

# Исследование ориентации жидкокристаллической смеси E7 в композитных фотонных кристаллах на основе монокристаллического кремния

© А.Д. Ременюк, Е.В. Астрова, Р.Ф. Витман, Т.С. Перова\*, В.А. Толмачев, J.K. Vij\*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

\* Университет Дублина, Тринити Колледж,  
Дублин 2, Ирландия

E-mail: arem@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию в окончательном виде 20 мая 2005 г.)

Исследована ориентация жидкого кристалла E7 на поверхности кремниевых пластин и внутри канавок щелевого кремния, полученного анизотропным травлением в щелочи. Для определения ориентации жидкого кристалла использованы методы инфракрасного поглощения и отражения, а также емкостный метод. Рассмотрены особенности инфракрасного поглощения жидкого кристалла, введенного в периодические матрицы. Показано, что в щелевом кремнии жидкий кристалл E7 проявляет слабо выраженную планарную ориентацию относительно кремниевых стенок.

Работа выполнена при финансовой поддержке программ „Оптика и лазерная физика“ (РАН), Президента РФ по поддержке научных школ (НШ 758-2003.2) и Ирландской программы по фундаментальным исследованиям (Science Foundation Ireland Grant 04/BR/P0698).

PACS: 61.30.-v, 78.20.-e, 42.70.Df

## 1. Введение

Периодические структуры на основе монокристаллического кремния в виде глубоких и узких щелей (щелевой кремний — GrSi) или глубоких каналов малого диаметра (макропористый кремний — maSi) являются перспективными для создания фотонных интегральных схем на базе кремния. Первые получают жидкостным анизотропным травлением кремния, ориентированного в плоскости (110), предварительно создав на его поверхности узкие окна окисной маски [1], вторые — электрохимическим травлением подложки с ориентацией (100) после формирования на ее поверхности упорядоченной „решетки“ затравочных ямок [2]. Стенки щелевого кремния представляют собой оптически гладкие плоскости (111), а каналы maSi — слегка гофрированную цилиндрическую поверхность.

Экспериментально было показано, что щелевой кремния представляет собой одномерный фотонный кристалл (1D ФК) [3], а макропористый кремний с треугольной упорядоченной решеткой — двумерный фотонный кристалл (2D ФК) [4]. В обоих случаях основная запрещенная зона для фотонов лежит в средней ИК-области спектра. Идея о заполнении пустот периодических структур на основе материалов с более высоким по сравнению с воздухом показателем преломления жидкими кристаллами (ЖК) для изменения показателя преломления ЖК и, следовательно, для управления положением фотонной зоны (photonic band gap — PBG) была впервые высказана в теоретической работе [5]. Эксперименты по инфльтрации ЖК в макропористый кремний показали, что PBG сдвигается в длинноволновую часть спектра, а

при нагреве за счет перехода ЖК из мезофазы в изотропное состояние был получен сдвиг коротковолнового края PBG на 70 nm [6].

Более перспективным представляется управление фотонной зоной с помощью внешнего электрического поля. Если в случае 2D ФК приложить электрическое поле к ЖК в каналах проводящего макропористого кремния затруднительно, то в случае 1D ФК на основе щелевого кремния задача относительно просто может быть решена путем создания встречно-штыревой структуры, изолированной от подложки [7]. В любом случае (как при термическом так и при электрическом управлении) величина эффекта зависит от исходной ориентации молекул ЖК.

Несмотря на довольно обширную информацию об ориентирующем действии поверхности твердых тел на ориентацию молекул нематических ЖК [8], данные для кремния в литературе не отражены.

Цель настоящей работы состоит в исследовании того, как ориентируется директор нематического ЖК E7 на поверхности (111) кремния в объемных ЖК-ячейках и щелевых структурах и как влияет на этот процесс предварительная обработка поверхности.

## 2. Эксперимент

ЖК-ячейки были изготовлены из двух полированных кремниевых пластин толщиной 1 mm. Использовался n-Si, полученный методом Чохральского, с удельным сопротивлением 30  $\Omega \cdot \text{cm}$  и ориентацией (111). При изготовлении ячейки C (табл. 1) пластины подвергались химическому травлению в горячем растворе ще-

Таблица 1. Параметры исследованных образцов

Образец	Тип структуры	Предварительная обработка поверхности	Условия заполнения ЖК	Ориентация директора относительно кремниевых стенок	Дихроичное отношение $N = A_z/A_x$ при $2220 \text{ cm}^{-1}$	Величина электрооптического эффекта $N_U = A(0)/A(U)$
C	Кремниевая объемная ячейка	30% раствор КОН, $T = 65^\circ\text{C}$ , 30 min	$T = 25^\circ\text{C}$	Планарная однородная	2.78	1.75
Ж	То же	3% раствор PVA в $\text{H}_2\text{O} + \text{C}_2\text{H}_2\text{O}_5$ (1 : 1), центрифуга ( $4000 \text{ min}^{-1}$ ), отжиг $80^\circ\text{C}$ , 30 min	$T = 25^\circ\text{C}$	Планарная случайная или изотропная	1	1.4
GrDe29A	Щелевой кремний большой площади, $l = 45 \mu\text{m}$	Гидрофилизация в ПАР + 5% раствор PVA в $\text{H}_2\text{O} + \text{C}_2\text{H}_2\text{O}_5$ (1 : 1), отжиг $100^\circ\text{C}$ , 1 h	$T = 76^\circ\text{C}$ + отлаживание 3 h, удаление ЖК с поверхности другой пластиной	Изотропная или слабопланарная	Усиление всех полос при $P \perp$ щелям	
GrDe29B	То же	Гидрофилизация в ПАР, обработка в хромолане, отжиг $120^\circ\text{C}$ , 1 h	$T = 76^\circ\text{C}$ + охлаждение 3 h, удаление ЖК с поверхности другой пластиной, поверхность плохо смачивается	То же	То же	
GrDe29D	» »	Гидрофилизация в ПАР	$T = 90^\circ\text{C}$ + удаление ЖК с поверхности потоком сжатого азота	» »	» »	

Примечание. ПАР — перекисно-аммиачный раствор, PVA — поливиниловый спирт (везде приведены wt.%).  $A_z$  и  $A_x$  — пиковые интенсивности выбранной полосы поглощения для двух взаимно перпендикулярных направлений поляризации света  $P_z$  и  $P_x$ ,  $A(0)$  и  $A(U)$  — пиковые интенсивности полосы при  $2220 \text{ cm}^{-1}$  при отсутствии напряжения и при напряжении  $U$  соответственно.

лочи, что имитировало процесс анизотропного травления. Для получения заданной толщины зазора использовались тефлоновые прокладки толщиной  $d = 5 \mu\text{m}$ . Затем ячейка зажималась и склеивалась эпоксидным клеем с двух противоположных сторон. Заполнение ячеек и структур ЖК проводилось за счет капиллярного эффекта при разных температурах  $T$  (табл. 1). В тех случаях, когда  $T > T_c$  (где  $T_c$  — температура перехода ЖК из мезофазы в изотропное состояние), использовалось медленное охлаждение до комнатной температуры в течение 3 h. Для заполнения ячеек нами была выбрана хорошо известная смесь E7 на основе цианобифенилов с положительной анизотропией диэлектрической постоянной  $\Delta\epsilon = 13.8$  и высокой анизотропией показателя преломления в ИК-области спектра  $\Delta n = 0.20$ ,  $n_e(\parallel) = 1.69$  и  $n_o(\perp) = 1.49$  [9]. Для E7  $T_c = 58^\circ\text{C}$ .

Для достижения наибольшего электрооптического эффекта необходимо, чтобы молекулы этого ЖК до приложения поля имели планарную ориентацию относительно кремниевых стенок. Обычно используемое в объемных ЖК-ячейках механическое натирание поверхности, покрытой ориентантом, для получения однородной планарной ориентации в случае щелевого кремния непри-

годно, поэтому применялись другие способы подготовки поверхности.

Ориентация молекул ЖК определялась по спектрам оптического пропускания в ИК-области при нормальном

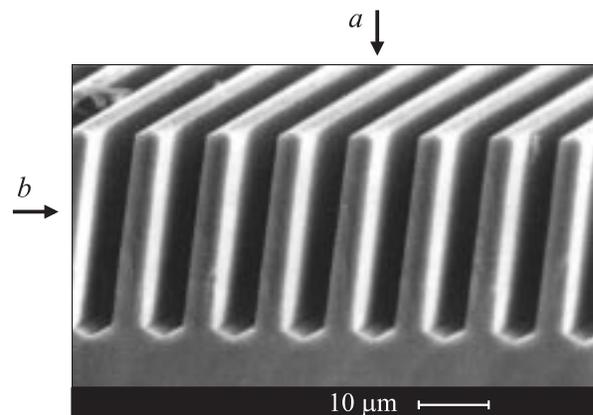


Рис. 1. Изображение образца щелевого кремния, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа. Геометрия  $a$  — направление распространения излучения при измерении спектров пропускания; геометрия  $b$  — направление распространения излучения при измерении спектров отражения для регистрации фотонной зоны.

падении света на кремниевые окна объемных ячеек или по нормали к подложке шелевого кремния (рис. 1, геометрия *a*). Спектры записывались с помощью Фурье-спектрометра Digilab 6000 FTIR или спектрофотометра Spectrod-75. Для исследований фотонной зоны свет направлялся параллельно плоскости подложки, т.е. перпендикулярно кремниевым стенкам (рис. 1, геометрия *b*), при этом записывались спектры отражения. Для фокусировки света на Si-стенках высотой  $\cong 50 \mu\text{m}$  в данном эксперименте использовался ИК-микроскоп UMA-500. Подробнее методика описана в [10].

### 3. Объемные ячейки

На рис. 2 приведен спектр оптического пропускания ЖК-ячейки *C*, полученный при двух взаимно перпендикулярных поляризациях света. На спектре хорошо

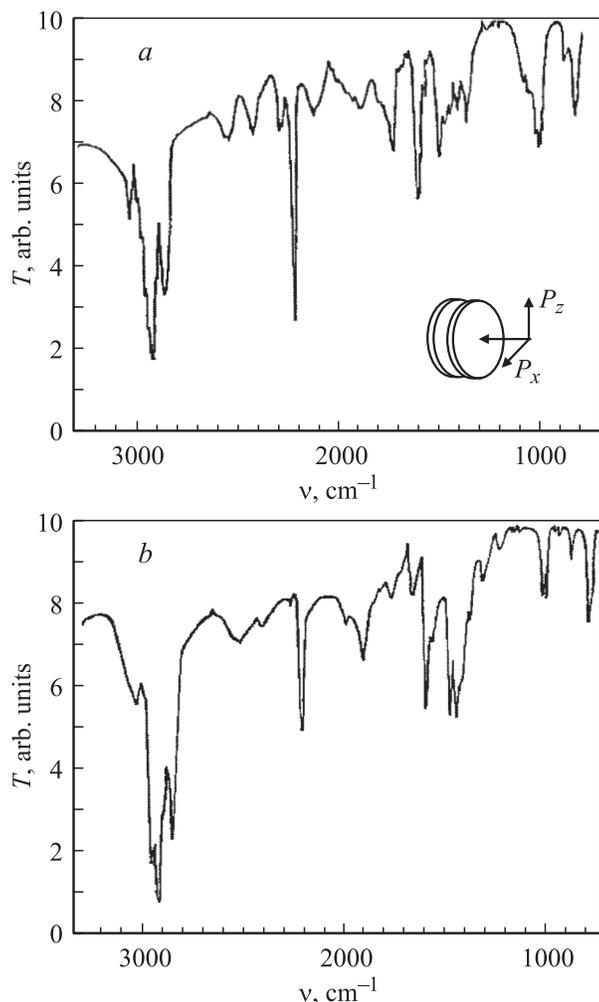
**Таблица 2.** Спектральное положение полос поглощения жидкого кристалла E7

Номер полосы	$\nu$ , $\text{cm}^{-1}$	$\lambda$ , $\mu\text{m}$	Колебания связи	Ориентация относительно оси молекул
1	2960	3.38	(-C-H)	Параллельная » »
2	2920	3.42	(-C-H)	
3	2840	3.52		
4	2220	4.50	$\nu$ (-C $\equiv$ N)	
5	1600	6.25	$\nu$ (C-C)	
6	1400	7.14		
7	1240	8.06	$\nu$ (C-C)	
8	1200	8.33	$\delta$ (C-H)	
9	1000	10.0		
10	817	12.24		

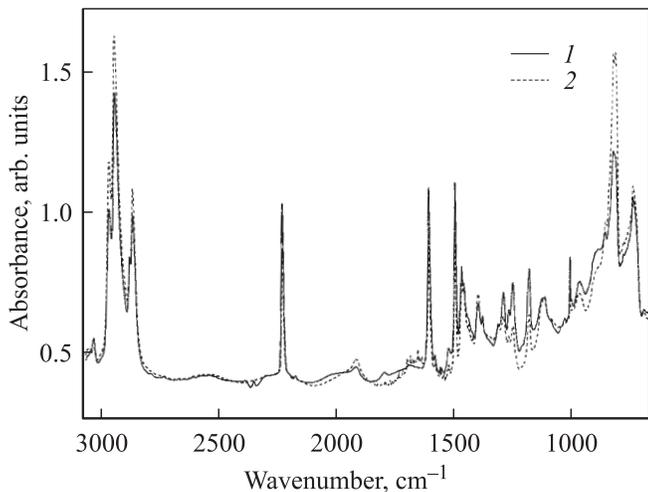
видны известные полосы поглощения смеси цианобифенилов, частоты которых приведены в табл. 2 [11]. Глубина пиков поглощения зависит от взаимной ориентации директора ЖК **L** и вектора поляризации **P**. Из спектров, приведенных на рис. 2, видно, что в зависимости от поляризации света глубина полос поглощения меняется. Это свидетельствует о наличии преимущественной ориентации составляющей директора в плоскости кремниевых пластин. Судить о степени ориентационного порядка *S* в плоскости, параллельной Si-пластинам, удобно по поглощению на колебаниях при  $\nu = 2220 \text{ cm}^{-1}$ , направления дипольных моментов которых параллельны длинной оси молекул E7. Для определения *S* использовалось дихроичное отношение  $N = \frac{A_z}{A_x} = 2.78$ , где  $A_z$  и  $A_x$  — пиковые интенсивности выбранной полосы поглощения для двух взаимно перпендикулярных направлений поляризации света  $P_z$  и  $P_x$ . Степень ориентационного порядка определялась из величины *N* с помощью известного соотношения [12]

$$S = \frac{N - 1}{N + 2} = 0.373.$$

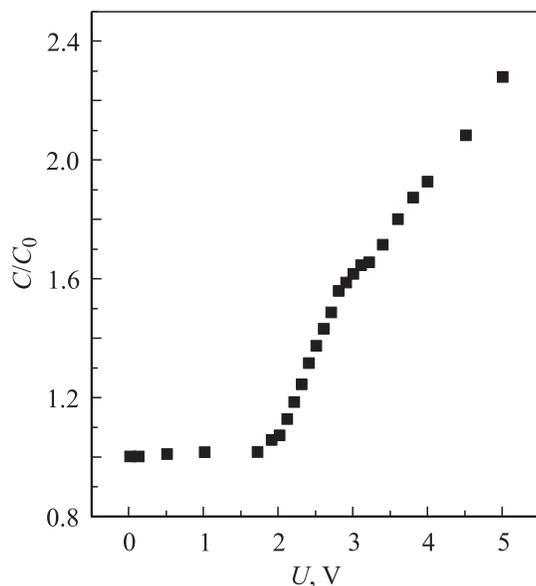
Такое значение *S* существенно меньше, чем обычно получаемая степень ориентационного порядка  $S = 0.67$  для нематических ЖК, поверхности окон которых покрыты ориентантом. О направлении директора ЖК **L** можно судить также по соотношению интенсивностей полос поглощения при 2220 и 817  $\text{cm}^{-1}$ . Поглощение в первой полосе максимально при  $\mathbf{L} \parallel \mathbf{P}$ , а во второй — при  $\mathbf{L} \perp \mathbf{P}$  [11]. При отклонении угла падения света от нормального за счет поворота ячейки в разных плоскостях интенсивность полосы 2220  $\text{cm}^{-1}$  уменьшалась, а полосы 817  $\text{cm}^{-1}$  увеличивалась, что также свидетельствует о преимущественной планарной ориентации. Таким образом, исследование ориентации директора ЖК на объемных ячейках указывает на слабую планарную ориентацию ЖК при его контакте с поверхностью (111) кремния, обработанной в горячей щелочи.



**Рис. 2.** Спектр оптического пропускания кремниевой ЖК-ячейки *C* при двух взаимно перпендикулярных направлениях поляризации света. *a* —  $P_z$ , *b* —  $P_x$ . На вставке показана геометрия эксперимента: горизонтальная стрелка — направление распространения излучения, стрелки  $P_x$  и  $P_z$  — направление поляризации излучения.



**Рис. 3.** Спектр поглощения кремниевой ячейки Ж, заполненной ЖК E7, в неполяризованном свете. Напряжение между электродами, В: 1 — 0, 2 — 6 В.



**Рис. 4.** Зависимость емкости кремниевой ячейки  $C$  от напряжения смещения ( $C_0$  — емкость образца при нулевом смещении).

Эффективность управления ориентацией ЖК с помощью электрического поля была исследована при приложении к ячейке Ж постоянного напряжения  $U$  от 0 до 6 В. S-эффект Фредерикса наблюдался по изменению оптической плотности указанных выше полос при  $\nu_1 = 2220 \text{ cm}^{-1}$  и  $\nu_2 = 817 \text{ cm}^{-1}$  и по изменению емкости на частоте  $f = 1 \text{ kHz}$ .

На рис. 3 показано, как изменяется спектр поглощения при подаче напряжения выше порогового: поглощение в полосах 2220, 1600, 1400 и  $1200 \text{ cm}^{-1}$  уменьшилось, а в полосе вблизи  $817 \text{ cm}^{-1}$  увеличилось, что свидетельствует о перестройке ориентации директора с планарной

на гомеотропную при приложении поля. Отношение интенсивностей полосы  $2220 \text{ cm}^{-1}$  при  $U = 0$  и 6 В составляет 1.4. Зависимость емкости от приложенного напряжения показана на рис. 4. Величина диэлектрической постоянной  $\epsilon$  при этой частоте, вычисленная по емкости при  $U \approx 0$ , оказалась равной  $5.6 \pm 0.2$ , что близко к величине диэлектрической постоянной  $\epsilon_{\perp}$  для ориентации вдоль плоскости кремниевых пластин (по данным фирмы Merck (Германия)  $\epsilon_{\parallel} = 19$ ,  $\epsilon_{\perp} = 5.2$ ). Из рис. 4 хорошо видно пороговое изменение емкости вблизи  $U = 2 \text{ V}$ , соответствующее напряжению переключения ЖК E7. Среднее значение диэлектрической проницаемости ЖК E7 на частоте 1 kHz по данным фирмы Merck  $\langle \epsilon \rangle = 1/3(\epsilon_{\parallel} + \epsilon_{\perp}) = 9.8$ . Таким образом, если изначально ЖК в ячейке изотропен, максимальное изменение емкости при подаче напряжения должно составить не более чем

$$\frac{C(U = 5 \text{ V})}{C(U = 0)} = \frac{\epsilon_{\parallel}}{\langle \epsilon \rangle} = 1.94.$$

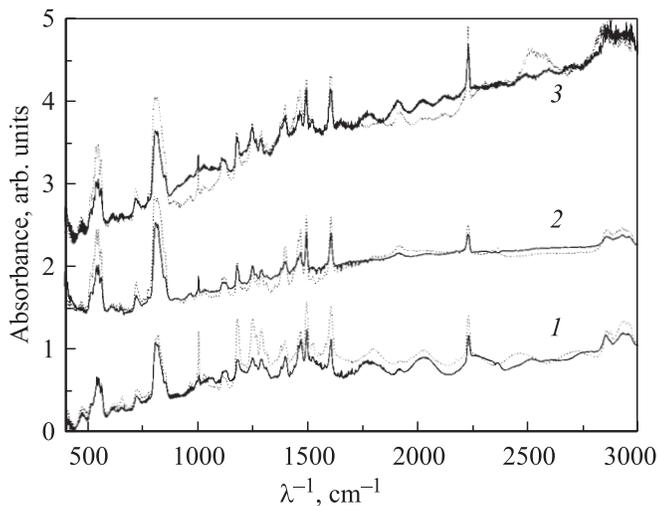
Экспериментальное изменение емкости, согласно рис. 4, составило  $C(U = 5 \text{ V})/C(U = 0) = 2.24$ , что также указывает на исходную планарную ориентацию директора ЖК.

Далее было исследовано влияние ориентанта, обычно применяемого для получения однородной планарной ориентации ЖК в сочетании с механическим натиранием. Предварительное покрытие кремниевых пластин (ячейка Ж) поливиниловым спиртом (3 wt.%) давало последующую планарную гетерогенную ориентацию ЖК (при обеих поляризациях света интенсивность поглощения в полосе  $2220 \text{ cm}^{-1}$  была одинакова). При подаче на ячейку достаточно большого напряжения интенсивность пика полосы при  $2220 \text{ cm}^{-1}$  уменьшается всего в 1.4 раза. Сравнение с величиной электрооптического эффекта в ячейке С свидетельствует о том, что пленка поливинилового спирта не привела к увеличению доли ориентированных планарно молекул ЖК.

## 4. Щелевой Si

Для получения щелевого кремния была использована технология жидкостного анизотропного травления пластин кремния с удельным сопротивлением  $5 \Omega \cdot \text{cm}$ , ориентированных в плоскости (110). Подробнее структуры и их получение описаны в [13]. Для измерения в геометрии  $a$  (рис. 1) использовались образцы с периодом  $A = 7 \mu\text{m}$ . Вертикальные стенки кремния толщиной  $D_{\text{Si}} = 2.3 \mu\text{m}$  чередуются с воздушными зазорами шириной  $4.7 \mu\text{m}$ . Глубина щелей  $l = 30\text{--}45 \mu\text{m}$  при общей толщине пластины  $200 \mu\text{m}$ .

Образцы щелевого кремния отмывались в стандартном перекисно-аммиачном растворе (ПАР). Для создания определенной ориентации ЖК были опробованы различные ориентанты, которые предварительно наносились на поверхность кремниевых стенок внутри



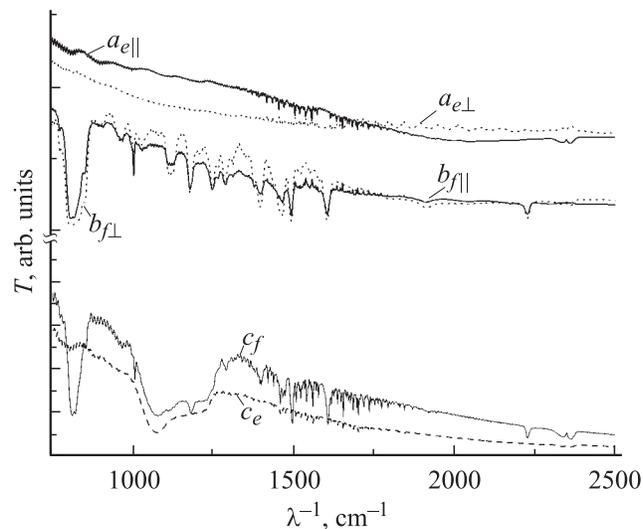
**Рис. 5.** Спектры поглощения щелевого кремния при обработке поверхности кремниевых стенок перед заполнением жидкого кристалла различными ориентантами: 1 — хромоланом, 2 — без ориентанта, 3 — поливиниловым спиртом. Сплошные линии — поляризация параллельна щелям, пунктир — поляризация перпендикулярна щелям. Спектры сдвинуты по оси ординат. Геометрия соответствует геометрии *a* (рис. 1).

щелей путем покрытия пленкой поливинилового спирта (PVA) с последующим отжигом при  $T = 100^\circ\text{C}$  или обработкой в растворе хромолана [14]. Затем слой ЖК наносился на поверхность, образец выдерживался при комнатной температуре в течение 10 min для капиллярного заполнения щелей. Излишки ЖК удалялись с поверхности путем центрифугирования (при скорости 5000 оборотов в минуту) или потоком сжатого азота. Спектры поглощения для образцов, обработанных этими ориентантами, показаны на рис. 5. Проследить влияние ориентантов на ориентацию ЖК-молекул можно по изменению пиковой интенсивности полос поглощения, связанных с колебаниями, направление дипольных моментов которых хорошо известно. Такими полосами являются полосы при  $817$ ,  $1600$  и  $2220\text{ cm}^{-1}$ . Полоса при  $2220\text{ cm}^{-1}$  находится в области малой прозрачности щелевого кремния, и об изменении ее интенсивности судить трудно, а интенсивность полос при  $817$  и  $1600\text{ cm}^{-1}$  слабо меняется при переходе от спектра 2 к спектрам 1 и 3. Из спектров, представленных на рис. 5, видно, что, несмотря на то что изменения в полосах поглощения при  $1600$  и  $817\text{ cm}^{-1}$  очень слабые, спектры, полученные при разных поляризациях, довольно сильно различаются в области других ИК-полос. Наиболее сильные различия наблюдаются, например, в районе  $1000$  и  $1200\text{--}1400\text{ cm}^{-1}$ . Эти полосы могут быть связаны с колебаниями, которые находятся под некоторым углом по отношению к длинной оси молекулы. Не исключено, что мы имеем дело с ориентацией молекул, которая отличается от чисто планарной, и полосы, направление дипольного момента которых совпадает с направлением

ем поляризации излучения, и проявляют максимальный дихроизм. К сожалению, некоторые из этих полос перекрываются, а некоторые не имеют абсолютно четкого отнесения, поэтому мы их не использовали для сравнения. В целом, можно сделать вывод, что существенного влияния на ориентацию ЖК ориентанты не оказывают.

На рис. 6 показаны поляризационный спектр пропускания пустой матрицы щелевого кремния, а также спектр после заполнения ее ЖК. Характерной особенностью спектров является очень низкая прозрачность в коротковолновой области и ее рост при длинах волн  $\lambda$ , близких к периоду структуры *A*. Аналогичный характер изменения имеют спектры макропористого кремния, приведенные на том же рисунке. Исходный кремний, из которого были изготовлены образцы, в этой области прозрачен. Поэтому низкое оптическое пропускание щелевого и макропористого кремния в коротковолновой области связано, по-видимому, с высоким рассеянием на кремниевых стенках [15]. Хотя расчеты в [15] выполнены для другой формы рассеивающих частиц, качественно эти результаты могут быть применены и для наших матриц. При длинах волн, больших, чем размеры рассеивающих частиц (в данном случае щелей или пор), интенсивность рассеяния уменьшается и прозрачность растет.

В спектрах пропускания образцов после их заполнения ЖК появляются все характерные для E7 полосы поглощения. Многочисленные узкие линии, присутствующие



**Рис. 6.** Спектры пропускания периодических кремниевых матриц до и после заполнения ЖК.  $a_{e||}$  и  $a_{e\perp}$  — спектры пустой матрицы щелевого кремния (образец GrDe29D) при поляризации вдоль и поперек щелей,  $b_{f||}$  и  $b_{f\perp}$  — спектры того же образца после заполнения ЖК,  $c_e$  и  $c_f$  — спектры пропускания макропористого кремния с периодом „решетки“  $4\mu\text{m}$  до и после заполнения ЖК (вид спектров  $c_e$ ,  $c_f$  от поляризации не зависит). Освещение при измерении спектров  $a_{e||}$ ,  $a_{e\perp}$ ,  $b_{f||}$ ,  $b_{f\perp}$  в геометрии *a* (рис. 1). Спектры сдвинуты по оси ординат.

Таблица 3. Коэффициенты поглощения ЖК E7 при  $\nu_1$  и  $\nu_2$ 

Тип структуры	Образец	Коэффициент поглощения, $10^2 \text{ cm}^{-1}$	
		$\nu_2 = 817 \text{ cm}^{-1}$	$\nu_1 = 2220 \text{ cm}^{-1}$
Объемная ячейка	C	10	14
GrSi	De29(7) A	6	2
GrSi	De29(7) B	7.6	1.8
GrSi	De29(7) C	5.3	3.2
GrSi	De29(7) D	6.2	1.3
GrSi	grSi0	9.3	2.5
maSi	2J12N	2.62	0.09
maSi	2M28N2	1	0.15
maSi	2A12N14	0.89	0.04

ющие на спектрах  $a_{e\parallel}$  и  $c_f$  в области  $1300\text{--}1700 \text{ cm}^{-1}$ , кроме перечисленных в табл. 2, относятся к нескомпенсированным вращательным колебаниям атмосферных паров воды.

Из спектров  $b_{f\parallel}$ ,  $b_{f\perp}$  (рис. 6) видно, что интенсивность всех полос несколько выше для света, поляризованного перпендикулярно щелям, в то время как изменения высоты пиков поглощения для колебаний, имеющих место вдоль и поперек длинной оси молекулы, должны происходить в противофазе: рост пика  $\nu_1 = 2220 \text{ cm}^{-1}$  должен сопровождаться уменьшением пика  $\nu_2 = 817 \text{ cm}^{-1}$ , и наоборот. Таким образом, при сравнении спектров поглощения ЖК в щелевом кремнии для двух ортогональных поляризаций света невозможно сделать вывод о том, как ориентируются молекулы ЖК по отношению к кремниевым стенкам: планарно или гомеотропно. Если сравнить относительные высоты пиков  $\nu_1$  и  $\nu_2$  в щелевой и макропористой матрицах с их высотой в объемной ячейке, обращает на себя внимание то, что все коротковолновые пики поглощения ЖК оказываются „приглушенными“. Интенсивность полосы  $\nu_1$  почти на порядок меньше, чем полосы  $\nu_2$ , в то время как в ячейке их отношение меньше 2. Впервые этот эффект был обнаружен в работе [16] при исследовании поведения других ЖК (дискотиков и ферроэлектриков) в макропористом кремнии с периодом  $A = 12 \mu\text{m}$ , где он интерпретировался как возрастание коэффициента поглощения для длинноволновых полос. Нами были рассчитаны коэффициенты поглощения для ЖК E7 для объемной ячейки и ряда образцов щелевого и макропористого кремния с учетом их пористости. Полученные результаты приведены в табл. 3. Из таблицы видно, что величина коэффициента поглощения коротковолнового пика  $\nu_1$  всегда существенно ниже, чем в ячейке, в то время как для длинноволнового пика  $\nu_2$  это различие не так велико. Отсюда можно сделать вывод, что в периодической матрице происходит ослабление интенсивности коротковолновых пиков, а не усиление длинноволновых. Качественно это можно объяснить волноводным эффек-

том, при котором уменьшение длины волны до величин, меньших периода структуры, приводит к вытеснению света в область с высокой диэлектрической проницаемостью (кремниевые стенки щелевой матрицы или области между порами макропористого кремния) [17]. Это равносильно тому, что через ЖК проходит меньше света. Перераспределение светового потока воспринимается как уменьшение поглощения в ЖК.

Для изменений ИК-спектров отражения щелевого кремния в геометрии  $b$  использовались образцы, состоящие из семи кремниевых стенок, разделенных канавками. Ориентанты не использовались. На рис. 7 показан спектр отражения одного из таких образцов щелевого кремния с периодом  $A = 4 \mu\text{m}$  и толщиной кремниевых стенок  $D_{st} = 2.3 \mu\text{m}$  до и после заполнения ЖК. Запрещенным зонам этого фотонного кристалла в спектре отражения соответствуют области с высоким отражением. При заполнении щелей ЖК происходят сдвиг запрещенных зон в длинноволновую область и уменьшение ширины запрещенных зон, что является следствием уменьшения контраста показателя преломления. При освещении светом с  $H$ -поляризацией (параллельной оси  $z$  на вставке) зона вблизи  $\lambda \sim 9 \mu\text{m}$  сдвинута в более длинноволновую область, чем с  $E$ -поляризацией (на вставке параллельна оси  $x$ ). Полученные экспериментально спектры отражения сравнивались с рассчитанными по методу, описанному в [18]. Наилучшее согласие экспериментальных и расчетных спектров получено при  $n_{LC} = 1.52$  и  $1.67 (\pm 0.01)$  для  $E$ - и  $H$ -поляризаций соответственно. Поскольку большее значение показателя преломления соответствует поляризации света, параллельной оптической оси, можно утверждать, что директор ЖК в

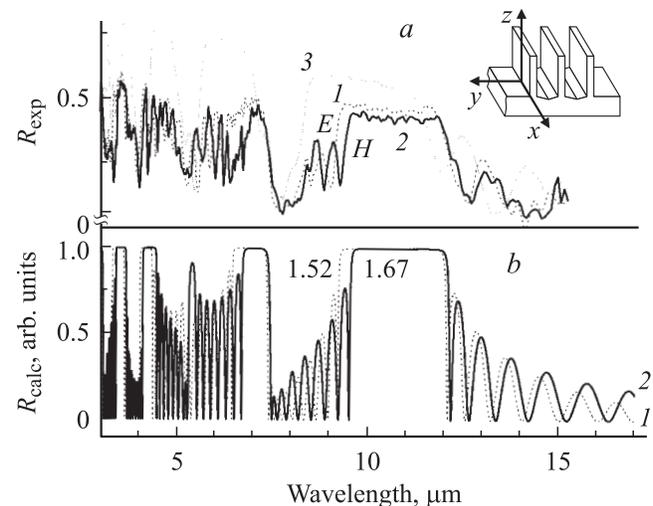


Рис. 7. Спектры отражения щелевого кремния до и после заполнения ЖК. Освещение в геометрии  $b$  (рис. 1).  $a$  — экспериментальный спектр: 1 — поляризация  $E$  (направление  $x$  на вставке), 2 — поляризация  $H$  (направление  $z$  на вставке), 3 — спектр, измеренный до заполнения образца ЖК.  $b$  — соответствующий расчетный спектр при  $n_{LC} = 1.52$  (1) и  $1.67$  (2).

исследованных образцах ориентирован вдоль оси  $z$ , т.е. планарно к кремниевым стенкам и гомеотропно ко дну щелей.

Следует отметить, что для части образцов ( $\approx 50\%$ ) никакого различия в спектрах для света, поляризованного в двух взаимно перпендикулярных направлениях ( $E$ - и  $H$ -поляризация), обнаружено не было, а сдвиг запрещенных зон после заполнения образца ЖК, полученный путем сравнения экспериментальных и расчетных спектров, соответствовал средней величине показателя преломления  $n_{LC} = 1.60 \pm 0.02$ . Очевидно, в этих образцах имела место хаотическая ориентация ЖК-молекул относительно кремниевых стенок.

## 5. Заключение

Исследование ориентирующего действия поверхности кремния на молекулы E7 с помощью поляризационной ИК-спектроскопии показало, что директор ЖК имеет преимущественно планарную ориентацию относительно кремниевых стенок как в объемных ячейках, так и в щелевом кремнии. Эти выводы подтверждаются анализом спектров отражения композитных фотонных кристаллов и рассчитанными на их основе величинами показателя преломления ЖК.

Обнаружен эффект ослабления коротковолновых полос поглощения ЖК в матрицах щелевого и макропористого кремния при нормальном падении ИК-света на поверхность образца, что объяснено преимущественным прохождением света через кремниевые стенки благодаря волноводному эффекту.

## Список литературы

- [1] D.L. Kendall. *Ann. Rev. Mater. Sci.* **9**, 373 (1979).
- [2] V. Lehman, H. Foll. *J. Electrochem. Soc.* **137**, 653 (1990).
- [3] В.А. Толмачев, Л.С. Границына, Е.Н. Власова, Б.З. Волчек, В. Нашекин, А.Д. Ременюк, Е.В. Астрова. *ФТП* **36**, 996 (2002).
- [4] U. Gruning, V. Lehman, S. Ottow, K. Bush. *Appl. Phys. Lett.* **68**, 747 (1996).
- [5] K. Bush, S. John. *Phys. Rev. Lett.* **83**, 967 (1999).
- [6] S. Leonard, J. Mondia, H. van Driel, O. Toader, S. John, K. Bush, A. Birner, U. Gosele, V. Lehman. *Phys. Rev. B* **61**, R 2389 (2000).
- [7] Е.В. Астрова, Т.С. Перова, С.А. Грудинкин, В.А. Толмачева, Ю.А. Пилюгина, В.Б. Воронков, Ж.К. Виж. *ФТП* **39**, 793 (2005).
- [8] Ж. Коньяр. *Ориентация нематических жидких кристаллов и их смесей*. Университет, Минск (1986). 100 с.
- [9] L.C. Khoo. *J. Mod. Opt.* **37b**, 1801 (1990).
- [10] V. Tolmachev, T. Perova, E. Astrova, B. Volchek, J.K. Vij. *Phys. Stat. Sol. (a)* **197**, 544 (2003).
- [11] S.-T. Wu. *Opt. Eng.* **9**, 120 (1987).
- [12] Л.М. Блинов. *Электро- и магнитооптика жидких кристаллов*. Наука, М. (1978). 384 с.
- [13] Е.В. Астрова, Т.С. Перова, В.А. Толмачев, А.Д. Ременюк, Ж. Виж, А. Moore. *ФТП* **37**, 417 (2003).
- [14] L.M. Blinov, V.G. Chigrinov. In: *Electronic Effects in Liquid Crystal Materials*. Springer-Verlag (1994). P. 97–131.
- [15] C.F. Bohren, D.R. Huffmans. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. John Wiley & Sons, Chichester, N. Y. (1983). 450 p.
- [16] Т.С. Перова, Е.В. Астрова, С.Е. Тsvetkov, А.Г. Tkachenko, Ж.К. Виж, С. Kumar. *ФТТ* **44**, 1145 (2002).
- [17] А.М. Желтиков. *УФН* **170**, 1203 (2000).
- [18] В.А. Толмачев. *Опт. и спектр.* **97**, 292 (2004).