

ЖАРОВА Юлия Александровна

**ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ОДНОМЕРНЫЕ ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ НА ОСНОВЕ  
ЩЕЛЕВОГО КРЕМНИЯ И ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО НАПОЛНИТЕЛЯ**

01.04.10

физика полупроводников

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2007 г.

Работа выполнена в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН и Санкт-Петербургском Университете Информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО)

**Научные руководители:**

Доктор технических наук, профессор А.М. Скворцов  
Кандидат физико-математических наук Е.В. Астрова

**Официальные оппоненты:**

Доктор физико-математических наук Г.Ф. Глинский  
Кандидат физико-математических наук А. Б. Певцов

**Ведущая организация:**

Институт проблем технологии микроэлектроники ИПТМ РАН г. Черноголовка

Защита состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2007 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета К 002.205.02 Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН.

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2007 г.

Отзывы об автореферате в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук

Куликов Г.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Фотонные кристаллы (ФК) – диэлектрические среды с периодически изменяющей диэлектрической проницаемостью, период которых соизмерим с длиной волны электромагнитного излучения. По аналогии с энергетическим спектром электронов в обычных атомных кристаллах ФК характеризуются запрещенными и разрешенными зонами для фотонов, дисперсионным законом, плотностью состояний, зонами Бриллюэна [1]. Термин «фотонный кристалл» был предложен Яблоновичем, обобщившим представление о хорошо известных одномерных (1D) ФК – диэлектрических брэгговских зеркалах на двух (2D) и трехмерный (3D) случай [2]. Технологические достижения в области получения структур с микронными и субмикронными размерами в последние десятилетия сделали возможным изготавливать ФК с фотонными запрещенными зонами (ФЗЗ) в области оптических частот. Наиболее интересными свойствами ФК являются подавление спонтанной эмиссии атомов и молекул и локализация света [3].

Среди множества применений ФК особое место занимают интегральная оптика и, в частности, кремниевая микрофотоника, которую можно рассматривать как оптический эквивалент микроэлектроники для интегральных схем. Обработка информации внутри чипа может осуществляться как с помощью оптических элементов, так и электронными компонентами в сочетании с оптическими. В последнем случае кремниевая микрофотоника базируется на элементах, интегрированных в чип, таких как излучатели, волноводы, детекторы, модуляторы, использование которых должно обеспечить высокую скорость обработки информации. Последние успехи в области создания эффективных кремниевых излучателей в спектральной области  $\lambda=1.1\text{--}1.6\text{ мкм}$  [4, 5, 6] открывают путь к созданию полностью кремниевой оптоэлектроники. Управление световыми потоками внутри чипа и контроль излучательных мод на краю ФЗЗ или в области дефектных мод микрорезонатора делает актуальной задачу по разработке

соответствующих фотонных структур на основе кремния. Во многих случаях интегрированных элементов оказывается достаточным изготовить одно- и двумерные структуры ФК, технология которых существенно проще. Наиболее удобно получать фотонные структуры путем формирования периодических пустот в кремниевой подложке. Это обеспечивает высокий контраст показателя преломления кремний-воздух и позволяет получать широкие ФЗЗ. Заполнение пустот различными материалами приводит к формированию композитных ФК, с сохранением достаточно высокого контраста показателя преломления.

Недавно было показано, что анизотропное химическое травление кремния, ориентированного в плоскости (110) [7], в сочетании с высокоразрешающей фотолитографией позволяют изготавливать интегрированные в чип 1D ФК для среднего ИК-диапазона [8]. Эта технология легла в основу настоящей диссертационной работы. Она обеспечивает получение в кремнии глубоких и узких щелей, ограниченных оптически гладкими стенками – плоскостями (111), и хорошо сочетается с технологией кремниевых интегральных схем.

Дополнительные возможности и большая функциональная гибкость появляются, если ФЗЗ может изменяться в реальном времени. Практически это означает, что спектр отражения ФК перестраивается под действием внешних факторов. Перестройка ФЗЗ может происходить за счет изменения геометрических размеров решетки ФК (деформация, тепловое расширение) или за счет изменения показателя преломления одной из компонент. В кремниевых ФК на основе монокристаллического кремния его показатель преломления может быть изменен путем генерации свободных носителей за счет инжекции из p-n перехода или оптического возбуждения. Перестройка ФЗЗ в этом случае характеризуется высоким быстродействием ( $\sim 1$  нс), но малым спектральным сдвигом ФЗЗ, т.к. изменение показателя преломления мало ( $\Delta n \leq 10^{-3}$ ). Значительно больший эффект может быть получен в композитных ФК, пустоты которых заполнены материалами с

управляемыми оптическими константами. В теоретической работе [9] было предложено использовать нематический жидкий кристалл (ЖК) для инфильтрации полостей инвертированного опала, где показатель преломления ЖК может существенно изменяться с помощью электрического поля. Последовавшие за этим экспериментальные работы демонстрировали в кремниевых ФК в основном термооптический эффект [10, 11], происшедший за счет фазового перехода ЖК из мезофазы в изотропное состояние. Композитные 1D ФК на основе щелевого кремния позволяют использовать электрическое поле для управления ФЗЗ, что наиболее интересно с практической точки зрения.

### **Цель работы.**

Целью настоящей работы явилось создание перестраиваемого одномерного фотонного кристалла на основе щелевого кремния с жидкокристаллическим наполнителем.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. рассчитать оптические характеристики структур;
2. разработать конструкцию и технологию получения композитного ФК;
3. исследовать ориентацию директора ЖК в щелях кремниевой матрицы;
4. разработать методы воздействия, позволяющие изменять показатель преломления ЖК;
5. исследовать оптические характеристики полученных композитных структур.

### **Научная новизна.**

1. Проведены расчеты спектров отражения композитных одномерных фотонных кристаллов на основе щелевого кремния с

разным периодом, фактором заполнения и показателем преломления ЖК. Построены карты фотонных запрещенных зон. Проведен расчет ожидаемого сдвига ФЗЗ в результате изменения показателя преломления жидкокристаллического наполнителя.

2. Разработаны варианты конструкций и технология получения композитного одномерного фотонного кристалла на основе щелевого кремния с нематическим жидкокристаллическим наполнителем.

3. Разработаны и изготовлены периодические структуры со встречно-штыревыми кремниевыми электродами на основе подложки «кремний на изоляторе» для исследования электрооптического эффекта в композитном фотонном кристалле.

4. Проведены исследования ориентирующего действия стенок щелевого кремния на молекулы ЖК на основе смеси цианобифенилов (E7). Установлено, что при введении ЖК при комнатной температуре молекулы ЖК выстраиваются преимущественно вдоль канавок щелевого кремния.

5. Исследованы изменения спектра отражения композитного фотонного кристалла при нагреве его выше температуры фазового перехода жидкокристаллической компоненты (термооптический эффект).

6. Продемонстрирован воспроизводимый сдвиг краев фотонной запрещенной зоны одномерного фотонного кристалла под действием внешнего электрического поля. Величина полученного электрооптического эффекта  $\Delta\lambda=0.19$  мкм, что составляет около 1.9% для края зоны при длине волны  $\lambda\approx 10$  мкм.

#### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Методом анизотропного щелочного травления пластин кремния ориентации (110) можно получать периодические щелевые структуры с

фотонными запрещенными зонами в спектральной области 1.4-15 мкм для света, распространяющегося в плоскости пластины.

2. Карты фотонных запрещенных зон одномерного фотонного кристалла – удобный инструмент для прогнозирования оптических характеристик периодических щелевых структур и анализа экспериментальных спектров их отражения и пропускания.

3. Периодическая щелевая структура встречно-штыревых кремниевых электродов на подложке «кремний на изоляторе», заполняемая нематическим жидким кристаллом, позволяет создавать композитный фотонный кристалл и перестраивать спектральное положение его фотонных запрещенных зон с помощью внешнего электрического поля.

4. Электрооптический эффект в жидкокристаллическом наполнителе полученного композита обеспечивает сдвиг коротковолнового края фотонной запрещенной зоны, расположенной вблизи  $\lambda = 10$  мкм, на  $\Delta\lambda/\lambda = 1.9\%$ . Характерное время электрического управления световым потоком составляет  $\sim 30$  мс, пороговое напряжение переключения 2 В.

### **Практическое и научное значение диссертации:**

Выполненные в работе исследования позволили сделать шаг в решении важной научно-технической проблемы по созданию электроуправляемых фотонных кристаллов, интегрированных в кремниевый чип. Продемонстрированные принципы формирования управляемых структур с запрещенной фотонной зоной на основе кремния могут служить основой для создания элементов микрофотоники (отражателей, микрорезонаторов, оптических фильтров, модуляторов, волноводов и т.д.) в практически важных областях длин волн ближнего и среднего ИК-диапазона.

### **Апробация работы:**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на 9 международных, 6 всероссийских конференциях и симпозиумах.

**Работа отмечена следующими дипломами:**

Выступления на 3 Всероссийских молодежных конференциях были отмечены дипломами. Исследования, приведенные в диссертации, были включены в цикл работ, получивших призовое место на конкурсе лучших работ ФТИ в 2005 году.

**Публикации:** По материалам диссертации опубликовано 24 научных труда, в том числе 8 статей в научных журналах и сборниках и 16 тезисов докладов.

**Структура и объем работы:** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций автора, приложения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет \_\_\_\_\_ страницы машинописного текста, включая \_\_\_\_\_ рисунков и \_\_\_\_\_ таблиц. Библиография содержит \_\_\_\_\_ наименований.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика диссертации, обоснована актуальность темы данной работы, определены цели и задачи исследований, изложены научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Проведен анализ литературы, в котором рассмотрены основные свойства, методы получения и применения фотонных кристаллов.

**В первой главе** приведены результаты расчета спектров отражения одномерных фотонных кристаллов на основе щелевого кремния, выполненные с помощью метода матриц переноса [12].

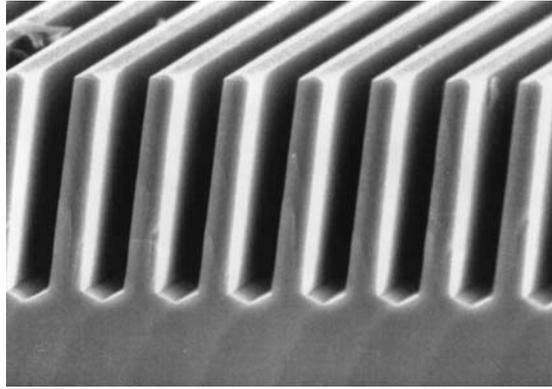


Рис. 1. Поперечное сечение структуры щелевого кремния. Изображение в электронном сканирующем микроскопе.

При проведении расчетов использовались программы для математического редактора MathCAD. Расчеты проводились в предположении нормального падения света, постоянства показателей преломления света кремния  $n_{Si}$ , воздуха  $n_{air}$  и жидкого кристалла  $n_{ЖК}$  в пределах рассматриваемого диапазона длин волн и отсутствия поглощения. Рассмотрены два типа структур: кремний-воздух с толщиной стенок  $D_{Si}$  и шириной щели  $D_{air}$  и кремний - жидкий кристалл с соответствующими геометрическими параметрами  $D_{Si}$  и  $D_{ЖК}$  с разным количеством периодов  $m=2-20$ . Показано, что за счет высокого контраста показателя преломления  $n_{Si}/n_{air}=3.42$  на спектре отражения хорошо выраженные стоп-зоны образуются уже при малом числе периодов  $m=2$ . Структуры щелевого кремния с малым периодом  $A < 3$  мкм, сложно получить с оптическими толщинами слоев  $\lambda/4$ , для которых фактор заполнения  $f = D_{Si}/A=0.226$ . Таким образом, возникла необходимость прогнозирования характеристик и анализа экспериментальных данных структур для более широкого диапазона факторов заполнения. Для этого были построены карты ФЗЗ, представляющие собой замкнутые области в координатах  $D_{Si}/A=f(A/\lambda)$  или  $D_{Si}/A=f(\lambda)$ , границы которых соответствуют фиксированному значению коэффициента отражения ( $R=0.999$  для  $m>2$  или  $R=0.97$  для  $m=2$ ), принимаемому за край запрещенной зоны. Пример карт ФЗЗ приведен на рис. 2, из которых видно как сдвигаются края ФЗЗ в результате заполнения

щелевого кремния ЖК (рис. 2а) т.е. за счет изменения оптического контраста ФК с 3.42/1 на 3.42/1.7. и при изменении показателя преломления ЖК на  $\Delta n=0.2$  (рис. 2б).

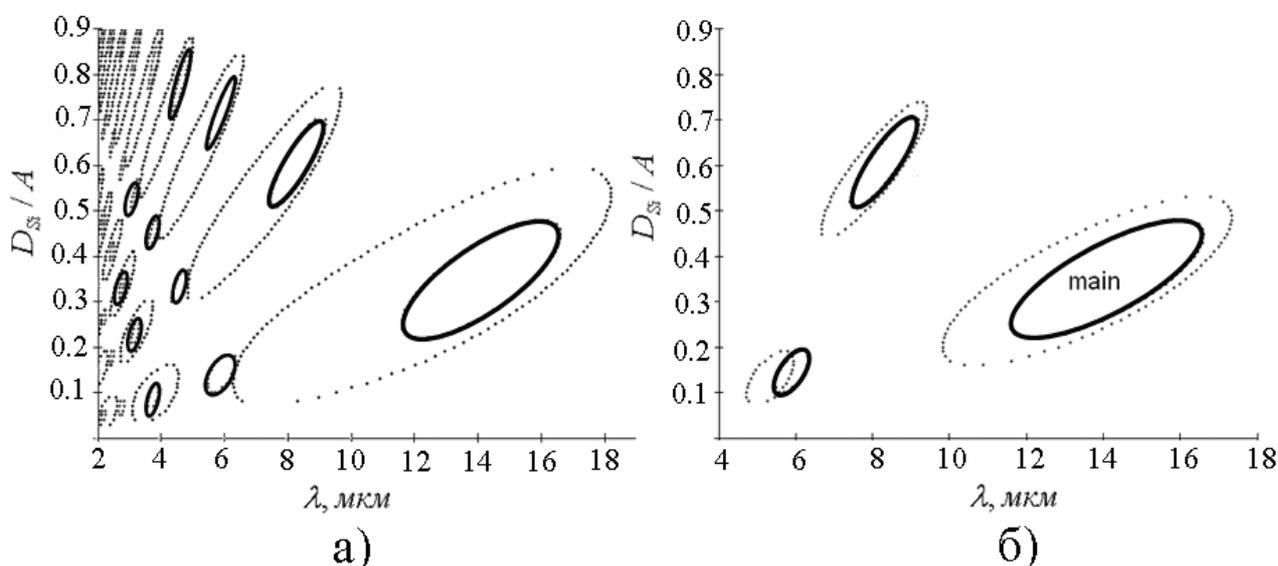


Рис. 2. Карты ФЗЗ структуры с  $A=3$  мкм и  $m=2$ : а) области ФЗЗ пустого (пунктирная линия) и заполненного ЖК с  $n=1.7$  фотонного кристалла (сплошная линия); б) карты ФЗЗ композитного фотонного кристалла, заполненного наполнителем с показателем преломления  $n = 1.5$  (пунктирная линия) и  $n = 1.7$  (сплошная линия).

На рис. 3 показаны основные варианты ориентации директора нематического ЖК в матрице щелевого кремния и соответствующие величины показателя преломления для использовавшейся в работе жидкокристаллической смеси E7. Результаты расчетов, проведенных для оценки электро- и термооптического эффектов в таких композитных структурах сведены в таблицу 1. Из таблицы видно, что максимальный эффект  $\Delta\lambda=0.54$  мкм можно ожидать за счет электрооптического эффекта, когда молекулы ЖК при нулевом напряжении  $V=0$  имеют однородную планарную ориентацию относительно Si стенок и направление этой ориентации совпадает с поляризацией света. Расчеты, выполненные для оценки сдвига ФЗЗ в зависимости от фактора заполнения, показывают, что величина сдвига возрастает по мере уменьшения фактора заполнения.

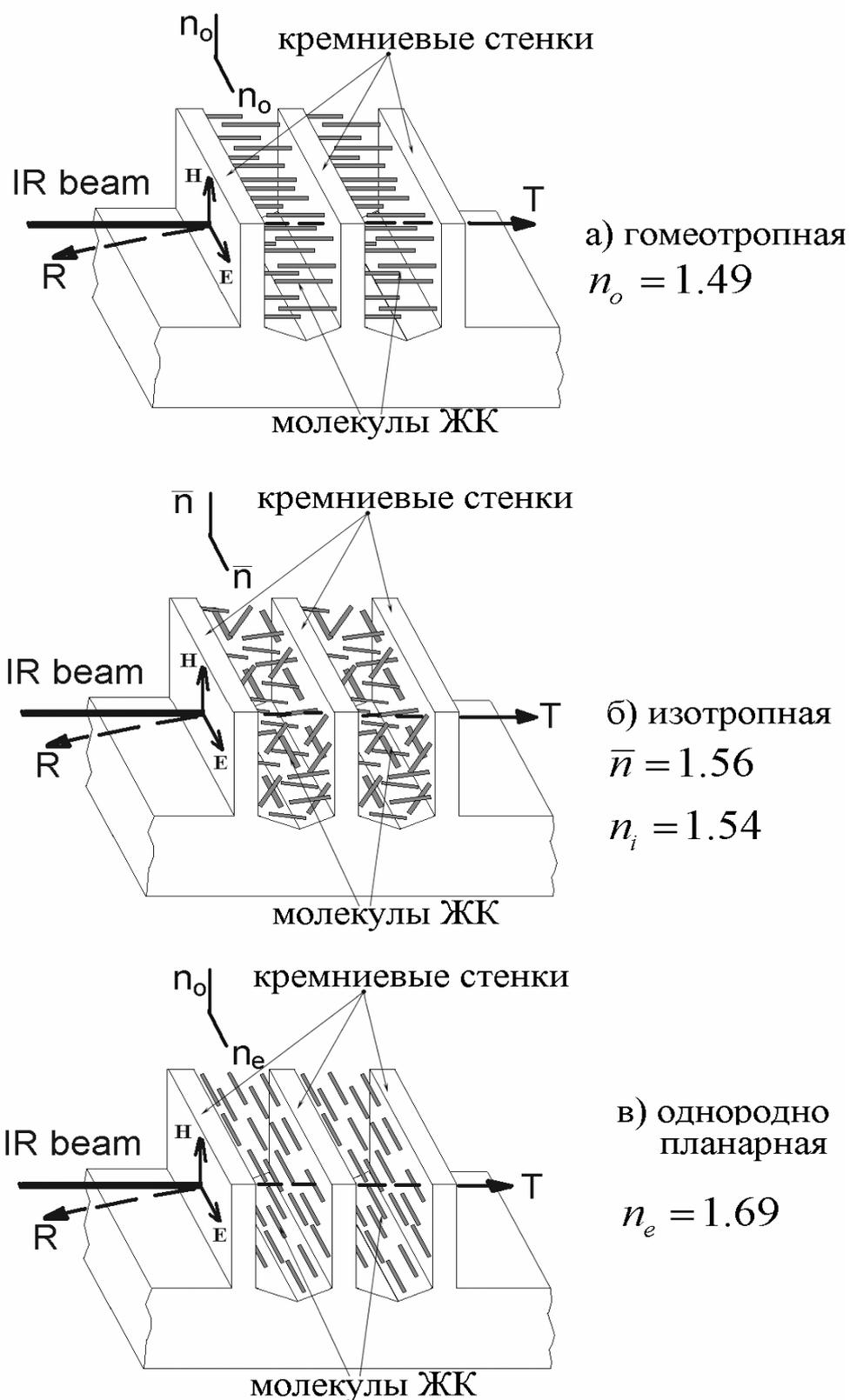


Рис. 3. Ориентация молекул ЖК в 1D ФК относительно стенок Si и вектора поляризации падающей световой волны.

Таблица 1. Расчет сдвига коротковолнового края основной ( $\lambda \approx 10$  мкм) и второй ( $\lambda \approx 6$  мкм) фотонных зон в зависимости от изменения показателя преломления ЖК в канавках для структуры с  $m=2$ , с периодом  $A=2.8$  мкм,  $f=0.45$ .

Изменение $n_{\text{ЖК}}$	$\Delta n$	Основная зона		Вторая зона		Тип внешнего воздействия
		$\Delta\left(\frac{A}{\lambda}\right)$	Сдвиг края $\Delta\lambda$ , мкм	$\Delta\left(\frac{A}{\lambda}\right)$	Сдвиг края $\Delta\lambda$ , мкм	
$n_o \rightarrow n_i$ 1.49→1.54	0.05	0.003	0.13	0.01	0.09	Тепло
$n_e \rightarrow n_i$ 1.69→1.54	0.15	0.001	0.40	0.02	0.28	Тепло
$n_e \rightarrow n_o$ 1.69→1.49	0.2	0.013	0.54	0.31	0.39	Электрическое поле
$\bar{n} \rightarrow n_o$ 1.56→1.49	0.07	0.005	0.19	0.01	0.13	Электрическое поле

где  $n_o$  – показатель преломления обыкновенного луча в ЖК;  $n_e$  – показатель преломления необыкновенного луча в ЖК;  $\bar{n}$  – среднее значение показателя преломления неупорядоченного ЖК в мезофазе,  $n_i$  – показатель преломления ЖК в изотропном состоянии при температуре выше фазового перехода.

**Во второй главе** изложена технология получения щелевых структур и конструирования композитных фотонных структур. В работе использовались пластины монокристаллического кремния n-типа с удельным сопротивлением 15 Ом·см, ориентированного в плоскости (110); толщина

пластин составляла 190-220 мкм. В работе был применен способ прецизионной ориентации длинной стороны формируемых канавок параллельно следу плоскостей (111) с помощью специальных знаков совмещения, представляющих собой веер из 180 полос шириной 5 мкм, расположенных радиально с шагом  $0.1^\circ$ . Для этого использовалась дополнительная технологическая операция формирования и последующего щелочного травления знаков совмещения. Анизотропное травление осуществлялось в 44% водном растворе КОН при температуре  $70^\circ\text{C}$  на глубину 30-40 мкм, маской служила пленка термического оксида кремния. Были изготовлены различные структуры с периодом от 2 до 64 мкм и количеством периодов от 2 до 16. Чипы с различными типами приборных структур содержат кроме самой периодической структуры вспомогательные резервуары и каналы для заполнения ее ЖК, рамку, препятствующую вытеканию ЖК из чипа и контактные площадки для присоединения электродов (рис.4).

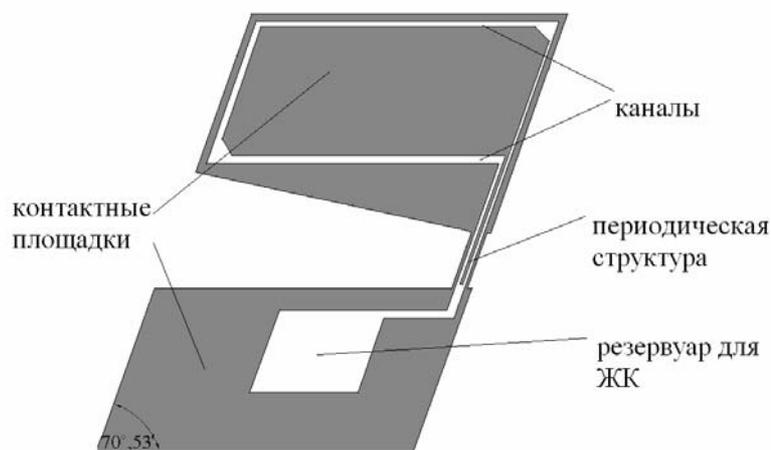


Рис.4. Топология чипа – рисунок маски фотошаблона для травления периодических структур с  $m=2$  со встречно-штыревыми электродами для создания композитных ФК.

Для исследования электрооптического эффекта были спроектированы и изготовлены периодические щелевые структуры со встречно-штыревыми кремниевыми электродами, изолированными от подложки с помощью р-п-

перехода или слоя  $\text{SiO}_2$  (подложка SOI – «кремний на изоляторе»). Внешний вид таких структур и схема поперечного сечения структуры на SOI подложке приведены на рис.5.

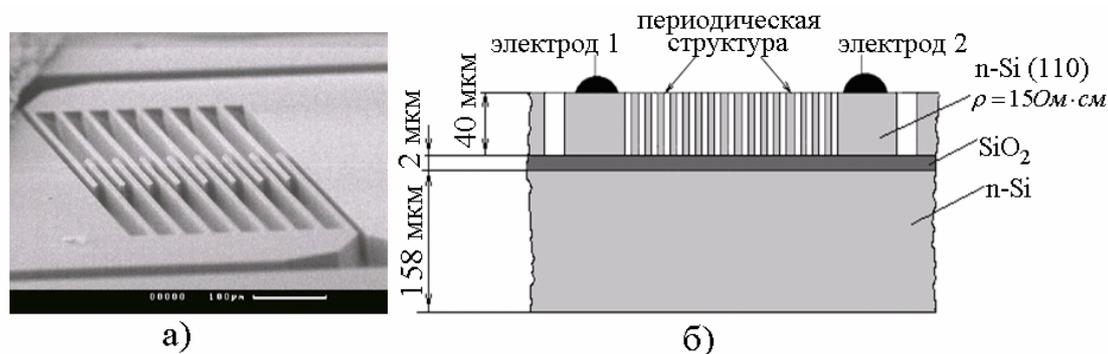


Рис. 5. Образец со встречно-штыревой структурой кремниевых электродов: а) изображение структуры, полученное с помощью электронного сканирующего микроскопа; б) схема поперечного сечения образца с электродами, изолированными от подложки с помощью слоя  $\text{SiO}_2$ .

Образцы на SOI подложке показали лучшие характеристики, чем с p-n-переходом. Они имели хорошую изоляцию: при подаче напряжения 50В к электродам структуры ток утечки составил не более 1 мкА. На них было удобно контролировать глубину травления по появлению на дне щелей слоя  $\text{SiO}_2$ .

**В третьей главе** описаны основные свойства ЖК, обоснован выбор ЖК для создания композитного одномерного ФК и исследована ориентация молекул ЖК в щелевом кремнии как после инфильтрации, так и при приложении электрического поля к ЖК внутри щелевой структуры. В качестве наполнителя щелевого кремния была выбрана хорошо известная смесь E7 фирмы Merck – нематический жидкий кристалл на основе смеси цианобифенилов с положительной анизотропией диэлектрической постоянной  $\Delta\epsilon > 0$  и высокой анизотропией показателя преломления в ИК области спектра ( $\Delta n = 0.20$  при  $\lambda = 10.6$  мкм). Основными критериями выбора данной жидкокристаллической смеси были: существование мезофазы при комнатной температуре (температура перехода в изотропную фазу  $58^\circ\text{C}$ ) и высокое значение  $\Delta n$ .

Как было показано в главе 1, величина спектрального сдвига краев ФЗЗ зависит от ориентации директора ЖК в мезофазе при нулевом внешнем напряжении  $V=0$ . Поэтому вопросу ориентации молекул ЖК в щелевой структуре уделялось значительное внимание. Методы создания микрорельефа на поверхности электродов, обычно используемые в ЖК объемных ячейках, неприменимы к щелевым кремниевым структурам, а возникающая преимущественная ориентация обусловлена геометрией канавок и взаимодействием ЖК с поверхностью Si, данные о котором в литературе отсутствуют. Для исследования поведения ЖК в щелевых структурах применялись поляризационные методы оптической микроскопии, ИК-спектроскопии и комбинационного рассеяния света (КРС) при падении света перпендикулярно плоскости подложки. В последних двух методиках исследовалась интенсивность пиков оптического поглощения и КРС, обусловленных поляризационно-зависимыми колебаниями внутри молекул ЖК. Эти пики при частотах  $2226\text{ см}^{-1}$  и  $1606\text{ см}^{-1}$  соответствуют колебаниям вдоль, а при  $817\text{ см}^{-1}$  поперек длинной стороны палочкообразной молекулы ЖК E7 и меняют интенсивность в зависимости от ориентации директора. Щели образца ориентировали параллельно и перпендикулярно вектору поляризации падающего света и определяли дихроичное отношение пиков ИК-поглощения или компоненты рассеянного света при измерении КРС (micro Raman). Было установлено, что после инфильтрации щелей жидкокристаллической смесью при комнатной температуре директор направлен вдоль канавок. Это состояние имеет низкое значение ориентационного порядка  $S=0.065$  и характеризует взаимодействие ЖК с кремниевыми стенками как слабое.

Воспроизводимый электрооптический эффект был зарегистрирован в поляризационном микроскопе и с помощью КРС при приложении к кремниевым электродам постоянного и переменного напряжения. Пороговое напряжение для  $S$ -перехода Фредерикса составило 2 В, (рис.6) что хорошо согласуется с параметрами ЖК E7.

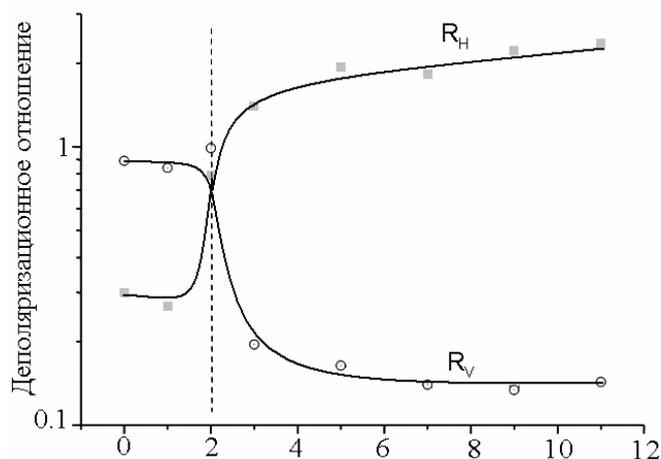


Рис.6. Электрооптический эффект, зарегистрированный с помощью КРС. Зависимость деполаризационных отношений  $R_H$  и  $R_V$  от приложенного постоянного напряжения для образца щелевого кремния, заполненного ЖК. Кривая  $R_H$  для ориентации щелей параллельно поляризации возбуждающего лазера ( $\lambda=514$  нм), кривая  $R_V$  - перпендикулярной ориентации.

**В четвертой главе** приводятся экспериментальные данные по исследованию оптических характеристик 1D ФК и их трансформации под действием внешних факторов: тепла и электрического поля. Экспериментальные спектры отражения и пропускания 1D ФК, измерялись с помощью Фурье спектрометра Digilab-6000, оснащенного ИК микроскопом UMA 500 в диапазоне длин волн 1.4 – 15 мкм при апертуре прямоугольной формы 10x20 мкм<sup>2</sup>. Схема измерений представлена на рис.7, а спектры, полученные для незаполненной матрицы 1D ФК на рис.8.

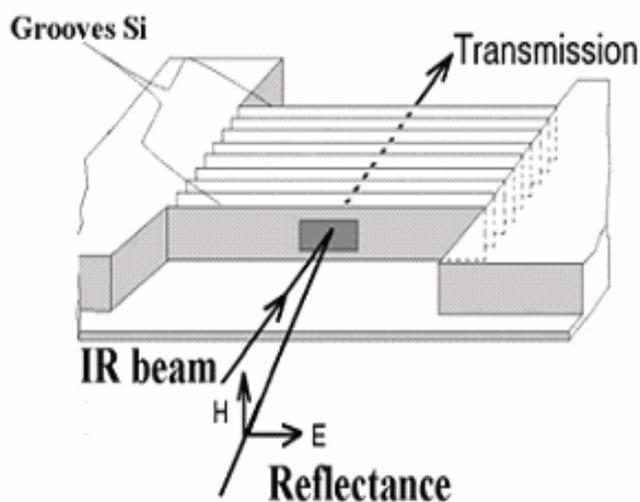


Рис.7. Схема измерения спектров пропускания и отражения в структурах на основе щелевого кремния.

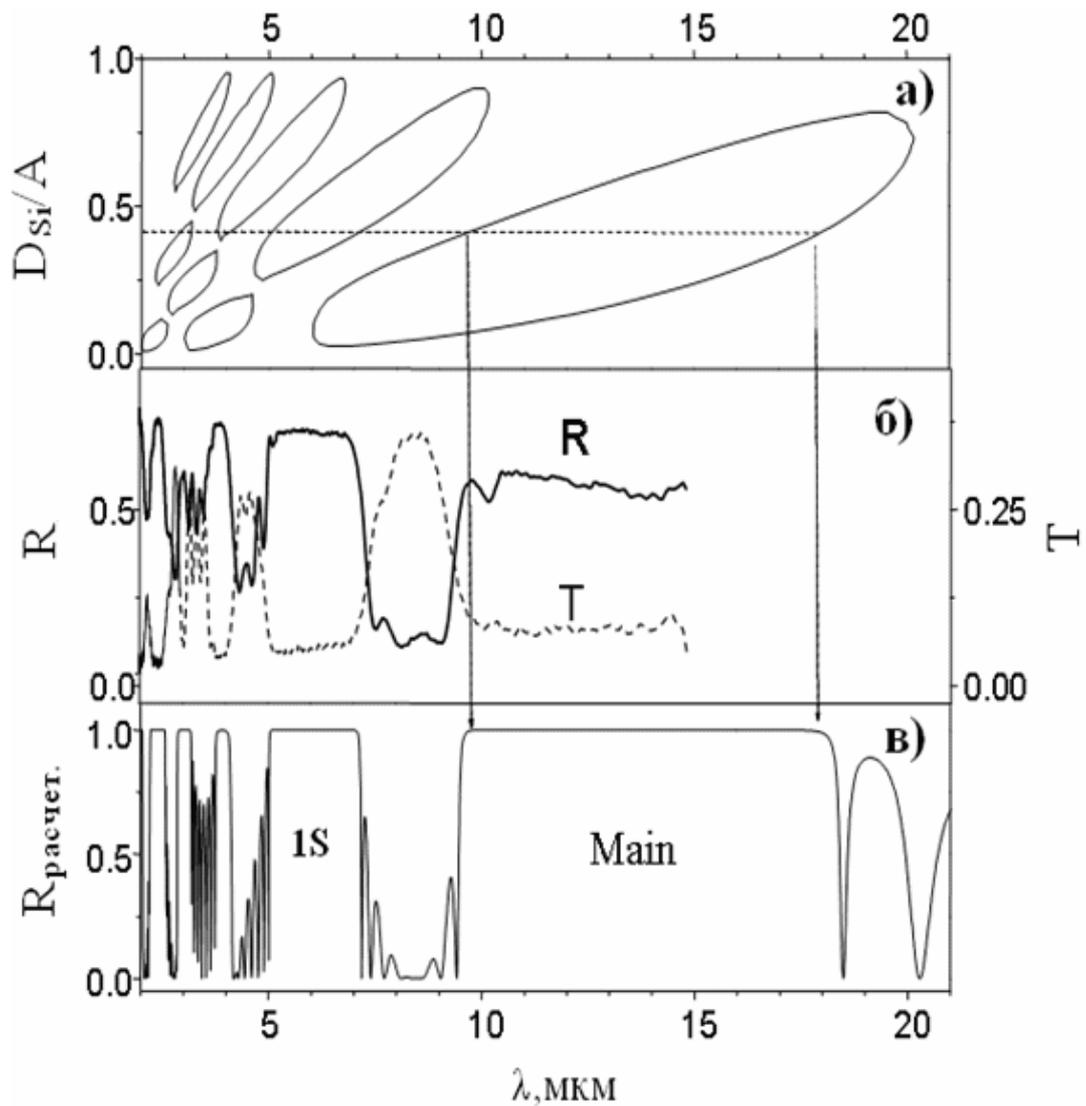


Рис.8. Оптические характеристики 1D ФК с периодом решетки  $A=3$  мкм и числом периодов  $m=6$ : а) карта ФЗЗ ( $R>0.999$ ); б) спектры отражения ( $R$ ) и пропускания ( $T$ ); в) расчетный спектр для  $D_{\text{Si}}/A=0.4$ .

На рис.8 ФЗЗ проявляются как области высокого отражения ( $R$ ) и соответствующие им области низкого пропускания ( $T$ ). Кроме основной ФЗЗ на экспериментальных спектрах хорошо видно еще несколько ФЗЗ более высокого порядка.

Процесс исследования оптических характеристик композитных структур состоял из следующих этапов. Сначала снимались спектры незаполненной матрицы и осуществлялся поиск расчетного спектра, наилучшим образом совпадающего с экспериментальным. При расчете варьировался фактор заполнения. Таким образом, определяли толщину

кремниевой стенки  $D_{Si}$  в измеренной структуре. Затем в щели структуры вводили ЖК и снимали спектры композитного ФК. Теперь при подгонке расчетного спектра к экспериментальному использовалась найденная ранее величина  $D_{Si}$ , а подгоночным параметром было значение показателя преломления ЖК. На рис.9 показаны спектры щелевого образца, заполненного ЖК, из которых видно, что для двух ортогональных поляризаций света (вдоль щелей E и перпендикулярно подложке H) края ФЗЗ сдвинуты друг относительно друга. В результате было найдено, что  $n_{ЖК} = 1.52$  и  $1.67$  для H и E – поляризаций, соответственно, что свидетельствует о преимущественной ориентации директора ЖК вдоль щелей.

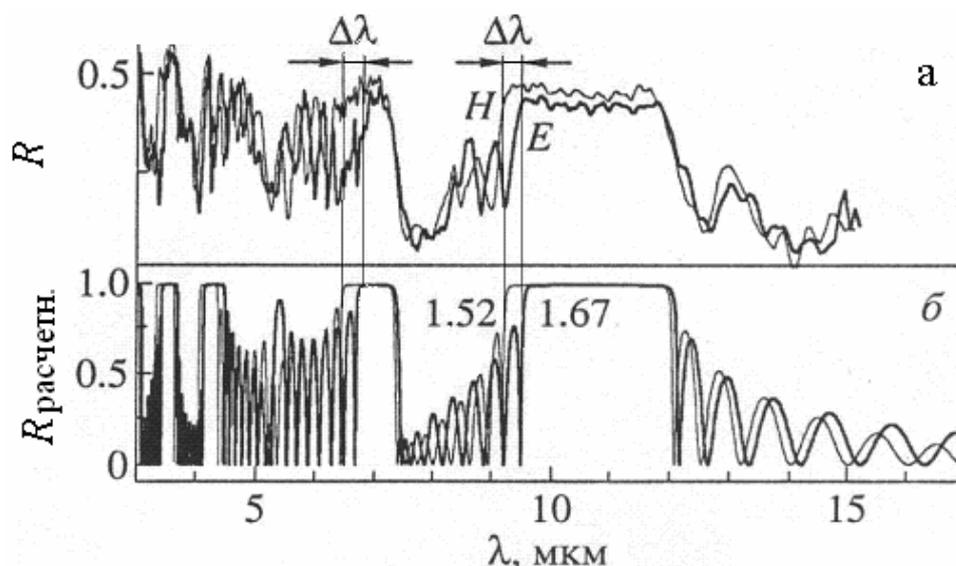


Рис.9. Спектры отражения заполненного ЖК фотонного кристалла с  $A=4$  мкм,  $m=6$ : (а) экспериментальный спектр композита для E (толстая линия) и H (тонкая линия) поляризаций; (б) расчетные спектры композитного ФК с фактором заполнения  $D_{Si}/A = 0.58$ , рассчитанные для  $n_{ЖК} = 1.52$  (тонкая линия) и  $n_{ЖК} = 1.67$  (толстая линия).

**Термооптический эффект** исследовался на образцах, представляющих собой двухпериодную структуру. Если спектры отражения, записанные для разных поляризаций до нагрева, различались между собой, то при температуре выше фазового перехода спектры для H и E поляризаций совпадали. Найденный из спектров при  $T=70^\circ\text{C}$   $n_{ЖК} = 1.53 \pm 0.03$  хорошо согласуется с данными для показателя преломления ЖК E7 в изотропной фазе ( $n_i = 1.54$ ). Сдвиг коротковолнового края основной фотонной зоны

составил  $\Delta\lambda_{\text{main}}=0.25\text{мкм}$ . Аналогичный сдвиг коротковолнового края можно было наблюдать для вторичной зоны 1S  $\Delta\lambda_{1S}=0.18\text{мкм}$  (рис.10).

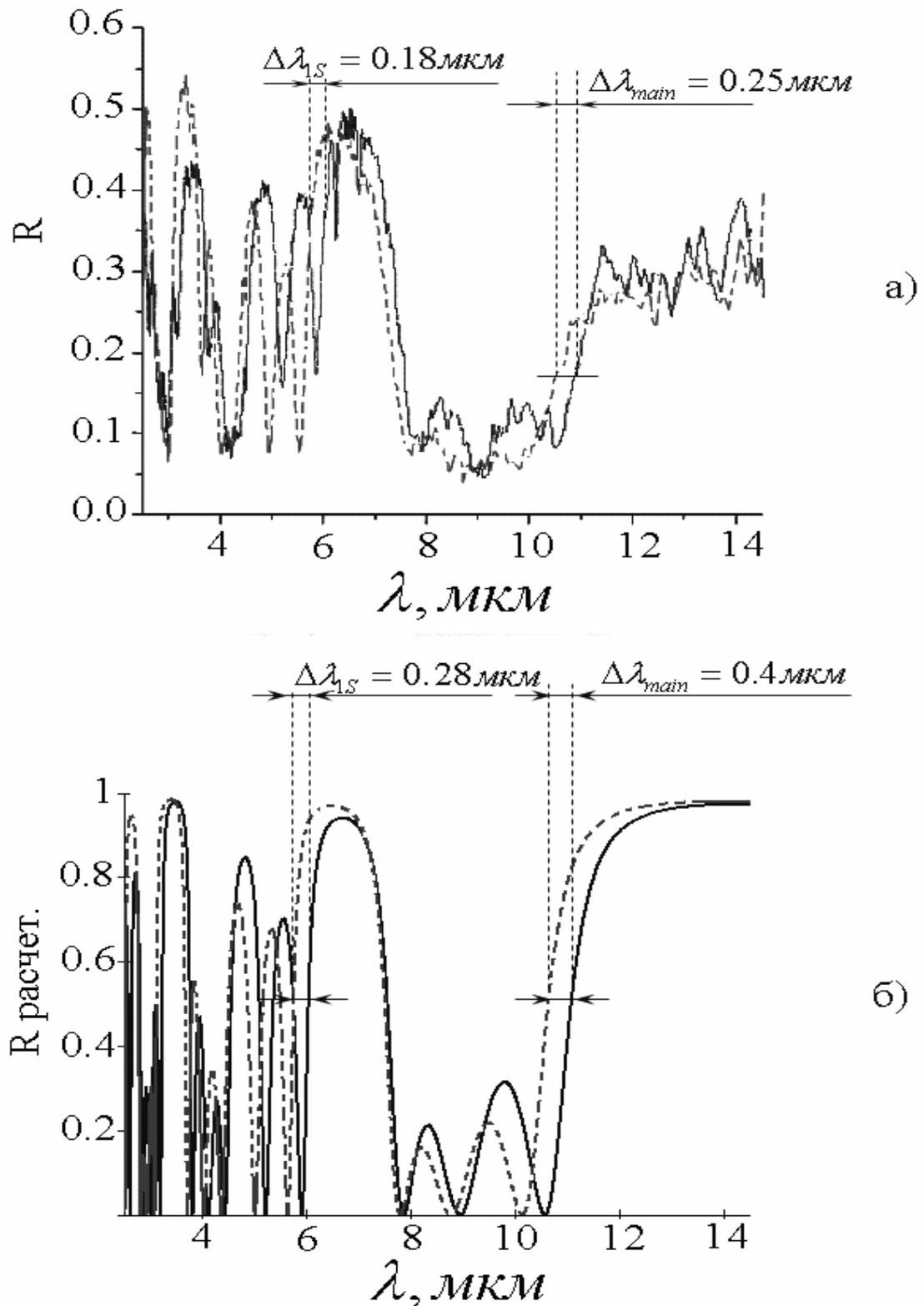


Рис. 10. Спектры отражения ФК с  $A=2.8\text{мкм}$ ,  $m=2$  и  $D_{Si}/A=0.45$ : а) экспериментальные спектры для Е поляризации после инфильтрации ЖК при  $T=23^\circ\text{C}$ , (сплошная линия) и при  $70^\circ\text{C}$ , (пунктирная линия); б) расчетные спектры  $n_{JK}=1.7$  (сплошная линия),  $n_{JK}=1.54$  (пунктирная линия).

Важно отметить, что термооптический эффект был необратим: после охлаждения до комнатной температуры ЖК возвращался в неориентированное (псевдоизотропное) состояние, что было хорошо видно по совпадению спектров для обеих поляризаций.

**Электрооптический эффект** исследовался также на двухпериодных структурах, но со встречно-штыревыми кремниевыми электродами и диэлектрической изоляцией от подложки. Схема структуры и ее параметры приведены на рис.11. Период структуры  $A=6$  мкм, фактор заполнения  $D_{Si}/A=0.4$ .

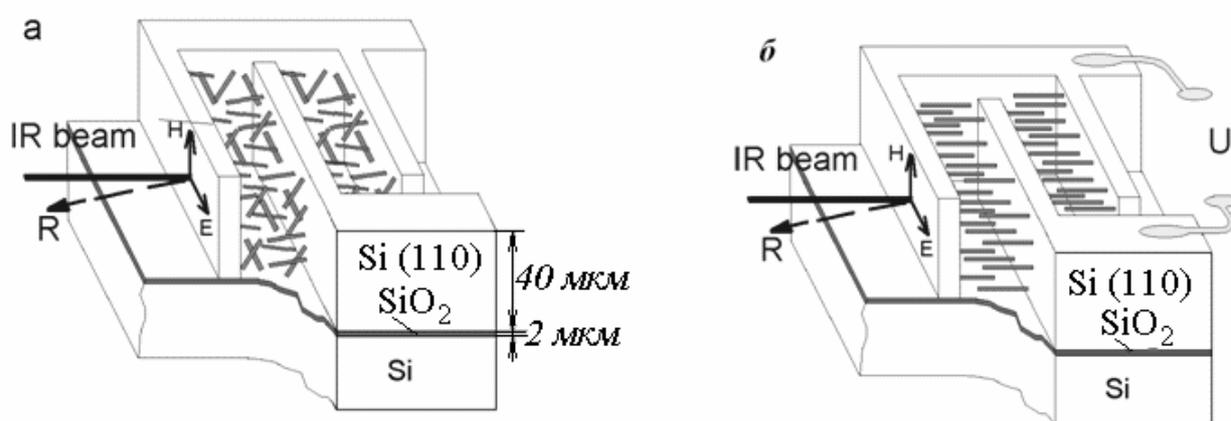


Рис.11. Схематическое изображение композитной структуры на SOI-подложке для измерения влияния электрического поля на спектры отражения поляризованного ИК света. Два состояния ориентации нематического ЖК в канавках: а) псевдоизотропная  $\bar{n} = 1.56$  и б) гомеотропная  $n_o = 1.49$ .

К электродам структуры прикладывалось переменное напряжение с амплитудой импульсов 2-10 В, частотой 100 Гц и длительностью импульса 1 мс. Как и при термооптическом эффекте, исходная планарная ориентация ЖК вдоль щелей обеспечивала большой сдвиг краев ФЗЗ при включении напряжения:  $\Delta\lambda=0.6$  мкм или 5.8% для края ФЗЗ ( $\lambda=10.15$  мкм). Однако после выключения напряжения спектр не возвращался к исходному. Было установлено, что воспроизводимый электрооптический эффект связан с переходом ЖК из псевдоизотропного состояния с показателем преломления  $n_{ЖК}=1.56$  при  $V=0$  в гомеотропное состояние с  $n_{ЖК}=1.49$  при  $V>2$  В. При этом сдвиг края третьей ФЗЗ в исследованной структуре составил  $\Delta\lambda=0.19$  мкм,

или 1.9% (рис.12). Быстродействие перестраиваемого одномерного фотонного кристалла лимитируется скоростью возвращения ЖК к псевдоизотропной ориентации при выключении напряжения. Оценка характерного времени переключения проводилась по спектральному положению ФЗЗ в зависимости от частоты импульсного напряжения. Это время составило 30 мс, что согласуется с данными для нематических ЖК.

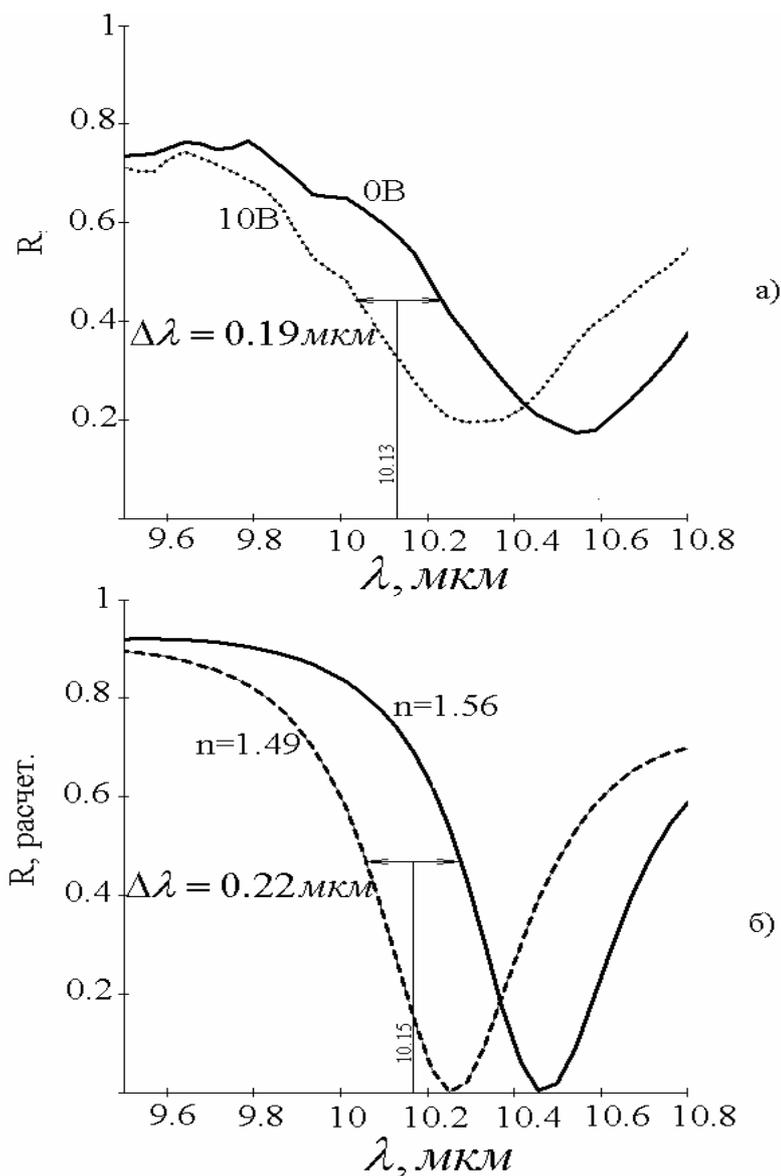


Рис. 12. Сдвиг длинноволнового края ФЗЗ в области  $\lambda=10\mu\text{м}$  за счет воспроизводимого электрооптического эффекта: а)–участок экспериментального спектра, б) – расчетного спектра.

**В заключении** сформулированы выводы по работе:

1. Рассчитаны геометрические параметры кремниевых периодических щелевых структур с помощью анализа спектров отражения и карт ФЗЗ кремниевых матриц и композитов, заполненных жидким кристаллом.
2. Разработаны и получены образцы, позволяющие проводить оптические измерения с помощью Фурье микроспектроскопии в геометрии, когда свет распространяется в плоскости подложки.
3. Предложен и впервые получен с помощью анизотропного щелочного травления композитный 1D ФК на основе периодической структуры встречно-штыревых электродов в слое кремния (110) на подложке с диэлектрической изоляцией (SOI).
4. Впервые изучена ориентация молекул жидкого кристалла в щелевых структурах на основе монокристаллического кремния комплексом методов поляризационной спектрометрии. Выявлена преимущественная планарная ориентация директора ЖК E7 вдоль канавок.
5. Структуры щелевого кремния с периодом 2-6 мкм, изготавливаемые с помощью фотолитографии, имеют запрещенные фотонные зоны в области среднего и ближнего ИК-диапазона.
6. Получены перестраиваемые 1D фотонные кристаллы и продемонстрирован сдвиг запрещенной фотонной зоны при нагреве и при приложении внешнего электрического поля.
7. Исследованы особенности наблюдавшихся эффектов: необратимость термооптического и обратимость электрооптического эффекта. Определены факторы, определяющие величину сдвига ФЗЗ.
8. Электрооптический эффект в полученном композитном 1D ФК обеспечивает сдвиг края третьей фотонной запрещенной зоны, расположенной вблизи  $\lambda = 10\text{ мкм}$  на  $\Delta\lambda/\lambda = 1.9\%$ . Характерное время переключения составляет  $\sim 30$  мс, пороговое напряжение переключения 2В.

**В приложении** описаны основные технологические режимы получения периодических кремниевых структур с помощью анизотропного травления.

#### **Цитируемая литература:**

1. J.D. Joannopoulos, R.D. Meade, J.N. Winn. Photonic crystals. Princeton University Press. 1995. 137 p.
2. E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. Phys. Rev. Lett. **58**, 2059 – 2062 (1987).
3. E. Yablonovitch. Photonic band-gap crystals. J. Phys.:Condens.Matter. **5**, 2443-2460 (1993).
4. M. Salib, L. Liao, R. Jones, M. Morse, A. Liu, D. Samara-Rubio, D. Alduino, M. Paniccia. Silicon Photonics. Intel Technology Journal, **08**, May 10, 2004, pp.143-161.  
[http://download.intel.com/technology/itj/2004/volume08issue02/vol8\\_iss2.pdf](http://download.intel.com/technology/itj/2004/volume08issue02/vol8_iss2.pdf)
5. Hybrid Silicon Laser  
<http://www.intel.com/research/platform/sp/hybridlaser.htm>.
6. Шагаем к кремниевому лазеру. Перст **12**, 11 (2005)  
[http://perst.issph.kiae.ru/Inform/perst/2005/5\\_11/index.htm](http://perst.issph.kiae.ru/Inform/perst/2005/5_11/index.htm).
7. Don L. Kendall. Vertical etching of silicon at very high aspect ratios. Annual Review Materials Science **9**, 373 – 403 (1979).
8. V. A. Tolmachev, T. S. Perova, E. V. Astrova, B. Z. Volchek, J. K. Vij. Vertically etched silicon as 1D photonic crystal. Phys. Stat. Sol. (a) **197**, 2, 544-548 (2003).
9. K. Busch, S. John. Liquid-crystal photonic-band-gap materials: the tunable electromagnetic vacuum. Phys. Rev. Lett. **83**, 5, 967-970 (1999).
10. S. W. Leonard, J. P. Mondia, H. M. van Driel, O. Toader, S. John, K. Busch, A. Birner, U. Gösele, V. Lehmann. Tunable two-dimensional photonic crystals using liquid-crystal infiltration. Phys. Rev. B **61**, 4, R2389-2392 (2000).

11. G. Mertens, T. Röder, R. Schweins, K. Huber, H-S. R. Kitzerow. Shift of the photonic band gap in two photonic crystal/liquid crystal composites. *Appl. Phys. Lett.* **80**, 1885-1887 (2002).
12. Р. Аззам, Н. Башара. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981 г. 584 с.

### **Список публикаций по теме диссертации Жаровой (Пилюгиной) Ю.А.**

#### **Статьи в журналах:**

1. Ю.А. Пилюгина, А.М. Скворцов, В.А. Толмачев Химическое микроструктурирование поверхности монокристаллического кремния. *Научно-Технический Вестник СПбГУ ИТМО, Санкт-Петербург.* **14**, 256-261 (2004).
2. V. Tolmachev, E. Astrova, T. Perova, J. Pilyugina, A. Moore. Design and fabrication of the periodical structures based on grooved Si for middle infrared microphotonics. *Physica status solidi (c)* **2**, 9, 3288–3292 (2005).
3. V.A. Tolmachev, E.V. Astrova, Yu.A. Pilyugina, T.S. Perova, R.A. Moore and J.K.Vij. 1D Photonic Crystal Fabricated By Wet Etching of Silicon. *Optical Materials* **27**, 5, 831-835 (2005).
4. Е.В.Астрова, Т.С.Перова, С.А.Грудинкин, В.А.Толмачев, Ю.А.Пилюгина, В.Б.Воронков, J.K.Vij. Исследование ориентации молекул жидкого кристалла E7 в композитах на основе щелевого кремния поляризационными методами ИК спектроскопии и комбинационного рассеяния света. *ФТП.* **39**, 7, 793-801 (2005).
5. В.А.Толмачев, Т.С.Перова, Е.В.Астрова, А.Д.Ременюк, Ю.А.Пилюгина, R.A. Moore. Оптические характеристики одномерных фотонных кристаллов на основе кремния в среднем ИК-диапазоне спектра. *Известия РАН. Сер Физическая.* **8**, 1108-1110 (2005).
6. E.V. Astrova, T.S. Perova, Yu.A. Zharova, S.A. Grudinkina, V.A. Tolmachev, V.A. Melnikov. Electro-tunable one-dimensional photonic crystal structures based on grooved silicon infiltrated with liquid crystal. *J. of Luminescence.* **121**, 298-300 (2006).

7. Скворцов А.М., Жарова Ю.А., Ткалич В.Л. Микроструктурирование поверхности монокристаллов кремния в электронной технике. Известия вузов. Приборостроение, 2006, с. 60-65.
8. V. A. Tolmachev, T. S. Perova, S. A. Grudinkin, V. A. Melnikov, E. V. Astrova, Yu. A. Zharova. Electrotunable in-plane one-dimensional photonic structure based on silicon and liquid crystal. Appl. Phys. Lett. **90**, 011908 (2007) and in Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology. January 2007, <http://www.vjnano.org>.

**Тезисы докладов:**

1. V. Tolmachev, E. Astrova, T. Perova, J. Pilyugina, R.A. Moore. Design and fabrication of the periodical structures based on grooved Si for middle infrared microphotonics. The 4-th International Conference Porous Semiconductors – Science and Technology, Cullera-Valencia, Spain, p.132-133 (2004).
2. Ю.А.Пилюгина, Е.В. Астрова, Т.С. Перова, С.А. Грудинкин, В.А. Толмачев, В.Б. Воронков, «Электрооптический эффект в композитных периодических структурах на основе щелевого кремния, заполненного жидким кристаллом». Шестая Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, с.35 (2004).
3. В.А.Толмачев, Т.С.Перова, Е.В.Астрова, А.Д.Ременюк, Ю.А.Пилюгина, R.A. Moore. Оптические характеристики одномерных фотонных кристаллов на основе кремния в среднем ИК диапазоне спектра. Третья международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики». Санкт-Петербург, стр.88-90 (2004).
4. Ю.А. Пилюгина. Получение одномерных фотонных кристаллов с помощью анизотропного травления кремния. «Микроэлектроника и информатика 2004». 11-ая Всероссийская Межвузовская научно-

- техническая конференция студентов и аспирантов, Зеленоград, с.23, (2004).
5. Ю.А.Пилюгина. «Использование жидкостного анизотропного травления кремния для получения одномерных фотонных кристаллов». Всероссийская конференция «ФАГРАН» «Физико-химические процессы в конденсированном состоянии и межфазных границах» («ФАГРАН-2004») Воронеж, т.1, с.286 (2004).
  6. V.A. Tolmachev, E.V. Astrova, J. Pilyugina, T.S. Perova, R.A. Moore. 1D photonic crystal fabricated by wet etching of silicon. The European Materials Research Society 2004 – Symposium A1 «Si-based photonics: toward true monolithic integration», Spring Meeting, Strasbourg, France, A1-PII.3 (2004).
  7. J.A.Pilyugina, E.V.Astrova, T.S.Perova. Electro-optical effect in composite photonic structures based on grooved silicon and liquid crystal. 13th Int. Symp. “Nanostructures: Physics and Technology” St Petersburg, Russia, с. 127 (2005).
  8. V.A. Tolmachev, T.S. Perova, E.V. Astrova<sup>1</sup>, J.A. Pilyugina and R.A. Moore. Thermo-optical effect in Si-liquid crystal photonic band gap structures. 13th Int. Symp. “Nanostructures: Physics and Technology” St Petersburg, Russia, с. 143 (2005).
  9. T.C. Perova, V.A. Tolmachev, E.V. Astrova, J. A. Pilyugina, R.A. Moore. Tunable 1D photonic structures based on grooved silicon and liquid crystal. Materials Week, Prague, (2005).
  10. Ю.А. Жарова. Электрооптический эффект в композитных периодических структурах на основе щелевого кремния, заполненного жидким кристаллом. «Микроэлектроника и информатика 2005». 12-ая Всероссийская Межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов, Зеленоград, с.123 (2005).
  11. Ю.А.Жарова Получение композитного фотонного кристалла на основе щелевого кремния и жидкого кристалла. Электрооптический эффект.

- «Индустрия наносистем и материалы». Всероссийская конференция инновационных проектов аспирантов и студентов по приоритетному направлению, Зеленоград, с. 66-70 (2005).
12. V.A. Tolmachev, T.S. Perova, E.V. Astrova, J.A. Pilyugina and R.A. Moore. Optical characteristics of ordinary and tunable 1D Si photonic crystals in the mid-infrared range. Opto-Ireland 2005: Optoelectronics, Photonic Devices, and Optical Networks. Proceeding SPIE 5825, p. 85-94 (2005).
  13. S.M. O'Neill, V.A. Tolmachev, E.V. Astrova, J.A. Pilyugina, S.A. Grudinkin, T.S. Perova and R.A. Moore, Adjustment of the photonic bandgap of silicon based 1D photonic crystals infiltrated with nematic liquid crystal E7. Microscopical society of Ireland – 29<sup>th</sup> Annual symposium, Dublin, Ireland (2005).
  14. T.S.Perova, E.V.Astrova, V.A.Tolmachev, J.A.Zharova and S.A. Grudinkin. Electrically and thermally tunable photonic structures based on grooved Si and liquid crystal E7. Materials of the 5-th International Conference Porous Semiconductors – Science and Technology, Sitges-Barcelona, Spain, p.407-408 (2006).
  15. Ю.А. Жарова. Оптические характеристики одномерных фотонных кристаллов на основе кремния и жидкого кристалла. «Микроэлектроника и информатика 2006». 13-ая Всероссийская Межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов, МИЭТ, Зеленоград, с.38 (2006).
  16. T.S.Perova, E.V. Astrova, V.A. Tolmachev, S. Grudinkin, J.A. Pilyugina. Tunable photonic structures based on grooved Si and nematic liquid crystal. The European Materials Research Society 2006 – Symposium D «Silicon-based photonics», Nice, France, D P1 08 (2006).