

Расчет зонной структуры фотонных кристаллов

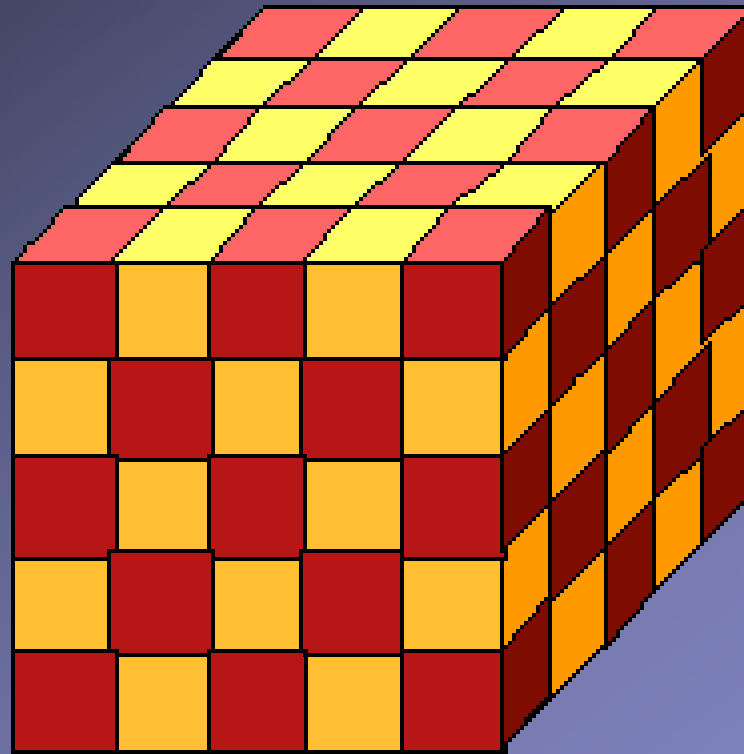
Д.С. Пихуля, П.С. Базаров, Ю.В. Микляев,
отдел нелинейной оптики

Обзор

1. **Определение фотонного кристалла**
2. История развития
3. Области применения
4. Голографическая литография
5. Расчет зонных структур фотонных кристаллов
6. Заключение

Фотонный кристалл

периодически модулированная
диэлектрическая проницаемость



Сравнение обычного (электронного) кристалла с фотонным кристаллом:

Кристалл	Фотонный кристалл
решетка атомов	решетка диэлектрика
периодически распределенный потенциал	периодически модулированная диэлектрическая проницаемость
электроны	фотоны

Зонная структура энергетических уровней

Запрещенные зоны

Математический аппарат для описания поведения электронов и фотонов в среде

	электрон	фотон
поле	$\Psi(r,t)=\Psi(r)\exp(i\omega t)$	$H(r,t)=H(r)\exp(i\omega t)$
задача о собственных значениях	$H\Psi=E\Psi$	$\Theta H=(\omega/c)^2 H$
эрмитов оператор	$H=-(\hbar/2\pi)^2 \nabla^2 / (2m) + V(r)$	$\Theta = \nabla_x (\epsilon^{-1}(r) \nabla_x)$

Обзор

1. Определение фотонного кристалла
2. История развития
3. Области применения
4. Голографическая литография
5. Расчет зонных структур фотонных кристаллов
6. Заключение

история развития

1972

1987

1990

1992

1998

2000

Быков В.П. в 1972г. предсказал возможность управления спонтанным излучением в периодической структуре.

В 1987 г. Эли Яблонович и Саджеев Джон предложили независимо друг от друга структуры, в которых может существовать запрещенная энергетическая зона для фотонов.

Быков В.П., ЖЭТФ **35**, 269 (1972)

E. Yablonovitch, Phys. Rev. Lett. **58**, 2059 (1987)

S. John, Phys. Rev. Lett. **58**, 2486 (1987)

история развития

1972

1987

1990

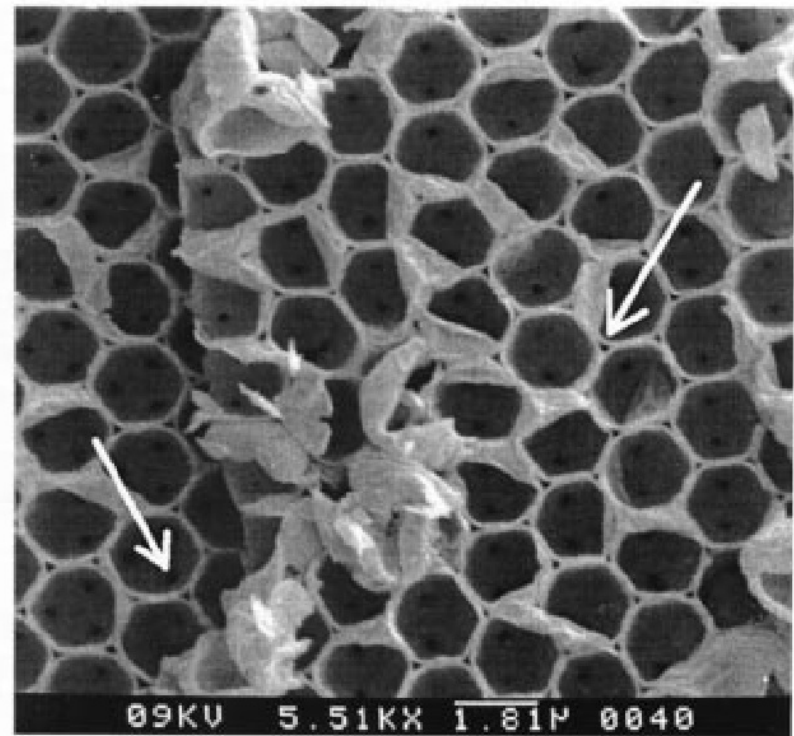
1992

1998

2000

Первый
инвертированный опал
из TiO_2

но без запрещенной
зоны, $n \leq 2.8$



Wijnhoven and Vos, Science, **281**, 802 (1998)

история развития

1972

1987

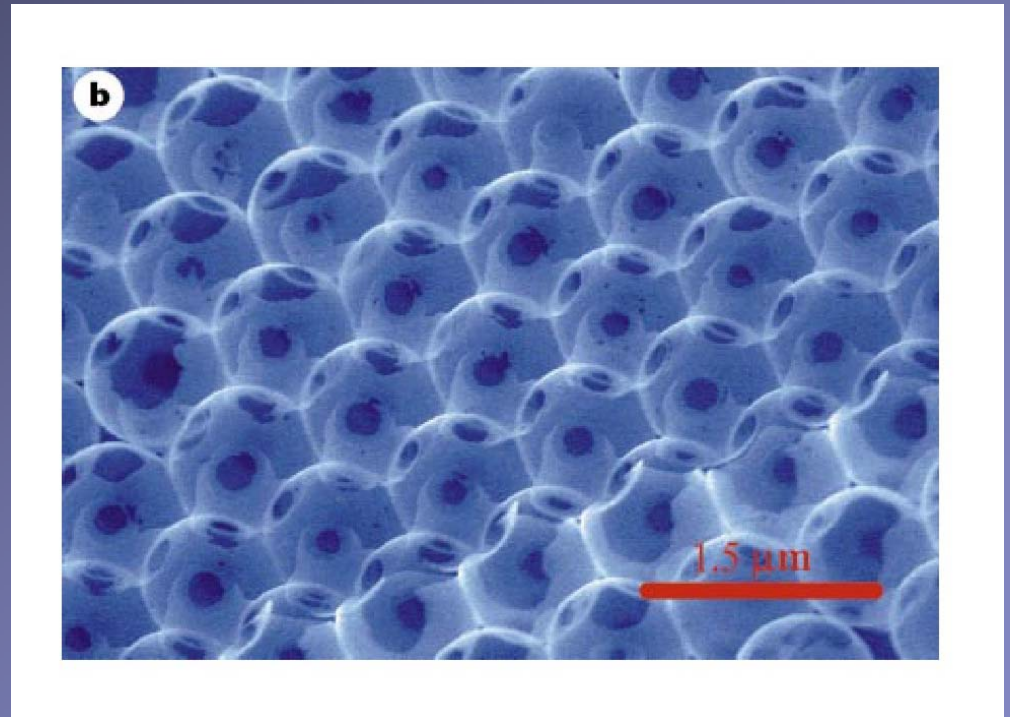
1990

1992

1998

2000

Первый трехмерный
фотонный кристалл
из кремния с
запрещенной зоной
вблизи 1.5 мкм



Blanco et al., Nature **405**, 437 (2000)

Обзор

1. Определение фотонного кристалла
2. История развития
3. **Области применения**
4. Голографическая литография
5. Расчет зонных структур фотонных кристаллов
6. Заключение

1. управление спонтанным излучением

- увеличение эффективности и снижение порога генерации лазеров
- принципиально новые источники излучения с высокой яркостью
- увеличение КПД солнечных батарей

2. оптический изолятор

- микрорезонаторы
- волноводы с малым радиусом кривизны
- ответвители

3. управление дисперсией

- суперпризмы, демультимплексоры
- нелинейные эффекты

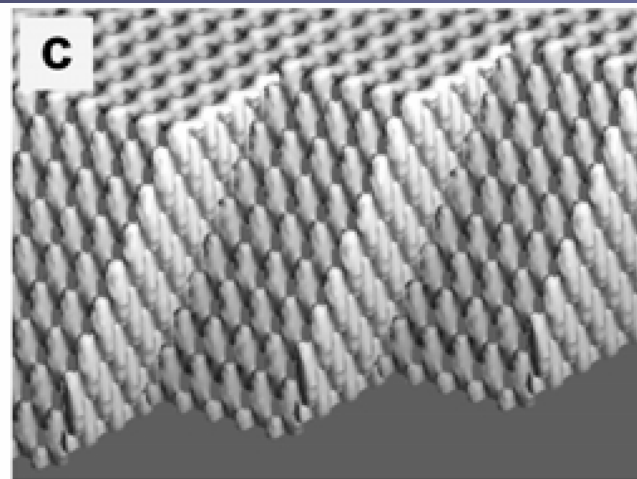
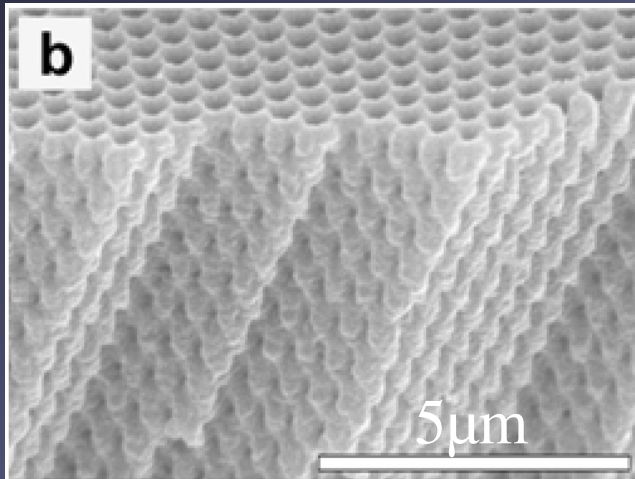
Обзор

1. Определение фотонного кристалла
2. История развития
3. Области применения
4. Голографическая литография
5. Расчет зонных структур фотонных кристаллов
6. Заключение

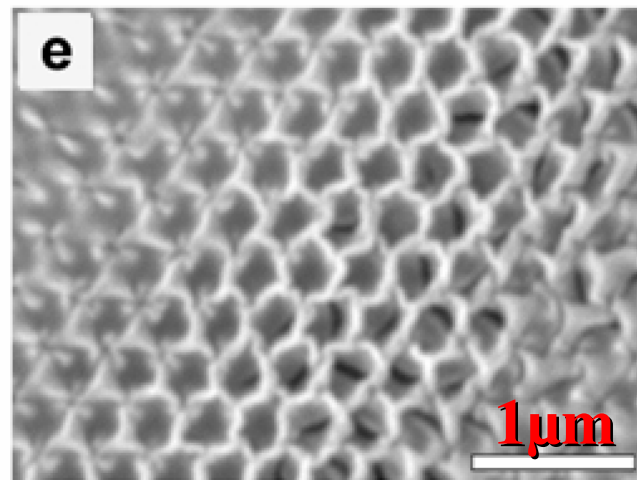
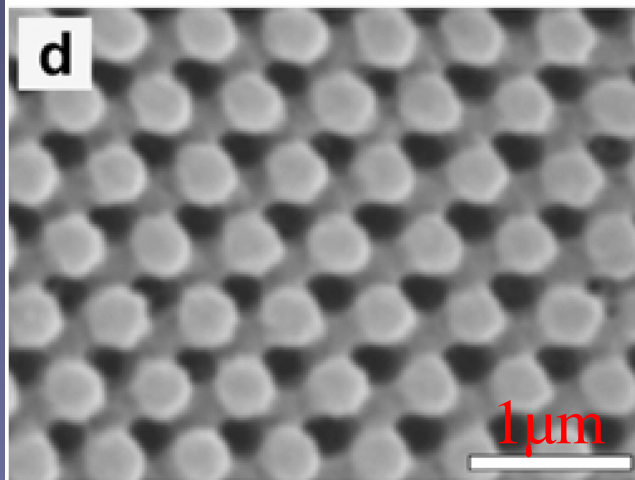
Голографическая литография

[D. N. Sharp, A.J. Turberfield, *Opt. Quant. Elec.* **34**, 3 (2002)]

[111]
СКОЛ



[111]
ПЛОСКОСТЬ



TiO₂

Интерференция четырех волн, дающая ГЦК симметрию

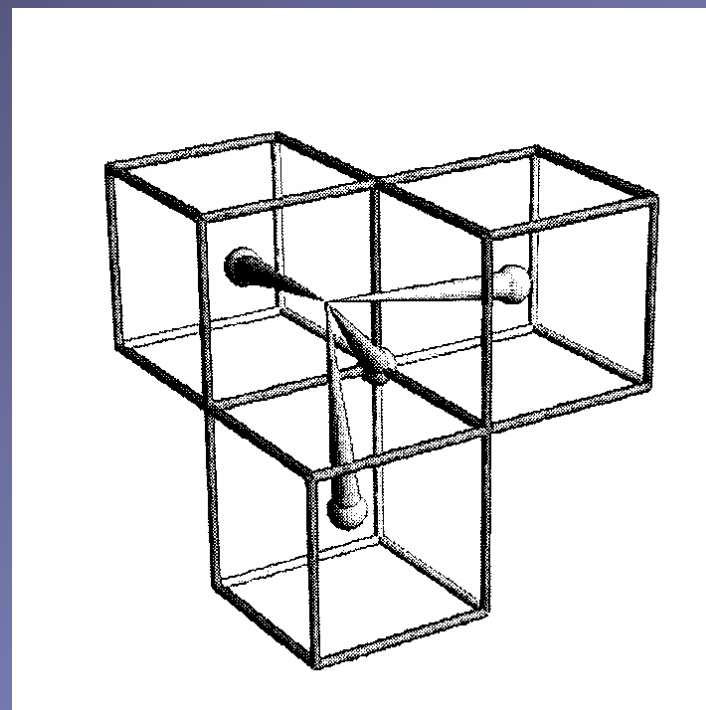
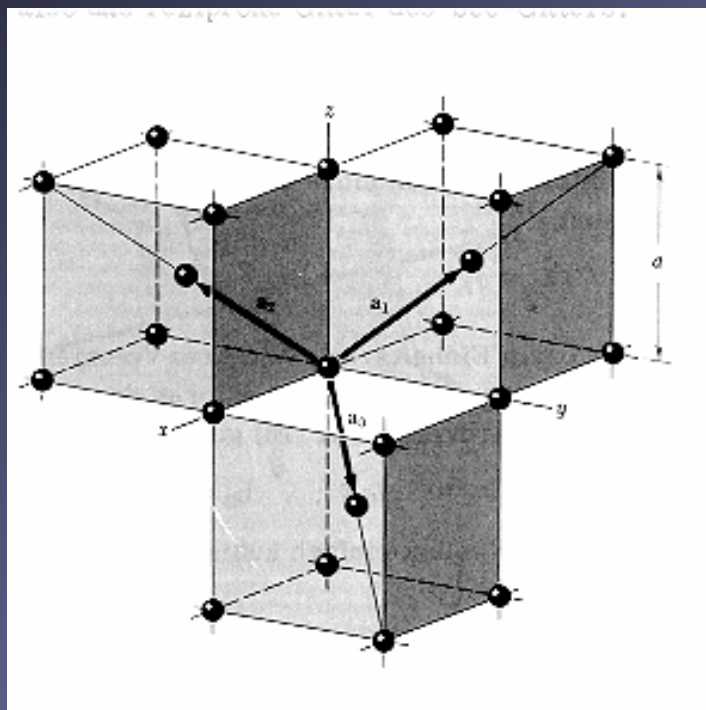
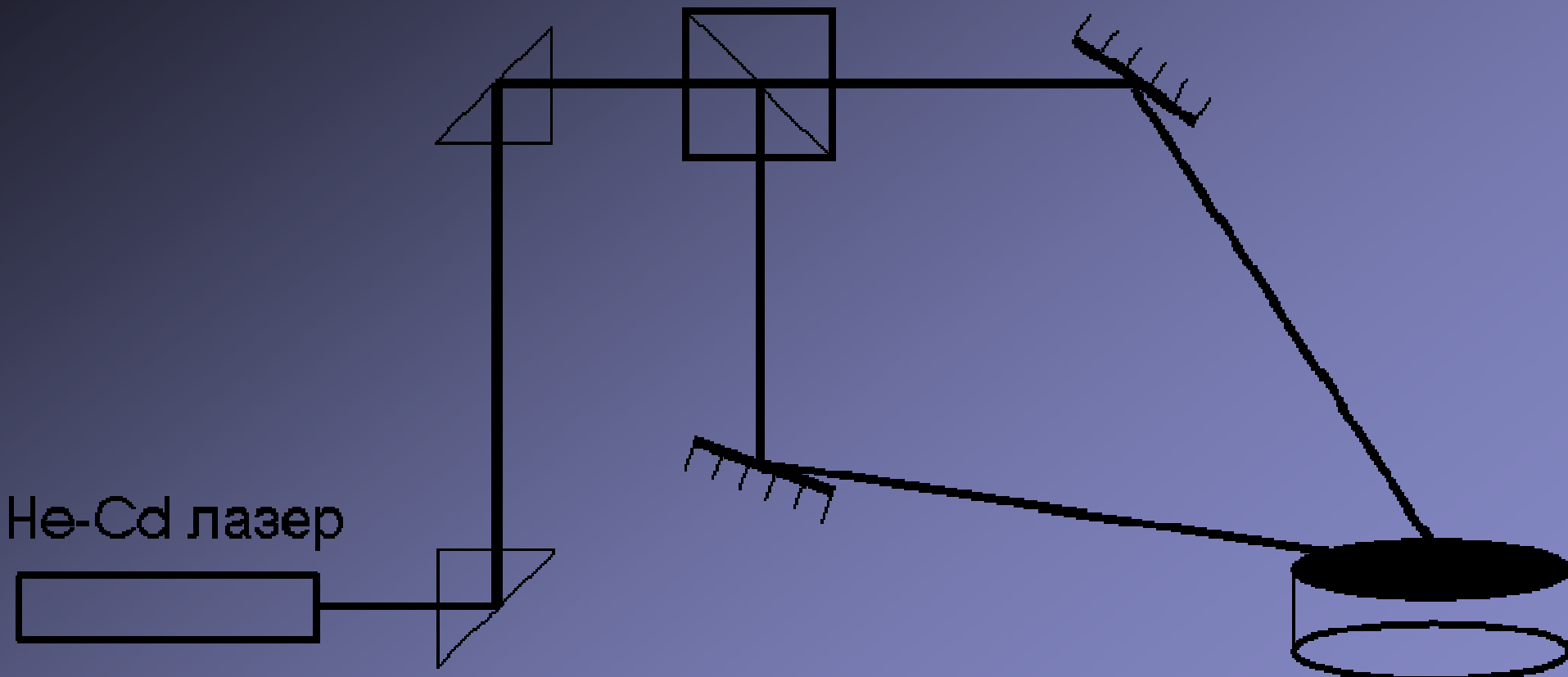


Схема записи решетки

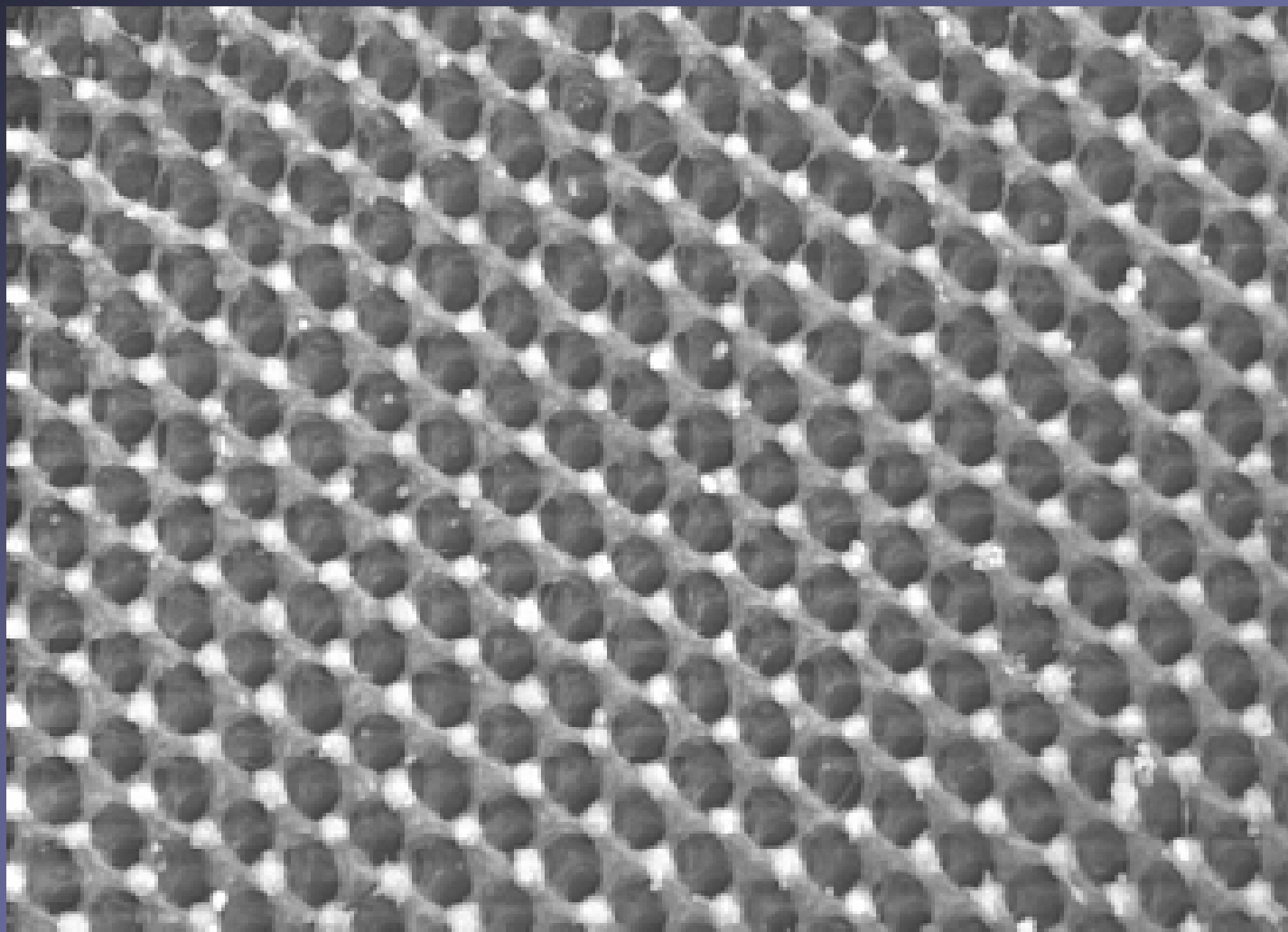
делительный
куб

He-Cd лазер



образец

Решетка, полученная путем трехкратного экспонирования
двухволновой интерференционной картиной



Обзор

1. Определение фотонного кристалла
2. История развития
3. Области применения
4. Голографическая литография
5. Расчет зонной структуры фотонных кристаллов
6. Заключение

Метод расчета

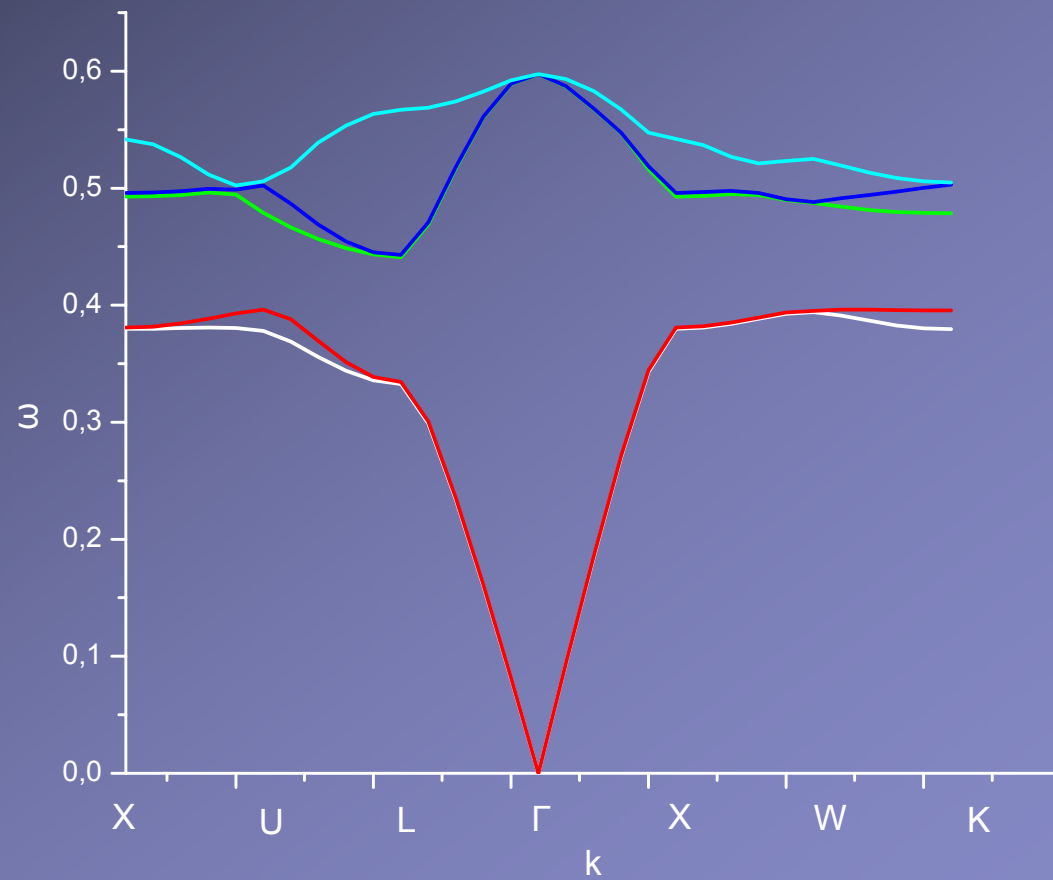
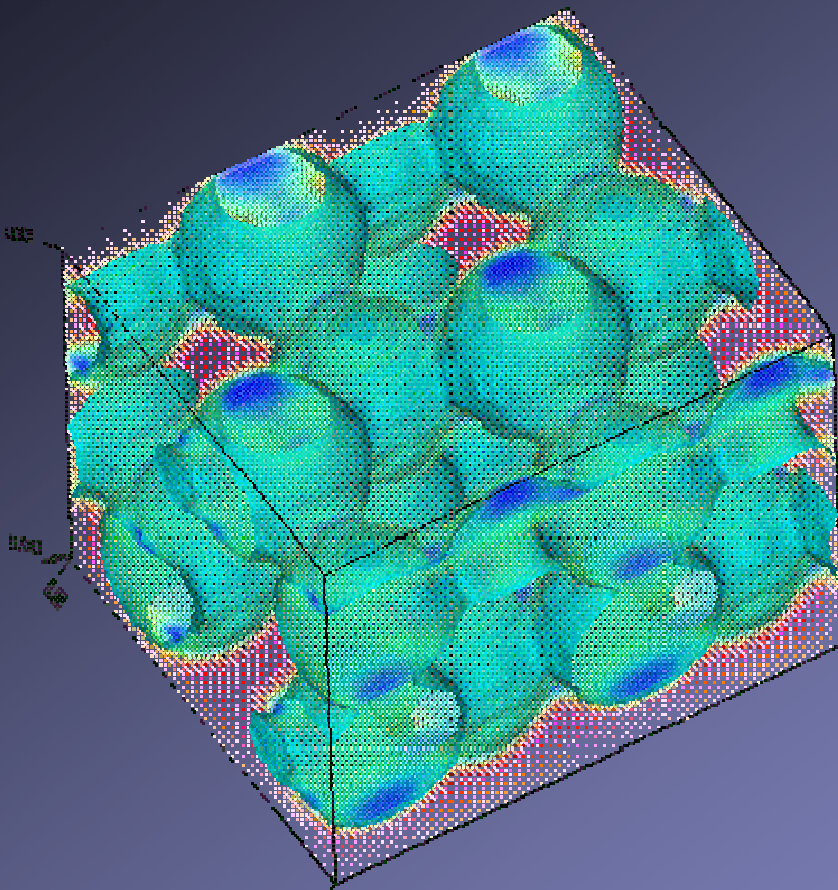
$$\nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \vec{H}_\omega(\vec{r}) \right) = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \vec{H}_\omega(\vec{r})$$

$$\vec{H}_\omega^{\vec{k}}(\vec{r}) = \sum_{\vec{G}\lambda} h_{\vec{G}\lambda} \hat{\vec{e}}_\lambda e^{[i(\vec{k} + \vec{G}) \cdot \vec{r}]}$$

$$\sum_{(\vec{G}\lambda)} \Theta_{(\vec{G}\lambda), (\vec{G}\lambda)}^{\vec{k}} \cdot h_{(\vec{G}\lambda)} = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 h_{(\vec{G}\lambda)}$$

$$\omega_n(\vec{k})$$

Зонная структура фотонного кристалла



MIT Photonic-Bands

<http://ab-initio.mit.edu/mpb>

Запрос входных данных

Преобразование в доступную форму

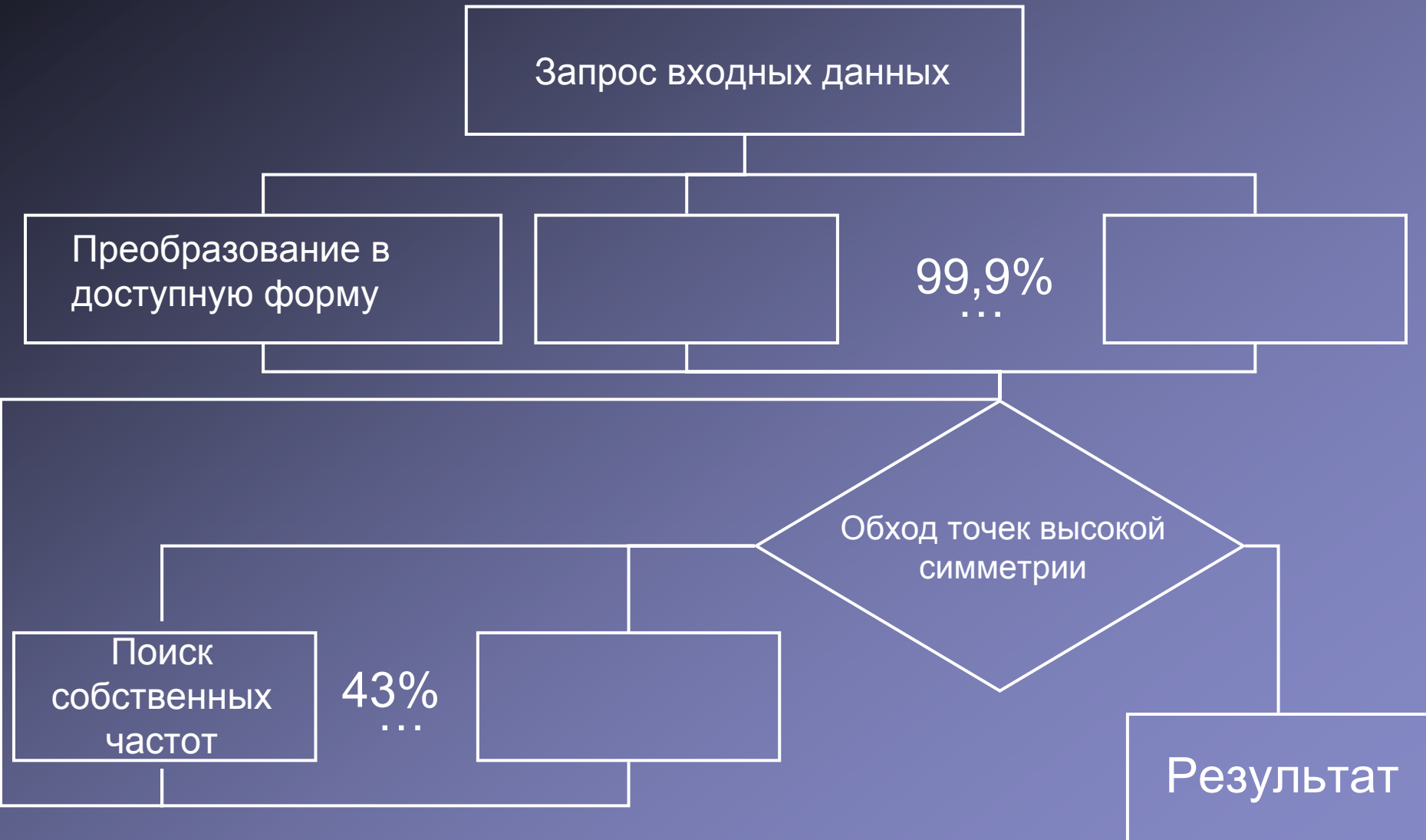
99,9%
...

Обход точек высокой симметрии

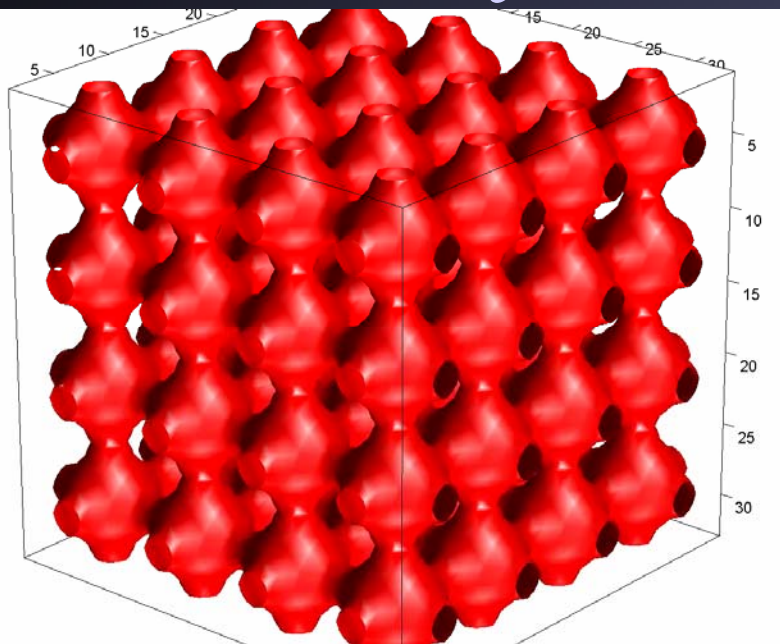
Поиск собственных частот

43%
...

Результат



Полученные результаты



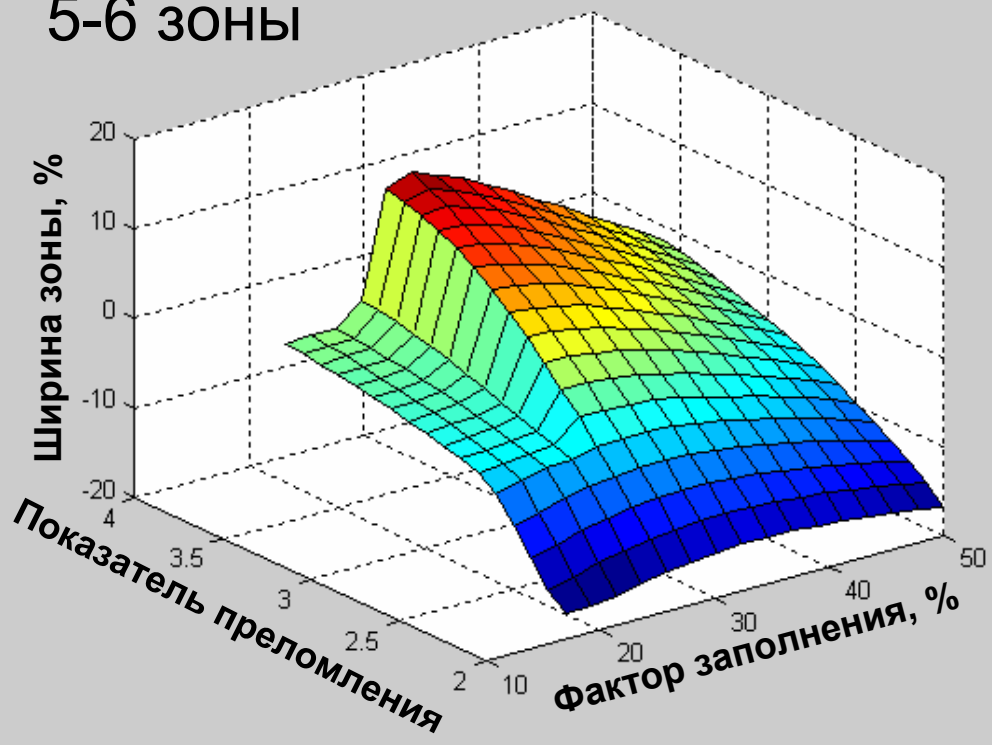
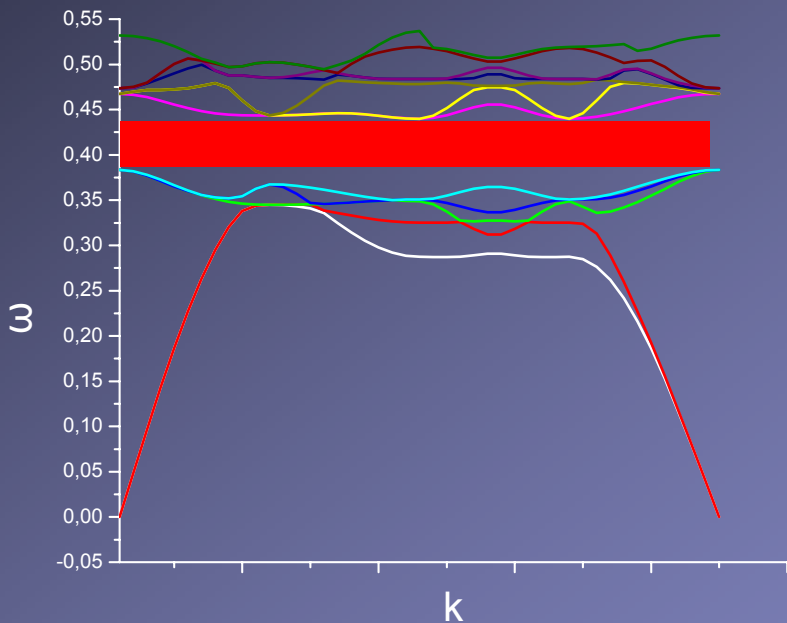
Простая кубическая решетка

$$n_{\min} = 2.7$$

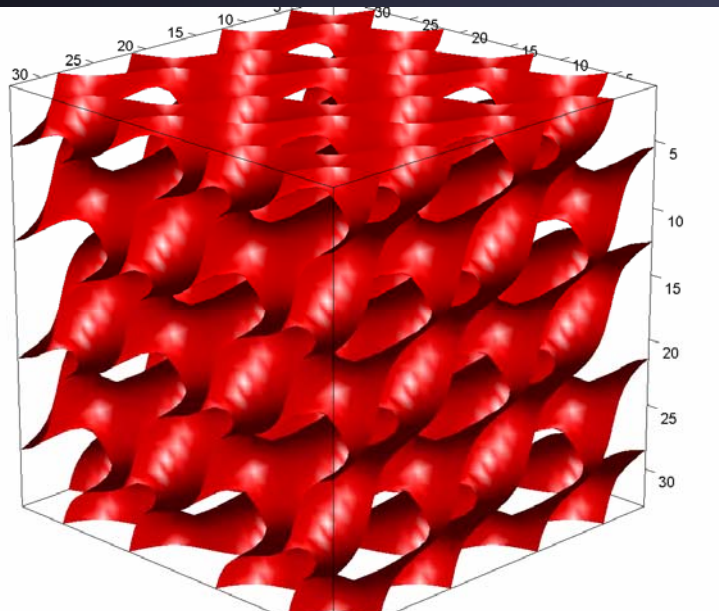
$$\Delta\omega_{5.6} = 13.7\%$$

$$f_{\text{опт}} = 27\%$$

5-6 зоны

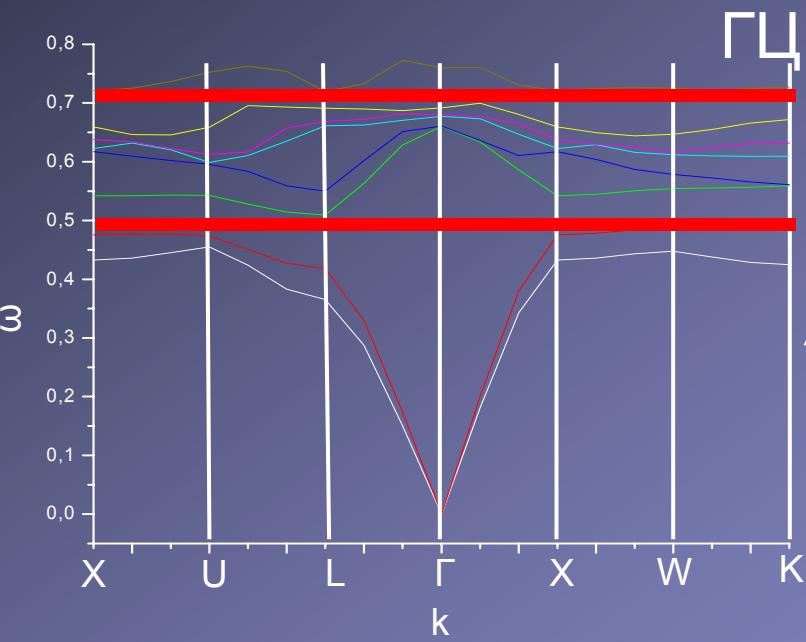
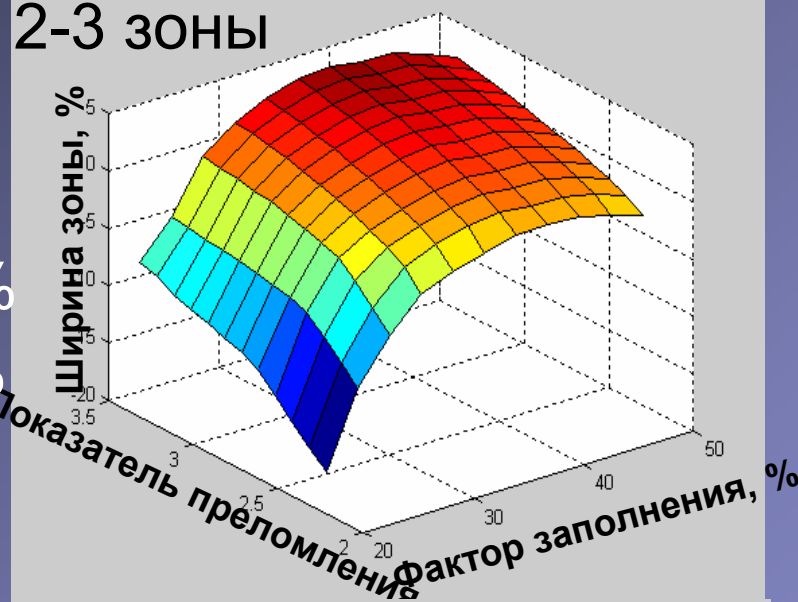


Полученные результаты



$$n_{\min} = 2.5$$
$$\Delta\omega_{3,4} = 4.5\%$$
$$f_{\text{опт}} = 38.5\%$$

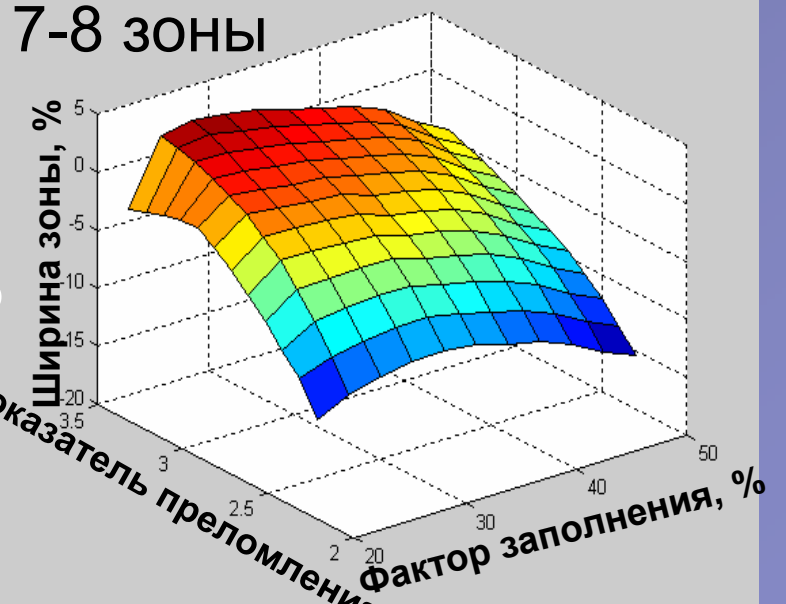
2-3 зоны



ГЦК решетка

$$n_{\min} = 2.9$$
$$\Delta\omega_{7,8} = 3.1\%$$
$$f_{\text{опт}} = 27\%$$

7-8 зоны



Обзор

1. Определение фотонного кристалла
2. История развития
3. Области применения
4. Голографическая литография
5. Расчет зонной структуры фотонных кристаллов
6. **Заключение**

Заключение

1. Освоена программа по расчету зонных структур фотонных кристаллов с использованием параллельных вычислений.
2. Проведены расчеты зонных структур фотонных кристаллов, полученных методом интерференционной литографии с использованием двухволновой схемы записи.
3. Исследованы зависимости ширины запрещенных зон от величины фактора заполнения и показателя преломления диэлектрика.

Перспективы

1. Использование метода суперъячеек для расчета зонных структур квазикристаллов.
2. Расчет гибридных решеток методом суперъячеек.
3. Построение волн Блоха для фотонных кристаллов.

Благодарности

Грант РФФИ № 04-02-96046Р2004урал_а