

**Научная статья**

УДК: 532.783

## **ОРИЕНТАЦИЯ НЕМАТИКА ПОЛИМЕРНОЙ ПЛЕНКОЙ, ТЕКСТУРИРОВАННОЙ МЕТОДОМ ШТАМПОВОЙ НАНОЛИТОГРАФИИ**

М. Н. Крахалев<sup>1,2</sup>, В. С. Тумашев<sup>3</sup>, В. А. Селезнев<sup>3</sup>, А. И. Комонов<sup>3</sup>, С. В. Мутилин<sup>3</sup>, А. В. Принц<sup>3</sup>,  
К. А. Фейзер<sup>1</sup>, М. А. Лесной<sup>1</sup>, В. С. Сутормин<sup>1,2</sup>, А. В. Баранник<sup>1</sup>, О. О. Прищепа<sup>1\*</sup>, В. Я. Зырянов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук –  
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия*

<sup>2</sup>*Институт инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета,  
Красноярск, Россия*

<sup>3</sup>*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения РАН,  
Новосибирск, Россия*

---

### **ИНФОРМАЦИЯ**

**История статьи:**

Поступила 26.04.2024

Одобрена 27.05.2024

Принята 3.06.2024

---

**Ключевые слова:**

полимер,  
ориентирующая пленка,  
метод нанопечати,  
нематик,  
линейный дефект

### **АННОТАЦИЯ**

Исследованы жидкокристаллические ячейки, в которых планарная ориентация директора задавалась пленками полимера SU-8, обработанными по технологии штамповой нанопечати. В результате текстурирования ориентирующая поверхность пленок представляет собой гребнеобразную решетку, профиль которой зависит от температуры обработки. В ячейках, заполненных нематическим ЖК E7, формируется однородная ориентационная структура с небольшим количеством поверхностных линейных дефектов на обеих подложках. Данные дефекты не образуются в ЖК-ячейках с асимметричными подложками, одна из которых покрыта пленкой SU-8, а вторая – натертой пленкой нейлон-6. Показано, что угол преднаклона директора на исследуемых пленках SU-8 близок к нулю, при этом пленки задают сильную полярную энергию сцепления для нематика E7. Полученные результаты представляют интерес для разработки методов изготовления ЖК-устройств с применением технологий нанопечати ориентирующих полимерных пленок.

---

**DOI:**

**10.18083/LCAppl.2024.2.83**

---

**Для цитирования:**

Крахалев М. Н., Тумашев В. С., Селезнев В. А., Комонов А. И., Мутилин С. В., Принц А. В., Фейзер К. А., Лесной М. А., Сутормин В. С., Баранник А. В., Прищепа О. О., Зырянов В. Я. Ориентация нематика полимерной пленкой, текстурированной методом штамповой нанолитографии. // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2024. Т. 24, № 2. С. 83–92.

**Research Article****NEMATIC ORIENTATION WITH POLYMER FILM  
TEXTURED BY STAMP NANOLITHOGRAPHY METHOD**

M. N. Krakhalev<sup>1,2</sup>, V. S. Tumashev<sup>3</sup>, V. A. Seleznev<sup>3</sup>, A. I. Komonov<sup>3</sup>, S. V. Mutilin<sup>3</sup>, A. V. Prinz<sup>3</sup>,  
K. A. Feyzer<sup>1</sup>, M. A. Lesnoy<sup>1</sup>, V. S. Sutormin<sup>1,2</sup>, A. V. Barannik<sup>1</sup>, O. O. Prishchepa<sup>1\*</sup>, V. Ya. Zyryanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Engineering Physics and Radio Electronics, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

<sup>3</sup>*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia*

**ARTICLE INFO:****ABSTRACT****Article history:**

Received 26 April 2024

Approved 27 May 2024

Accepted 3 June 2024

**Key words:**

polymer,  
orienting film,  
nanoprinting method,  
nematic,  
linear defect

Liquid crystal cells, in which the planar director orientation is specified by SU-8 polymer films treated by the stamp nanoprinting method, have been studied. The orienting film surface after texturing represents a comb-shaped lattice, the profile of which depends on the processing temperature. In cells filled with nematic LC E7, a homogeneous orientational structure with a small number of surface linear defects on both substrates is formed. These defects do not appear in LC cells with asymmetric substrates, when one of them is coated with an SU-8 film, and the other one is covered with a rubbed nylon-6 film. It has been shown that the director pre-tilt angle on the studied SU-8 films is close to zero and the films set a strong polar anchoring energy for the nematic E7. The results obtained are of interest for the development of methods for manufacturing LC devices using technologies for nanoprinting of orienting polymer films.

**DOI:**

10.18083/LCAppl.2024.2.83

**For citation:**

Krakhalev M. N., Tumashev V. S., Seleznev V. A., Komonov A. I., Mutilin S. V., Prinz A. V., Feyzer K. A., Lesnoy M. A., Sutormin V. S., Barannik A. V., Prishchepa O. O., Zyryanov V. Ya. Nematic orientation with polymer film textured by stamp nanolithography method. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2024, **24** (2), 83–92 (in Russ.).

## Введение

Разработка технологических методов изготовления ориентирующих покрытий для ориентации молекулярного ансамбля жидких кристаллов (ЖК) в составе амплитудных и фазовых электрооптических модуляторов по-прежнему остается актуальной задачей. Выбор ориентанта обусловлен как требуемыми характеристиками и конструкцией модуляторов, так и особенностями технологического процесса их изготовления и возможностью удешевления производства. Чаще всего создание анизотропии сцепления ЖК с ориентантом достигается следующими тремя способами обработки его поверхности: формированием преимущественно однонаправленного рельефа механическим натиранием или напылением, ориентационным упорядочением молекул поляризационно чувствительного фоторезиста оптической литографией и формированием заданного рельефа штамповой нанолитографией (ШНЛ). В последнем случае одноосная ориентация планарного слоя ЖК индуцирована упорядоченным массивом протяженных наноканавок [1].

Метод ШНЛ позволяет сформировать заданный рельеф поверхности ориентирующей пленки с разрешением 5 нм в течение нескольких минут на площади более 150 см<sup>2</sup> [2–6]. В настоящее время активно развиваются методы наноструктурирования поверхностей для ориентирования ЖК с помощью ШНЛ [7–9]. В работе [10] показана технология изготовления массивов перестраиваемых оптических микрофильтров Фабри–Перо с использованием ШНЛ на резисте SU-8. Данная технология была также применена для создания перестраиваемого поверхностно-излучающего лазера с вертикальным резонатором [11]. Выбор резиста SU-8 в качестве материала для ориентирующего слоя связан с его уникальными свойствами. Неполимеризованный SU-8 имеет низкую температуру стеклования  $T_g = 55$  °С, что делает его привлекательным для использования в технологии ШНЛ. После фотополимеризации SU-8 обеспечивает химическую и механическую стойкость ориентирующих слоев к последующим литографическим операциям, например, к формированию спейсеров-стенок ЖК-ячеек до процесса их сборки. Целью данной работы являлось изготовление пленок резиста SU-8 с гребнеобразным нанорельефом, сформированным методом ШНЛ, и исследование ориентирующего воздействия полученных пленок на нематическую смесь E7.

## Материалы и методы исследования

Эксперименты по формированию ориентирующих покрытий выполнялись на установке ШНЛ *Eitre 6 Nano Imprinter (Obducat Tech AB)* с использованием технологии промежуточных полимерных штампов (*IPS®-Intermediate Polymer Stamp*), исключающей контакт между Si-мастер-штампом и твердотельной подложкой со слоем резиста. В данной технологии сначала методом горячего тиснения с помощью Si-мастер-штампа с массивом протяженных наноканавок глубиной 160 нм, шириной 100 нм и периодом 180 нм формируется гибкий промежуточный полимерный штамп, прозрачный для ультрафиолетового (УФ) излучения (рис.1, *a–c*) [12]. Далее гибкий полимерный штамп используется для термопластического тиснения слоя фоторезиста SU-8 2000.5 (*Microchem*) с УФ-полимеризацией на целевой, в данном случае стеклянной, подложке (рис. 1, *d–f*). Важно отметить, что гибкость полимерного штампа также обеспечивает высокую однородность штамповки на большой площади.

Для получения тонких слоев фоторезиста SU-8 разбавлялся циклопентаном (*Sigma Aldrich*) и раствор наносился на подложки методом центрифугирования. Объемные соотношения между SU-8 и циклопентаном, а также скорости нанесения подбирались таким образом, чтобы получить однородные по площади пленки SU-8 толщиной 100 нм. Толщина полученных пленок резиста контролировалась с использованием метода эллисометрии. Структурирование слоя SU-8 выполнялось термопластичным тиснением полимерным промежуточным штампом при давлении 55 атм. и температуре в диапазоне от 65 до 80 °С в течение 5 мин (рис. 1, *e*). Затем проводилось экспонирование УФ-излучением в течение 1 мин, после которого образец охлаждался без снятия давления до температуры 50 °С. После снятия давления полимерный штамп отделялся от образца. На завершающем этапе образец отжигался при температуре 95 °С в течение 1 мин для полной полимеризации SU-8. Анализ профиля полученных ориентирующих пленок проводился методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе *SOLVER P47 PRO (НТ-МДТ)* с разрешением 0,1 нм по высоте и точностью 1 нм в латеральных размерах.

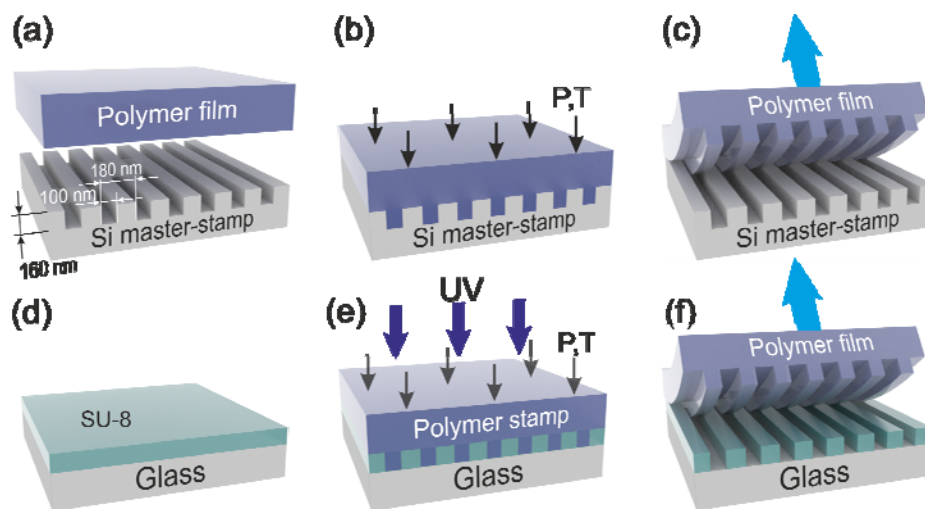


Рис. 1. Схема формирования рельефа в слое резиста SU-8 промежуточным полимерным штампом: а) Si-мастер-штамп с периодом 180 нм, полимерная пленка (IPS<sup>®</sup>), б) Si-мастер-штамп и IPS<sup>®</sup> пленка приводятся в контакт при повышенной температуре Т и давлении Р, в) удаление полимерной пленки IPS<sup>®</sup> после охлаждения и сброса давления приводит к формированию промежуточного полимерного штампа, который является инверсной репликой исходного Si-мастер-штампа, д) нанесение резиста SU-8 заданной толщины методом центрифугирования на стеклянную подложку, е) приведение в контакт подложки со слоем SU-8 и полимерного штампа при повышенной температуре и давлении с УФ-засветкой, ф) удаление полимерного штампа приводит к формированию рельефа слоя SU-8

Fig. 1. Scheme of relief formation in SU-8 resist layer by the intermediate polymer stamp: а) Si-master-stamp with the period of 180 nm and IPS<sup>®</sup> polymer film, б) Si-master-stamp and IPS<sup>®</sup> film are contacted under elevated temperature T and pressure P, в) removing of the IPS<sup>®</sup> polymer film after cooling and depressurization results in the formation of the intermediate polymer stamp that is an inverse replica of the initial Si-master-stamp, д) coating of SU-8 resist of the specified thickness by spin-coating onto a glass substrate, е) matching to contact of the substrate with the SU-8 layer and the polymer stamp at elevated temperature and pressure under UV-radiation, ф) removing of the polymer stamp leads to relief formation of the SU-8 layer

Для изготовления ЖК-ячеек стеклянные подложки с проводящим слоем ИТО, покрытые наноструктурированными пленками SU-8, склеивались с использованием стеклянных микросфер диаметром  $17,3 \pm 1,4$  мкм (*Duke Scientific*) в качестве спейсеров. Наноструктурированный резист был нанесен на подложках по всей поверхности, за исключением небольшого участка на краю для формирования электрического контакта к ИТО. После склейки подложек толщина получившегося зазора измерялась интерференционным методом. Ячейки заполнялись нематической смесью E7 (*SYNTHON*) в изотропной фазе при температуре 70 °С. Дополнительно были изготовлены ЖК-ячейки с асимметричными ориентирующими пленками, где на одной подложке использовалась текстурированная пленка SU-8, а на второй - натертая полимерная пленка нейлон-6. Пленка

нейлон-6 наносилась методом центрифугирования 0,5 % раствора полимера в муравьиной кислоте и после высушивания подложка однонаправленно натиралась. Исследования ориентационных структур ЖК проводились на поляризационном оптическом микроскопе (ПОМ) *Axio ImagerA1.m* (*Zeiss*). Электрооптические исследования выполнялись с использованием установки, в которой луч He-Ne лазера (*Lasos*) с длиной волны 632,8 нм последовательно проходил поляризатор, образец, анализатор и попадал на кремниевый фотодетектор *PDA100A-EC* (*ThorLabs*). Сигнал с фотодетектора измерялся мультиметром 34465A (*Keysight*), напряжение на ЖК-ячейку подавалось от генератора сигналов *AFG-72225* (*GW Instek*) с использованием амплитудного усилителя *AVA-1810* (Актаком). Измерения проводились в геометрии скрещенных поляризаторов.

## Результаты и их обсуждение

### Морфология поверхности пленок SU-8.

Важной особенностью, которую необходимо учитывать в процессах штамповой литографии по резисту SU-8, является подбор необходимой толщины штампуемого слоя и температуры тиснения при формировании глубокого рельефа. При температуре тиснения выше 70 °C резист SU-8 становится легко текучим. В этом случае при слоях резиста толщиной менее 100 нм происходит

неоднородное заполнение штампа, обусловленное действием капиллярных сил. В данной работе использовались пленки резиста толщиной 100 нм. На рисунке 2 приводятся АСМ-изображения и профили поверхности двух типов образцов с различным характером гребнеобразной структуры рельефа. В первом случае тиснение полимерным штампом происходило при температуре 80 °C, при которой наноканавки полимерного штампа полностью заполняются резистом.

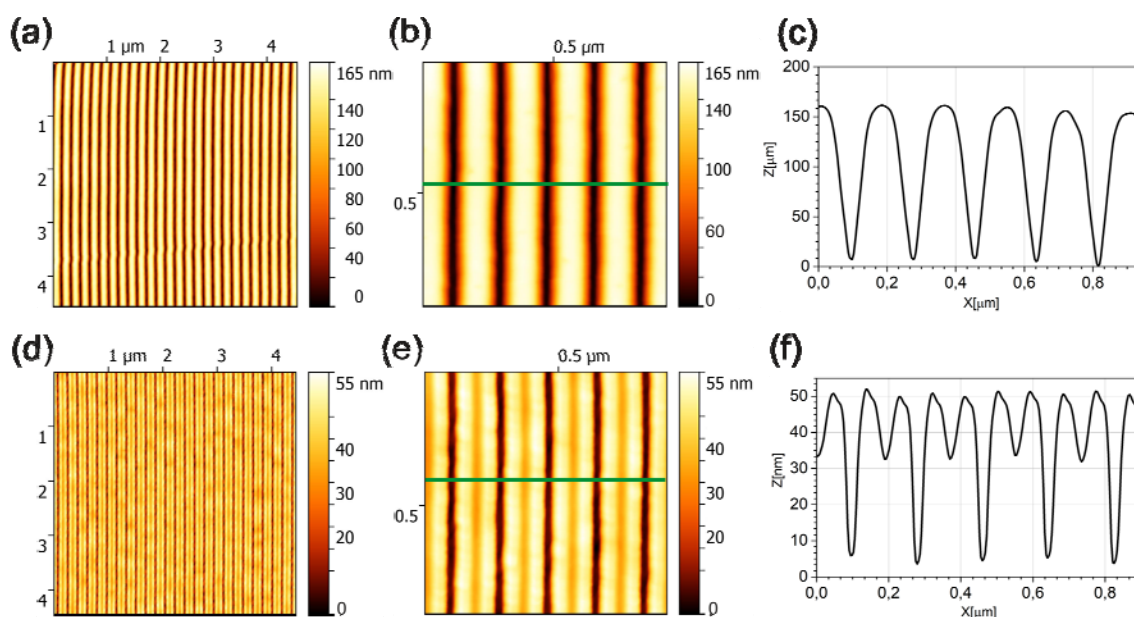


Рис. 2. АСМ изображения и профили фрагментов поверхности ориентанта SU-8 после УФ-отверждения оттиска, выполненного при температурах: 80 °C (a–c) и 65 °C (d–f)

Fig. 2. AFM images and profiles of surface segments of SU-8 orientant after UV-curing of stamp at the temperatures of 80 °C (a–c) and 65 °C (d–f)

В результате был сформирован однородный по площади ориентирующий слой, представляющий собой решетку с гребнями высотой 155 нм и периодом 180 нм (рис. 2, a–c). Во втором случае при уменьшении температуры печати до 65 °C, наблюдаются уменьшение высоты формируемых наногребней до 52 нм и формирование наноканавок глубиной 15 нм в их центре (рис. 2, d–f). Формирование наноканавок на вершинах гребней связано с увеличением вязкости резиста при темпера-

туре 65 °C по сравнению с вязкостью SU-8 при 80 °C. В этом случае выдавливаемый штампом резист прежде всего течет вверх вдоль стенок наноканавок полимерного штампа. Данное явление можно использовать при необходимости для увеличения плотности наногребней, а также для уменьшения глубины канавок. При формировании ЖК-ячеек нами использовались оба типа рельефа на резисте SU-8.

Ориентационная структура нематика E7 в ячейке с одинаковыми ориентирующими пленками SU-8 на обеих подложках.

Оптические текстуры слоев ЖК с ориентирующими пленками из наноструктурированного резиста, полученных тиснением полимерного штампа при температурах 80 °C и 65 °C имели одинаковый вид при наблюдении в поляризационный микроскоп в геометрии скрещенных поляризаторов. На рисунке 3 показана оптическая картина слоя ЖК с ориентирующими пленками SU-8, обработанными при 80 °C, которая представляет собой темную область с замкнутыми светлыми линиями, что соответствует однородной ориентации ЖК с небольшим количеством замкнутых линейных дефектов. Изменяя положение фокуса микроскопа, можно видеть, что линейные дефекты локализованы на поверхности подложек (рис. 3, b, c).

При этом возможны ситуации, когда один дефект расположен на одной подложке, а также когда два дефекта располагаются на обеих подложках один над другим. Формирование и стабильность поверхностных линейных дефектов могут быть обусловлены особенностями граничных условий, например полярным углом наклона директора и величиной энергии сцепления ЖК с ориентирующей пленкой [13, 14]. Количество дефектов в образце небольшое, а их влияние на однородность оптической картины и, следовательно, на коэффициент пропускания образца в геометрии скрещенных поляризаторов незначительно. Таким образом, оптические и электрооптические методы исследования граничных условий, используемые для нематических слоев с однородной планарной структурой, можно применить для образцов с ориентирующими пленками SU-8.

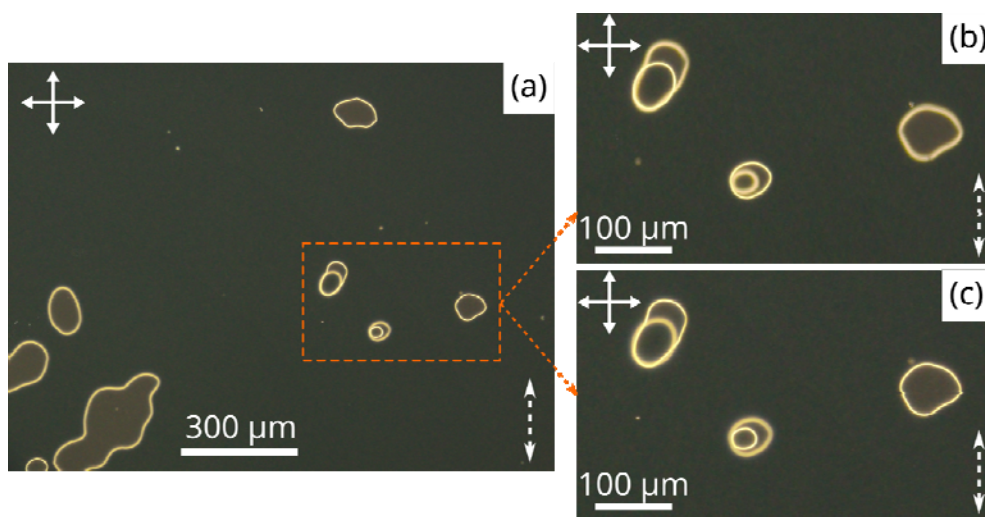


Рис. 3. ПОМ-фотографии участка образца в геометрии скрещенных поляризаторов (a). Увеличенные фотографии участка с доменами, сделанные для положения фокальной плоскости микроскопа вблизи верхней (b) и нижней (c) подложек ЖК-ячейки. Ориентация поляризаторов показана двойными стрелками, направление наноканавок на пленках SU-8 обозначено двойной пунктирной стрелкой. Оранжевый пунктирный прямоугольник показывает положение увеличенного участка. Толщина слоя ЖК составляет 19,1 мкм

Fig. 3. POM-photographs of a sample area taken in the crossed polarizers (a). The enlarged photos of the area with domains taken for the position of the focal microscope plane near the top (b) and bottom (c) substrates of LC cell. The polarizers orientation is indicated by the double arrows. The direction of nano-grooves on the SU-8 films is noted by the double dashed arrow. The orange dashed rectangle indicates the position of the enlarged area.

The LC layer thickness is 19.1 μm



Для изучения граничных условий в рассматриваемых ЖК-ячейках нами были проведены измерения угла преднаклона и полярной энергии сцепления ЖК с пленкой SU-8. Материальные параметры нематика E7 были взяты из работ [15, 16]. Измерение угла преднаклона  $\theta_s$  проводилось по методу, предложенному в работе [17]. Для этого с помощью вращающейся платформы измеряется зависимость интенсивности  $I$  света, прошедшего через образец, расположенный между скрещенными линейными поляризаторами, от угла падения света  $\beta_{in}$ . При  $\beta_{in} = 0^\circ$  луч света падает на образец нормально, а угол между азимутальной ориентацией директора и направлениями поляризаторов равен  $\pm 45^\circ$ . В общем случае при отличном от нуля угле преднаклона  $\theta_s$  наблюдаемая зависимость  $I(\beta_{in})$  будет асимметричной относительно угла  $\beta_{in} = 0$ , и при малых углах преднаклона директора положение точки экстремума  $\beta_{in,extrem}$  для значения оптической разности хода между обыкновенной и необыкновенной волнами связано со значением угла  $\theta_s$  соотношением  $\theta_s = \beta_{in,extrem}/(n_{||} + n_{\perp})$ . Из полученной экспериментальной зависимости, приведенной на рис. 4, а, следует, что  $\beta_{in,extrem} \cong 0^\circ$  и угол преднаклона директора равен  $\theta_s \cong 0^\circ$ .

Определение полярной энергии сцепления проводилось по анализу электрооптического отклика структуры в сильных электрических полях [18]. Для этого, зная угол преднаклона директора  $\theta_s$  и пороговое напряжение  $U_{th}$ , соответствующее

переходу Фредерикса, по линейному участку зависимости  $\delta \cdot (U - \bar{U})$  от  $(U - \bar{U})$  можно найти полярную энергию сцепления  $W_s$ . Для  $\theta_s = 0^\circ$  коэффициент наклона данного линейного участка будет равен  $-2\delta_0 K_{11}/W_s d$ , здесь  $\delta_0$  – разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами при  $U < U_{th}$ ,  $\delta$  – разность фаз при напряжении  $U$ ,  $d$  – толщина ЖК-слоя,  $\bar{U} = \alpha \Delta \epsilon U_{th} / \epsilon_{||}$ ,

$$\alpha = \frac{1}{\pi} \int_0^1 \sqrt{\frac{(\epsilon_{\perp} + \Delta \epsilon)(K_{11} + (K_{11} - K_{33})y)}{K_{11}y(\epsilon_{\perp} + \Delta \epsilon y)}} dy$$

$K_{11}$ ,  $K_{33}$  – константы упругости поперечного и продольного изгиба, соответственно.

На рисунке 4, б показана зависимость коэффициента пропускания  $T = I/I_{max}$  от приложенного напряжения  $U$ . Видно, что изменение светопропускания носит пороговый характер и осцилляции  $T$  имеют практически одинаковую величину. Таким образом, можно сделать вывод, что влияние линейных дефектов структуры на электрооптический отклик минимально. Пороговое напряжение, полученное путем линейной аппроксимации изменения  $\delta(U)$  вблизи порога Фредерикса (рис. 4, в), равно  $U_{th} = 0,92 \pm 0,02$  В. Полярная энергия сцепления оказалась равной  $W_s = 3,67 \pm 0,16 \cdot 10^{-4}$  Дж/м<sup>2</sup>, что соответствует сильному сцеплению ЖК с пленкой SU-8.

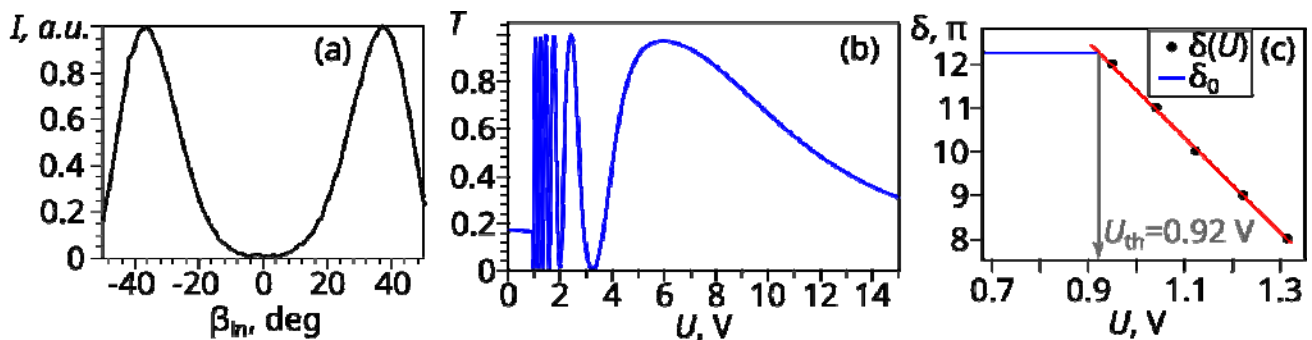
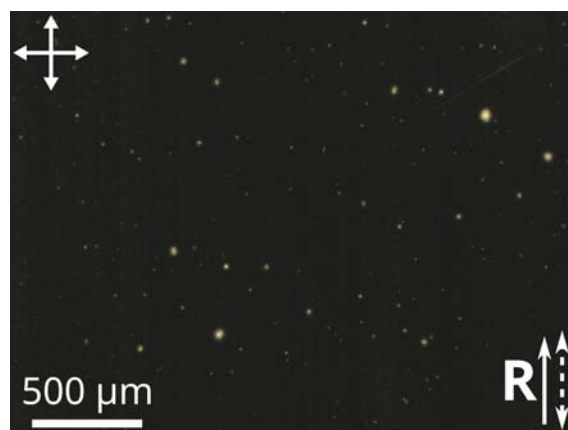


Рис. 4. Зависимость  $I(\beta_{in})$  для образца с ориентирующими пленками SU-8 (а), зависимость светопропускания  $T$  (б) и фазовой задержки  $\delta$  (в) от приложенного напряжения  $U$

Fig. 4. The dependence of  $I(\beta_{in})$  for the sample with orienting films of SU-8 (a), the dependence of light transmission  $T$  (b) and the phase delay  $\delta$  (c) on applied voltage  $U$

*Ориентационная структура нематика E7 в ячейке с асимметричными SU-8 и нейлон-6 ориентирующими пленками.*

Величина энергии сцепления является важным параметром, определяющим время выключения, а также зависимость изменения фазы необыкновенной волны от приложенного поля, в особенности в ЖК-ячейках с толщиной слоя около 2–3 мкм [19]. В частности, чем больше энергия сцепления ЖК с поверхностью, тем меньше время электрооптического отклика ЖК-ячейки. Соответственно, полимер SU-8 является перспективным материалом для ориентации тонкого слоя ЖК. С другой стороны, имеющиеся линейные дефекты могут оказать негативное влияние на работу модулятора, в особенности характеризующегося высокой плотностью активных элементов, характерной, например, для модуляторов фазы, работающих на отражение [20]. Устранения этих линейных дефектов можно добиться, например, дополнительной обработкой ориентирующих пленок. Опыт показал, что дополнительная натирка пленок SU-8 перед сборкой ЖК-ячейки приводит к появлению большого числа дефектов структуры, что может быть связано с механическим разрушением отвержденного полимера SU-8. Таким образом, данный двухэтапный метод обработки не подходит для пленок SU-8. Для устранения поверхностных линейных дефектов мы использовали подложки с различными ориентирующими полимерами: SU-8 на одной подложке и натертой пленкой нейлон-6 на второй. Как следует из рис. 5, в такой ячейке формируется однородная ориентация директора без каких-либо поверхностных линейных дефектов. Данный эффект может быть обусловлен более сильной энергией сцепления нематика E7 с натертой пленкой нейлон-6. Но полярная энергия сцепления E7 с нейлон-6, измеренная по вышеописанной методике, оказалась равной  $W_s = 0,96 \pm 0,03 \cdot 10^{-4}$  Дж/м<sup>2</sup>, что примерно в 3,8 раза меньше энергии сцепления E7 с пленкой SU-8. Таким образом, можно предположить, что формирование бездефектной структуры в ячейке с асимметричными подложками, по-видимому, обусловлено большей азимутальной энергией сцепления нематика E7 с полимером нейлон-6.



*Рис. 5.* POM-фотография ЖК-ячейки с ориентирующей пленкой SU-8 на одной подложке и пленкой нейлон-6 на другой, сделанная в геометрии скрещенных поляризаторов. Ориентация поляризаторов показана двойными стрелками, направление наноканавок на пленке SU-8 обозначено двойной пунктирной стрелкой, направление натирки **R** нейлон-6 показано одинарной стрелкой

*Fig. 5.* POM-photograph of LC cell with asymmetric substrates (the orienting SU-8 film is on one substrate and the nylon-6 film is on another one) taken in the crossed polarizers. The polarizers orientation is noted by the double arrows, the direction of nano-grooves on the SU-8 films is shown by the double dashed arrow, and the rubbing direction **R** of nylon-6 is indicated by the single arrow

## Выводы

Исследованы ЖК-ячейки, в которых планарная ориентация директора задавалась пленками полимера SU-8, обработанными по технологии штамповой нанопечати. Наноструктурирование пленок было выполнено с использованием промежуточных полимерных штампов при температурах печати 80 °С и 65 °С. Исследования морфологии поверхности пленок показали, что в образцах, полученных при более высокой температуре, ориентирующий слой представляет собой решетку с гребнями высотой 155 нм и периодом 180 нм, в то время как образцы, полученные при температуре 65 °С, характеризуются уменьшенной до 52 нм высотой формируемых наногребней, в центре которых расположены наноканавки глубиной 15 нм.



Исследования методами поляризационной микроскопии показали, что для обоих типов ориентирующих пленок в ЖК-ячейках формируется однородная структура с небольшим количеством поверхностных линейных дефектов. Данные дефекты не возникают при использовании ЖК-ячейки с асимметричными подложками, одна из которых покрыта пленкой SU-8, а вторая – натертой пленкой нейлон-6. Показано, что угол преднаклона директора на исследуемых пленках SU-8 близок к нулю, при этом пленки задают сильную полярную энергию сцепления для нематика E7. Полученные результаты представляют интерес для разработки методов изготовления ЖК-устройств с применением технологий нанопечати ориентирующих полимерных пленок.

**Благодарность:** исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 1 «Национальный центр исследования архитектур суперкомпьютеров. Этап 2023–2025» и госзаданий Сибирского отделения Российской академии наук.

**Acknowledgments:** this study was conducted within the scientific program of the National Center for Physics and Mathematics, section No. 1 «National Center for Supercomputer Architecture Research. Stage 2023–2025» and state assignments of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

#### Список источников / References

1. Liu Y.J., Loh W.W., Leong E.S.P., Kustandi T.S., Sun X.W., Teng J.H. Nanoimprinted ultrafine line and space nanogratings for liquid crystal alignment. *Nanotechnology*, 2012, **23** (46), 465302. DOI: 10.1088/0957-4484/23/46/465302.
2. Feldman M. Nanolithography: The art of fabricating nanoelectronic and nanophotonic devices and systems. *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials: Number 42*. Woodhead Publishing Limited, 2014. 573 p.
3. Taniguchi J., Ito H., Mizuno J., Saito T. Nanoimprint technology: Nanotransfer for thermoplastic and photocurable polymers. Wiley, 2013. 238 p. DOI: 10.1002/9781118535059.
4. Cui Z. Nanofabrication: principles, capabilities and limits. Springer Cham, 2016. 432 p.
5. Zhou W. Nanoimprint lithography: An enabling process for nanofabrication. Springer Berlin Heidelberg, 2013. 249 p. DOI: 10.1007/978-3-642-34428-2.
6. Bhushan B. Springer handbook of nanotechnology. Springer Berlin Heidelberg, 2010. 1961 p. DOI: 10.1007/978-3-642-02525-9.
7. Tang M.-J., Xie H.-M., Li Y.-J., Li X.-J., Wu D. A new grating fabrication technique on metal films using UV-nanoimprint lithography. *Chinese Phys. Lett.*, 2012, **29** (9), 098101. DOI: 10.1088/0256-307X/29/9/098101.
8. Lee D.W., Won J.H., Kim D.H., Oh J.Y., Kim D.-H., Liu Y., Seo D.-S. Well-ordered nanostructured organic/inorganic hybrid thin film construction via UV nanoimprint lithography applicable to liquid crystal systems. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2022, **139** (26), e52445. DOI: 10.1002/app.52445.
9. Kim D.H., Lee D.W., Oh J.Y., Won J., Liu Y., Seo D.S. Self aligned liquid crystals on sol-gel-processed zirconium oxide surface via nanoimprinting lithography. *Opt. Mater.*, 2022, **129**, 112494. DOI: 10.1016/j.optmat.2022.112494.
10. Sadani B., Boissard B., Lafosse X., Camps T., Doucet J.B., Daran E., Paranthoen C., Levallois C., Dupont L., Bouchoule S., Bardinal V. Liquid-crystal alignment by a nanoimprinted grating for wafer-scale fabrication of tunable devices. *IEEE Photonics Techn. Lett.*, 2018, **30** (15), 1388. DOI: 10.1109/LPT.2018.2849641.
11. Debernardi P., Simaz A., Tibaldi A., Boissard B., Camps T., Bertazzi F., Goano M., Reig B., Doucet J.-B., Bardinal V. Anisotropic transverse confinement design for electrically pumped 850 nm VCSELs tuned by an intra cavity liquid-crystal cell. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2022, **28** (1), 1700111. DOI: 10.1109/JSTQE.2021.3089897.
12. Seleznev V.A., Tumashev V.S., Yamaguchi H., Prinz V.Ya. Fabrication of large-area metal and semiconductor nanobridge arrays using nanotransfer printing and UV lithography. *Precision Engineering*, 2023, **82**, 316. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2023.04.009.
13. Kostikov D.A., Krakhalev M.N., Prishchepa O.O., Zyryanov V.Ya. Nematic structures under conical anchoring at various director tilt angles specified by polymethacrylate compositions. *Polymers*, 2021, **13**, 2993. DOI: 10.3390/polym13172993.
14. Krakhalev M.N., Bikbaev R.G., Sutormin V.S., Timofeev I.V., Zyryanov V.Ya. Nematic and cholesteric liquid crystal structures in cells with tangential-conical boundary conditions. *Crystals*, 2019, **9**, 249. DOI: 10.3390/cryst9050249.
15. Brimicombe P.D., Kischka C., Elston S.J., Raynes E.P. Measurement of the twist elastic constant of nematic liquid crystals using pi-cell devices. *J. Appl. Phys.*, 2007, **101** (4), 043108. DOI: 10.1063/1.2432311.
16. Li J., Wen C.-H., Gauza S., Lu R., Wu S.-T. Refractive indices of liquid crystals for display applications. *J. Displ. Technol.*, 2005, **1**, 51–61. DOI: 10.1109/JDT.2005.853357.

17. Ong H.L. Cell thickness and surface pretilt angle measurements of a planar liquid-crystal cell with obliquely incident light. *J. Appl. Phys.*, 1992, **71**, 140–144. DOI: 10.1063/1.350726.
18. Nastishin Y.A., Polak R.D., Shiyonovskii S.V., Bodnar V.H., Lavrentovich O.D. Nematic polar anchoring strength measured by electric field techniques. *J. Appl. Phys.*, 1999, **86** (8), 4199. DOI: 10.1063/1.371347.
19. Jiao M., Ge Z., Song Q., Wu S.-T. Alignment layer effects on thin liquid crystal cells. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**, 061102. DOI: 10.1063/1.2841642.
20. Zhang Z., You Z., Chu D. Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices. *Light: Science & Applications*, 2014, **3**, e213. DOI: 10.1038/lsa.2014.94.

**Вклад авторов:**

- <sup>1</sup>**Крахалев М. Н.** – проведение исследований, редактирование текста статьи.
- <sup>2</sup>**Тумашиев В. С.** – проведение исследований, редактирование текста статьи.
- <sup>3</sup>**Селезнев В. А.** – проведение исследований, редактирование текста статьи.
- <sup>4</sup>**Комонов А. И.** – проведение исследований, редактирование текста статьи.
- <sup>5</sup>**Мутилин С. В.** – проведение исследований, редактирование текста статьи.
- <sup>6</sup>**Принц А. В.** – проведение исследований, редактирование текста статьи.
- <sup>7</sup>**Фейзер К. А.** – проведение исследований, редактирование текста статьи.
- <sup>8</sup>**Лесной М. А.** – проведение исследований, редактирование текста статьи.
- <sup>9</sup>**Сутормин В. С.** – проведение исследований, редактирование текста статьи.
- <sup>10</sup>**Баранник А. В.** – проведение исследований, редактирование текста статьи.
- <sup>11</sup>**Прищепа О. О.** – проведение исследований, написание текста статьи.

<sup>12</sup>**Зырянов В. Я.** – научное руководство, концепция исследования, редактирование текста статьи.

**Contribution of the authors:**

- <sup>1</sup>**Krakhalev M. N.** – conducting research, editing the text
- <sup>2</sup>**Tumashev V. S.** – conducting research, editing the text
- <sup>3</sup>**Seleznev V. A.** – conducting research, editing the text
- <sup>4</sup>**Komonov A. I.** – conducting research, editing the text
- <sup>5</sup>**Mutilin S. V.** – conducting research, editing the text
- <sup>6</sup>**Prinz A. V.** – conducting research, editing the text
- <sup>7</sup>**Feyzer K. A.** – conducting research, editing the text
- <sup>8</sup>**Lesnoy M. A.** – conducting research, editing the text
- <sup>9</sup>**Sutormin V. S.** – conducting research, editing the text
- <sup>10</sup>**Barannik A. V.** – conducting research, editing the text
- <sup>11</sup>**Prishchepa O. O.** – conducting research, writing the text of the article
- <sup>12</sup>**Zyryanov V. Ya.** – scientific leadership, research concept, editing the text of the article

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0003-3519-9497>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0001-7973-9155>

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0001-6488-8908>

<sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0001-8065-6445>

<sup>5</sup><https://orcid.org/0000-0001-7666-5138>

<sup>6</sup><https://orcid.org/0000-0002-4694-8695>

<sup>9</sup><https://orcid.org/0000-0003-4695-5569>

<sup>11</sup><https://orcid.org/0000-0003-2433-2571>

<sup>12</sup><https://orcid.org/0000-0001-7373-3342>

Поступила 26.04.2024, одобрена 27.05.2024, принята 3.06.2024  
 Received 26.04.2024, approved 27.05.2024, accepted 3.06.2024