

# 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.



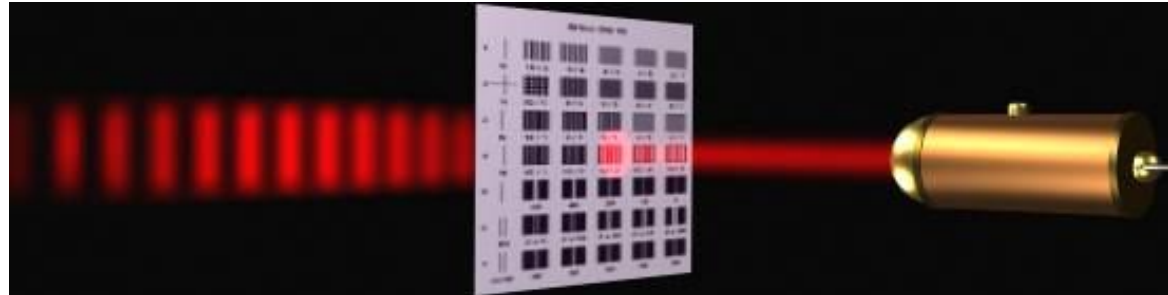
# Фотонные кристаллы

Структуры, характеризующиеся периодическим изменением диэлектрической проницаемости в пространстве.

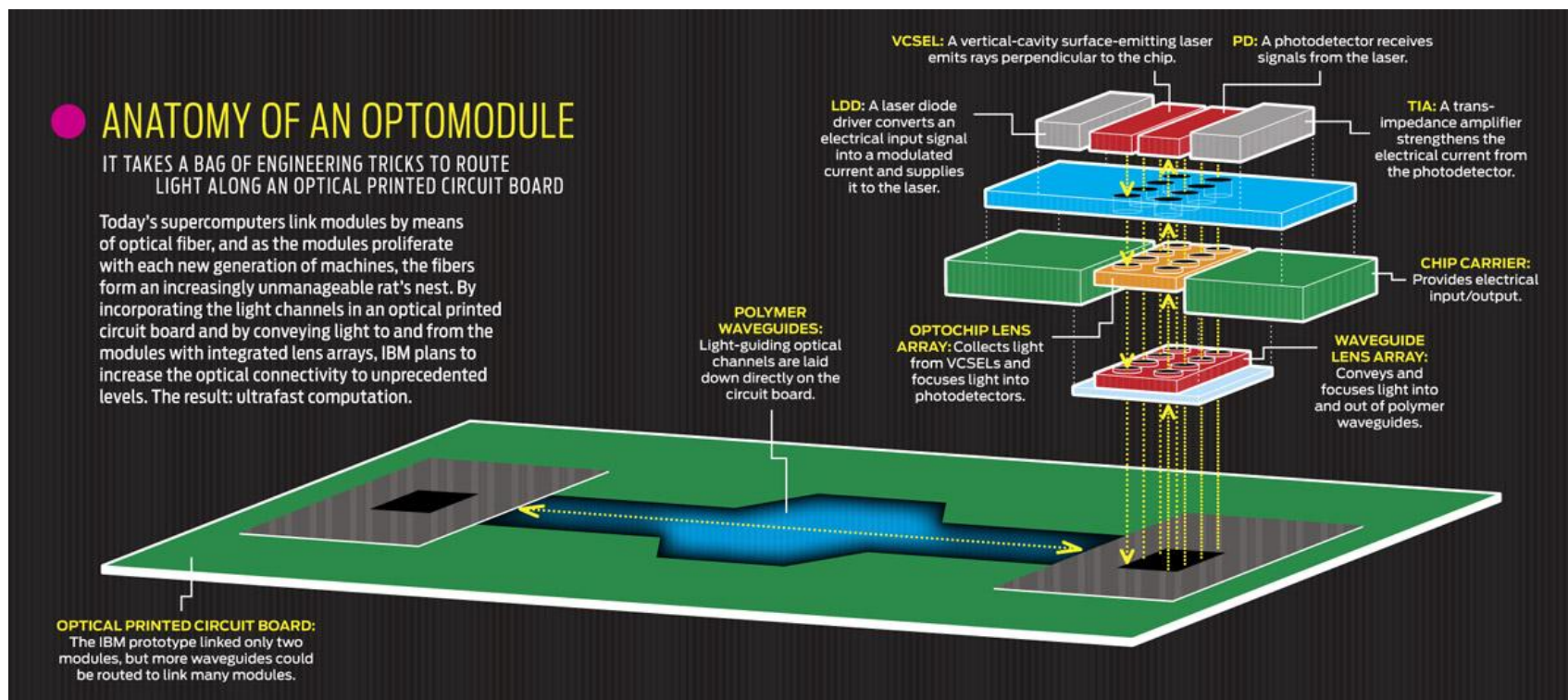


# Применение

- 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:

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

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

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

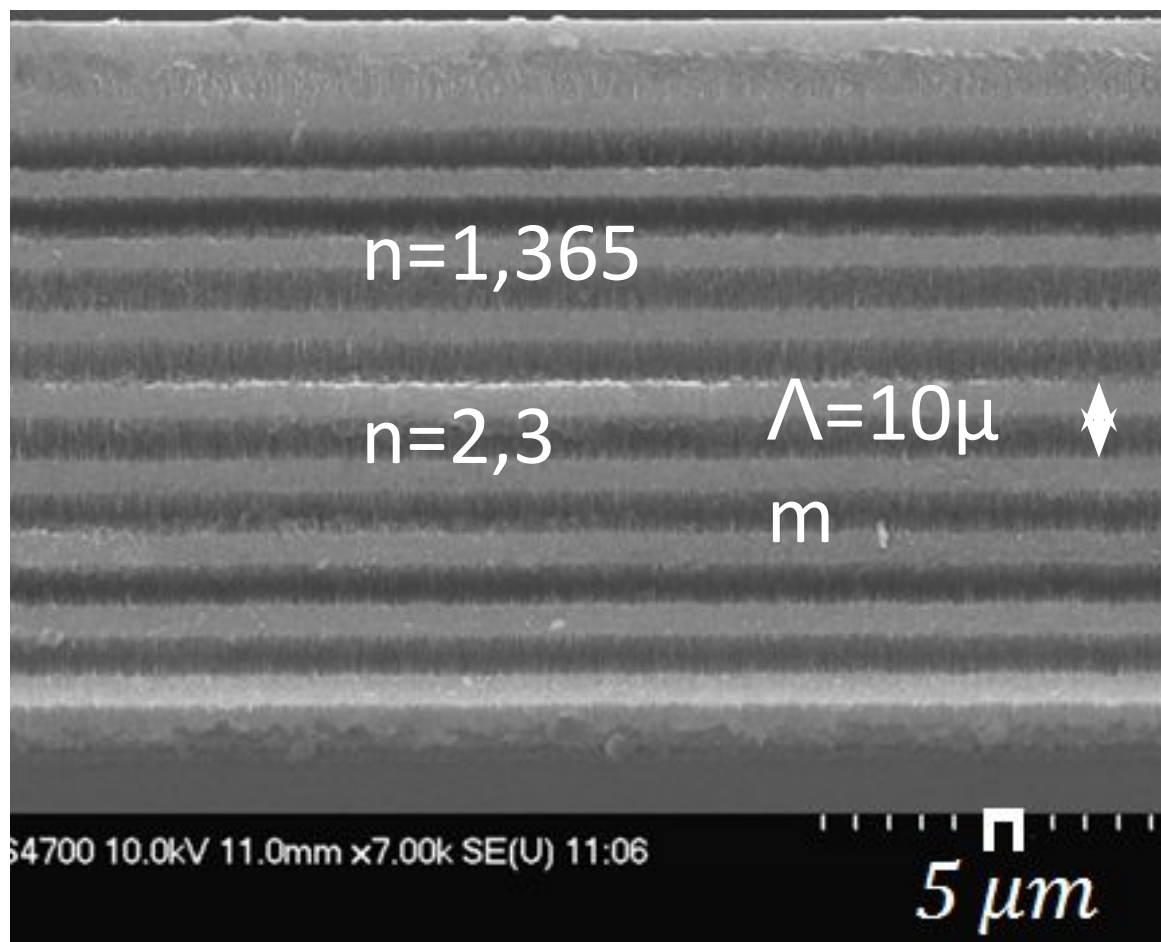
$$A_j e^{j \cdot n_j \cdot k \cdot x_j} + B_j e^{-j \cdot n_j \cdot k \cdot x_j} = A_{j+1} e^{j \cdot n_{j+1} \cdot k \cdot x_j} + B_{j+1} e^{-j \cdot n_{j+1} \cdot k \cdot x_j}$$

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

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

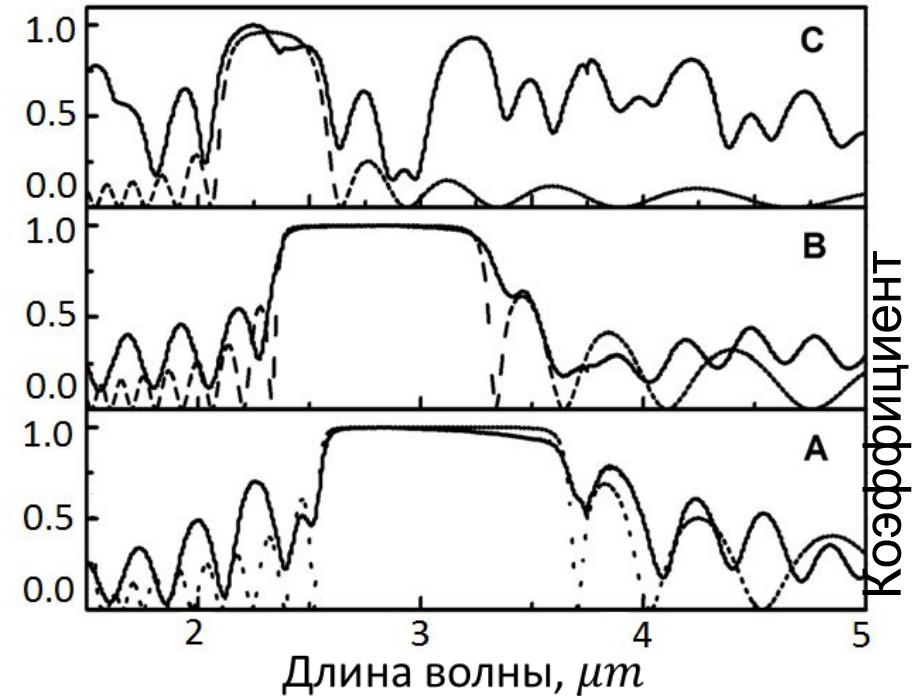


# Проверка метода

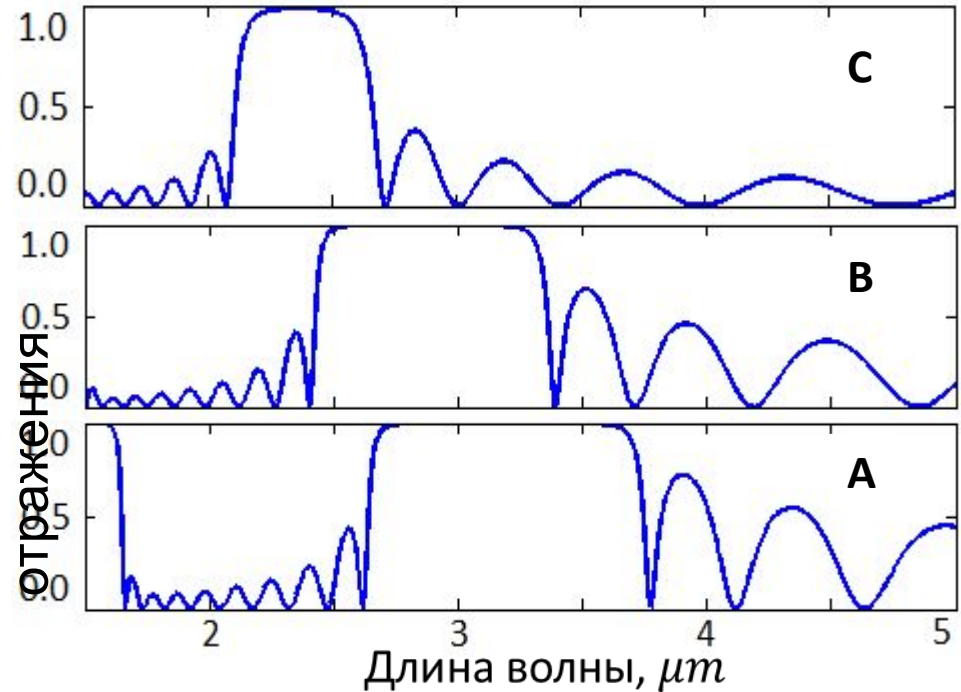


Поперечное СЭМ-изображение фотонного кристалла на основе пористого кремния, 10 периодов

# Проверка метода



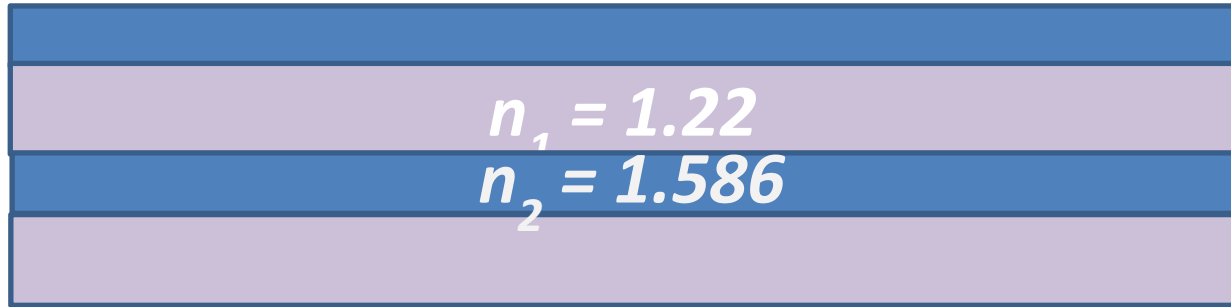
Спектры отражения структуры. (а) без окисления, (б) с окислением 20 мин, с окислением 30 мин. Теоретические результаты показаны пунктирными линиями.



Аналогичные спектры, рассчитанные в настоящей работе.

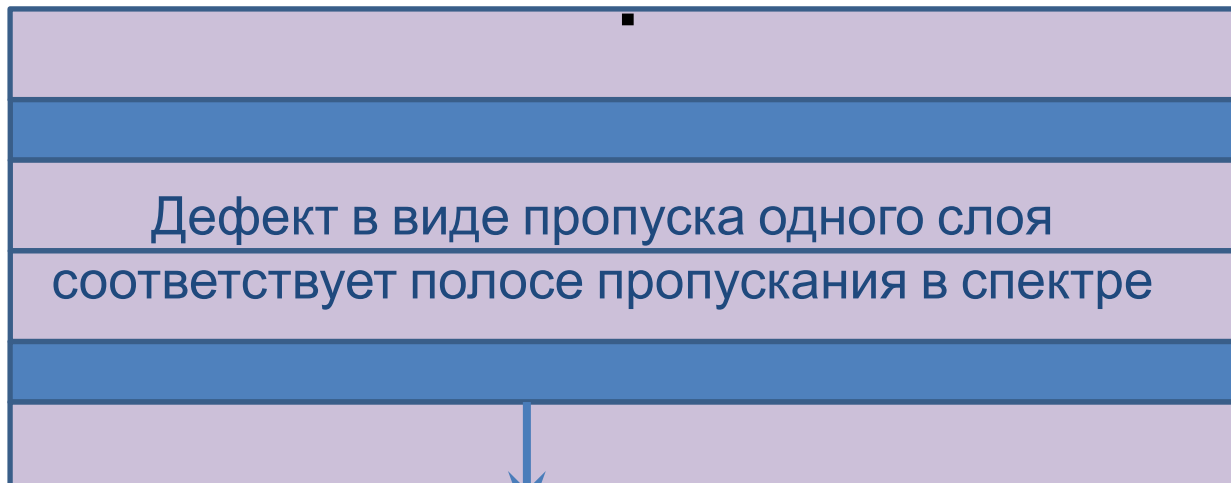
# Подбор структуры

50  
слоев

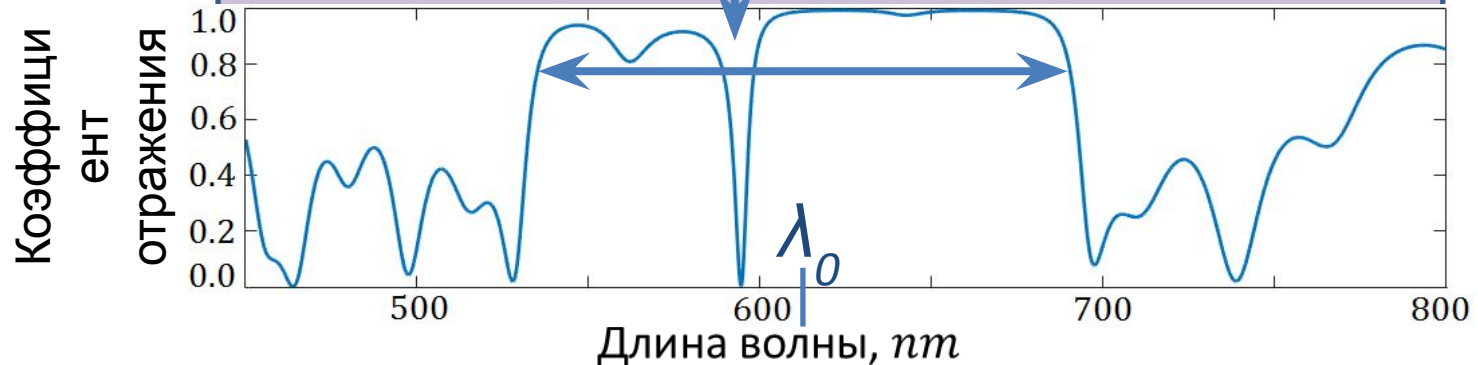


$$\frac{\lambda}{4} = 155 \text{ nm}$$

⋮

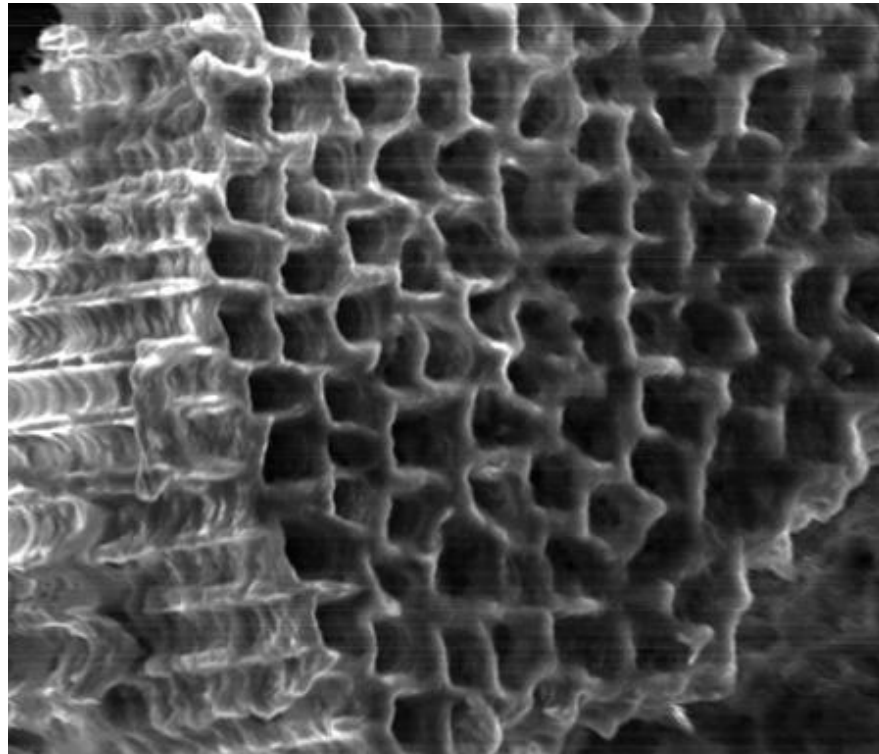


$$\lambda_0 = 620 \text{ nm}$$

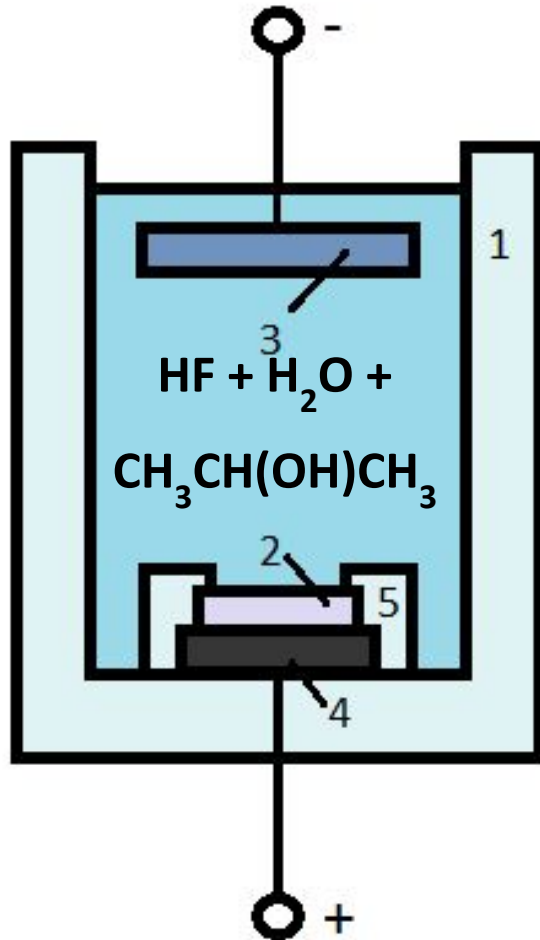


# Пористый кремний и фотонные кристаллы на его основе

Пористый кремний – кремний, имеющий пористую структуру



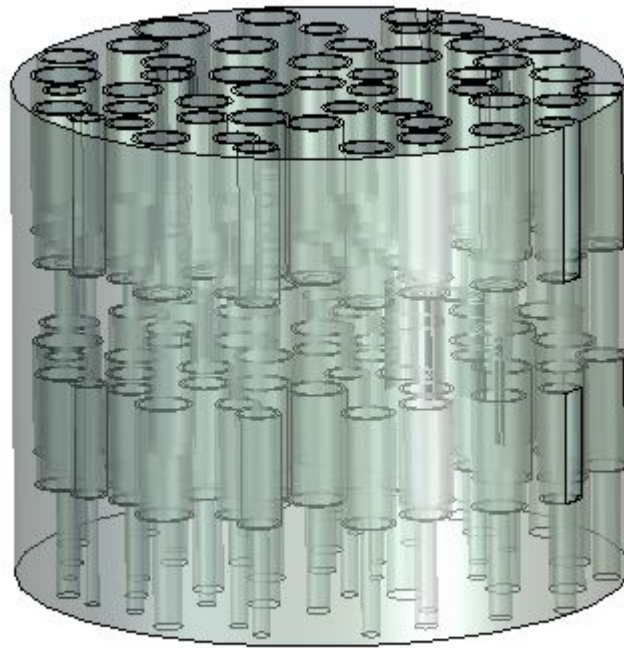
# Методика эксперимента электрохимического травления



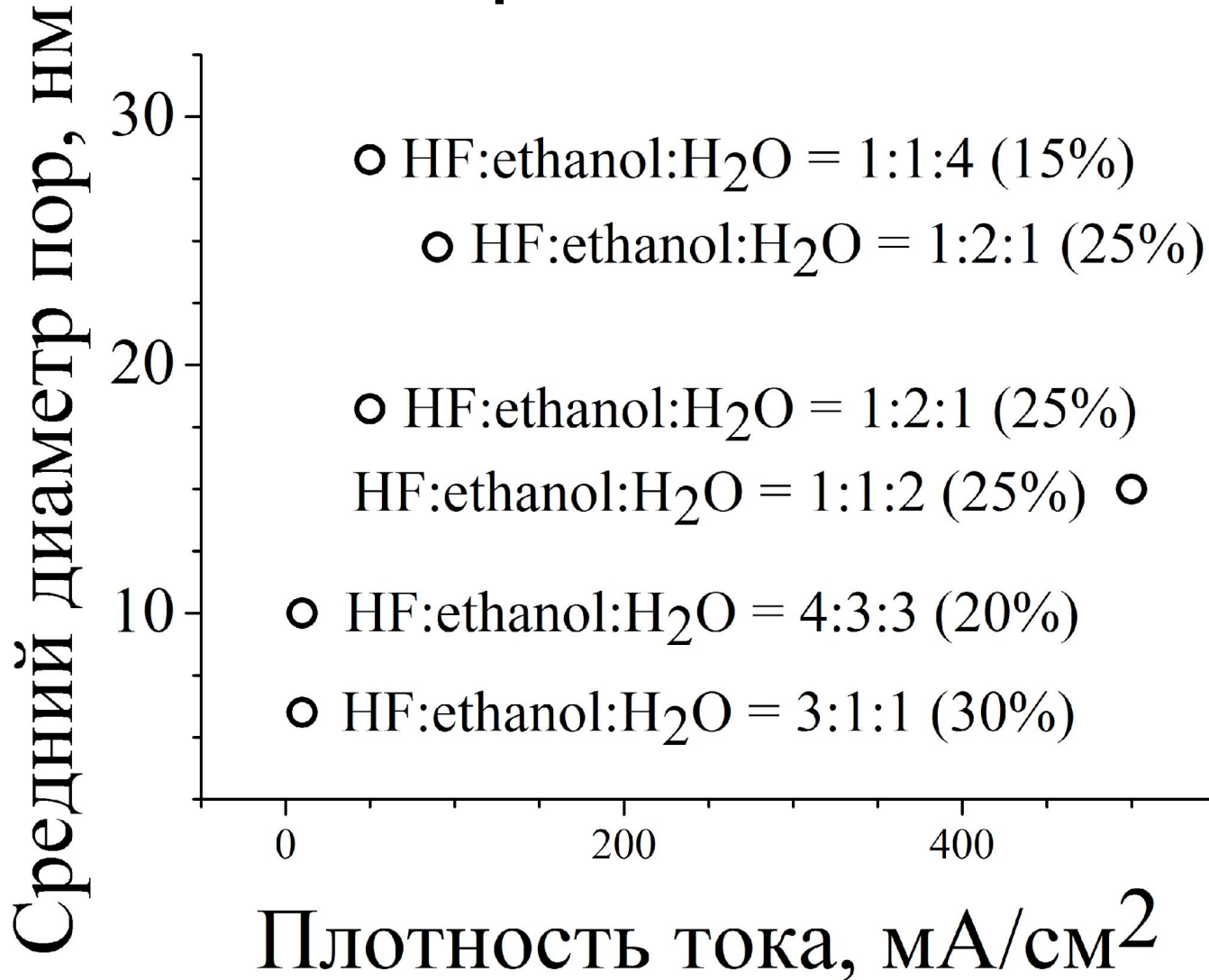
1 – фторпластовая ячейка, 2 – кремниевая пластина,  
3 – металлический электрод, 4 – графит, 5 –

уплотнитель

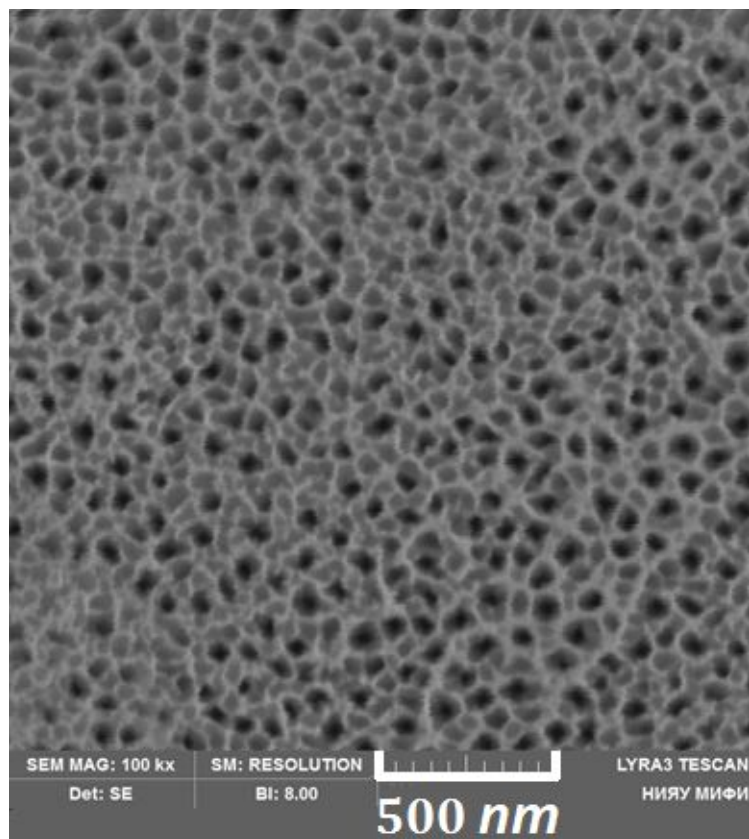
В рамках одного процесса травления, варьируя плотность тока, можно получать многослойные структуры, каждый слой которых будет обладать необходимым эффективным показателем преломления



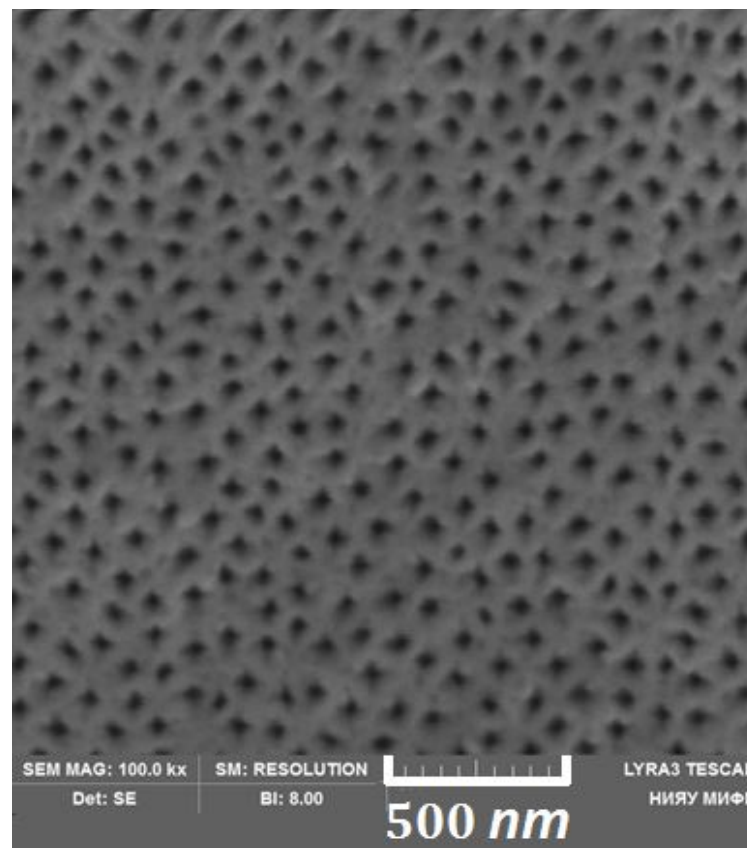
# Режимы получения пористого кремния



Образец ПК-1

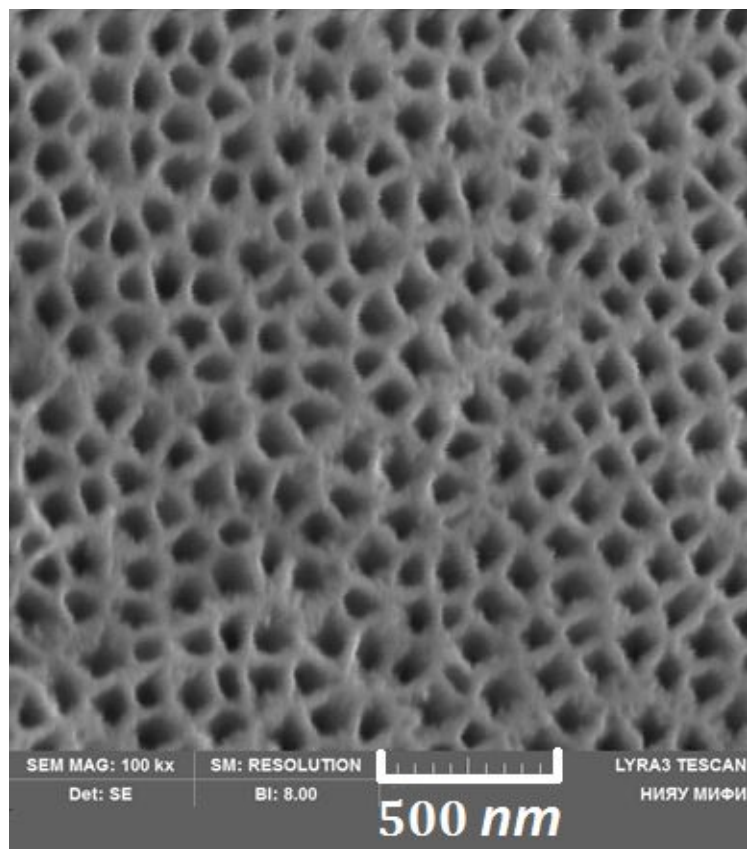


Образец ПК-2

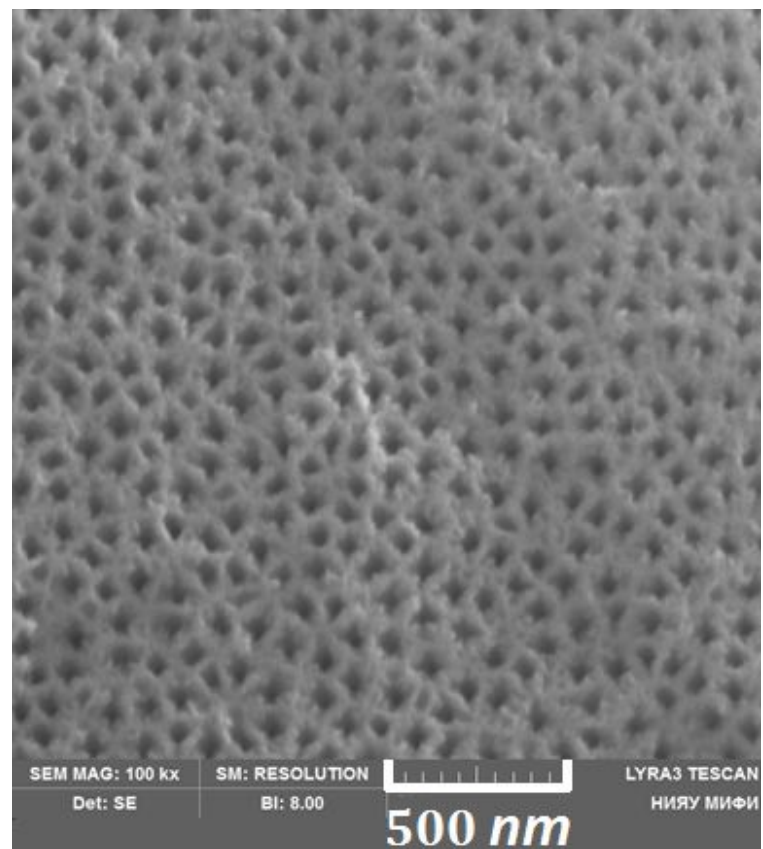




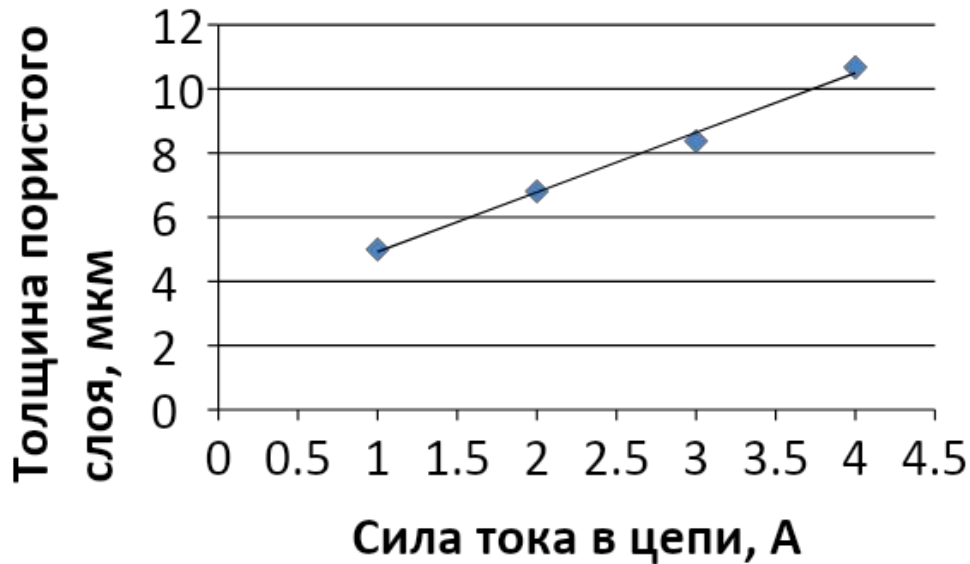
Образец ПК-3



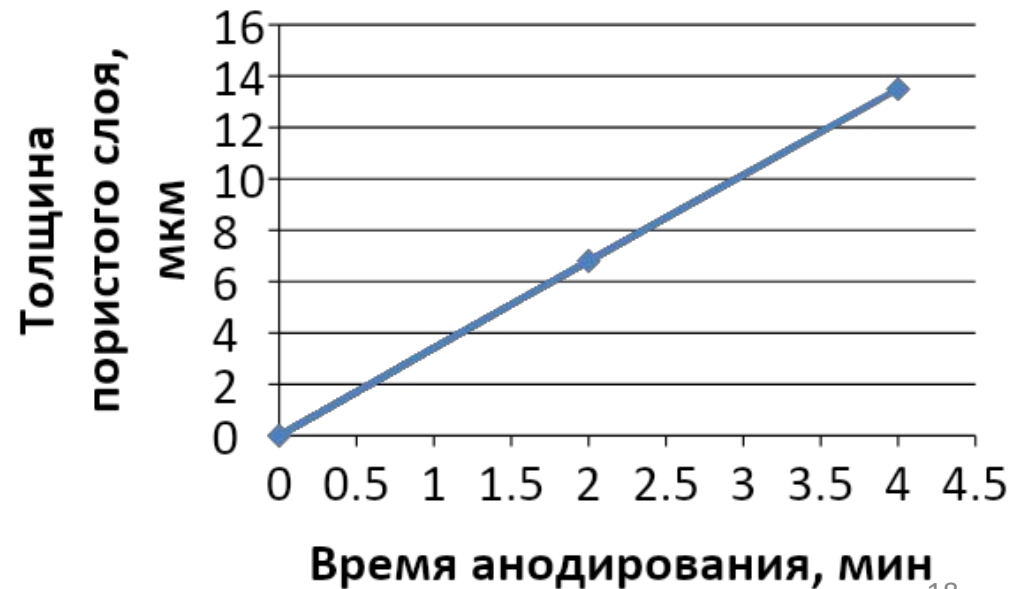
Образец ПК-4



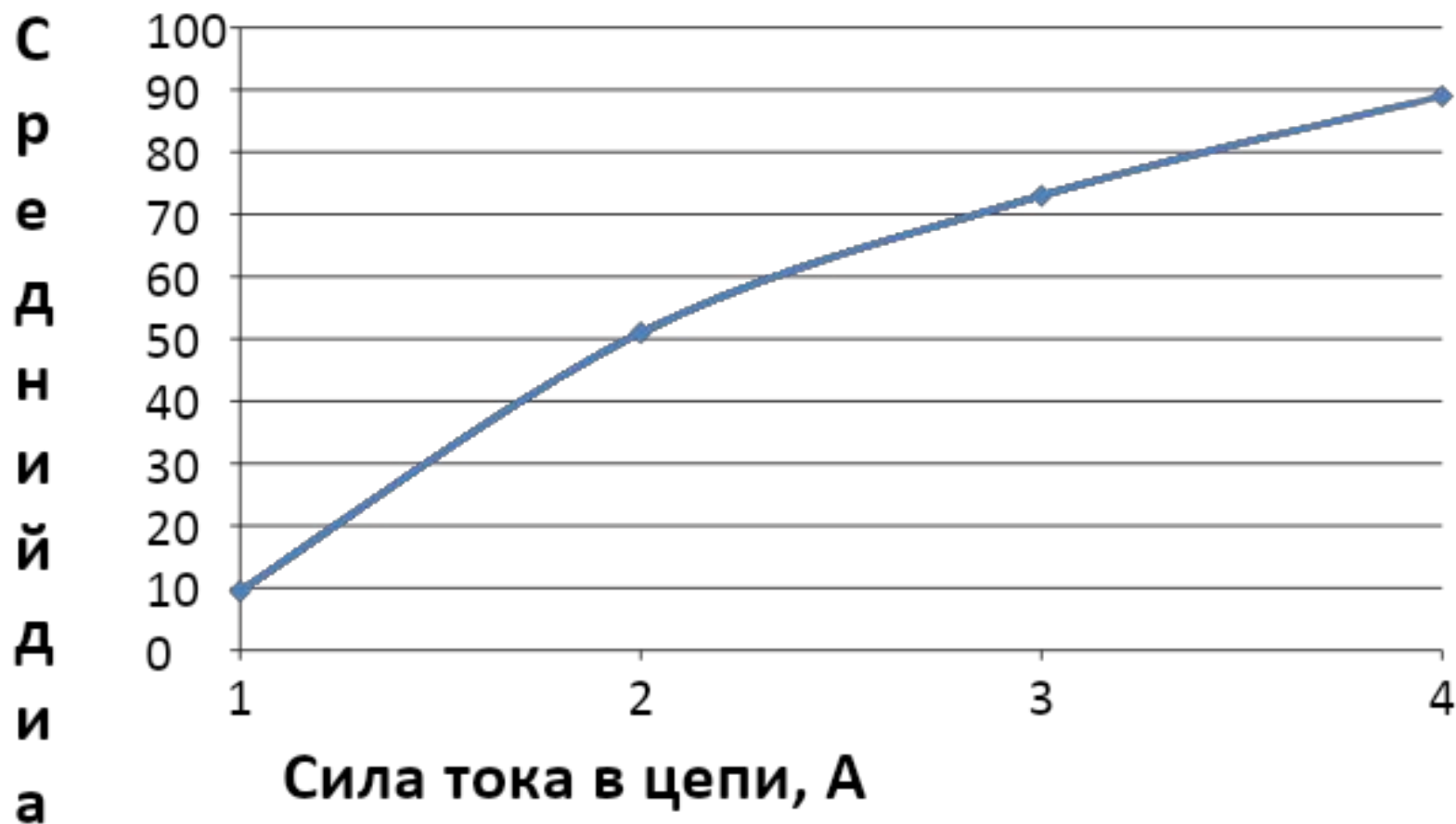
Зависимость  
толщины  
пористого слоя от  
силы тока  
анодирования.



Зависимость  
толщины  
пористого слоя от  
времени  
анодирования.



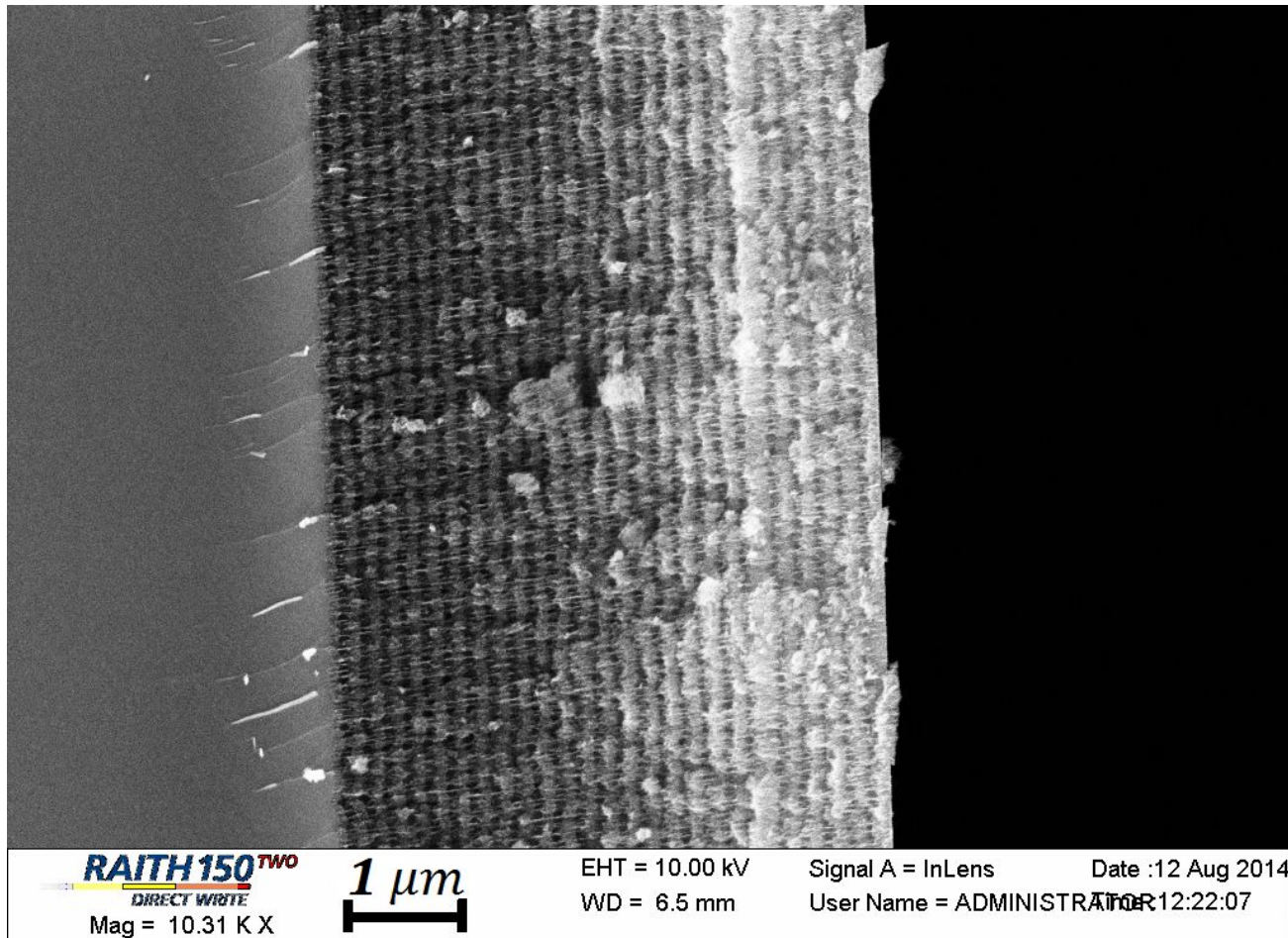
# Зависимость среднего размера пор от силы тока анодирования.



# Результат

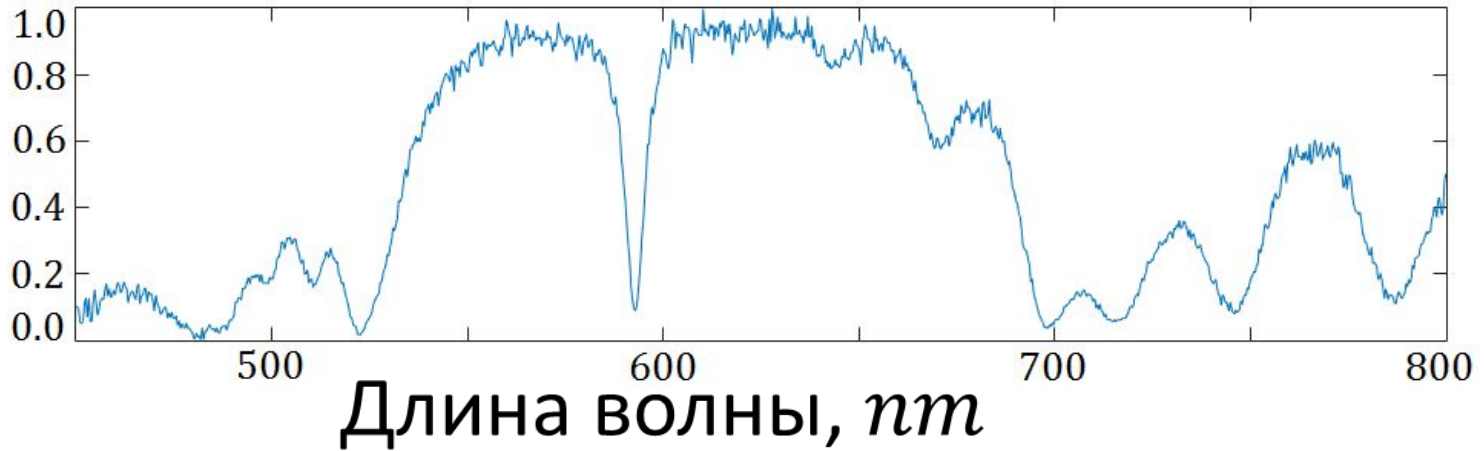
эксперимента  
50 слоев,  $n_1 = 1.22$ ,  $n_2 = 1.586$   
 $\frac{\lambda}{4} = 155 \text{ nm}$

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

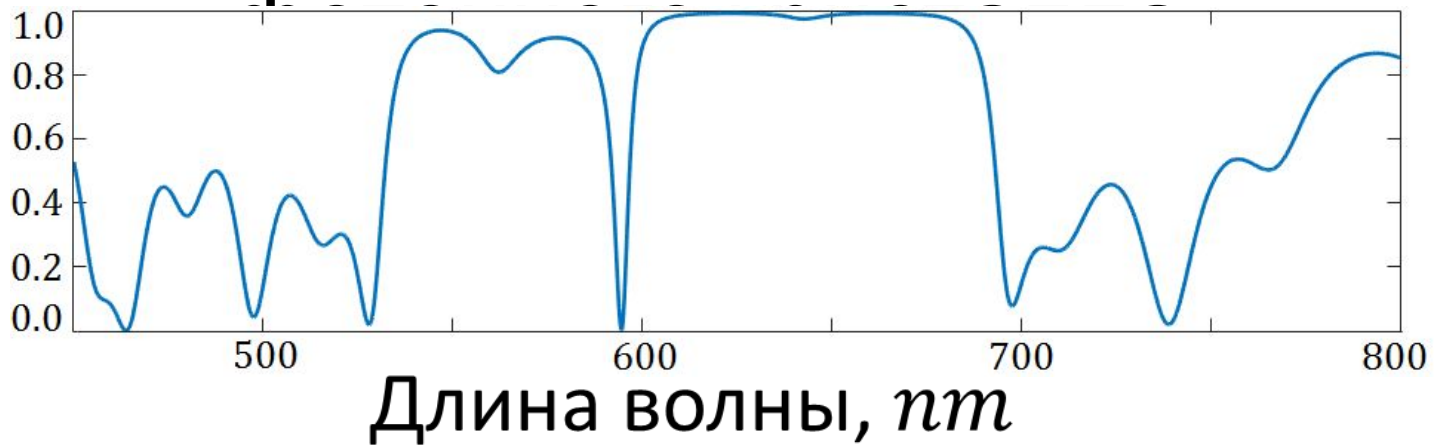


# Результат

Коэффициент отражения



## Измеренный спектр отражения



## Рассчитанный спектр отражения

# Заключение

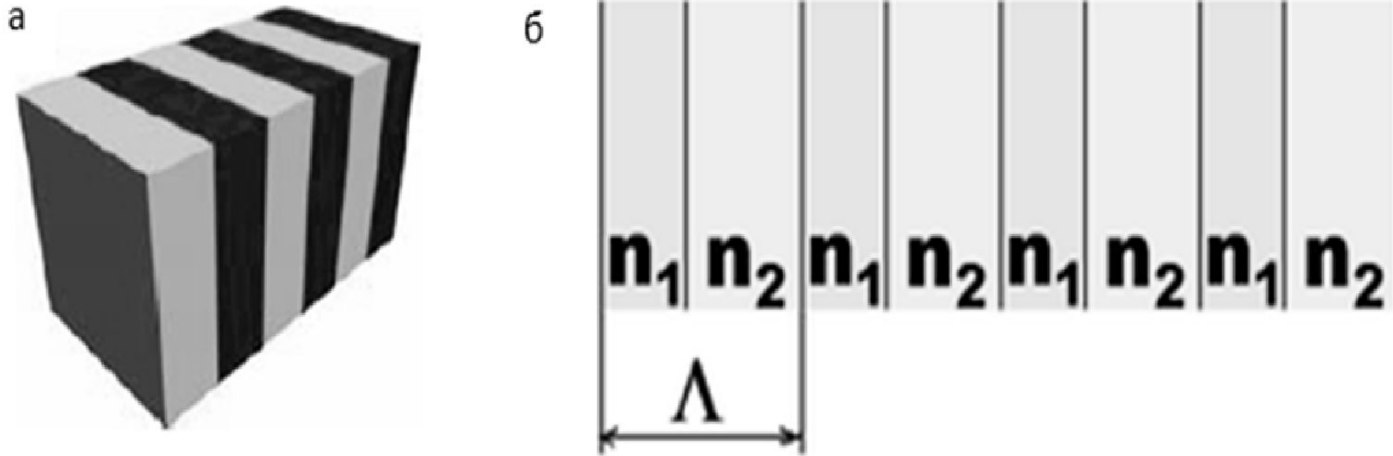
## Основные результаты

### 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

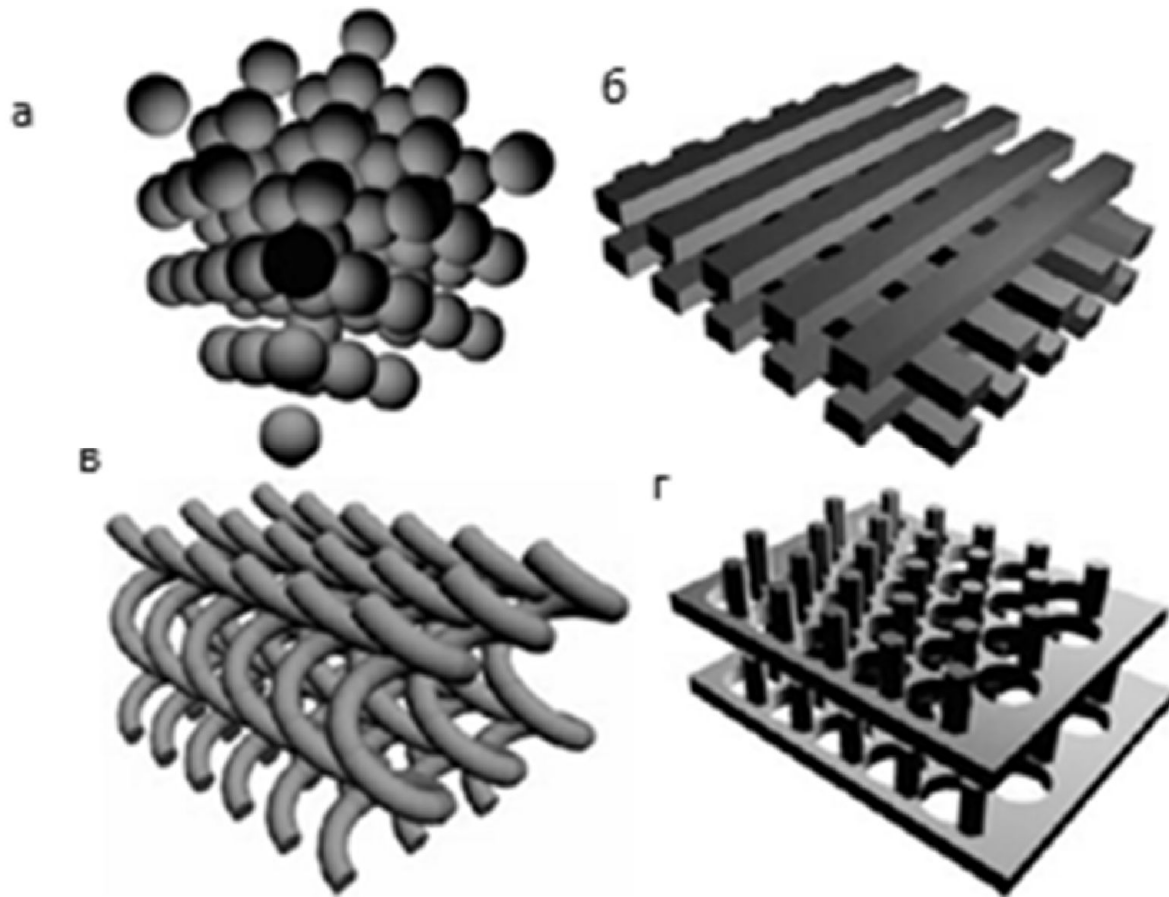
**Спасибо за внимание!**

# Одномерные фотонные кристаллы



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





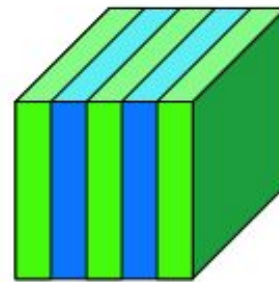
Примеры 3-D фотонных кристаллов[9]: 3-D фотонный кристалл с гранецентрированной решеткой и элементами в форме шаров (а); 3-D фотонный кристалл с решеткой в виде «поленницы» и элементами в форме прямоугольных шпал (б); спиралевидная решетка (в), решетка, подобная алмазной (г)

# Классификация фотонных кристаллов

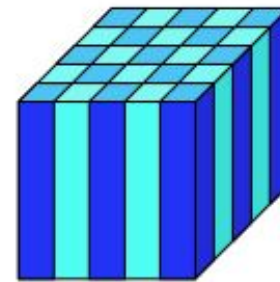
ФК делятся на три

типа:

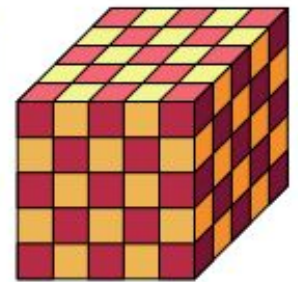
- Одномерные (1D)
- Двумерные (2D)
- Трехмерные (3D).



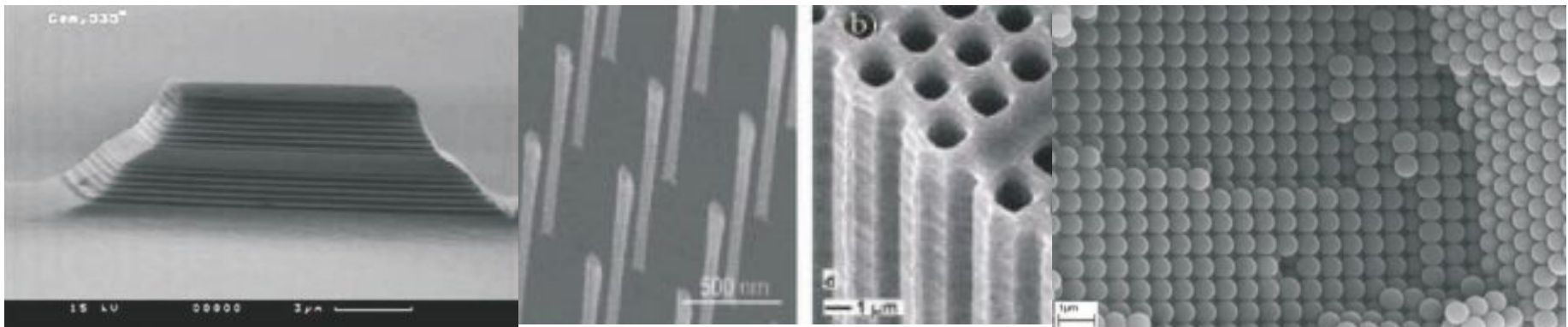
периодичность  
в одном  
направлении



периодичность  
в двух  
направлениях

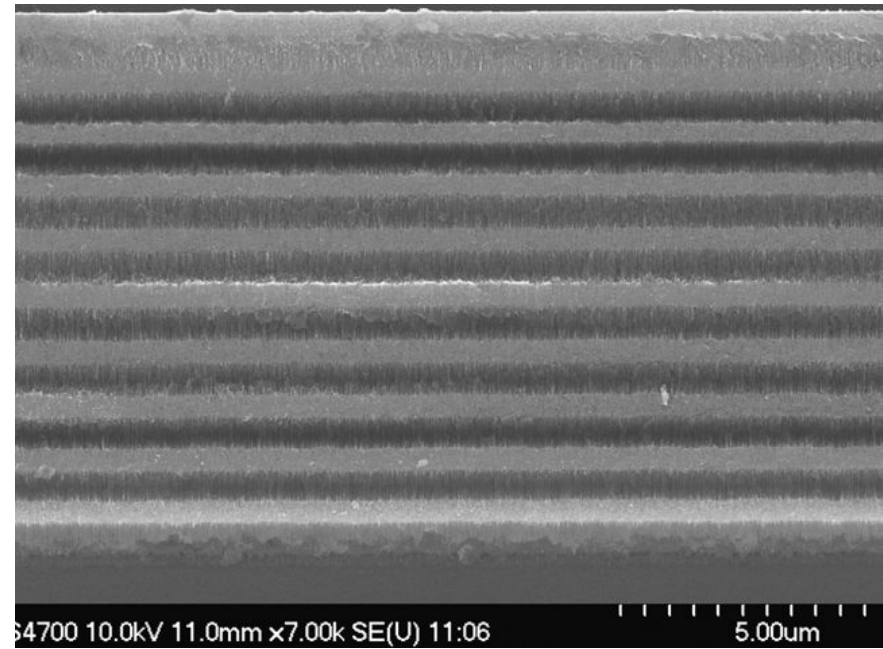


периодичность  
в трех  
направлениях



# 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 Wang<sup>3</sup>



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 5μm каждый. Изначально структура состояла из слоев с показателями преломления 1,365 и 2,3,. После окисления в течение 20 мин при 500 °C слой нГн почти полностью окислен в SiO<sub>2</sub>, поэтому показатели преломления незначительно упали до 1,285 и 2,055. При дальнейшем окислении в течение 30 мин при 500 °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 Ω cm) (1 0 0)  
Электролит из HF (40%) и спирта в объемном соотношении 1 : 1 (V/V)  
Плотности тока J1 = 10 mA cm<sup>-2</sup> и J2 = 70 mA cm<sup>-2</sup>

# 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

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

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

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

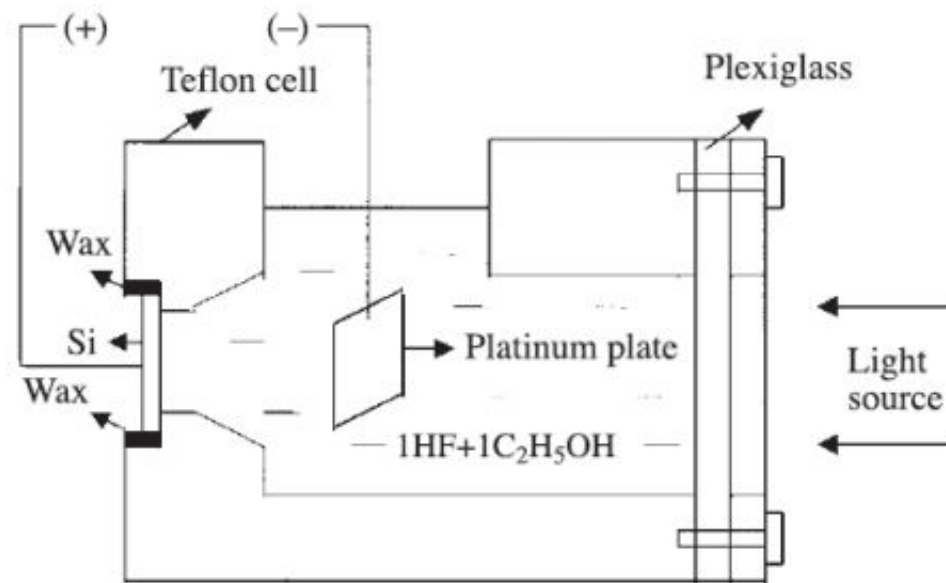
$$A_j e^{j \cdot n_j \cdot k \cdot x_j} + B_j e^{-j \cdot n_j \cdot k \cdot x_j} = A_{j+1} e^{j \cdot n_{j+1} \cdot k \cdot x_j} + B_{j+1} e^{-j \cdot n_{j+1} \cdot k \cdot x_j}$$

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

# 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

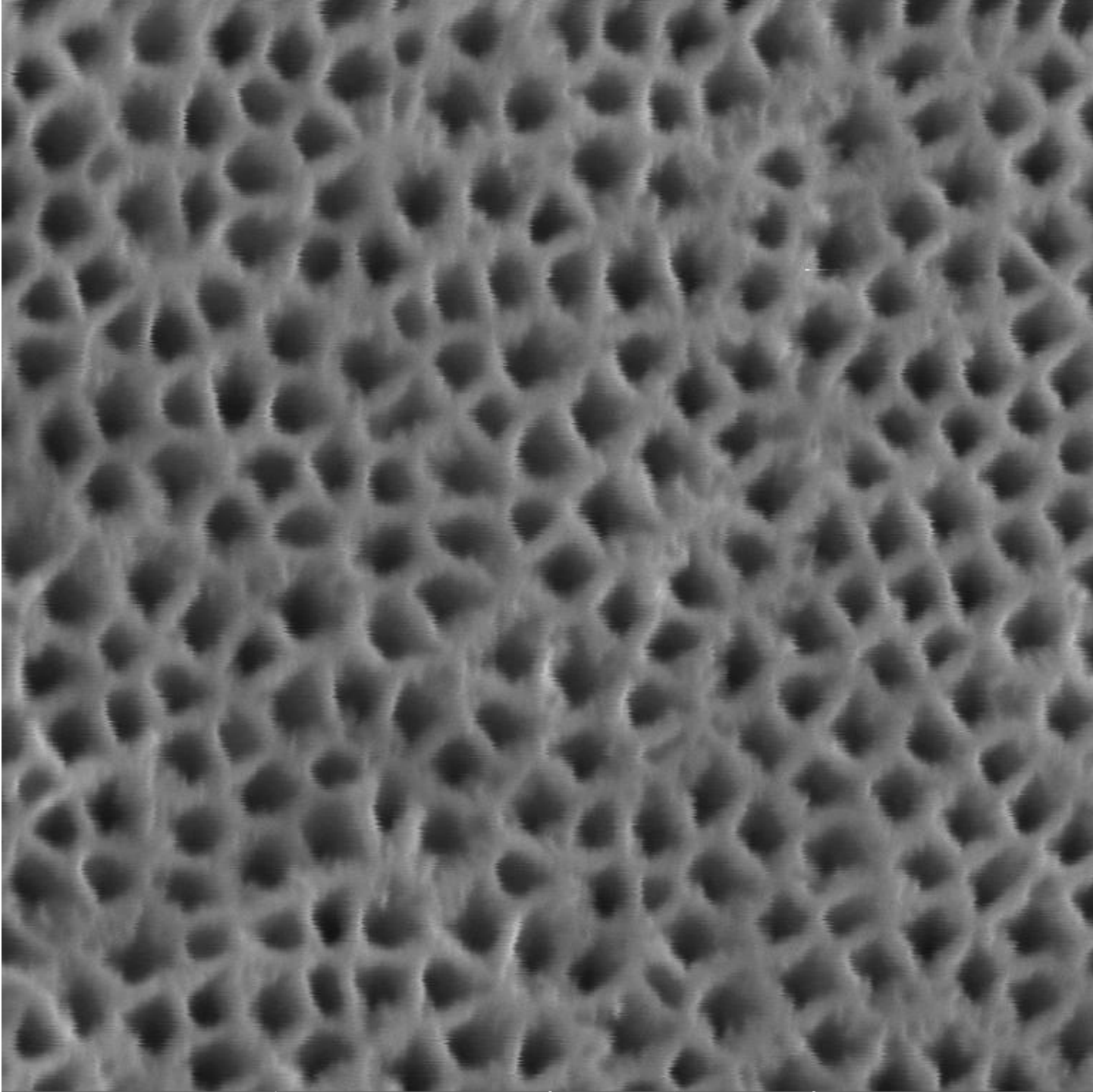


# Выбор режима получения пористого кремния

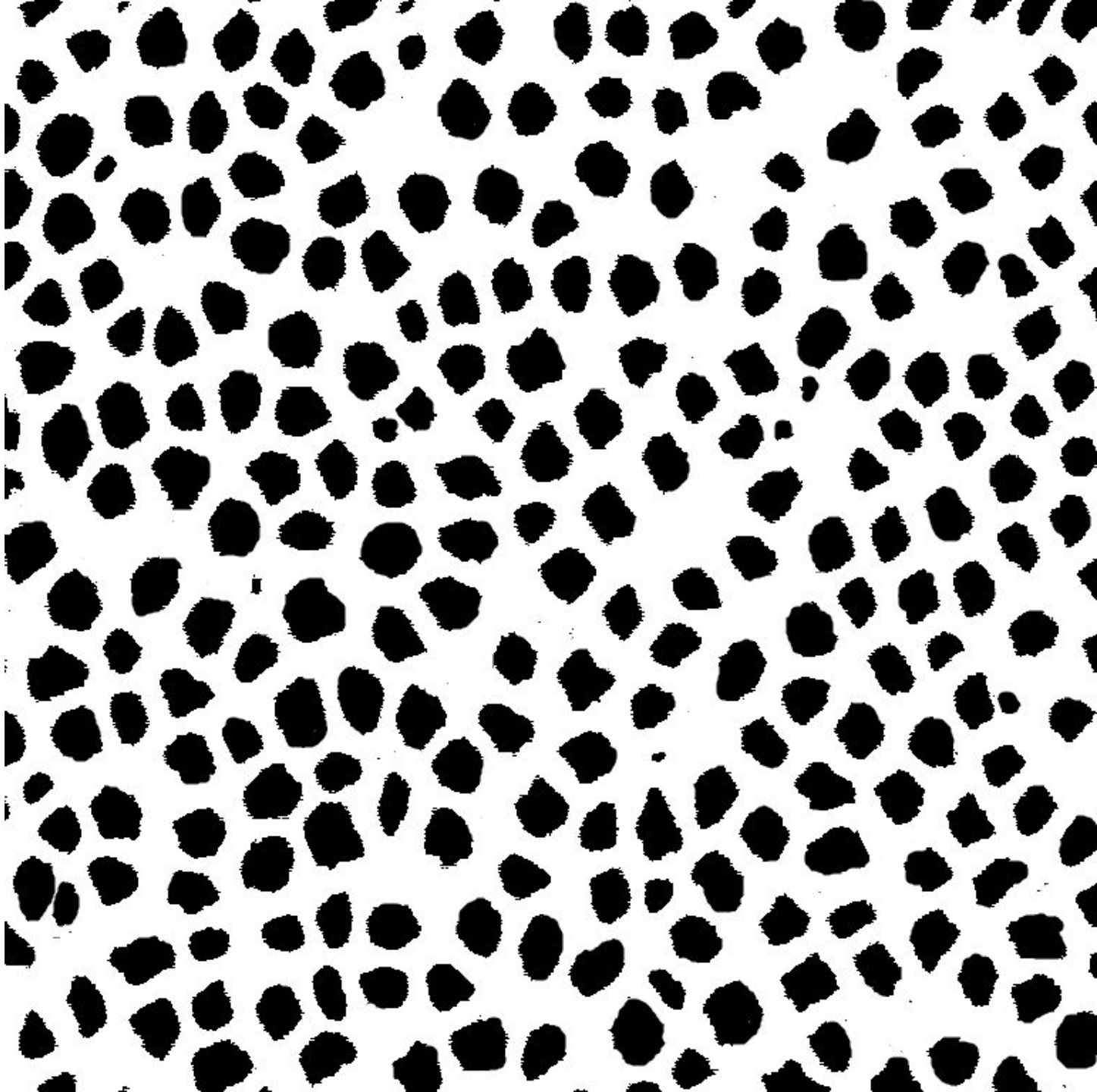
Для получения 1D фотонных кристаллов важно, чтобы структура в поперечном направлении была однородна для необходимых электромагнитных волн. То есть, в случае пористого кремния необходимо, чтобы размер пор был на порядок-два меньше, чем выбранный диапазон длин волн света.

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

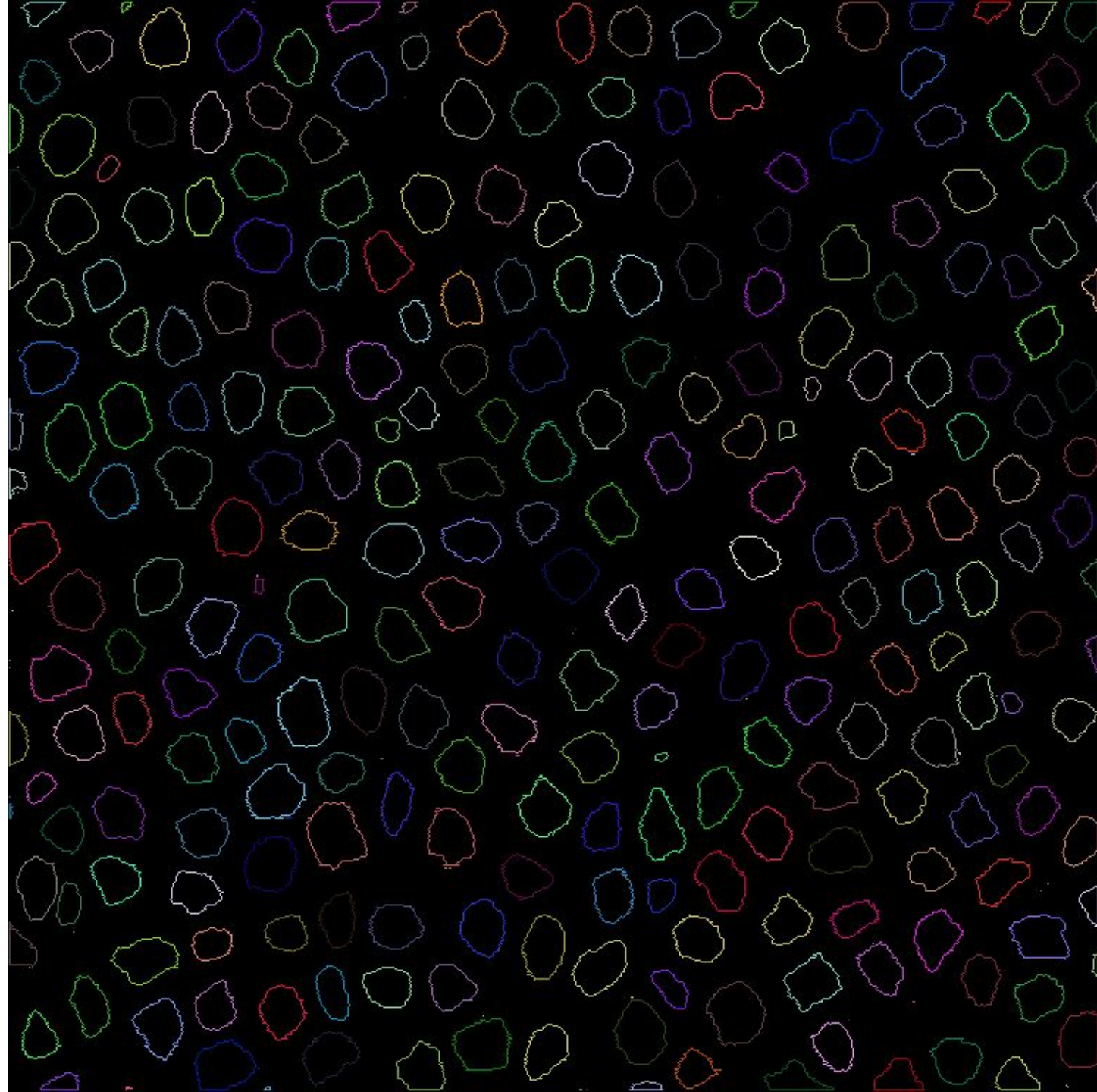


Повышение контраста

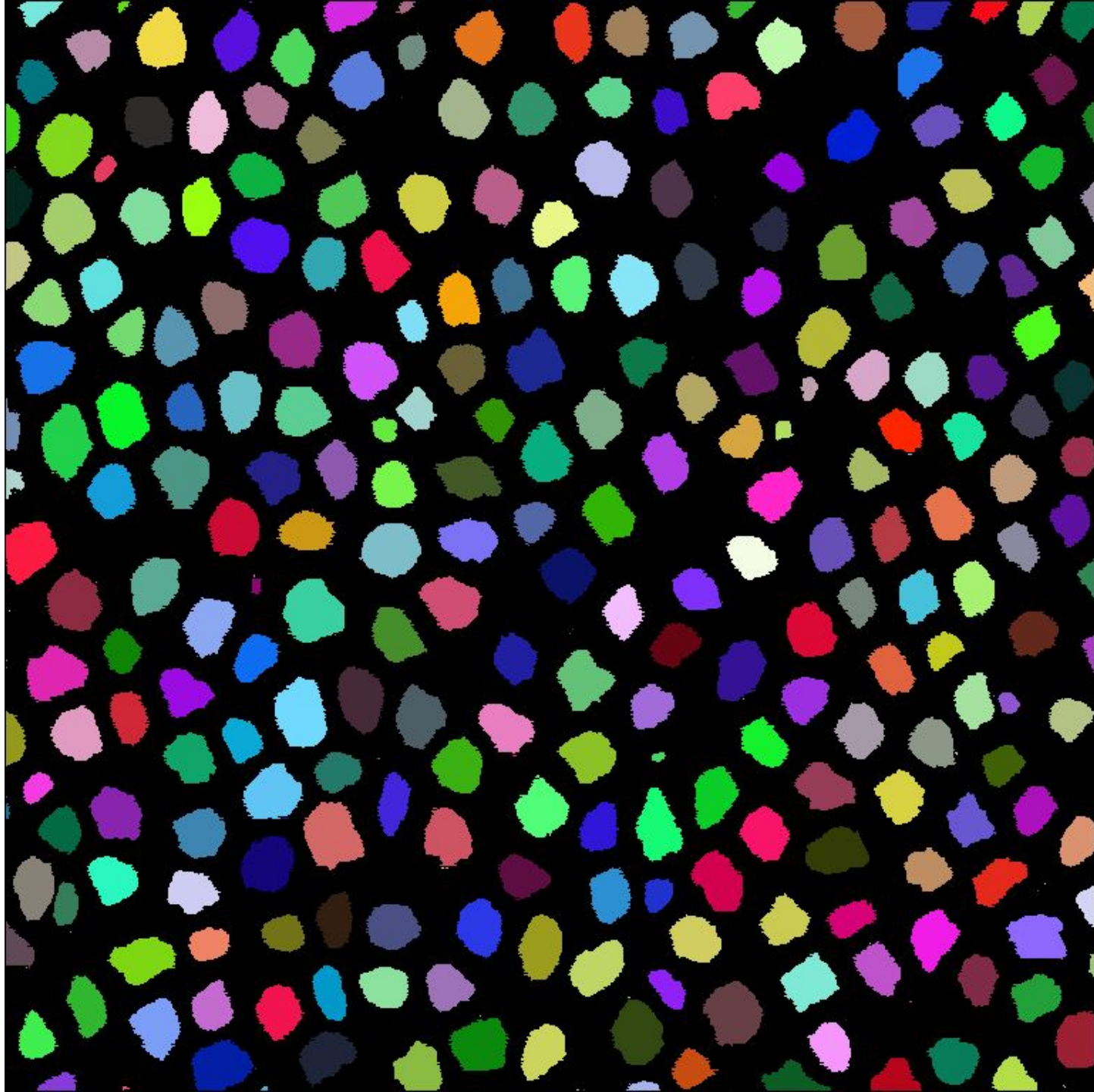




# Определение замкнутых областей



# 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

