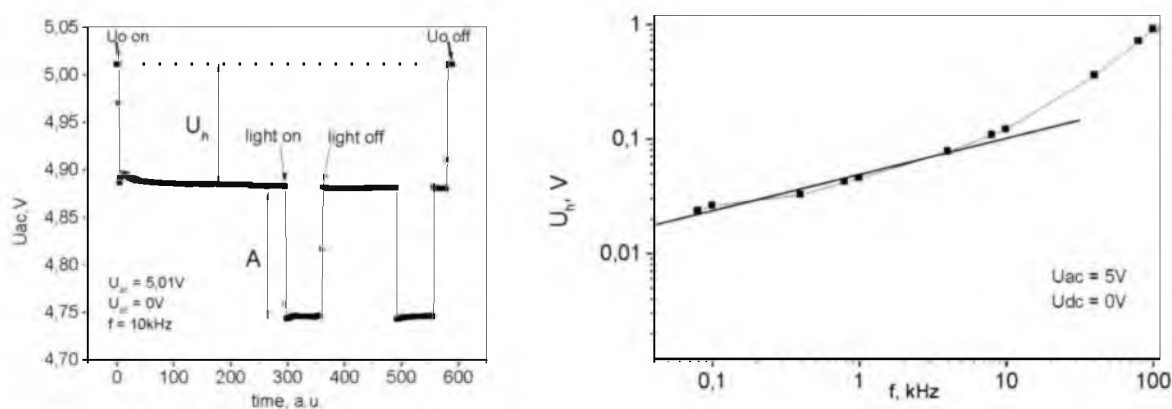


Рис. 3. Падение напряжения при подключении структуры Si/нематик/ИТО к генератору переменного напряжения. а – Зависимость напряжения от времени (относительные единицы) при подключении генератора и импульсном локальном освещении структуры лазерным излучением. б – Зависимость падения напряжения от частоты переменного напряжения. Смещение $U_{dc} = 0\text{В}$

Fig. 3. The voltage drop when connecting the structure of Si/nematic/ITO to the alternating voltage generator. a – Dependence of voltage on time (relative units) when connecting a generator and pulsed local illumination of the structure with laser radiation. b – Dependence of the voltage drop on the frequency of the AC voltage. Bias $U_{dc} = 0\text{V}$

На рис. 3а представлена типичная кривая, отображающая характер падения напряжения при подключении (U_0 on) генератора переменного напряжения при соответствующей частоте к структуре Si/нематик/ИТО и отключении его (U_0 off) от структуры. Хорошо видно, что при подключении исходное напряжение U_0 падает на величину U_h . Исходное напряжение U_0 соответственно подбирается таким образом, что бы после его уменьшения на величину U_h на слое ЖК падало напряжение достаточное для перехода Фредерика.

Рис. 3б демонстрирует кривую, соответствующую падению напряжения U_h при подключении структуры Si/нематик/ИТО к генератору переменного напряжения в зависимости от частоты (f). Видно, что величина падения напряжения растет с увеличением частоты переменного напряжения. Такой характер изменения падения напряжения от частоты можно объяснить следующим образом. Структура Si/нематик/ИТО может быть представлена в виде некоторой составной емкости ($C_{\text{structure}}$). Цепь: генератор – измерительный прибор – $C_{\text{structure}}$ можно рассматривать в качестве интегрирующей

цепочки, при этом напряжение U_h , которое регистрируется прибором, падает на некотором эффективном внутреннем резисторе самого измерительного прибора (вольтметр), а не на реактивном сопротивлении ($X_{Cstructure}$) ёмкости структуры Si/нематик/ITO, как принято для переходных характеристик интегрирующих цепочек. Принимая во внимание, что сумма падений напряжения U_h и напряжения на реактивном сопротивлении ёмкости структуры $X_{Cstructure}$ остается постоянной, уменьшение падения на ёмкости структуры с увеличением частоты, т. к. $X_{Cstructure} \sim 1/f$, будет сопровождаться ростом U_h с частотой, что демонстрирует рисунок 2в, причем в двойном логарифмическом масштабе наблюдается линейная зависимость в некотором диапазоне частот.

В кремнии сравнительно легко реализовать эффект поля – изменение поверхностной проводимости внешним электрическим полем. Типичная электрическая реакция структуры Si/нематик/ITO на импульс света, в случае, если поверхность кремния обеднена основными носителями заряда, продемонстрирована на рис. 3а. Как видно, при включении (light on) и выключении (light off) активного света на кривой наблюдается дополнительное к величине U_h падение напряжения на величину A . В качестве источника активного света использовалось лазерное излучение He–Ne лазера, сфокусированное в интересующее место структуры.

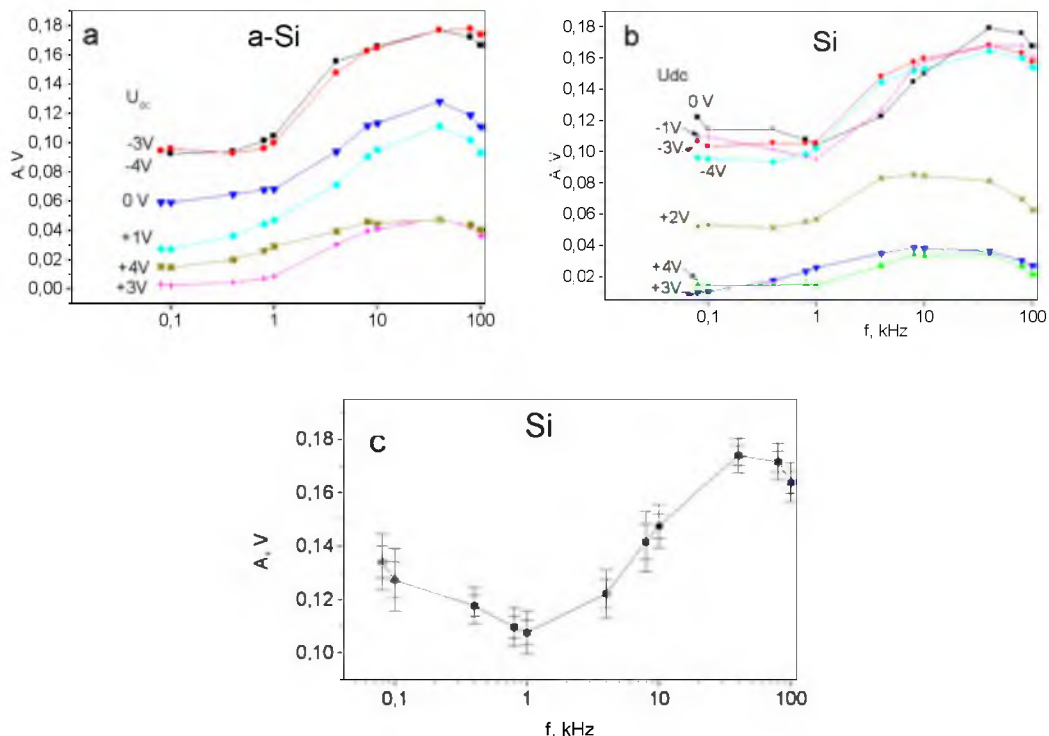


Рис. 4. Зависимость падения напряжения A при импульсном включении лазерного облучения структуры от частоты. а – Освещение фрагмента структуры с плёнкой a-Si. б – Освещение фрагмента структуры с открытой поверхностью Si. в – Зависимость падения напряжения A от частоты с суточной релаксацией между измерениями.

$$U_{dc} = 0 \text{ В}$$

Fig. 3. The dependence of the voltage drop A at the pulse switching on of the laser irradiation of the structure on frequency. а – Illumination of a fragment of the structure with a-Si film. б – Illumination of a fragment of a structure with an open Si surface. в – Dependence of voltage drop A on frequency with daily relaxation between measurements.

$$U_{dc} = 0 \text{ V}$$

Дополнительное падение напряжения величиной A обусловлено уменьшением (или полным исчезновением) области обеднения поверхности кремния и объясняется следующим образом. Область обеднения обладает определённой ёмкостью C_{Si} , которая зависит от многих факторов, главный из которых – это постоянное смещение U_{dc} . Ёмкость



C_{Si} соединена последовательно с емкостью жк слоя C_{LC} . В случае обеднения поверхности общая ёмкость структуры $C_{structure} \approx C_{Si}$. Из-за генерации неравновесных носителей заряда под действием излучения обеднение поверхности исчезает, что сопровождается, в свою очередь, исчезновением емкости C_{Si} . Поэтому результирующая ёмкость структуры $C_{structure}$ становится $\approx C_{LC}$. Из-за того, что $C_{LC} > C_{Si}$, результирующее реактивное сопротивление структуры уменьшится. Вследствие этого будет иметь место соответствующее падение напряжения, величиной A .

На рис. 4 представлены кривые, соответствующие падению напряжения A при импульсном освещении разных участков поверхности структуры Si/нематик/ITO, а именно, рис. 4а соответствует освещению поверхности пленки a-Si, а рис. 4б соответствует освещению открытой поверхности Si. В эксперименте изменение полярности смещения U_{dc} осуществлялось от отрицательных к положительным значениям. Релаксация структуры между измерениями, при которых изменялась частота и смещение, была около 5 минут. Из представленных рисунков видно, что для высоких частот (более нескольких кГц) изменение величины A от частоты, а также крутизна кривых, для обоих типов поверхностей практически одинаково как для отрицательного, так и для положительного смещений. Влияния плёнки a-Si на падение A в этом диапазоне частот не видно. Различие в поведении кривых наблюдается в районе низких частот около 1 кГц при отрицательном смещении. Кривые, соответствующие импульсному освещению открытой поверхности кремния (рис. 4б), демонстрируют минимум, приходящийся на окрестность вышеупомянутой частоты. С целью исключения влияния гистерезисного поведения структуры, связанного с возможным накоплением ионного заряда определенного знака у поверхности кремния при малых временах релаксации, было проведено несколько экспериментов с длительной (около суток) релаксацией между измерениями и только при смещении $U_{dc}=0V$. Эти эксперименты убедительно показывают наличие минимума, рис. 4с. Кривые, соответствующие импульсному освещению поверхности пленки a-Si, при отрицательных смещениях такого минимума не демонстрируют, рис. 4а. Появление минимума можно связать с изменением характера обеднения поверхности кремния, связанного с селективным (по частоте) «размораживанием» влияния ионных подвижных зарядов, которые включены в процессы накопления объемного заряда, инжекции, переноса носителей через границу кремний/жк, эффекта поля, вызванного ионным зарядом у поверхности кремния [Кучеев, 2012].

Влияние ионной подсистемы косвенно подтверждается также относительным расположением кривых при отрицательных полярностях смещения структуры Si/нематик/ITO при импульсном освещении открытой поверхности кремния, рис. 4б. Хорошо видно, что с увеличением отрицательного смещения кривые располагаются последовательно друг за другом в сторону уменьшения величины падения напряжения A . Такое взаимное расположение кривых не соответствует ожидаемому, при котором в общем случае увеличение степени обеднения поверхности (при увеличении отрицательного смещения) приводило бы к увеличению A . Реальное поведение кривых (рис. 4б) можно объяснить возрастающей утечкой носителей в обеднённый слой поверхности кремния при возрастании отрицательного смещения, что уменьшает степень обеднения. Для участков структуры с пленкой a-Si на кремнии относительное расположение кривых соответствует ожидаемому, т. е. с увеличением отрицательного смещения растёт падение напряжения A . В этом случае плёнка a-Si, по всей видимости, создает блокирующий эффект утечкам носителей через границу Si/ a-Si /жк.

При положительных смещениях на структуре влияния пленки a-Si не проявляется, что объясняется отсутствием обеднения поверхности, и следовательно, в этом случае результирующая ёмкость структуры практически равна емкости жк слоя, и при этом светочувствительность не проявляется.

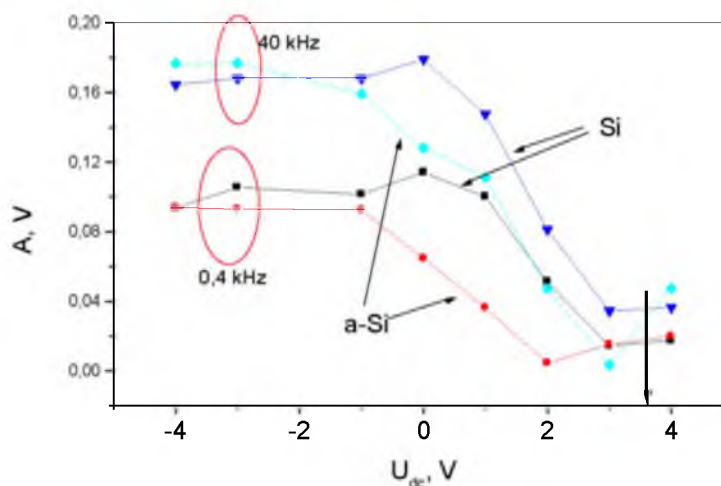


Рис. 5. Зависимость падения напряжения A от смещения на структуре Si/нематик/ITO. Эллипс 0,4 kHz охватывает кривые (не отображены) для частот 0,08, 0,1, 0,4, 0,8, 1 kHz. Эллипс 40 kHz охватывает кривые (не отображены) для частот 4, 8, 10, 40, 80, 100 kHz

Fig. 5. Dependence of the voltage drop A on the bias on the structure of Si / nematic / ITO. The 0.4 kHz ellipse covers curves (not displayed) for the frequencies 0.08, 0.1, 0.4, 0.8, 1 kHz. Ellipse 40 kHz covers curves (not displayed) for frequencies 4, 8, 10, 40, 80, 100 kHz

На рис. 5 представлены типичные зависимости падения напряжения A от смещения структуры для двух частот (кривые для других частот не отображены из-за возникающей загруженности рисунка), которые можно отнести к высокочастотному или низкочастотному диапазону соответственно. Такое разделение на два диапазона основано на том, что при отрицательных смещениях структуры все кривые $A - U_{dc}$ для обоих типов поверхности (a -Si и Si) смещаются относительно друг друга, что схематично на рис. 5 отмечено эллипсами. Для низкочастотного диапазона (кривые в эллипсе 0,4 кГц) падение напряжения A принимает меньшие значения, чем для кривых, принадлежащих высокочастотному диапазону (эллипс 40 кГц). Такое разделение явным образом допускает процессы переноса ионных носителей заряда в жк в низкочастотном диапазоне и заморозку ионной подсистемы в высокочастотном диапазоне. Общее смещение в сторону уменьшения падения A для низкочастотного диапазона объясняется переносом носителей через границу Si/жк и соответственно уменьшением обеднения кремния. В поведении кривых хорошо просматривается влияние плёнки a -Si для обоих диапазонов частот. Особенно отчетливо такое влияние пленки обнаруживается в окрестности смещения $U_{dc} = 0$ В. Кривые, которые относятся к освещению открытой поверхности кремния (Si), заметным образом выше кривых, которые соответствуют освещению поверхности пленки a -Si.

В качестве контроля факта обеднения поверхности кремния одновременно с электрическими измерениями падения напряжения A проводилось исследование светочувствительности структуры. Под светочувствительностью структуры понимается наличие реакции нематика на импульс активного света [Кучеев, 2011; Гончаров, 2012]. Принимая во внимание, что удельное сопротивление образца «промышленного» кремния в структуре значительно ниже сопротивления жк слоя (жк относятся к высокоомным материалам), факт наличия указанной светочувствительности без сомнения подтверждает режим обеднения (инверсии) в приповерхностном слое кремния. Только в этом случае возможно согласование реактивных/активных сопротивлений жк слоя и обеднённой поверхности кремния.

На рис. 6 представлены кривые зависимости смещения U_{dc} , при котором пропадает светочувствительность структуры для двух участков поверхности, а именно, открытой



поверхности (Si) и с плёнкой (a-Si). Кривые получены по визуальным наблюдениям реакции нематика в окрестности лазерного пятна на поверхности Si или a-Si. Смещение изменялось от отрицательных значений к положительным, что отмечено левой стрелкой. На высоких частотах пороги исчезновения светочувствительности для кремния и поверхности a-Si практически неразличимы, тогда как с уменьшением частоты появляется различие. Видно, что для участка структуры с открытой поверхностью кремния для частоты около 1 кГц наблюдается рост порога исчезновения светочувствительности с формированием максимума. Для фрагмента структуры с плёнкой a-Si имеет место монотонное уменьшение порога исчезновения светочувствительности (исчезновения обеднения).

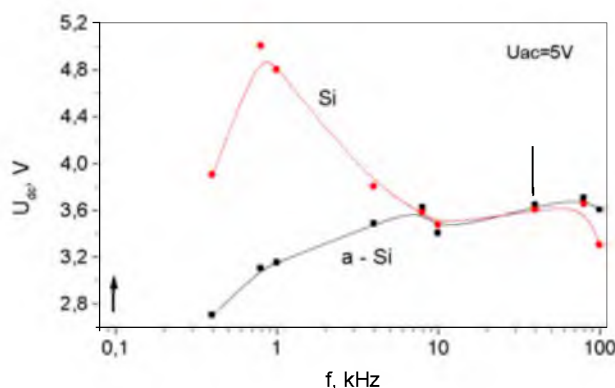


Рис. 6. Зависимость порога исчезновения светочувствительности структуры от частоты. $U_{ac} = 5V$

Fig. 6. The dependence of the threshold for the disappearance of the photosensitivity of the structure on the frequency. $U_{ac} = 5V$

Можно отметить, что чувствительность метода, основанного на падении напряжения, выше, чем метод определения порога исчезновения светочувствительности (исчезновения обеднённого слоя). Это можно продемонстрировать на следующем примере. Порог (U_{dc}) исчезновения светочувствительности (обеднения) при высокой частоте (например, 40 кГц) отмечен правой стрелкой на рис. 6. Это же значение смещения отмечено стрелкой на рисунке 5 на графике в координатах $A - U_{dc}$. Хорошо видно, что при отмеченном смещении падение напряжения A принимает не нулевое значение, т. е. какой-то уровень обеднения поверхности еще регистрируется.

Заключение

Таким образом, исследование структуры Si/нематик/ITO, сформированной на монокристаллическом кремнии p-типа проводимости, методом падения напряжения при подключении ее к генератору переменного напряжения и возбуждении ее активным светом (He-Ne 0,6 мкм), позволяет сделать выводы, что (1) структура обладает фотоемкостными свойствами, которые обусловлены формированием обеднённого приповерхностного слоя, факт наличия которого независимо подтверждается по визуальной регистрации реакции нематика в структуре на активный свет. Характер кривых фототовета структуры позволяет их разделить на два диапазона частот, причем такое разделение связывается с ионными процессами в ЖК. Метод, основанный на падении напряжения, позволяет регистрировать в структуре Si/нематик/ITO пленки аморфного кремния нанометровой толщины на поверхности монокристаллического кремния. Исследование ориентации нематика СВ показало, что на плёнках a-Si, которые напылены магнетронным методом как на поверхность кремния, так и на поверхность окиси кремния, формируется гомеотропная ориентация, тогда как в микроззорах под прижимными масками вследствие косоного напыления материала формируется планарная ориентация.



Список литературы
References

1. Васильев А.А., Касасент Д., Компанец И.Н., Парфёнов А.В. 1987. Пространственные модуляторы света. М., Радио и связь, 320.
Vasiliev A.A., Kasasent D., Kompanez I.N., Parfenov A. V. 1987. Space modulators of light. M., Radio&Svaz, 320 (in Russian).
2. Blinov L.M. and Chigrinov V.G. 1993. Electrooptic Effects in Liquid Crystal Materials. Springer New York: 464.
3. Гончаров И.Ю., Колесников Д.А., Кучеев С.И., Омельченко Е.И., Тучина Ю.С. 2012. Обеднение кремния, облученного фокусированным пучком ионов Ga в структуре Si/нематик/электрод. Научные ведомости БелГУ, Серия: Математика. Физика. 23 (142), вып. 29: 118–122.
Goncharov I.Yu., Kolesnikov D.A., Kucheev S.I., Omelchenko E. I., Tuchina Yu. S. 2012. Depletion of silicon treated by Ga focused ion beam in Si/nematic/electrod structure. Belgorod State University Scientific Bulletin. Mathematics & Physics, 23 (142), issue 29: 118–122 (in Russian).
4. Gritsenko N.I., Кучеев С.И. 2003. Ion controlled liquid crystal spatial light modulator. Proceeding of SPIE, V. 5257. P.145–151.
5. Zakhvalinskii V., Piliuk E., Goncharov I., Simashkevich A., Sherban D., Bruc L., Curmei N., and Rusu M. 2014. Silicon carbide nanolayers as a solar cell constituent. Phys. Status Solidi A, V. 212, iss.1: 1–5 (in Russian).
6. Zakhvalinskii V.S., Piljuk E.A., Goncharov I.Yu., Rodrigues V.G., Kuzmenko A.P., Taran S.V., Abakumov P.A. 2014. RF magnetron sputtering of silicon carbide and silicon nitride films for solar cells. J. NANO- ELECTRON. PHYS. 6, No 3, 03062(3pp).
7. Zakhvalinskii V.S., Abakumov P.V., Kuzmenko A.P., Chekadanov A.S., Piljuk E.A., Rodriguez V.G., Goncharov I.J., Taran S.V. 2015. Temperature Influence on the Properties of Thin Si₃N₄ Films. J. NANO- ELECTRON. PHYS. 7, No 4, 04052(2pp)
8. Захвалинский В.С., Кучеев С.И., Межаков Н.Н., Перервенко Э.О., Пилюк Е.А. 2014. Ионная адсорбция и ориентация нематика на карбиде кремния в нематической ячейке. Научные ведомости БелГУ, Серия: Математика. Физика. 25 (196), вып. 37: 138–142.
Zahvalinski V.S., Kucheev S.I., Mezhaikov N.N., Perervenko E.O., Piljuk E.A. 2014. The ionic adsorption and the orientation of the nematic on the silicon carbide in the nematic cell. Belgorod State University Scientific Bulletin. Mathematics & Physics, 25 (196), issue 37: 138–142 (in Russian).
9. Кучеев С.И., Захвалинский В.С., Пилюк Е.А. Борисенко Л.В. 2016. Инжекция из двойного электрического слоя в нематической ячейке с пористым кремнием. Научные ведомости БелГУ, Серия: Математика. Физика. 13 (234), вып. 43: 134–139.
Kucheev S.I., Zakhvalinskii V.S., Piljuk E.A. Borisenko L.V. 2016. Injection from double electric layer in nematic cell with pore silicon. Belgorod State University Scientific Bulletin. Mathematics & Physics, 13 (234), issue 43: 134–139 (in Russian).
10. Кучеев С.И., Межаков Н.Н., Захвалинский В.С., Пилюк Е. А. 2017. Обеднение кремния, индуцированное плёнками нитрида кремния в структуре Si/Si₃N₄/нематик/ИТО. Научные ведомости БелГУ, Серия: Математика. Физика. 13 (262), вып. 47: 85–91.
Kucheev S.I., Mezhaikov N.N., Zahvalinski V.S., Piljuk E.A. 2017. Deplation of silicon induced by Si₃N₄ films in Si/Si₃N₄/нематик/ИТО structure. Belgorod State University Scientific Bulletin. Mathematics & Physics, 13 (262), issue 47: 85–91 (in Russian).
11. Кучеев С.И., Тучина Ю.С. 2010. Доменная переориентация нематика в структуре Si/нематик/ИТО. Научные Ведомости БелГУ, Серия Математика Физика, № 11 (82) вып. 19, с. 95–100.
Kucheev S.I., Tuchina Yu.S. 2010. Domen reorientation of nematic in Si/nematic/ИТО structure. Belgorod State University Scientific Bulletin. Mathematics & Physics, 11 (82), issue 19: 95–100 (in Russian).
12. Кучеев С.И., Новиков В.Ю., Тучина Ю.С. 2012. Эффект поля, индуцированный подвижными ионами в жидкокристаллической ячейке с кремниевой подложкой. Научные ведомости БелГУ, Серия: Математика. Физика. 11 (130), вып. 27: 165–168.
Kucheev S.I., Novikov V.Yu., Tuchina Yu.S. 2012. Field effect induced ions moving in nematic cell with silicon substrate. Belgorod State University Scientific Bulletin. Mathematics & Physics, 11 (130), issue 27: 165–168 (in Russian).



13. Кучеев С.И., Тучина Ю.С. 2011. Электрооптика нематической ячейки на основе кремния, обработанного плазмой. Научные ведомости БелГУ, Серия: Математика. Физика. 11 (106), вып. 23: 44–51.

Kucheev S.I., Tuchina Yu.S. 2011. Electrooptics of a nematic cell based on silicon treated with plasma. Belgorod State University Scientific Bulletin. Mathematics & Physics, 11 (106), issue 23: 44–51 (in Russian).

14. Lasarev G., Hermerschmidt A., Kruger S., Osten S. LCOS Spatial Light Modulators: Trends and Applications. Optical Imaging and Metrology. <http://www.beck-shop.de>

15. Monkade M., Boix M., Durand G. 1988. Europhys. Lett. Vol.5. P.697–701

16. Muller R., Kamins T. 2003. Device electronics for integrated circuits. New York, Wiley: 530.

17. Yang D.K., Wu S.T. 2006. Fundamentals of Liquid Crystal Devices John Wiley & Sons, Ltd. : 378.

Ссылка для цитирования статьи

Reference to article

Захвалинский В.С., Кучеев С.И., Пилюк Е.А., Родригез Г.В., Рыжикова Е.Ю., Бондаренко В.А. 2019. Ориентация нематика 5СВ и фотоёмкостные свойства структуры Si/нематик/ITO с плёнкой a-Si. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика. 51 (2): 311–322. Doi: 10.18413/2075-4639-2019-51-2-311-322.

Zahvalinskii V.S., Kucheev S.I., Piljuk E.A., Rodrigues G.V., Rizhikova E.Yu., Bondarenko V.A. 2019. Orientation of nematic 5CB and photo capacitive properties of Si/nematic/ITO structure with a-Si. Belgorod State University Scientific Bulletin. Mathematics. Physics. 51 (2): 311–322 (in Russian). Doi: 10.18413/2075-4639-2019-51-2-311-322.