

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

МИФИ

Кафедра № 67

"Физика конденсированных сред"

Получение и исследование фотонных кристаллов на основе пористого кремния

Студент: Авхадиева А.И.

Группа: Т11-67К

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ

Каргин Н.И.



Москва 2016

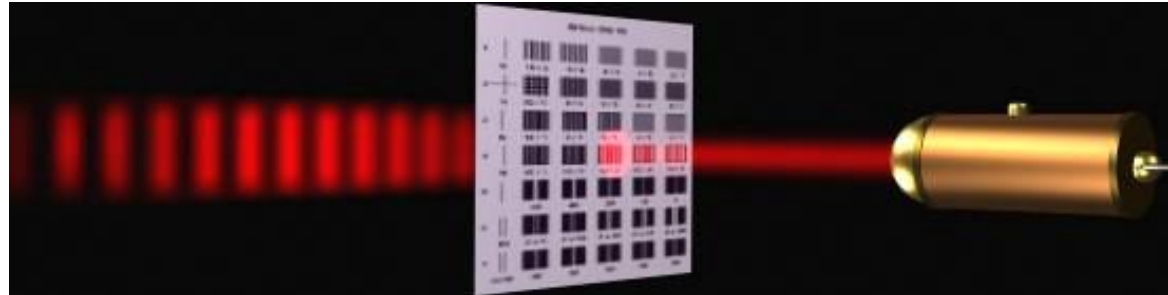
Фотонные кристаллы

Структуры, характеризующиеся периодическим изменением диэлектрической проницаемости в пространстве.

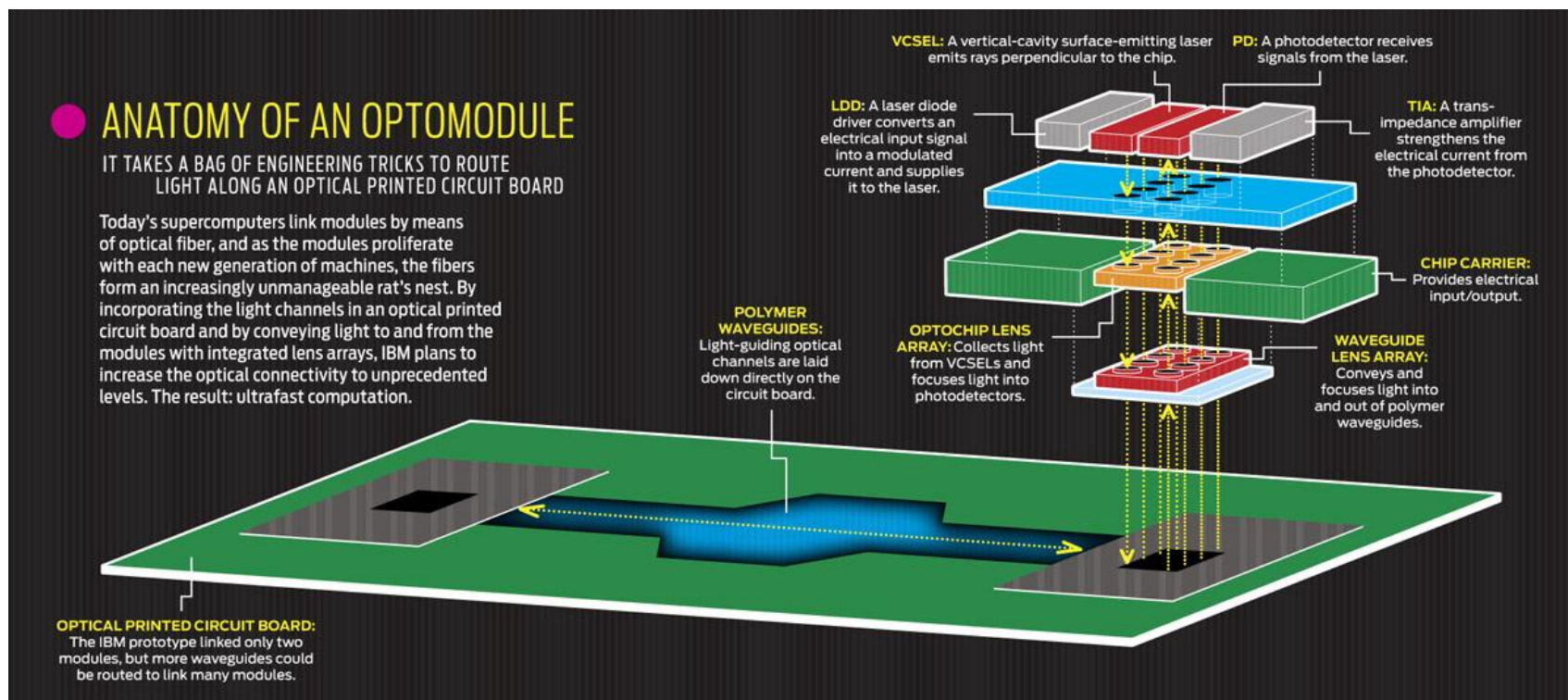


Применение

- Устройств оптической памяти и логические устройства
- Многослойные отражающие покрытия
- Фотонные сверхпроводники
- Суперпризмы
- Суперлинзы
- Волноводы
- Дисплеи
- Лазеры
- Фильтры



Актуальность



Структуру компонентов оптического компьютера можно подобрать теоретически в соответствии с требуемыми свойствами

Цель работы и задачи

Цель работы - расчет спектра отражения ограниченного фотонного кристалла с дефектом, являющегося фильтром, его экспериментальное получение и исследование полученной структуры.

Для достижения цели поставлены задачи:

- Выбор метода расчета фотонных кристаллов, его реализация и апробация, подбор структуры с желаемыми свойствами в программе.
- Подбор режимов травления, получение однослойного пористого кремния, обработка результатов экспериментов, получение и исследование фотонного кристалла на основе пористого кремния.

Методы получения фотонных кристаллов

1. Методы самосборки
2. Методы травления
3. Голографические методы
4. Другие методы литографии
5. Методы, основанные на регулировании пористости полупроводников и диэлектриков

Численные методы исследования фотонных кристаллов

1. метод разложения электромагнитного поля по плоским волнам
2. метод Корринга-Кона-Ростокера
3. метод конечных разностей в пространственно-временной области
4. методы матриц переноса
5. метод разложения локализованных мод электромагнитного поля по функциям Ванье
6. метод конечных элементов
7. метод, основанный на поиске огибающей функции

Метод матриц переноса

Уравнения Максвелла

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \mathbf{j} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad \mu = 1$$

$$\Delta \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \frac{\varepsilon_r(\mathbf{r})}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = 0.$$

Уравнение Гельмгольца для конечной 1-D многослойной структуры:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0(\mathbf{r}) e^{i(\mathbf{k}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{r} + \omega \cdot t)} = \mathbf{E}_0(\mathbf{r}) e^{i(\mathbf{k}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{r})} e^{i(\omega \cdot t)}$$

$$\nabla^2 \mathbf{E}_0(\mathbf{r}) + \varepsilon_r(\mathbf{r}) \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{E}_0(\mathbf{r}) = 0 \quad \frac{\partial^2 E_z(x)}{\partial x^2} + \varepsilon_r(x) \frac{\omega^2}{c^2} E_z(x) = 0$$

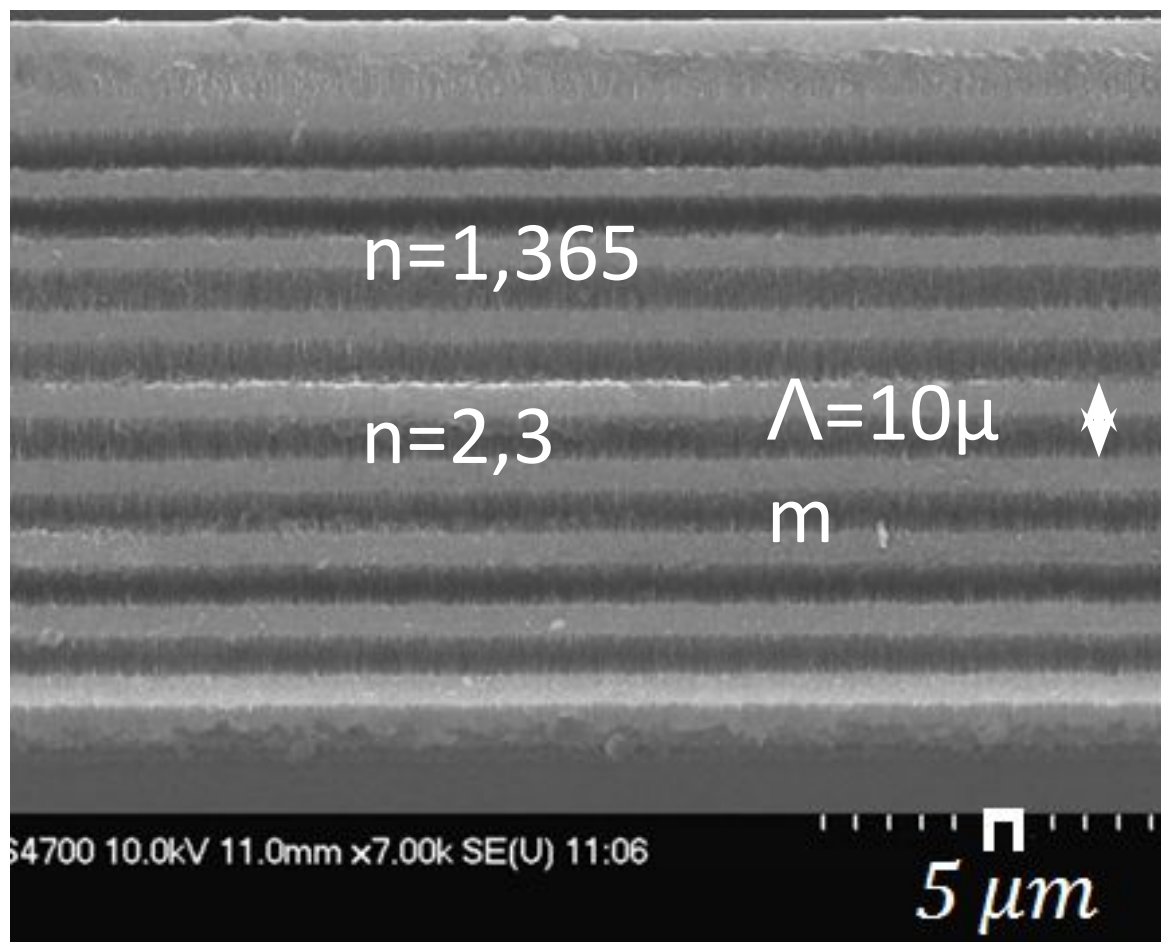
$$E_j(x) = A_j e^{j \cdot n_j \cdot k \cdot x_j} + B_j e^{-j \cdot n_j \cdot k \cdot x_j}$$

$$A_j e^{j \cdot n_j \cdot k \cdot x_j} + B_j e^{-j \cdot n_j \cdot k \cdot x_j} = A_{j+1} e^{j \cdot n_{j+1} \cdot k \cdot x_j} + B_{j+1} e^{-j \cdot n_{j+1} \cdot k \cdot x_j}$$

$$j \cdot n_j \cdot k \cdot A_j e^{j \cdot n_j \cdot k \cdot x_j} - j \cdot n_j \cdot k \cdot B_j e^{-j \cdot n_j \cdot k \cdot x_j} =$$

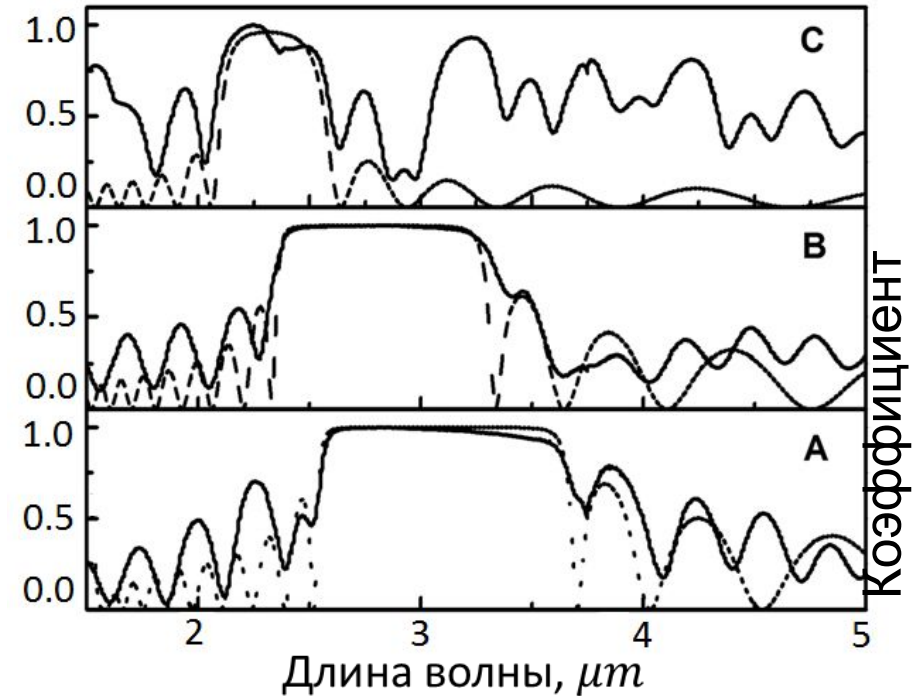
$$= j \cdot n_{j+1} \cdot k \cdot A_{j+1} e^{j \cdot n_{j+1} \cdot k \cdot x_j} - j \cdot n_{j+1} \cdot k \cdot B_{j+1} e^{-j \cdot n_{j+1} \cdot k \cdot x_j}$$

Проверка метода

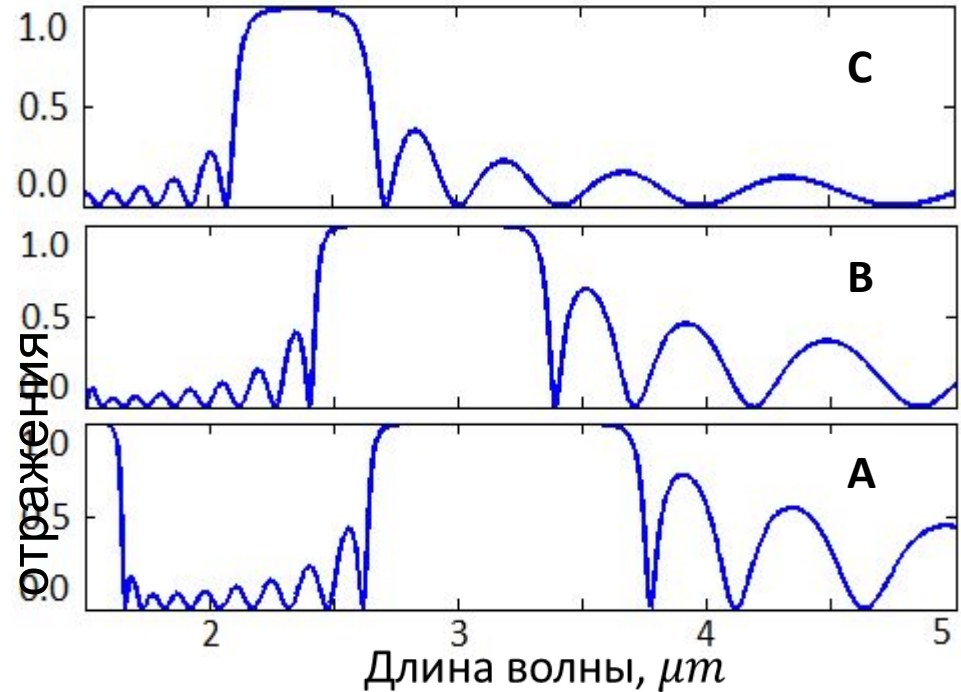


Поперечное СЭМ-изображение фотонного кристалла на основе пористого кремния, 10 периодов

Проверка метода



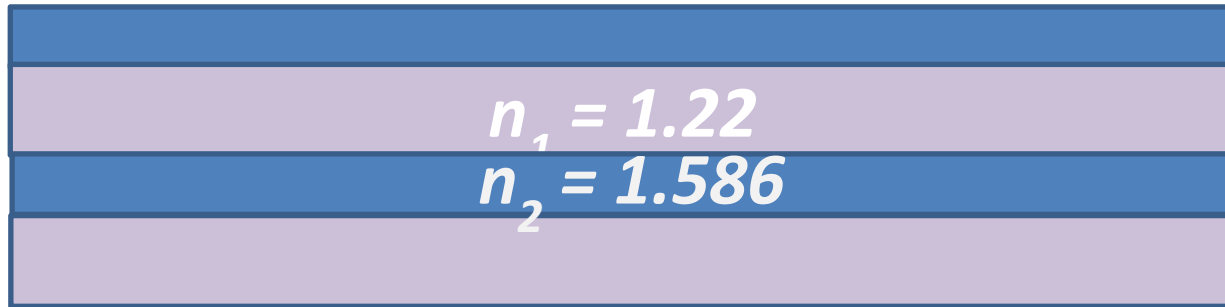
Спектры отражения структуры. (а) без окисления, (б) с окислением 20 мин, с окислением 30 мин. Теоретические результаты показаны пунктирными линиями.



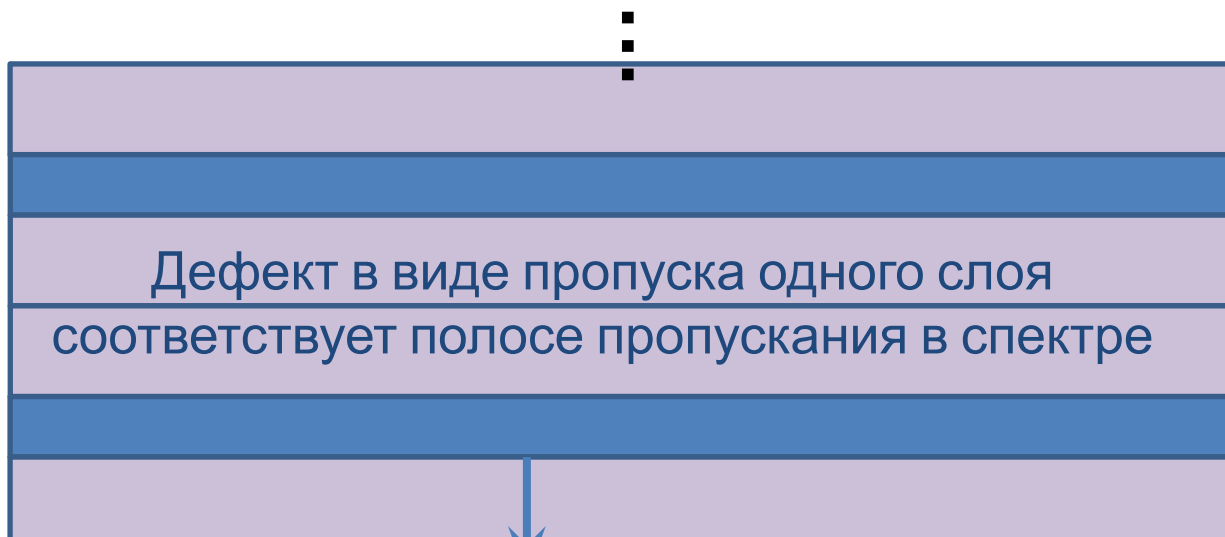
Аналогичные спектры, рассчитанные в настоящей работе.

Подбор структуры

50
слоев

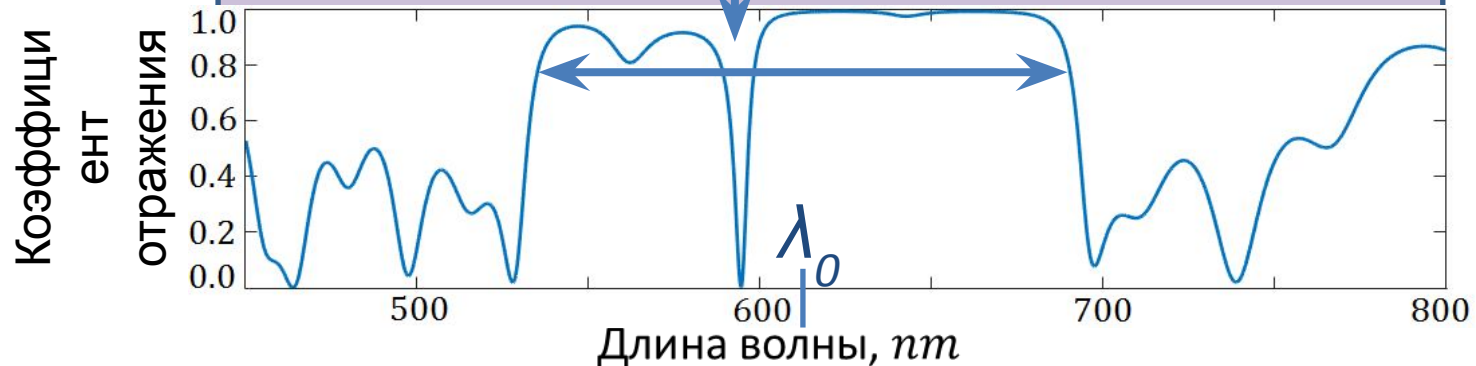


$$\frac{\lambda}{4} = 155 \text{ nm}$$



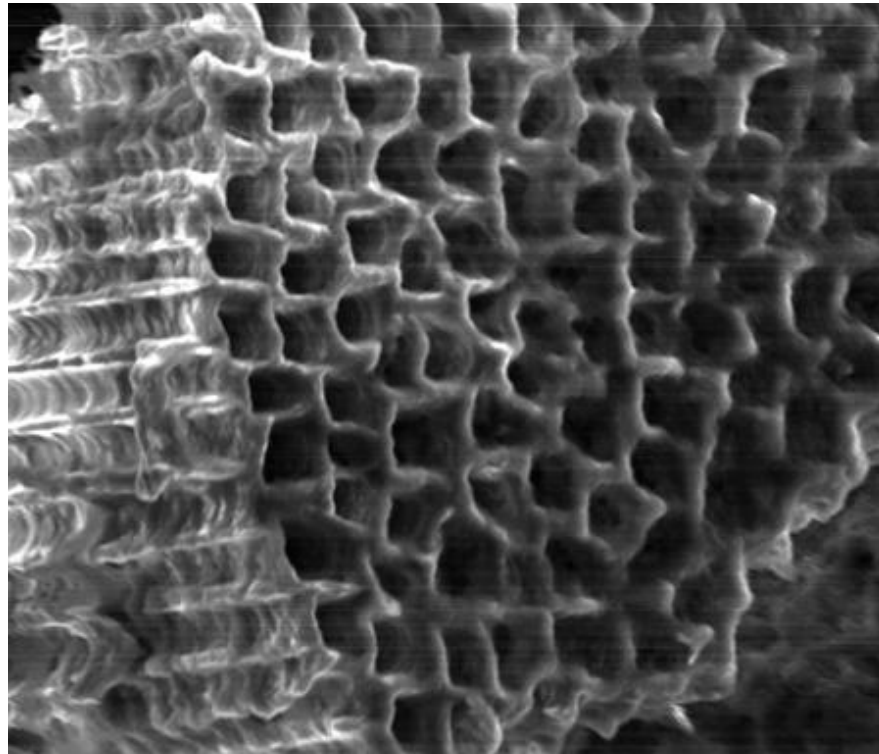
Дефект в виде пропуска одного слоя
соответствует полосе пропускания в спектре

$$\lambda_0 = 620 \text{ nm}$$

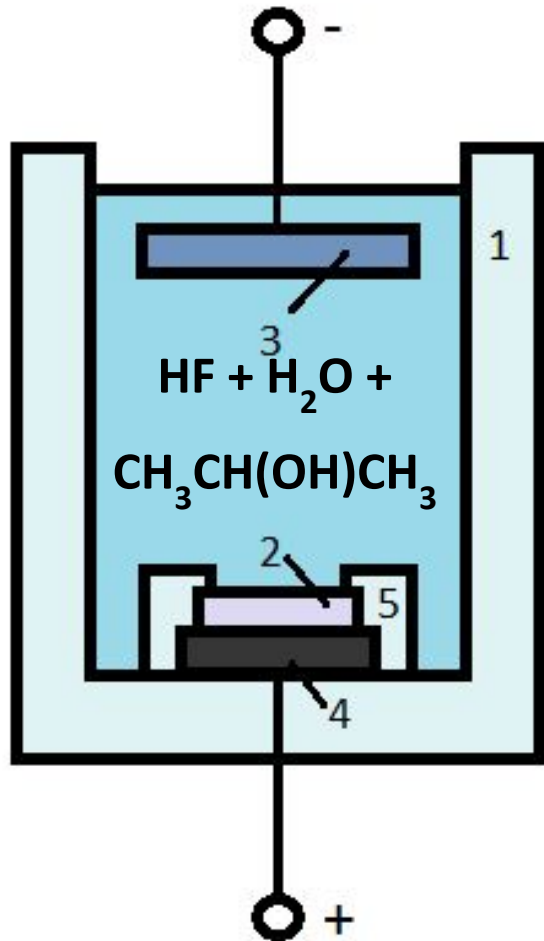


Пористый кремний и фотонные кристаллы на его основе

Пористый кремний – кремний, имеющий пористую структуру



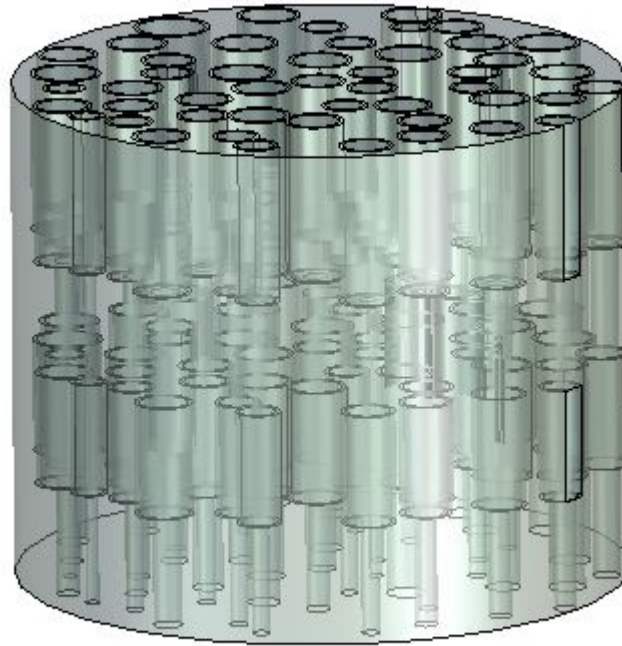
Методика эксперимента электрохимического травления



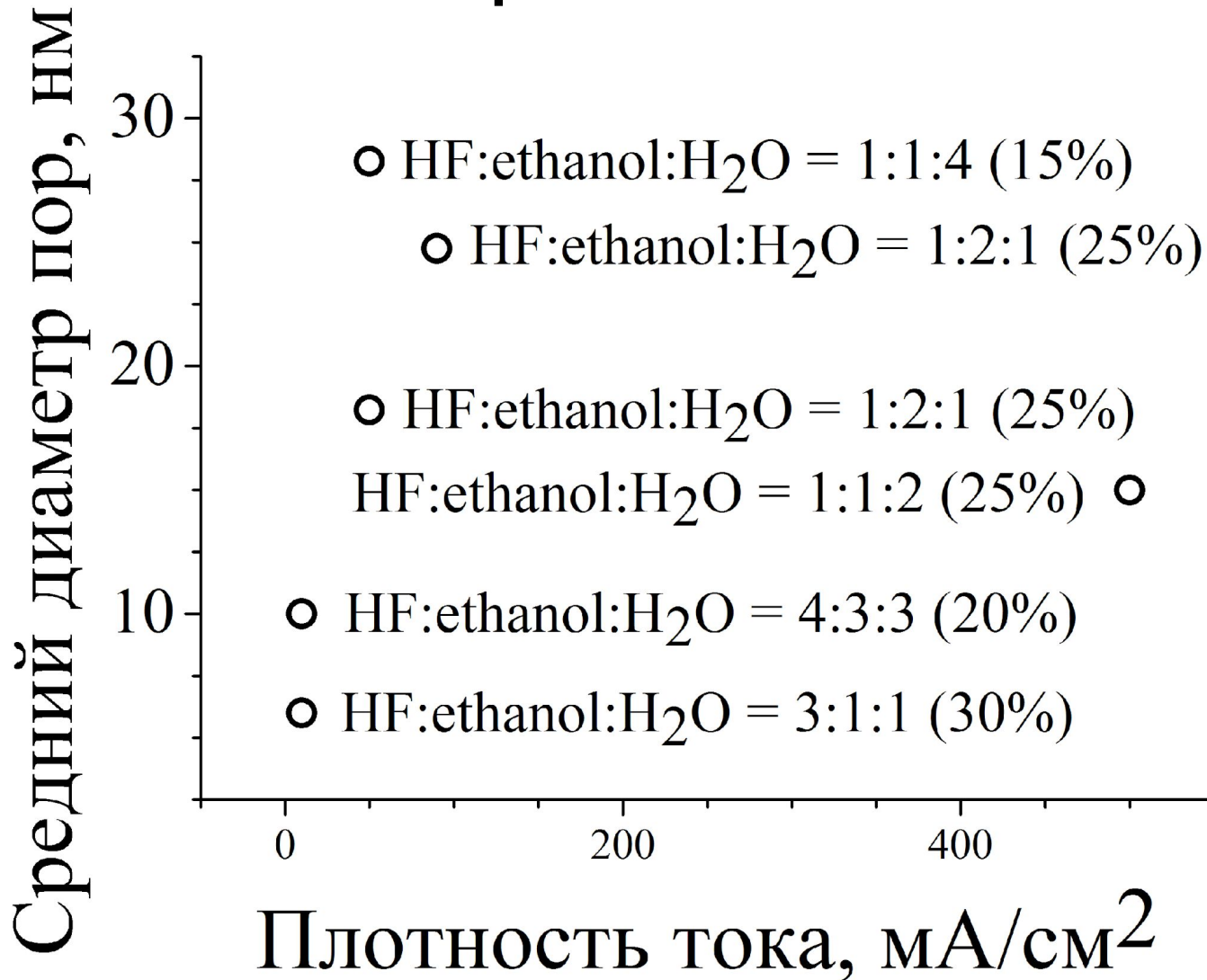
1 – фторпластовая ячейка, 2 – кремниевая пластина,
3 – металлический электрод, 4 – графит, 5 –

уплотнитель

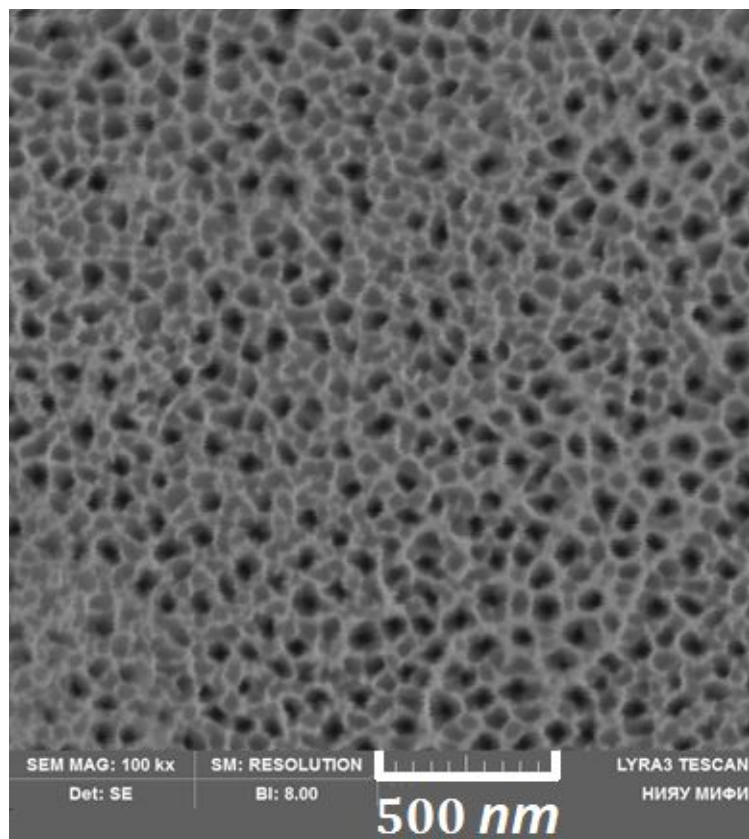
В рамках одного процесса травления, варьируя плотность тока, можно получать многослойные структуры, каждый слой которых будет обладать необходимым эффективным показателем преломления



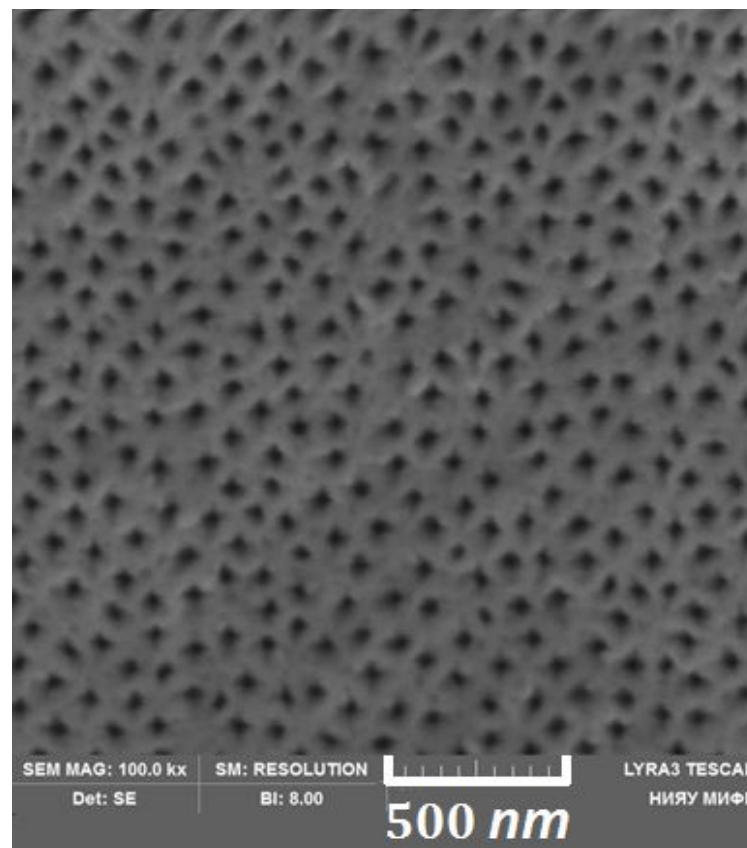
Режимы получения пористого кремния



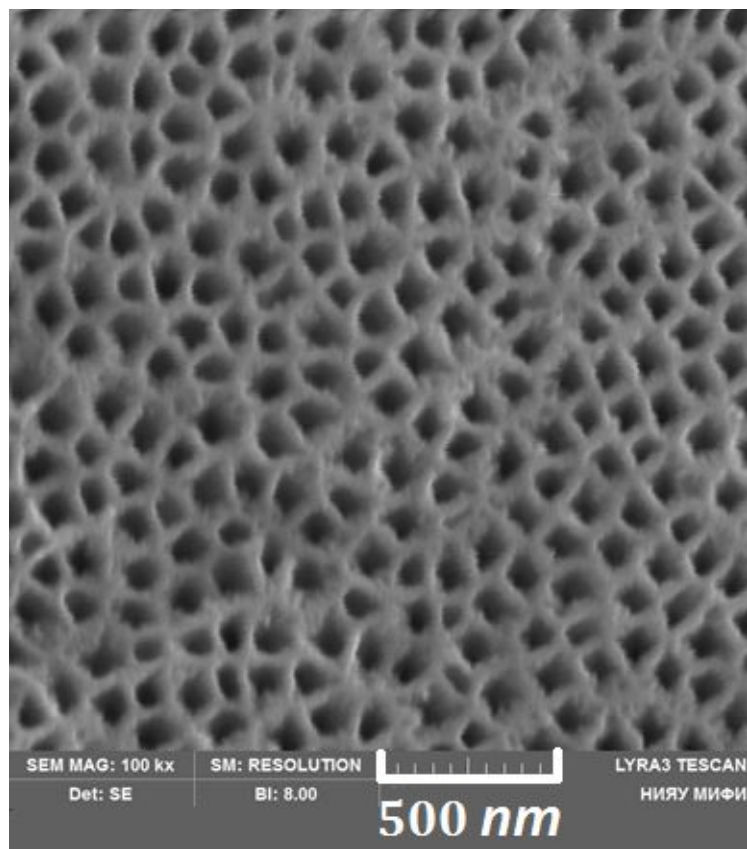
Образец ПК-1



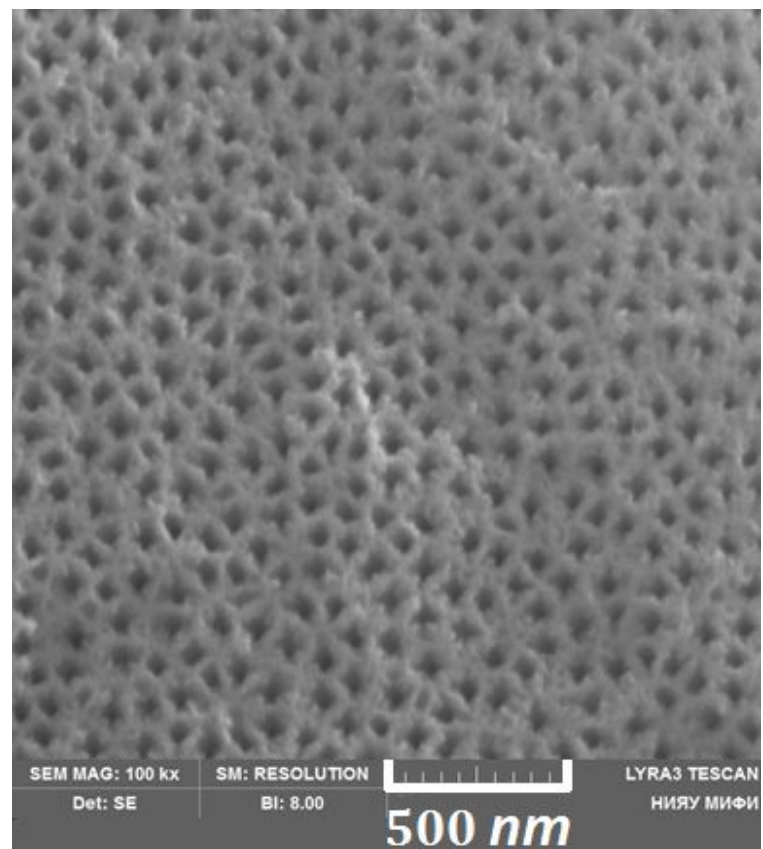
Образец ПК-2



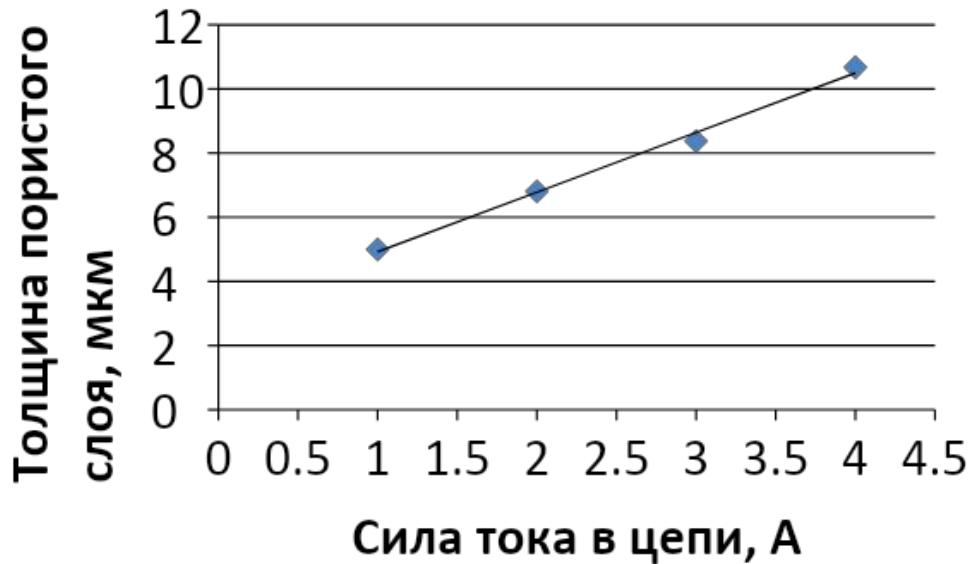
Образец ПК-3



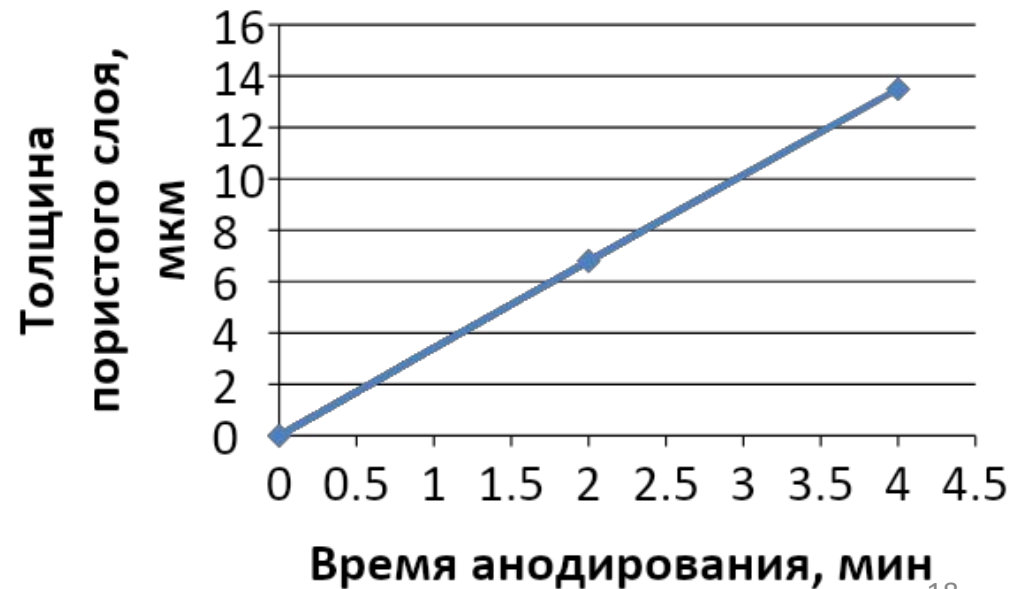
Образец ПК-4



Зависимость
толщины
пористого слоя от
силы тока
аноодирования.



Зависимость
толщины
пористого слоя от
времени
аноодирования.



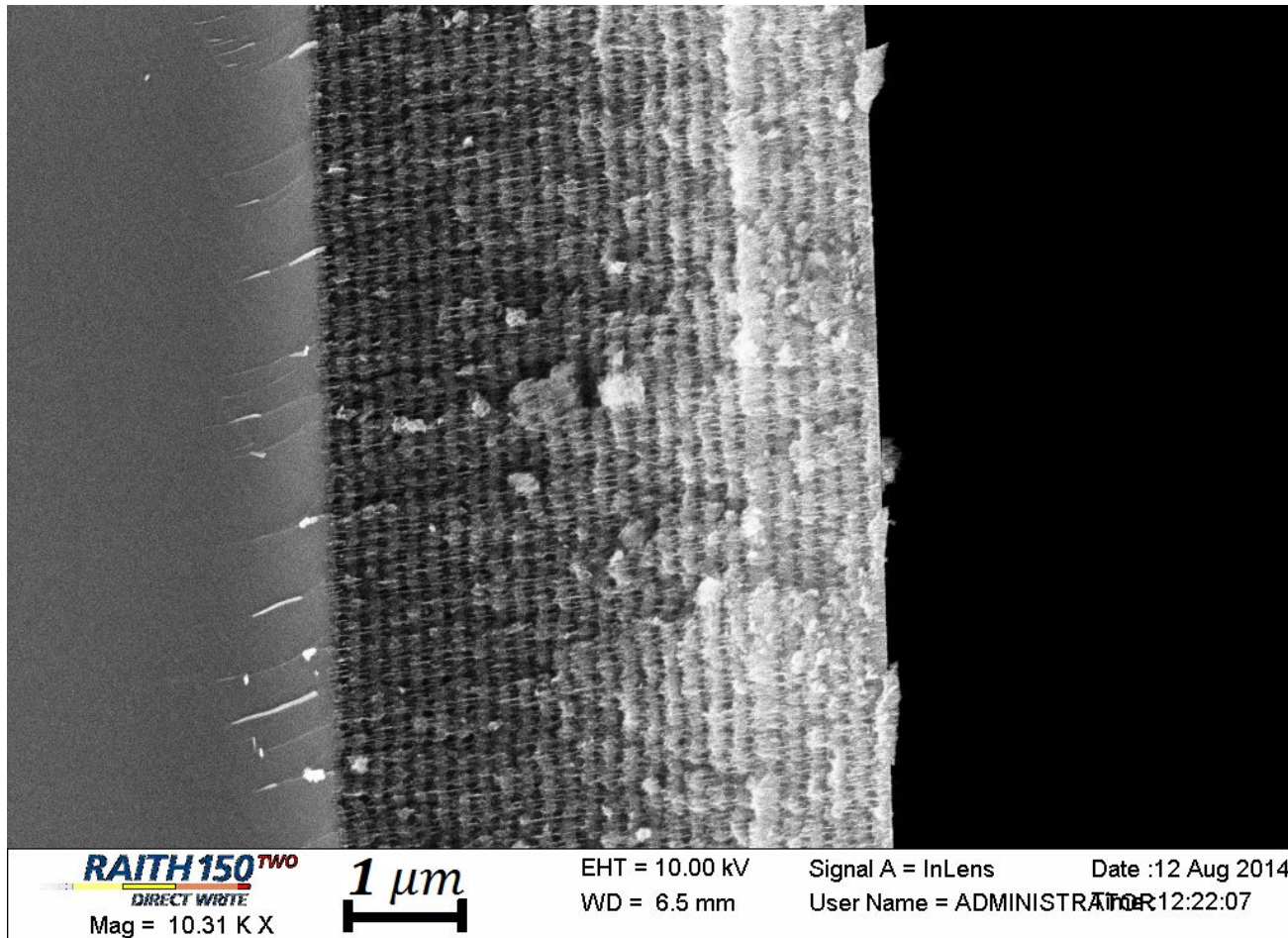
Зависимость среднего размера пор от силы тока анодирования.



Результат

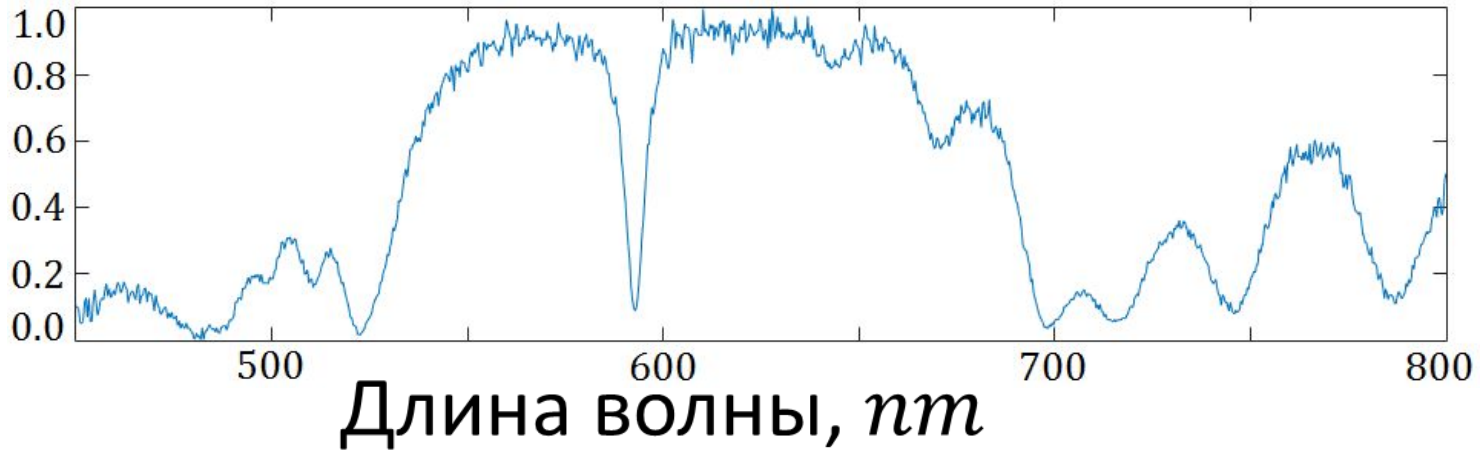
эксперимента
50 слоев, $n_1 = 1.22$, $n_2 = 1.586$
 $\frac{\lambda}{4} = 155 \text{ nm}$

$\lambda_0 = 620 \text{ nm}$ - центр фотонной запрещенной зоны.

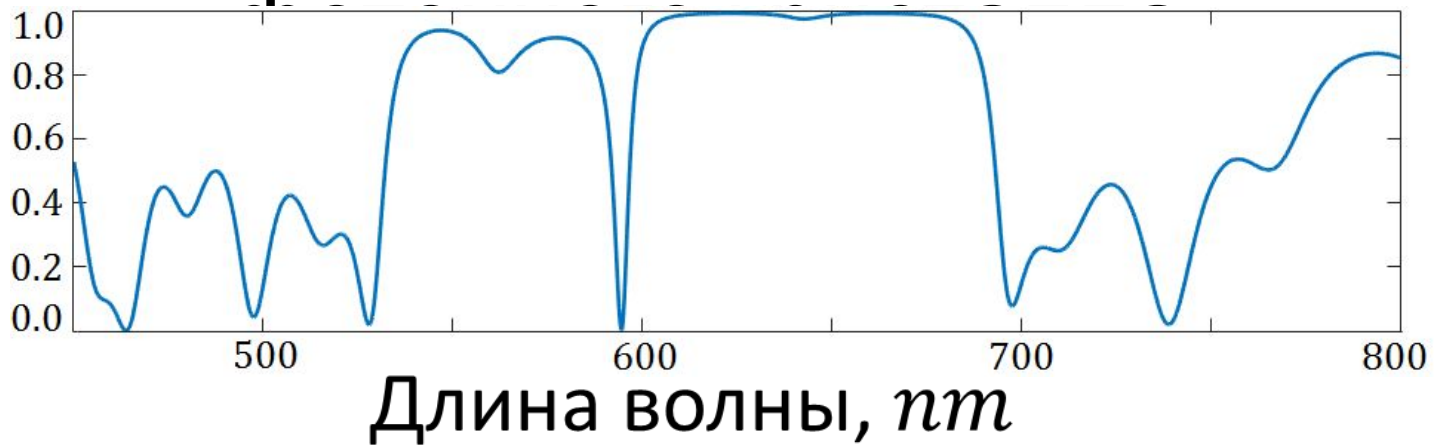


Результат

Коэффициент отражения



Измеренный спектр отражения



Рассчитанный спектр отражения

Заключение

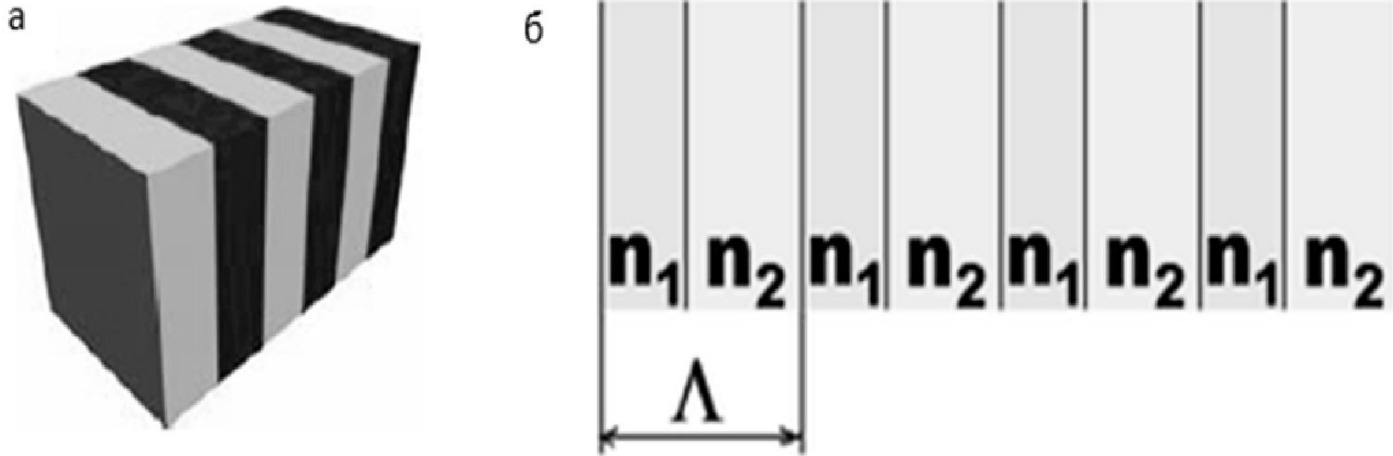
Основные результаты

работы:

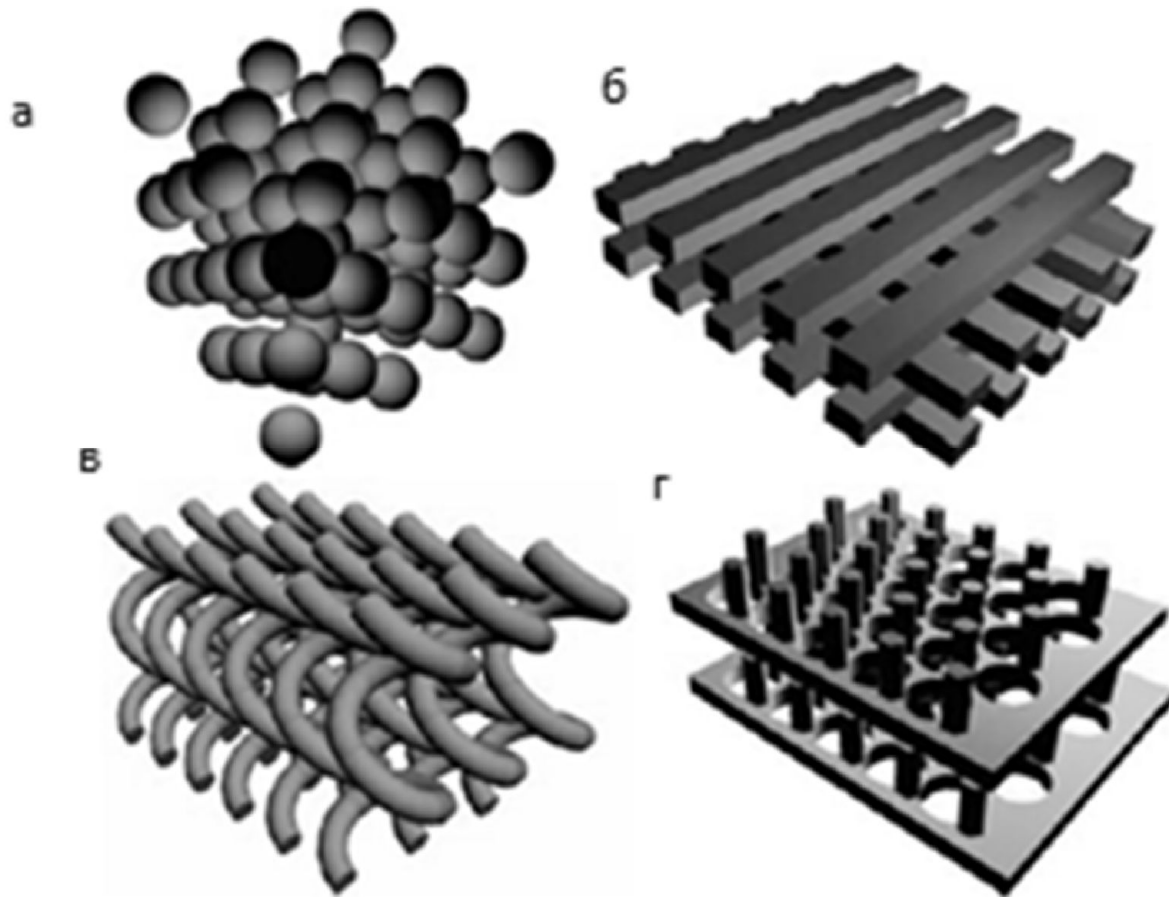
- Реализован метод матриц переноса и проверен в сравнении с экспериментальными данными
- Произведена серия экспериментов по получению пористого кремния
- Теоретически подобран фотонный кристалл с дефектом, являющийся фильтром.
- Получен образец фотонного кристалла и его спектр.
- Выявлено, что экспериментальный и теоретический спектр сходятся в заданном диапазоне длин волн и структура может быть использована в качестве оптического фильтра

Спасибо за внимание!

Одномерные фотонные кристаллы



В одномерных фотонных кристаллах коэффициент преломления периодически изменяется в одном пространственном направлении



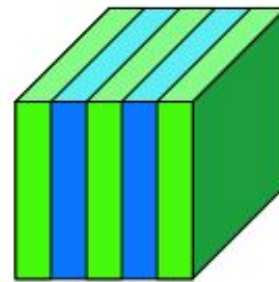
Примеры 3-D фотонных кристаллов[9]: 3-D фотонный кристалл с гранецентрированной решеткой и элементами в форме шаров (а); 3-D фотонный кристалл с решеткой в виде «поленницы» и элементами в форме прямоугольных шпал (б); спиралевидная решетка (в), решетка, подобная алмазной (г)

Классификация фотонных кристаллов

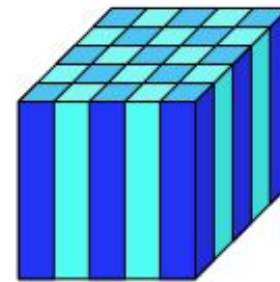
ФК делятся на три

типа:

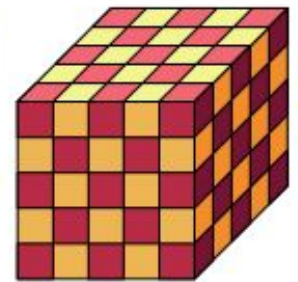
- Одномерные (1D)
- Двумерные (2D)
- Трехмерные (3D).



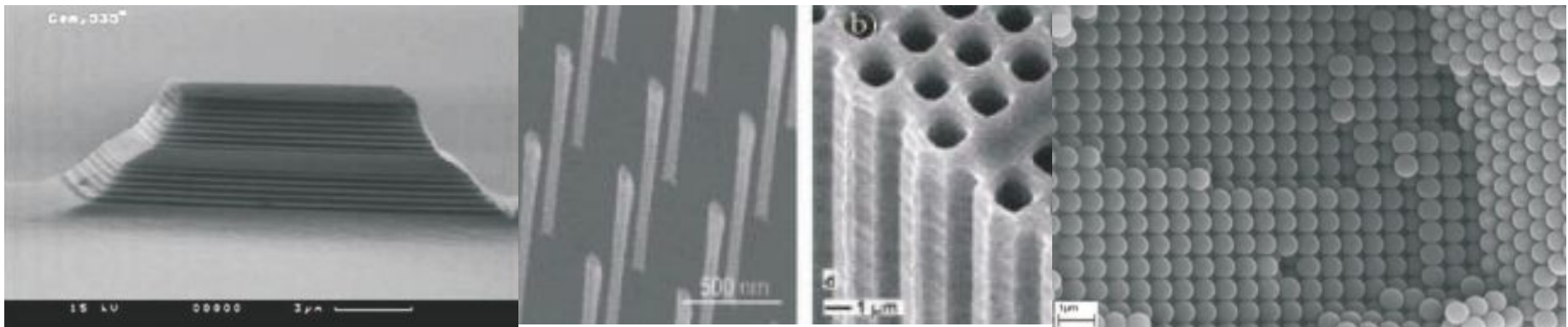
периодичность
в одном
направлении



периодичность
в двух
направлениях

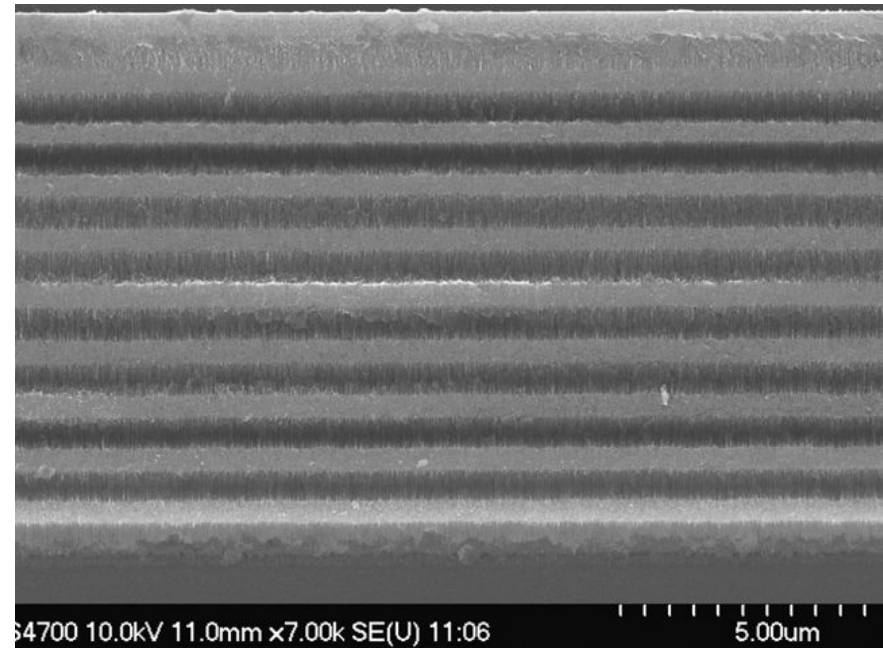


периодичность
в трех
направлениях



1D partially oxidized porous silicon photonic crystal reflector for mid-infrared application

Zhejin Wang, Jie Zhang, Shaohui Xu, Lianwei Wang, Zhishen Cao, Peng Zhan and Zhenlin Wang³



Для отработки метода была выбрана структура, полученная в Китае. Она представляет из себя фотонный кристалл на основе пористого кремния из десяти периодов, толщины слоев по 5 μm каждый. Изначально структура состояла из слоев с показателями преломления 1,365 и 2,3,. После окисления в течение 20 мин при 500 $^{\circ}\text{C}$ слой нГн почти полностью окислен в SiO_2 , поэтому показатели преломления незначительно упали до 1,285 и 2,055. При дальнейшем окислении в течение 30 мин при 500 $^{\circ}\text{C}$, показатели преломления достигают значений 1.5 и 1.2, контраст становится слишком мал (

Поперечное СЭМ-изображение фотонного кристалла на основе пористого кремния, 10 периодов

Подложка (0.01 $\Omega\text{ cm}$) (1 0 0)
Электролит из HF (40%) и спирта в объемном соотношении 1 : 1 (V/V)
Плотности тока $J_1 = 10\text{ mA cm}^{-2}$ и $J_2 = 70\text{ mA cm}^{-2}$

Метод матриц переноса

Уравнения
Максвелла

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

Материальные уравнения
случае

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mu_0 \mathbf{H}(\mathbf{r}, t),$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \varepsilon_r(\mathbf{r}) \varepsilon_0 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$$

$$\mathbf{j} = 0 \quad \mu = 1$$

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial \mu_0 \mathbf{H}(\mathbf{r}, t)}{\partial t},$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \frac{\partial \varepsilon_r(\mathbf{r}) \varepsilon_0 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$$

Далее нужно взять ротор от первого уравнения, в этом случае можно подставить в него

второе

$$\Delta \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \frac{\varepsilon_r(\mathbf{r})}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = 0.$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0(\mathbf{r}) e^{i(\mathbf{k}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{r} + \omega \cdot t)} = \mathbf{E}_0(\mathbf{r}) e^{i(\mathbf{k}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{r})} e^{i(\omega \cdot t)}$$

$$\nabla^2 \mathbf{E}_0(\mathbf{r}) + \varepsilon_r(\mathbf{r}) \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{E}_0(\mathbf{r}) = 0$$

$$\frac{\partial^2 E_z(x)}{\partial x^2} + \varepsilon_r(x) \frac{\omega^2}{c^2} E_z(x) = 0$$

Уравнение

Гельмгольца

уравнение Гельмгольца для конечной 1-D
многослойной структуры

$$E_j(x) = A_j e^{j \cdot n_j \cdot k \cdot x_j} + B_j e^{-j \cdot n_j \cdot k \cdot x_j}$$

$$E_j(x_j) = E_{j+1}(x_j) \quad \text{Условия}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} E_j(x_j) = \frac{\partial}{\partial x} E_{j+1}(x_j) \quad \text{СШИВКИ}$$

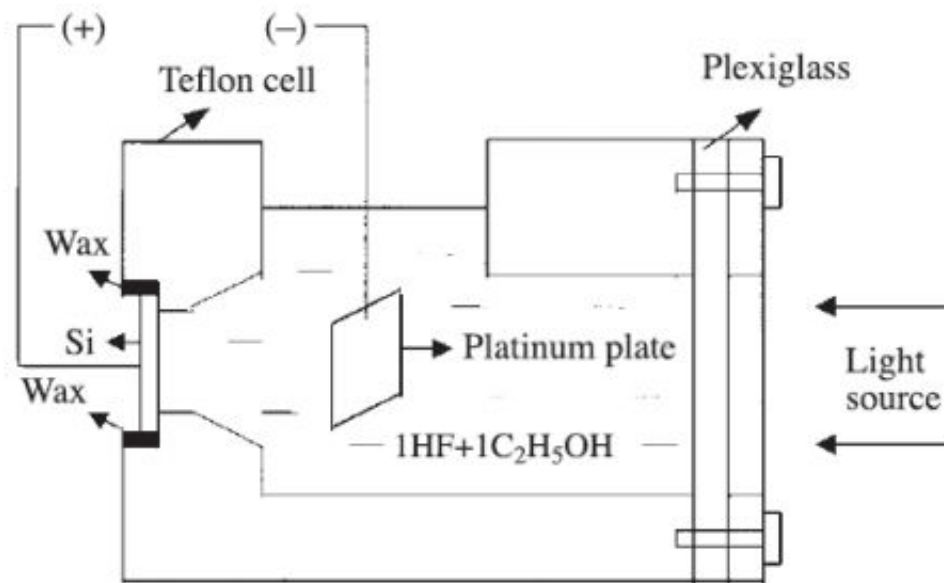
$$A_j e^{j \cdot n_j \cdot k \cdot x_j} + B_j e^{-j \cdot n_j \cdot k \cdot x_j} = A_{j+1} e^{j \cdot n_{j+1} \cdot k \cdot x_j} + B_{j+1} e^{-j \cdot n_{j+1} \cdot k \cdot x_j}$$

$$j \cdot n_j \cdot k \cdot A_j e^{j \cdot n_j \cdot k \cdot x_j} - j \cdot n_j \cdot k \cdot B_j e^{-j \cdot n_j \cdot k \cdot x_j} = j \cdot n_{j+1} \cdot k \cdot A_{j+1} e^{j \cdot n_{j+1} \cdot k \cdot x_j} - j \cdot n_{j+1} \cdot k \cdot B_{j+1} e^{-j \cdot n_{j+1} \cdot k \cdot x_j}$$

Получение пористого кремния

Электрохимическое травление

Анодом служит сама кремниевая пластина, которая помещается в электрохимическую ячейку из фторопласта. Основой электролита является плавиковая кислота (HF) с различными органическими добавками, которые хорошо смачивают поверхность кремния. В качестве катода используется электрод, материал которого не взаимодействует с плавиковой кислотой

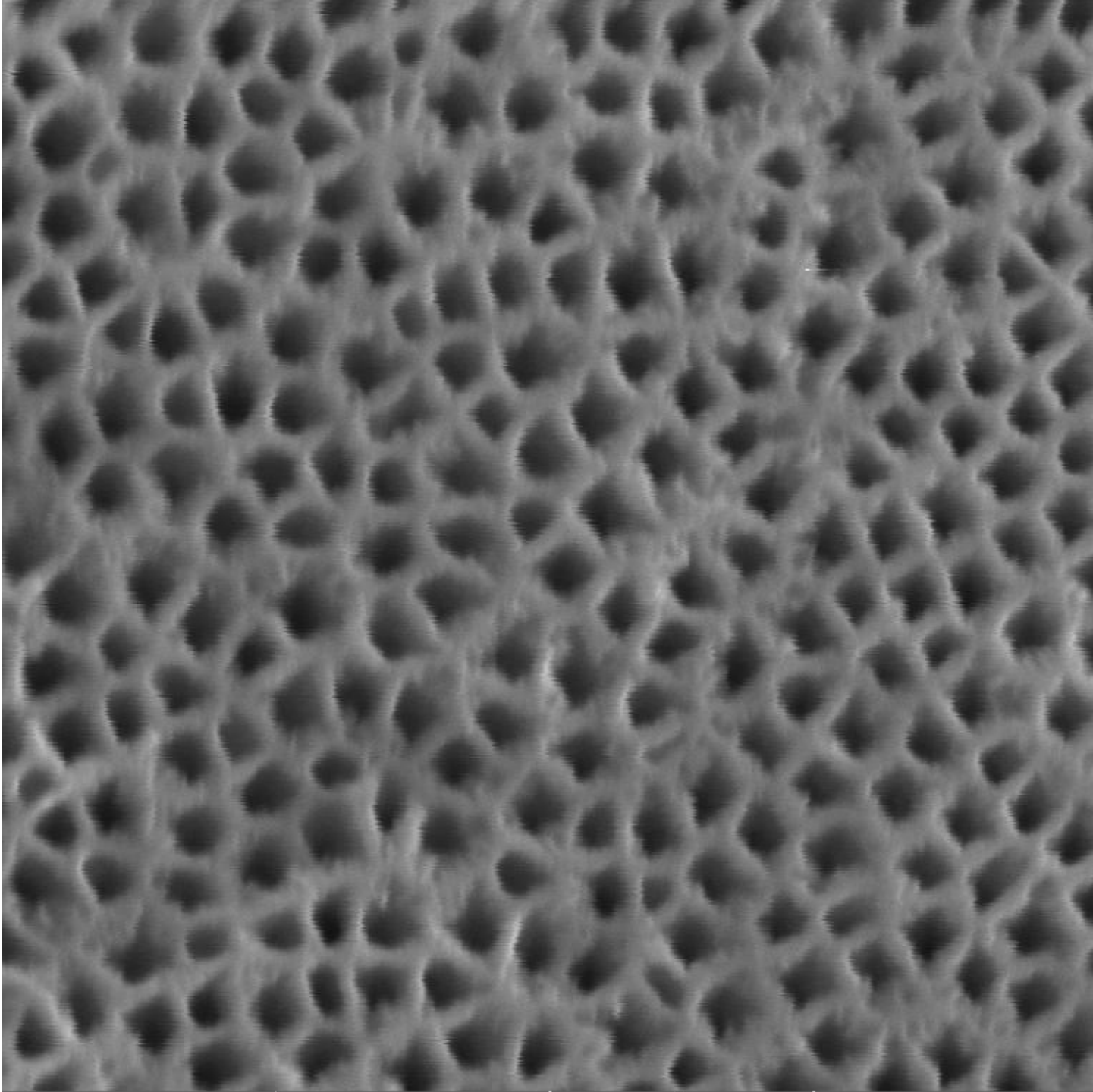


Выбор режима получения пористого кремния

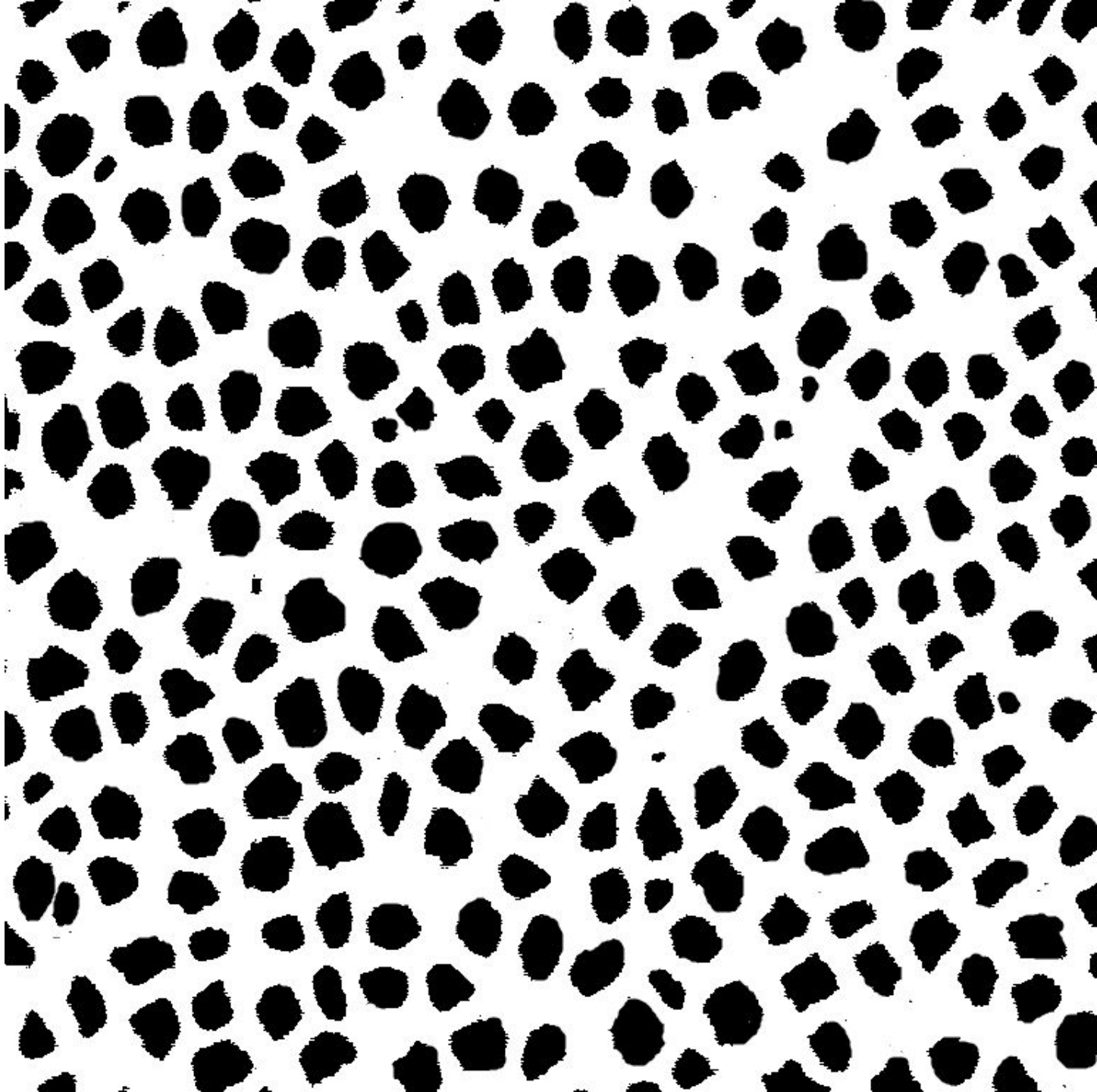
Для получения 1D фотонных кристаллов важно, чтобы структура в поперечном направлении была однородна для необходимых электромагнитных волн. То есть, в случае пористого кремния необходимо, чтобы размер пор был на порядок-два меньше, чем выбранный диапазон длин волн света.

Установлено, что толщина пленки пористого кремния практически линейно зависит от времени травления и может меняться от долей до сотен микрометров. Структура пористого слоя определяется плотностью тока, концентрацией HF в электролите и характером легирования кремниевой подложки. При прочих равных условиях размер пор зависит от плотности тока.

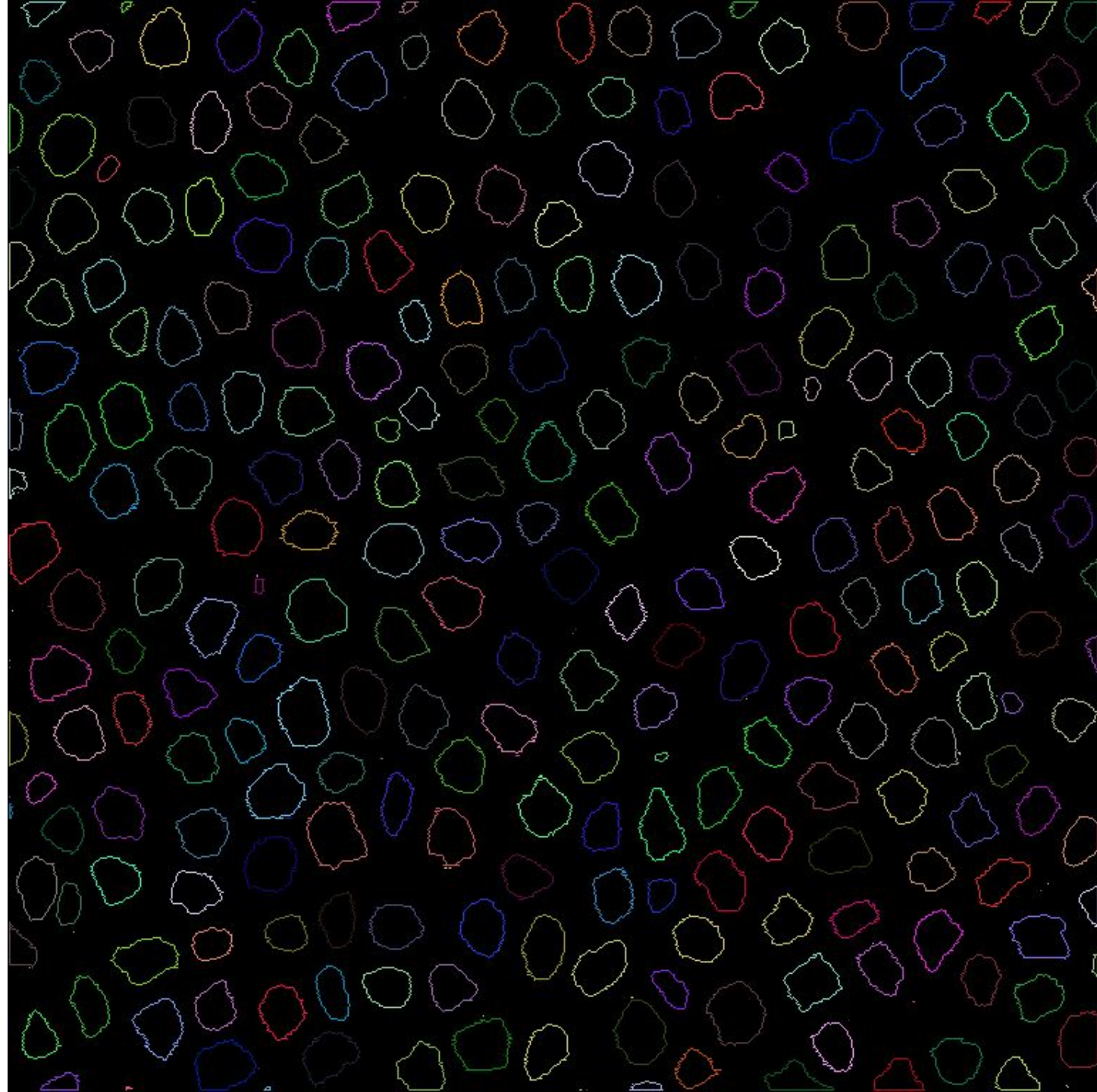
Изображение с электронного микроскопа



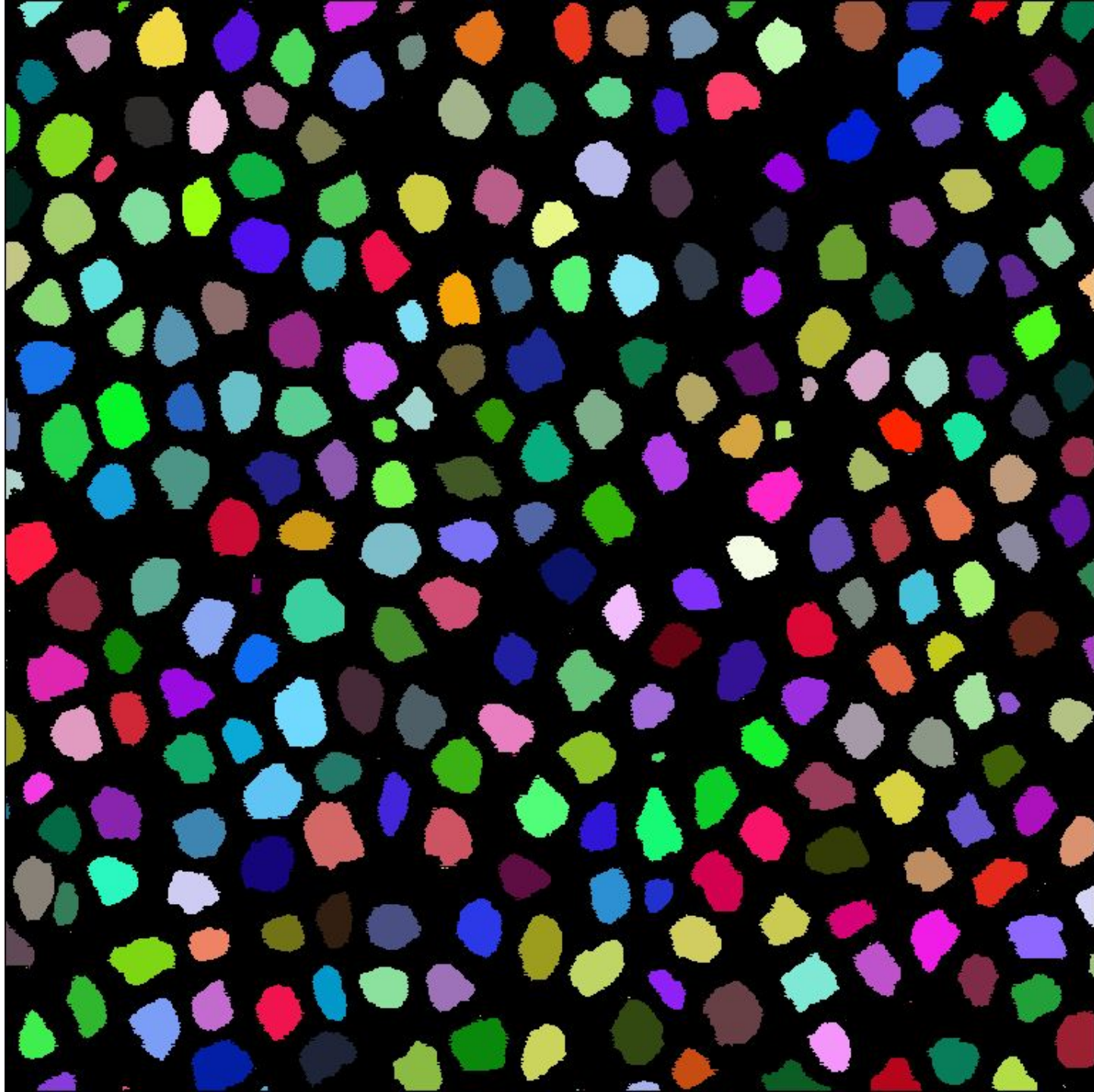
Повышение контраста



Определение замкнутых областей



Определение площади



Получение образцов пористого кремния на пластинах Si (100) КЭС 0.007 – 0.015 в водном растворе плавиковой КИСЛОТЫ.

Образец	Подложка	Электролит	Ток в цепи, А	Время травления, мин.	Толщина пористого слоя, мкм	Средний диаметр пор, нм	Корень из дисперсии размера пор, нм
1	Si(100)	$\text{HF:H}_2\text{O:}$ $\text{CH}_3\text{CH(OH)CH}_3 =$ 1:3:1	4	2	10.67	40	15
2			2	2	6.80	52	10
3			3	2	8.37	74	18
4			2	4	13.49	48	10
5			1	2	5	9	7

- Подобрать режимы эксперимента для получения пористого кремния с большим и маленьким показателем преломления, для того, чтобы контраст двух показателей преломления был $\Delta n \geq 4$ точно велик
- Подобрать с помощью метода матрицы переноса толщины и количество слоев для изготовления фотонного кристалла с ярко выраженной запрещенной зоной
- Получить спроектированный фотонный кристалл и измерить его спектр отражения

