

На правах рукописи



Ли Галина Викторовна

**ТЕХНОЛОГИЯ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ
МАКРОПОРИСТОГО КРЕМНИЯ**

Специальность

01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской Академии наук

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник ФТИ им. А. Ф. Иоффе

Е. В. Астрова

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник ФТИ им. А. Ф. Иоффе

А. В. Селькин

кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией нано- и микросистемной техники
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургского государственного
политехнического университета»

Е. Н. Пятышев

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Защита состоится « 21 » ноября 2013 г. в 10 час. 00 мин.

на заседании диссертационного совета Д 002.205.02 при ФТИ им. А. Ф. Иоффе
по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

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

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

Автореферат разослан « 16 » октября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук

 Л. М. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Данная диссертационная работа посвящена разработке методов получения высокоаспектных одномерных (1D) и двумерных (2D) периодических структур с помощью фотоэлектрохимического травления (ФЭХТ) кремния и исследованию их оптических свойств. Актуальность темы связана с широкими перспективами использования таких кремниевых структур в качестве 1D и 2D фотонных кристаллов (ФК). Развитие науки о ФК и их практических приложениях во многом определяются возможностями технологии. Бурный интерес к этим искусственным средам в последние десятилетия напрямую связан с технологическим прогрессом, уменьшением периода ФК и переходом в оптический диапазон электромагнитных волн. Особое место занимают структуры с фотонной запрещённой зоной на кремнии, основном элементе современной полупроводниковой микроэлектроники. Главным направлением развития микроэлектроники является увеличение объема и скорости передаваемой информации. Обработка информации внутри чипа может осуществляться как с помощью оптических элементов, так и в сочетании с электронными компонентами (кремниевая микрофотоника). В последнем случае фотонные элементы интегрированы в чип, а свет в них распространяется в плоскости пластины. Управление оптическими потоками способно существенно увеличить скорость обработки информации. Таким образом, детальное изучение технологических процессов получения различных структур на основе кремниевых ФК и их взаимосвязи с оптическими свойствами определяют актуальность настоящего исследования.

Цель диссертационной работы состоит в исследовании возможностей метода ФЭХТ кремния, дополненного другими технологическими процессами микроэлектроники, для формирования ФК структур среднего ИК диапазона.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Изучить закономерности образования периодических щелевых структур с помощью ФЭХТ.

2. Исследовать оптические характеристики 1D ФК на основе этих щелевых структур.
3. Разработать технологию получения 2D ФК с конечным числом периодов.
4. Провести теоретические и экспериментальные исследования оптических свойств таких 2D ФК структур.
5. Создать структуру перестраиваемого микрорезонатора (МР) на основе композита кремний – жидкий кристалл (ЖК).

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Сформулированы условия получения периодических щелевых структур в процессе ФЭХТ.
2. Установлены основные закономерности получения 2D структур с конечным числом периодов путем совместного формирования макропор и щелей на одной подложке.
3. Определена зависимость неровности стенок 1D и 2D периодических структур от геометрических параметров рисунка затравок и нормированной плотности тока травления j/j_{PS} . Исследовано влияние последующих обработок на величину неровности.
4. Изучено влияние рассеяния света внутри 1D и 2D структур на оптические свойства ФК, полученных с помощью ФЭХТ.
5. Исследованы особенности оптических характеристик структур 2D ФК и определена роль приграничных слоев ФК в формировании поверхностных состояний.
6. Предложена конструкция и изготовлена структура композитного МР на основе кремний-ЖК. Исследованы его оптические характеристики и сформулированы условия получения электроуправляемого устройства.
7. Теоретически и экспериментально исследованы поверхностные состояния Тамма в структуре 2D ФК с несимметричными границами.

Научная и практическая значимость. Изучены физико-химические процессы формирования кремниевых 1D ФК и 2D ФК с малым числом периодов и микрорезонатора на их основе. Проанализированы и систематизированы фак-

торы, влияющие на оптические характеристики реальных структур на основе макропористого кремния.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. 1D ФК может быть получен с помощью ФЭХТ n-Si, на поверхности которого сформированы затравочные центры в виде периодических канавок. Существуют определенные условия образования высокоаспектных щелевых структур. Структуры с наиболее гладкими стенками можно получить при оптимальных значениях периода затравок и тока анодирования, зависящих от удельного сопротивления n-Si и критической плотности тока j_{PS} .
2. Полоска 2D ФК с вертикальными стенками и малым числом периодов может быть изготовлена методом одновременного ФЭХТ макропор и щелей. Оптимальные условия формирования 2D ФК полосок с гладкими боковыми стенками и минимальным искажением решетки макропор вблизи щелей определяются геометрическими параметрами рисунка затравочных центров и нормированной плотностью тока ФЭХТ j/j_{PS} .
3. Резонансные моды в фотонных стоп зонах (ФСЗ) полоски 2D ФК, полученного одновременным травлением макропор и щелей, обусловлены поверхностными фотонными состояниями Таммовского типа и проявляются на экспериментальных спектрах отражения в виде глубоких низкодобротных провалов. Их появление и спектральное положение зависят от толщины немодулированного интерфейсного слоя кремния на внешних границах ФК.
4. Рэлеевское рассеяние света на поверхности макропор и щелей оказывает существенное влияние на оптические характеристики ФК структур. Увеличение интенсивности рассеяния приводит на спектрах отражения к увеличению амплитуды поверхностных состояний и уменьшению амплитуды дефектных мод. Различие спектров отражения при освещении с разных сторон полоски 2D ФК с несимметричными границами также обусловлено потерями на рассеяние.
5. Электроуправляемый МР для среднего ИК диапазона может быть изготовлен на основе композитной структуры 2D ФК с помощью ФЭХТ. Он состо-

ит из узкой полоски макропористого кремния, в центре которой расположен дефект в виде щели, заполняемой нематическим жидким кристаллом. Интерфейсные слои такой структуры должны быть достаточно тонкими, а число периодов в Брэгговских зеркалах по обе стороны от дефекта не должно быть больше трех.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: V и VI М/н конференций молодых ученых и специалистов «Оптика-2007» и «Оптика – 2009» (С.-Петербург, Россия, 2007 и 2009); XIII М/н Симпозиум Наноп физика и Нанозлектроника (Н.Новгород, Россия, 2009); 5th Kurt Schwabe symposium. From corrosion to semiconductors. (Erlangen, Germany, 2009); XIII, XIV and XV International Conference “Gettering and Defect Engineering in Semiconductor Technology (GADEST)” (Dolnsee-Schorfheide, Germany, 2009; Loepersdorf, Austria, 2011; Oxford, United Kingdom, 2013); М/н конференция «Микро- и нанозлектроника 2009» (Звенигород, Россия, 2009); 33rd and 35rd Annual Symposium of Microscopical Society of Ireland (Dublin, Ireland, 2009 and 2011); Intel European Research and Innovation Conference 2009 and 2011 (Intel-Lexlip, Ireland, 2009 and 2011); 7th and 8th International Conference on Porous Semiconductors Science and Technology – PSST 2010 and PSST 2012 (Valencia, Spain, 2010; Malaga, Spain, 2012); VII, VIII и IX м/н конференции по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе: Кремний-2010, Кремний-2011, Кремний-2012 (Н.- Новгород, Россия, 2010; Москва, Россия, 2011; С.-Петербург, Россия, 2012); Photonics Ireland Conference 2011 (Malahide, Ireland, 2011); SPIE Photonics West (San Francisco, USA, 2011); XI Российская конференция по физике полупроводников (С.-Петербург, Россия, 2013).

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 13 статьях, из них 12 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ [A1-A12]. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора. Автором были разработаны ФК структуры: спроектированы шаблоны и изготовлены образцы. Проведены исследования законо-

мерностей формирования щелевых структур в процессе ФЭХТ и возможностей сглаживания их стенок. Предложена и разработана технология формирования узких полосок 2D ФК и перестраиваемого МР. Проанализированы оптические характеристики полученных структур и рассчитаны спектры наилучшим образом совпадающие с экспериментом. Проведены численные эксперименты и определено влияние поверхностных состояний и рассеяния на оптические спектры реальных структур.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка публикаций автора и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 183 страницы, включая 135 рисунков, 91 формулу и 16 таблиц. Библиография включает 198 наименований на 15 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведен список конференций, на которых были изложены основные результаты диссертации, отражен личный вклад автора и его благодарности, а так же кратко описана структура диссертации.

Первая глава работы посвящена обзору литературы по ФК, различным дефектам в их решетке и возможностям перестройки ФСЗ или локализованного состояния в ней. Основное внимание уделено кремниевым ФК, отражено современное состояние технологии их получения. Подробно рассмотрен метод ФЭХТ кремния n-типа [1], который позволяет получать высокоаспектные ФК структуры на основе макропористого кремния со строгой периодичностью. Долгое время этот метод позволял получать только 2D решетки макропор. Получение структур различной геометрии: меандров, спиралей, полых трубок, столбиков, щелей и т.д., продемонстрированное в работе [2], значительно расширило возможности данного метода [3, 4]. Проанализированы различные виды обработки макропористого кремния после анодирования и способы форми-

рования микроструктур с вертикальными стенками. Определен ряд нерешенных проблем в этой области, которые отражены в цели данной диссертационной работы и поставленных задачах.

Во **второй главе** приводится описание использованных в работе методик эксперимента и расчета. Рассмотрены основные технологические операции и применение анизотропного травления (АТ) для создания различных затравочных центров на исходных пластинах n -Si ориентации (100) с помощью стандартных методов фотолитографии, в результате которых на пластинах образовывались линейные V – образные канавки, либо точечные центры нуклеации (рис. 1).

Описана автоматизированная установка фотоэлектрохимического травления SiPor фирмы Etch & Technology. Для травления использовался водный раствор HF с концентрацией $C_{HF} = 1.4-6\%$ (вес.) и добавлением 5% C_2H_5OH . Температура травления варьировалась от $20-25^\circ C$.

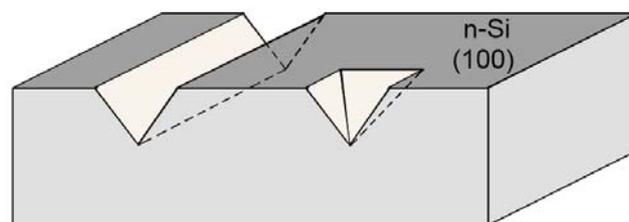


Рис. 1 Схематичное изображение поперечного сечения затравочных центров: линейных для щелей и точечных для макропор

Травлению подвергалась центральная часть образца диаметром 18 мм при плотности тока травления $j=6-31$ mA/cm^2 и разности потенциалов на границе кремний-электролит $U=1-2$ В. При этом средняя скорость травления составляла $v_{Si} = 0.8$ $мкм/мин$. Глубина травления варьировалась от $l = 50 - 350$ $мкм$.

Рассмотрены методы получения сквозных мембран: механическое удаление подложки, стравливание подложки в щелочи и электрохимическая полировка в процессе травления, их преимущества и недостатки. Описаны методики измерений с помощью сканирующего электронного (СЭМ) и атомносилового микроскопов (АСМ).

Исследование оптических свойств ФК структур осуществлялось с помощью Фурье-спектрометра FTIR Digilab 6000, оснащенного ИК микроскопом UMA 500 с прямоугольной апертурой. Свет направлялся на боковую стенку структу-

ры в направлении Z (рис. 2). Линейные размеры апертуры варьировались от 20 до 200 мкм. Измерения выполнялись в диапазоне частот $650\text{--}6500\text{ см}^{-1}$ ($\lambda=15\text{--}1.5\text{ мкм}$) с разрешением 8 см^{-1} . При проведении поляризационных измерений ТМ-поляризации света соответствовал вектор электрического поля световой волны \vec{E} , направленный вдоль оси пор, а ТЕ-поляризации – перпендикулярно ей, т.е. в плоскости образца.

Для расчета спектров отражения и пропускания 1D ФК был использован метод матрицы переноса [5]. При этом модель 1D ФК представлялась в виде периодических слоев с высоким (Si) и низким (воздух) показателем преломления. Оптические характеристики 2D ФК структур рассчитывались методом матрицы рассеяния [6, 7]. Были использованы две модели 2D ФК в виде воздушных цилиндров распределенных в кремниевой матрице: двухкомпонентная (рис. 2а) и трехкомпонентная (рис. 2б).

Спектры отражения и пропускания идеальной структуры рассчитывались по двухкомпонентной модели при $k=0$, где k – коэффициент экстинкции. В реальных структурах имеются потери, связанные с Релеевским рассеянием света на стенках пор и щелей, которые учитывали путем введения комплексного показателя преломления. Для согласия теоретических и экспериментальных спектров использовалась либо двухкомпонентная модель при $k \neq 0$, когда комплексный показатель преломления приписывался всему кремнию, либо трехкомпонентная модель, в которой он приписывался только тонкому слою вокруг пор толщиной ΔR . Расчеты обычно проводились для нормального угла падения света ($\varphi=0^0$). При анализе

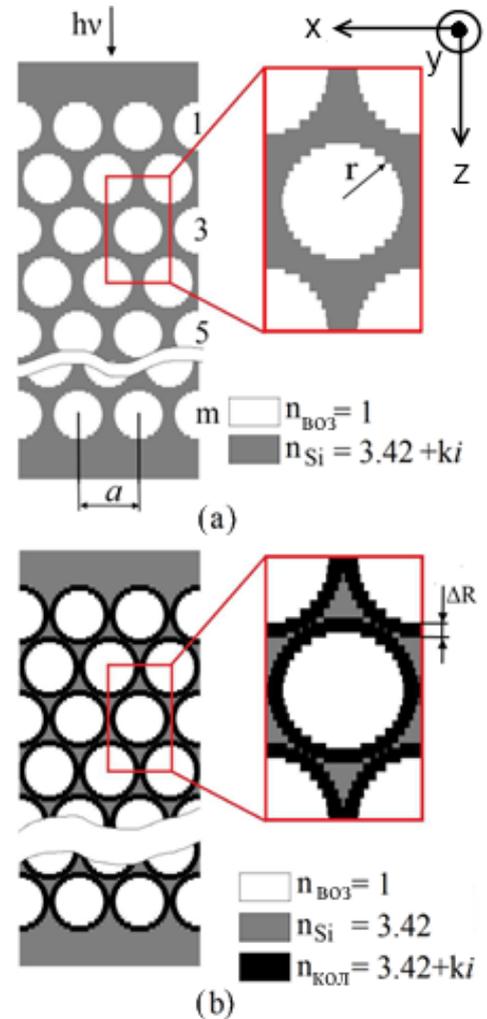


Рис. 2 Двух- (а) и трех- (б) компонентные модели 2D ФК, используемые для расчета методом матрицы рассеяния

экспериментальных спектров для наилучшего совпадения угол варьировался в пределах $0^{\circ} < \varphi < 30^{\circ}$.

Третья глава посвящена технологии получения 1D ФК с помощью ФЭХТ кремния и исследованию их оптических свойств. Эксперименты проводились на n-Si(100) с удельным сопротивлением 5 и 15 Ом·см. Одновременно травилась зоны, имеющие разный период затравочных канавок. Период затравок варьировался в диапазоне $a=4-13$ мкм, а плотность тока анодирования составляла $j/j_{PS}=0.14-0.84$, где j_{PS} – критическая плотность тока, соответствующая переходу от порообразования к электрополировке. Величина j_{PS} зависит только от концентрации HF в электролите и его температуры [8]. Поскольку зарождение макропор происходит вдоль дна затравочных канавок на среднем расстоянии друг от друга A_{II} то слияние отдельных пор в единую щель происходит при $A_{II} < d$, где d – средний диаметр дискретных пор. Для кремния с удельным сопротивлением $\rho = 5$ Ом·см $d \approx 1.8$ мкм, а для $\rho = 15$ Ом·см $d \approx 3.0$ мкм. Как видно из

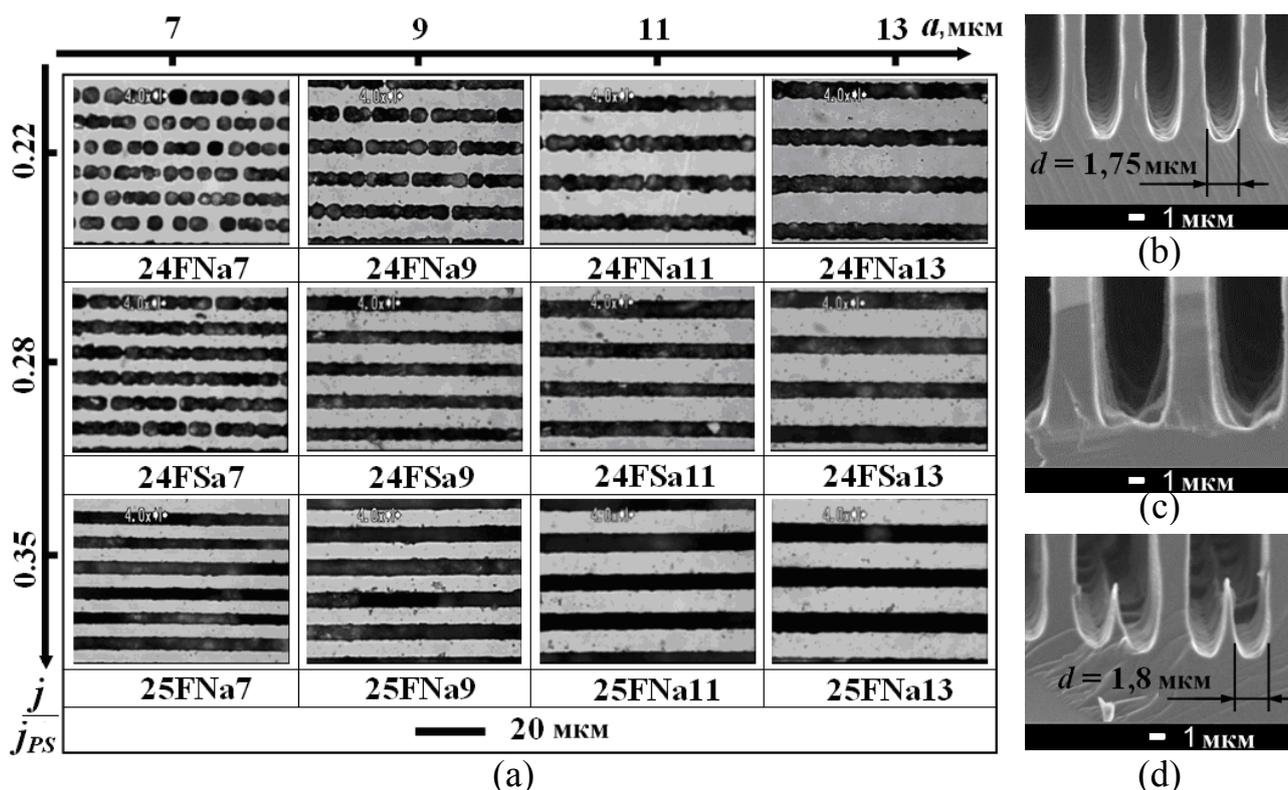


Рис. 3 (а) Образование щелей в зависимости от относительной плотности тока j/j_{PS} и периода затравок a на кремнии с $\rho=15$ Ом·см; (b, с и d) СЭМ изображение поперечного сечения щелевых структур с периодом, соответственно, 4, 6 и 7 мкм, полученных на кремнии с $\rho=5$ Ом·см при $j/j_{PS}=0.66$.

I	Дискретные поры $j/j_{PS} \ll \frac{\pi d}{4a}$		IV	Образование сплошных щелей $j/j_{PS} > \frac{\pi d}{4a}$	
II	Дискретные поры $j/j_{PS} < \frac{\pi d}{4a}$		V	Сглаживание стенок $\frac{\pi d}{4a} < j/j_{PS} < 2\frac{d}{a}$	
III	Граница слияния $j/j_{PS} = \frac{\pi d}{4a}$		VI	Образование двойного ряда пор $j/j_{PS} > 2\frac{d}{a}$	

Рис. 4 Схема, поясняющая условия слияния пор в щели (идеализированная картина, игнорирующая случайный характер расположения пор вдоль рядов)

рис. 3а, этот процесс очень чувствителен к периоду затравочных канавок a и относительной плотности тока j/j_{PS} . Диаметр пор на дне щели также стремится к этому характерному значению (рис. 3b-d), что наблюдается, если ширина щели $w_t > 2d$. Таким образом, налицо стремление системы к такой самоорганизации, при которой граница кремний-электролит имеет определенный радиус кривизны. Пористость постоянна по всей площади образца, независимо от рисунка затравок, и согласно [8], определяется отношением $p = j/j_{PS} = \text{const}$. Учитывая, что для дискретных пор $p = \pi d^2 / 4a \cdot A_{II}$, то для $A_{II} = d$ находим граничное условие образования щели $j/j_{PS} = \pi d / 4a$. Пористость щелевой структуры $p = w_t / a$, откуда следует, что при ширине щели $w_t = 2d$, критерием образования двойного ряда пор является условие $j/j_{PS} = 2d/a$.

Схема формирования периодических щелевых структур приведена на рис. 4. На ней показано, как и при каком условии по мере

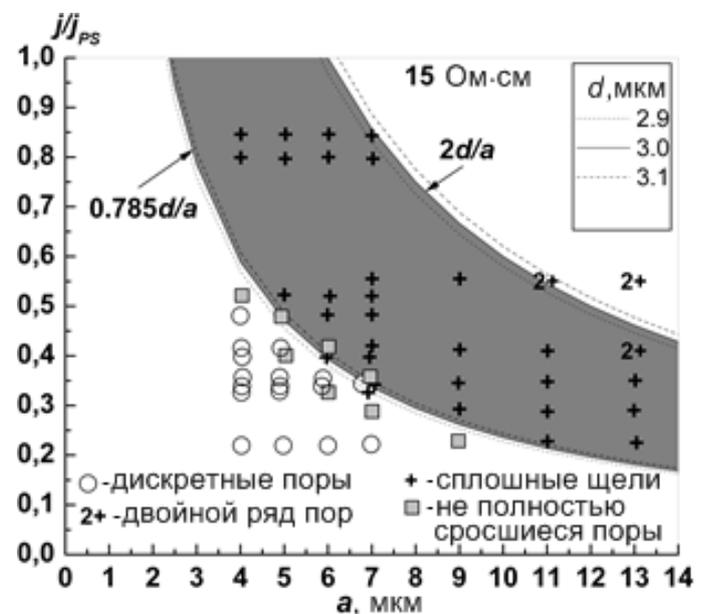


Рис. 5 Зависимость плотности тока j/j_{PS} от периода затравок, необходимого для слияния дискретных пор в щели.

увеличения плотности тока анодирования дискретные поры сливаются и как происходит двойникование (формирование щели из двойного ряда пор). На рис. 5 приведены 2 расчетные кривые, соответствующие границе слияния $j/j_{PS}=0.785d/a$ и двойникования $j/j_{PS}=2d/a$ для n-Si с $\rho=15$ Ом·см, для которого характерны макропоры диаметром $d=3.0\pm 0.1$ мкм. Закрашенная область между ними соответствует условию образования щелей без двойникования. На этот же график нанесены экспериментальные точки. Представленные данные свидетельствуют о хорошем согласии эксперимента со сформулированными критериями.

Стенки, щелевых структур, полученных ФЭХТ, характеризуются гофрированной поверхностью, обусловленной следами сросшихся макропор (рис. 7d-f). Наиболее выраженная шероховатость наблюдается при не полностью сросшихся порах, при образовании щелей из двойного ряда пор и при значительном отклонении периода затравок от \bar{a} . \bar{a} представляет собой среднее расстояние между соседними порами в неупорядоченной решетке. Его можно найти с помощью мнемонического правила: $\bar{a}\approx 2\sqrt{\rho}$. Зависимость среднеквадратичной неровности стенок от плотности тока $RMS=f(j/j_{PS})$ носит немонотонный характер (рис. 6). Наиболее гладкие стенки с минимальным $RMS \approx 40$ нм образуются в области токов $0.34 < j/j_{PS} < 0.44$. Шероховатость стенок можно уменьшить используя дополнительную обработку с помощью АТ и/или термического окисления с последующим снятием окисла. Структура 1D ФК, полученная при оптимизированных условиях, показана на рис. 7.

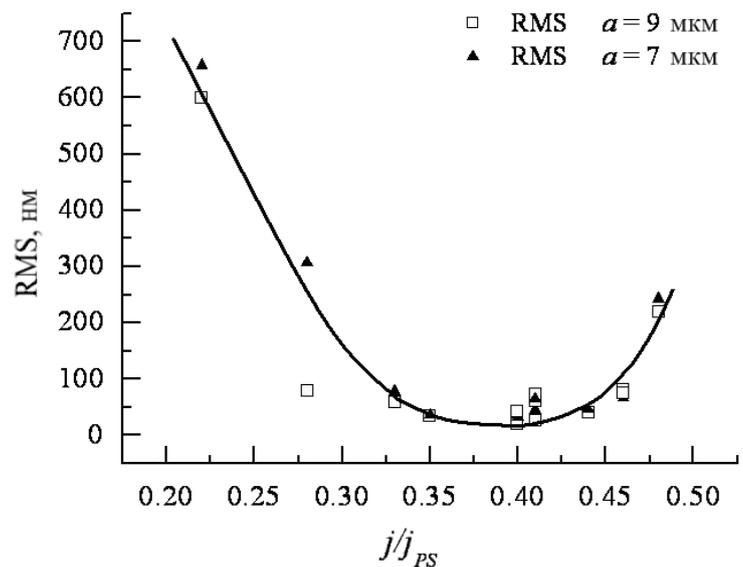


Рис. 6 Зависимость RMS от нормированной плотности тока j/j_{PS} для щелевых структур с периодом $a=7$ и 9 мкм. Исходный кремний: $\rho = 15$ Ом·см.

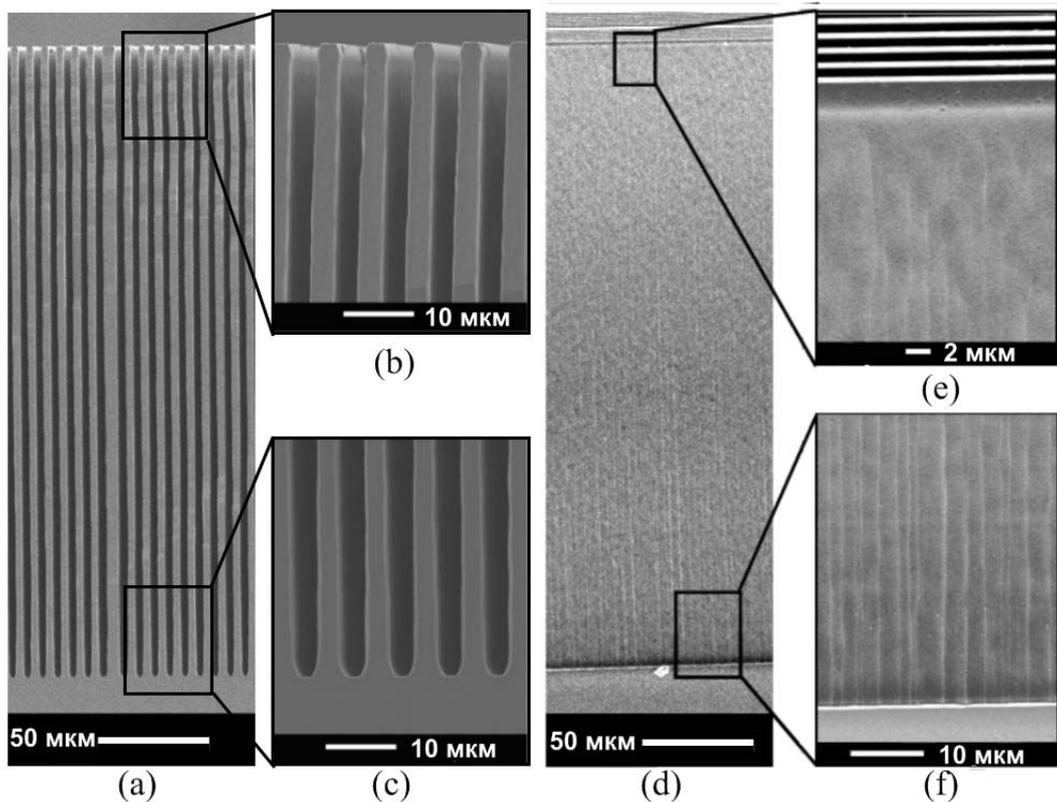


Рис. 7 СЭМ изображение 1D структуры с периодом $a = 7$ мкм, полученный при $j/j_{PS} = 0.41$ на n-Si с $\rho = 15$ Ом·см: а) сечение поперек щелей; б и с) - увеличенное изображение его верхней и нижней части; д) сечение вдоль щелей; е и ф) - увеличенное изображение верхней и нижней части стенки.

Исследование оптических характеристик полученных щелевых структур показало, что они являются хорошими 1D ФК для света распространяющегося перпендикулярно Si стенкам в плоскости подложки. Рис. 8 демонстрирует области высокого отражения (95%), соответствующее ФСЗ 2–4 порядков и хорошую модуляцию отражения в длинноволновой области.

В четвертой главе рассматривается получение 2D ФК полоски с конечным числом периодов, для чего использова-

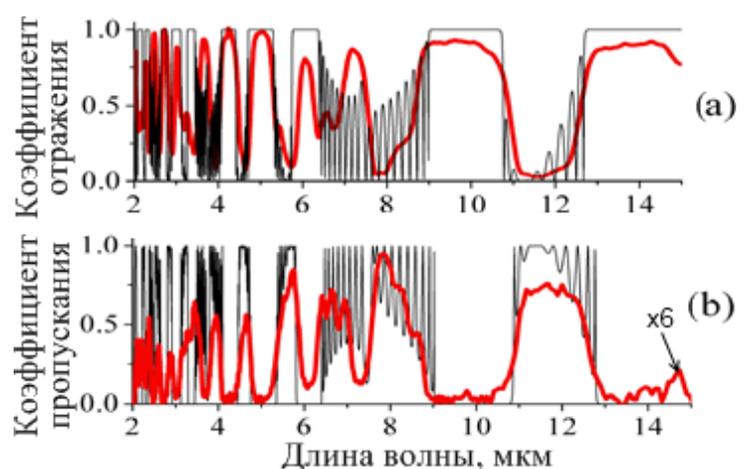


Рис. 8 Экспериментальные (толстая) и расчетные (тонкая) спектры отражения (а) и пропускания (б) 1D ФК с периодом $a=7$ мкм

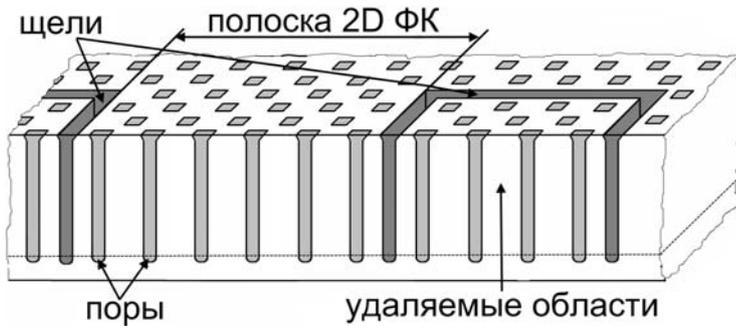


Рис. 9 Схема получения полосок 2D ФК

лось одновременное формирование макропор и щелей на подложке. Метод заключается в том, что замкнутый контур щелей определяет прямоугольные области образца, подлежащие удалению (рис.9)

[4]. После сошлифовки или травли подложки эти жертвенные области удалялись из образца, оставляя тонкую полоску ФК. Полученный образец, состоящий из 11 рядов макропор, организованных в тригональную решетку, с периодом $a=3.75$ мкм показан на рис. 10. Введение щелей в решетку макропор нарушает порядок периодической структуры и приводит к перераспределению локальной плотности тока в процессе травления, что изменяет размер и форму пор рядом со щелью (эффект близости). Экспериментальные исследования показали, что расстояние между затравочной канавкой для щели и центром ближайших к ней рядов пор должно быть близко к постоянной 2D решетки a . Слишком малое расстояние может привести к неполному срастанию пор в щель или к деградации щели с глубиной, а слишком большое – к широкой щели с сильно гофрированными стенками.

Исследование методом АСМ неровности стенок полученных 2D ФК структур в зависимости от плотности тока травления показало, что наименьшая шероховатость достигается при $j/j_{PS}=0.4$.

Особенностью 2D ФК структур, полученных одновременным ФЭХТ макропор и щелей, является наличие кремниевого предслоя на границе воздух-ФК, толщиной w (рис. 11а). Данный предслой является дефектом

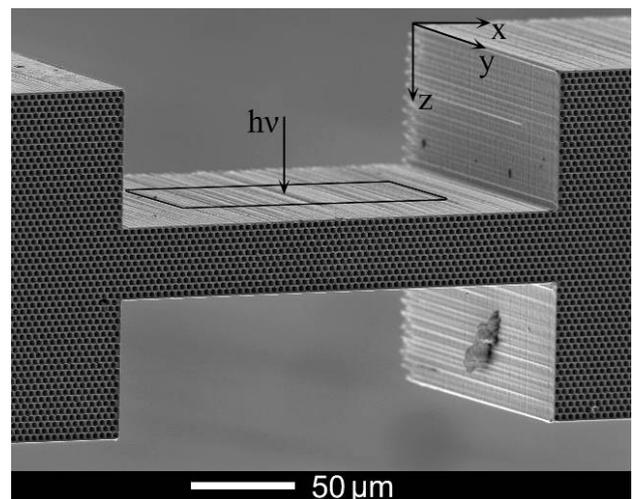


Рис. 10 СЭМ снимок полоски 2D ФК, вырезанной вдоль направления Г-К.

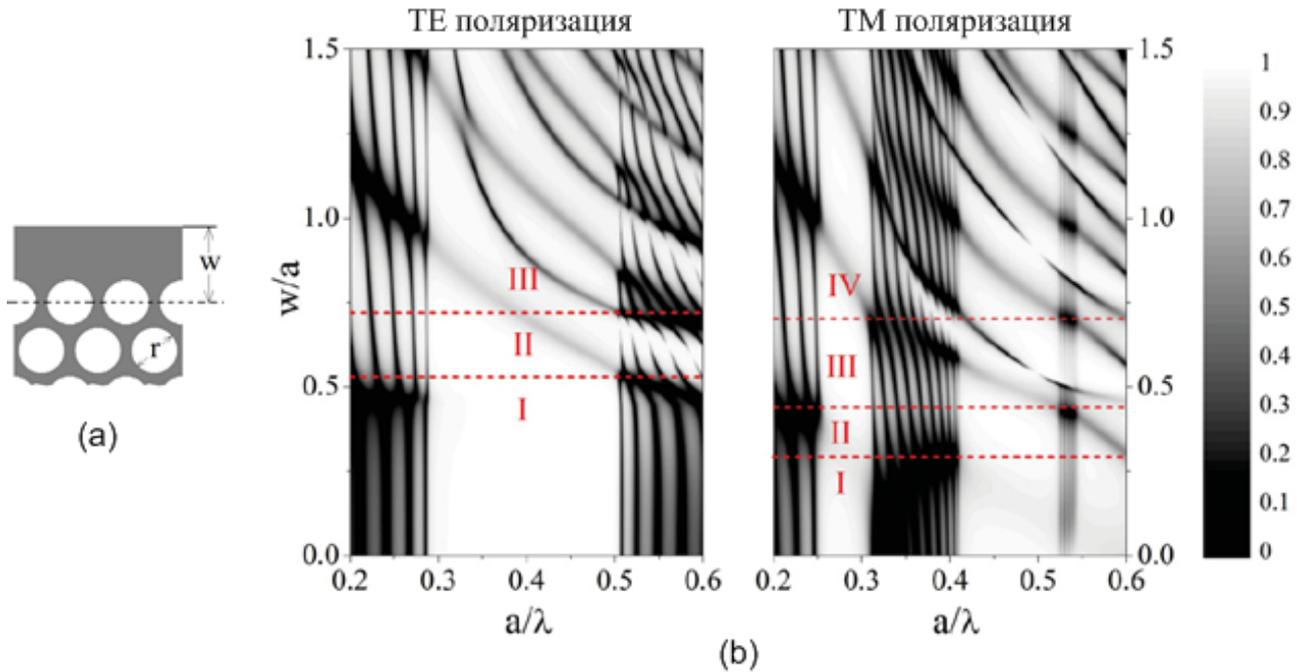


Рис. 11 Схематическое изображение предслоя w на границе 2D ФК полосы (а) и карты коэффициента отражения 2D ФК полосы, состоящей из 11 рядов пор, для ТЕ и ТМ поляризаций при $r/a=0.45$ и $k=0.001$ (b).

в решетке ФК и при определенных условиях может приводить к появлению поверхностных состояний (типа Тамма) в ФСЗ [9, 10, 11].

На рис. 11 приведены расчетные зависимости коэффициента отражения, определяющие спектральное положение и амплитуду поверхностной моды в стоп зонах полосы 2D ФК в зависимости от толщины предслоя w . Эти зависимости для ТЕ (ТМ) поляризации можно разделить на три (четыре) области по количеству поверхностных мод в области ФСЗ. Отсутствие поверхностных мод в фотонных стоп зонах наблюдается при $w < 0.55a$ для ТЕ поляризации и $w < 0.30a$ для ТМ поляризации (области I на рис. 11b). Для структуры с $w=0.62a$ были проведены расчеты ближнепольного распределения электромагнитного поля, которые демонстрируют картину, характерную для стоячей волны и подтверждают заключение о том, что эти моды являются поверхностным состояниями типа Тамма [9].

На экспериментальном спектре отражения, приведенном на рис. 12а, хорошо виден глубокий провал, обусловленный этим поверхностным состоянием. Амплитуда поверхностного пика на спектрах отражения и пропускания идеаль-

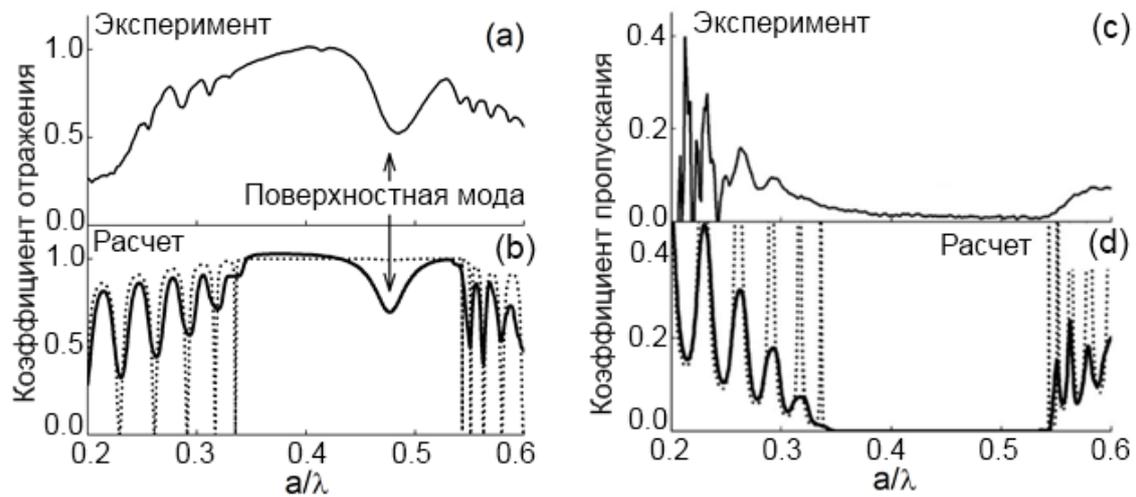


Рис. 12 Экспериментальные (а, с) и расчетные (b, d) спектры отражения и пропускания 2D ФК полосы (фактор заполнения $r/a=0.47$; $w=0.62a$) для света ТЕ поляризации. На (b, d) пунктиром обозначен расчет по идеальной модели, а сплошными линиями по трехкомпонентной модели ($\Delta R = 0.4$ мкм, $k = 0.03i$).

ной структуры имеет исчезающе малую амплитуду ($\sim 10^{-7}$). Согласие между

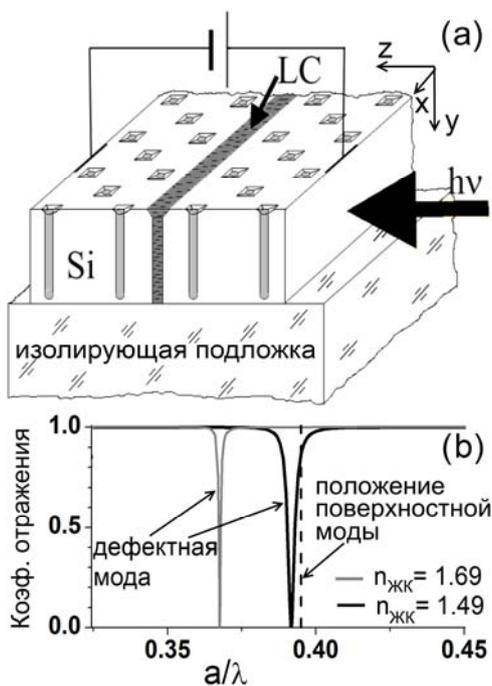


Рис. 13 Структура устройства электроперестраиваемого МР на основе макропористого кремния со щелевым дефектом (а) и сдвиг дефектной моды при изменении $n_{\text{жк}}$ (b).

экспериментальными и расчетными зависимостями (рис. 12) удалось достичь при учете потерь на рассеяние. Его наличие приводит к существенному увеличению амплитуды поверхностного пика на спектре отражения. Чтобы ФСЗ полосы 2D ФК не содержала поверхностного состояния, толщина предслоя w должна быть мала. Однако технология одновременного ФЭХТ пор и щелей так же накладывает свои ограничения на величину предслоя: $w > r$. Таким образом, с учетом технологии, для структур с фактором заполнения $r/a = 0.45$ отсутствию поверхностных состояний в первой ФСЗ соответствует условие $0.45a < w < 0.55a$ (ТЕ поляризация) и $0.45a < w < 0.72a$ (ТМ поляризация).

Пятая глава посвящена технологии

формирования и свойствам композитной структуры МР на основе кремниевой полоски 2D ФК с дефектом в виде щели, заполненной ЖК. Схема микрорезонатора показана на рис. 13а. При приложении внешнего электрического поля появляется возможность перестройки частоты дефектной моды за счет изменения показателя преломления ЖК. Предварительные оценки показали, что сдвиг частоты МР за счет электрооптического эффекта может достигать 6% (рис. 13б).

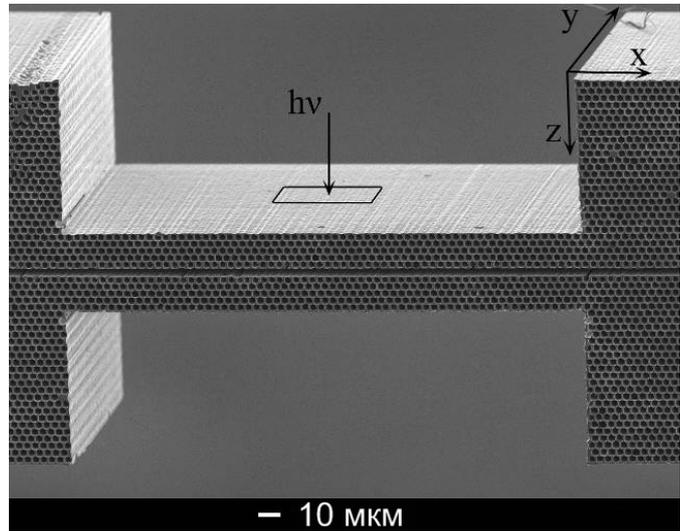


Рис. 14 СЭМ изображение структуры МР

Структура МР (рис. 14) изготавливалась по той же технологии, что и узкая полоска 2D ФК. Исследование экспериментальных спектров отражения и пропускания структуры МР (рис. 15) с пустой и заполненной ЖК щелью показало наличие низкодобротного поверхностного состояния в спектрах отражения, обусловленного предсломом, и отсутствие МР моды. Для расчета спектров использовалась двухкомпонентная модель с $k = 0$ и $k = 0.02$. В последнем случае

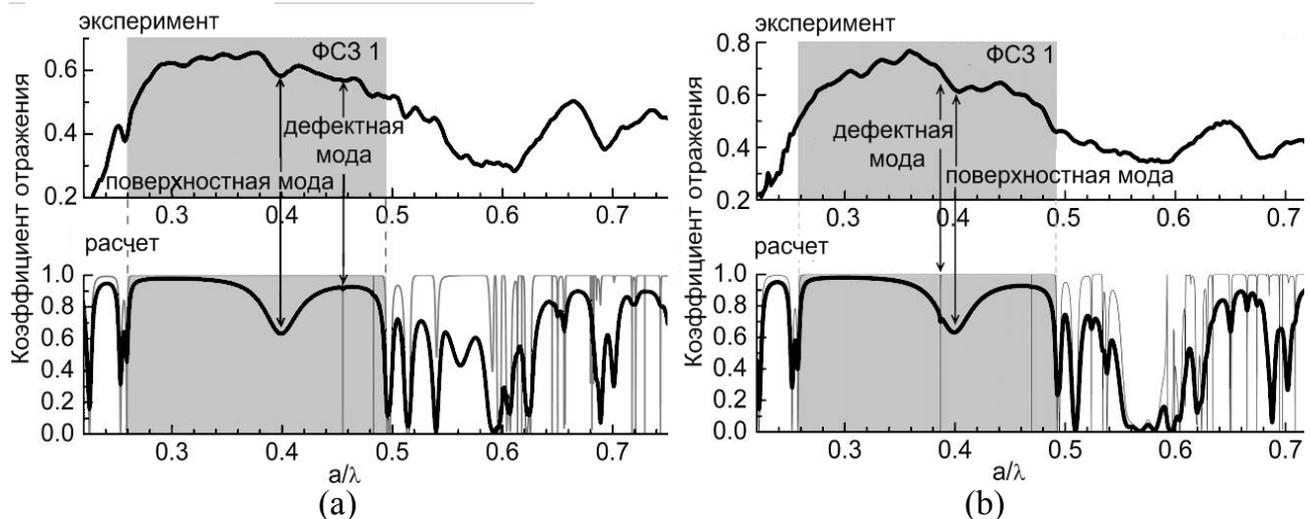


Рис. 15 Экспериментальные и расчетные спектры отражения для образца с пустой (а) и заполненной ЖК (б) щелью для ТЕ поляризации света. На теоретических зависимостях тонкая серая линия – расчет при $k = 0$, толстая черная линия при $k = 0.02$. Параметры расчета: $r/a = 0.433$, угол падения света $\varphi = 10^\circ$.

удалось получить хорошее согласие с экспериментом.

Моделирование показало, что по мере возрастания потерь (роста k) амплитуда поверхностного пика увеличивается, сам он уширяется, а абсолютная величина отражения в зоне уменьшается. Взаимодействие поверхностной и дефектной мод в условиях их спектральной близости может приводить не только к снижению добротности дефектной моды (рис. 13b), но и полностью маскировать её (рис. 15b). Поэтому при проектировании структуры перестраиваемого МР следует выбирать параметры, при которых Таммовские состояния в ФСЗ будут отсутствовать.

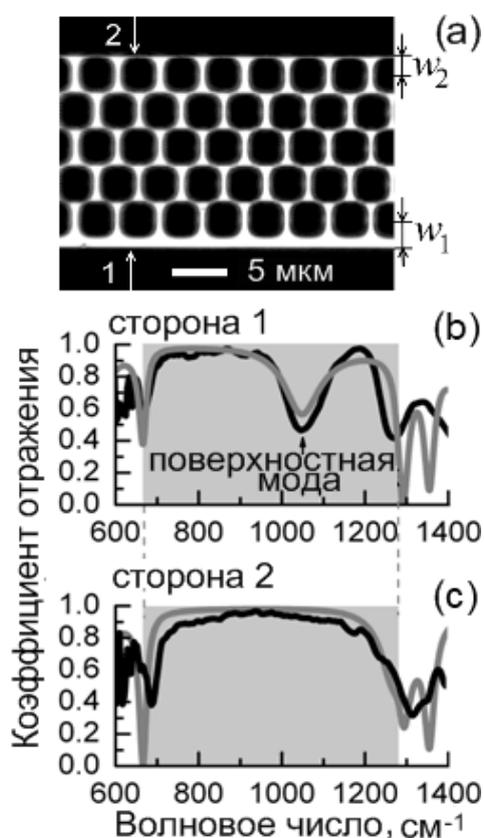


Рис. 16 2D ФК с асимметричными границами $w_1=0.685a$ и $w_2=0.552a$ (a) и его спектры отражения в области ТЕ стоп зоны при освещении со стороны 1 (b) и 2 (c). Черная линия – эксперимент, серая - расчет.

проявилось в спектрах отражения полосы 2D ФК, имеющей разную толщину

Исследование влияния величины k на дефектную моду показало, что в отличие от поверхностной моды, ее амплитуда падает по мере увеличения потерь. При фиксированном k увеличение числа периодов m в Брэгговских зеркалах по обе стороны от щели приводит к снижению амплитуды дефектной моды. Если за численную характеристику потерь взять значение $k = 0.02$, найденное из расчетных кривых, которые показали наилучшее совпадение с экспериментом (рис. 15), то в микрорезонаторе, заполненном ЖК, уже при $m=3$ амплитуда дефектной моды падает до 24% от максимально возможного значения в 100%. Таким образом, для надежной экспериментальной регистрации дефектной моды число периодов должно быть $m \leq 3$.

Влияние Релеевского рассеяния в сочетании с нарушением симметрии наглядно

предслож на внешних границах (рис. 16а). На рис. 16б,с приведены экспериментальные и расчетные спектры отражения для света ТЕ поляризации при освещении ФК со стороны 1 и 2, которые различаются тем, что в первом случае поверхностное состояние наблюдается, а во втором нет. Спектры пропускания при этом остаются одинаковыми, независимо от того с какой стороны падает свет, что находится в полном согласии с принципом обратимости [12]. Анализ показывает, что при $k = 0$ спектры отражения также остаются одинаковыми, независимо от стороны освещения. В соответствии с расчетами, проведенными для полоски, состоящей из 5 рядов пор, предслож толщиной $w=0.685a$ создает поверхностную моду в ФСЗ, а слой толщиной $w=0.552a$ не создает. При увеличении величины k спектры отражения от разных сторон структуры начинают все больше различаться. При потерях на рассеяние, которое для нашей структуры оценивается с помощью $k = 0.025$, отражение в области ФСЗ не «чувствует» сигнала от заднего края структуры, поскольку амплитуда отраженного оттуда света мала. Таким образом, на спектрах отражения видны поверхностные состояния, обусловленные только входным предсложом.

В заключении диссертации перечислены основные результаты работы:

1. Для получения 1D ФК структур методом ФЭХТ n-Si необходимо соблюдать следующие условия: $0.785d/a < j/j_{PS} < 2d/a$; наиболее гладкие стенки получаются в еще более узком диапазоне при $0.34 < j/j_{PS} < 0.44$ и периоде $a \approx 2\sqrt{\rho}$.
2. При получении узких полосок 2D ФК методом одновременного ФЭХТ глубоких пор и щелей к вышеуказанным правилам проектирования 1D ФК необходимо добавить следующее условие: расстояние между центром щели и ближайшим рядом пор должно быть близко к периоду двумерной решетки a .
3. Наличие кремниевого предслож на границе 2D ФК полоски может сопровождаться появлением в ФСЗ низкодобротных разрешенных состояний, связанных с поверхностными модами. Спектральное положение этих поверхностных состояний определяется толщиной предслож.

4. Рассеяние света на внутренних границах кремний-воздух реальных ФК структур весьма существенно. Связанные с ним потери ограничивают максимальное число периодов в структуре ФК и МР, приводят к уменьшению амплитуды дефектных мод и увеличению амплитуды поверхностных состояний, и объясняют различие экспериментальных спектров отражения несимметричной структуры 2D ФК, измеренных с разных сторон.
5. Для получения микрорезонатора необходимо обеспечить малую толщину предлоя и малое число рядов пор с каждой стороны от дефекта.

Основные результаты работы отражены в следующих публикациях:

- A1. **Федулова Г. В.** Щелочное вскрытие макропор при изготовлении кремниевых структур со сквозными каналами // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2007. Т. 40. С. 75-79.
- A2. Astrova E. V., **Fedulova G. V.** Formation of deep periodic trenches in photo-electrochemical etching of n-type silicon // JMM. 2009. Vol. 19. P.095009(11).
- A3. Astrova E. V., Tolmachev V. A., Zharova Yu. A., **Fedulova G. V.**, Baldycheva A. V., Perova T. S. Silicon periodic structures and their liquid crystal composites // Solid State Phenomena. 2009. Vol. 156-158. Pp. 547-554.
- A4. Astrova E. V., Tolmachev V. A., **Fedulova G. V.**, Melnikov V. A., Ankudinov A. V., Perova T. S. Optical properties of one-dimensional photonic crystals fabricated by photo-electrochemical etching of silicon // Appl. Phys. A. 2010. Vol. 98. No. 3. Pp. 571-581.
- A5. Астрова Е. В., Толмачев В. А., **Федулова Г. В.**, Melnikov V.A., Perova T.S. Одномерные фотонные кристаллы, полученные с помощью фотоэлектрохимического травления кремния // Известия РАН. Серия физическая. 2010. Т. 74. № 1. С. 74–77.
- A6. Жарова Ю. А., **Федулова Г. В.**, Гущина Е. В., Анкудинов А. В., Астрова Е. В., Ермаков В. А., Перова Т. С. Технология получения одномерных

фотонных кристаллов с помощью фотоэлектрохимического травления кремния // ФТП. 2010. Т. 44. № 7. С. 986-994.

- A7. Астрова Е. В., **Федулова Г. В.**, Гущина Е. В. Формирование полосок двумерного фотонного кристалла путем одновременного фотоэлектрохимического травления щелей и макропор в кремнии // ФТП. 2010. Т. 44. № 12. С. 1666-1672.
- A8. Astrova E. V., **Fedulova G. V.**, Zharova Yu. A., Gushchina E. V. Side-Wall Roughness of Deep Trenches in 1D and 2D Periodic Silicon Structures Fabricated by Photoelectrochemical Etching // Phys. Stat. Sol. C. 2011. Vol. 8. No. 6. Pp. 1936-1940.
- A9. Astrova E. V., **Fedulova G. V.**, Zharova Yu. A. Defect engineering in 2D photonic crystals fabricated by electrochemical etching of silicon // Sol. St. Phenom. 2011. Vol. 178-179. Pp. 459-464.
- A10. Dyakov S. A., Baldycheva A. V., Perova T. S., **Li G. V.**, Astrova E. V., Gippius N. A., Tikhodeev S.G. Surface states in the optical spectra of two-dimensional photonic crystals with various surface terminations // Phys. Rev. B. 2012. Vol. 86. No. 11. P. 115126(8).
- A11. **Li G. V.**, Astrova E.V., Zharova Yu.A., Dyakov S. A., Baldycheva A.V., Perova T. S., Gippius N. A., Tikhodeev S. G. Tunable microcavity based on macroporous silicon: feasibility of fabrication // JLT. 2013. Vol. 31. No. 16. Pp. 2694-2700.
- A12. **Li G. V.**, Astrova E. V., Dyakov S. A., Baldycheva A., Perova T. S., Tikhodeev S. G., Gippius N. A. Surface Tamm states in a photonic crystal slab with asymmetric termination // Phys. Stat. Sol. RRL. 2013. Vol. 7. No. 7. Pp. 481-484.
- A13. Dyakov S.A., Astrova E.V., Perova T.S., Tolmachev V.A., **Fedulova G.V.**, Baldycheva A.V., Timoshenko V.Y., Tikhodeev S.G., Gippius N.A. Optical spectra of two-dimensional photonic crystal bars based on macroporous Si // Proc. SPIE. 2011. Vol. 7943. P. 79431I(9).

Список цитируемой литературы:

1. Lehmann V., Föll H. Formation mechanism and properties of electrochemically etched trenches in n-type silicon // J. Electrochem. Soc. 1990. Vol. 137. Pp. 653–659.
2. Barillaro G., Nannini A., Piotto M. Electrochemical Etching in HF solution for silicon micromachining // Sensors and Actuators A. 2002. Vol. 102. Pp. 195–201.
3. Barillaro G., Diligenti A., Benedetti M., Merlo S. Silicon Micromachined Periodic Structures for Optical Applications at 1.55 μm // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. P. 151110(3).
4. Geppert T., Schweizer S. L., Gosele U., Wehrspohn R. B. Deep trench etching in macroporous silicon // Appl. Phys. A. 2006. Vol. 84. Pp. 237–242.
5. Azzam R.M.A., Bashara N.M. Ellipsometry and polarized light. North-Holland. Elsevier Science: Amsterdam. Netherlands. 1987. 379p.
6. Whittaker D. M., Culshaw I. S. Scattering-matrix treatment of patterned multi-layer photonic structures // Phys. Rev. B. 1999. Vol. 60. No. 24. Pp. 2610–2618.
7. Tikhodeev S. G., Yablonskii A. L., Muljarov E. A., Gippius N. A., Ishihara T. Quasiguidded modes and optical properties of photonic crystal slabs // Phys. Rev. B. 2002. Vol. 66. P. 045102(17).
8. Lehmann V. Electrochemistry of Silicon. Wiley – VCH. Germany. 2002. 277p.
9. Тамм И.Е. О возможной связи электронов на поверхностях кристалла // ЖЭТФ. 1933. Vol. 3. Pp. 34–35.
10. Виноградов А.П., Дорофеев А.В., Мерзликин А.В., Лисянский А.А. Поверхностные состояния в фотонных кристаллах // УФН. 2010. Т. 180. № 3. С. 249–263.
11. Mihi A., Miguez H., Rodriguez I., Rubio S., Meseguer F. Surface resonant modes in colloidal photonic crystals // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 71. No.12. P. 125131(7).
12. Born M., Wolf E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. 7th edn. Cambridge Univ. Press. UK. 1999. 986p.