

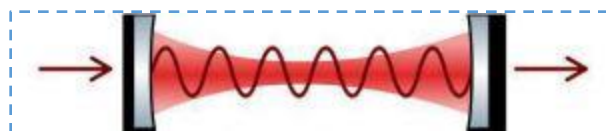
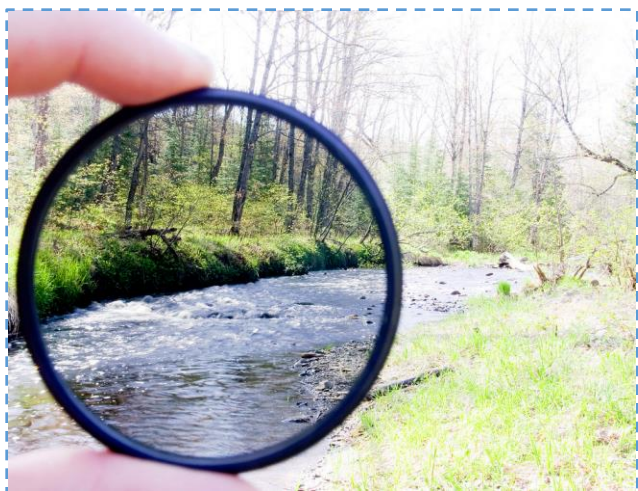
# Изучение влияния структуры ГФК на его оптические характеристики

Научный руководитель:  
Юрасов Николай Ильич  
доцент кафедры ФН-4, к. ф.-м. н.  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Автор: Радько Петр Игоревич  
СОШ №446

# Постановка проблемы

- Сегодня разрабатываются новые оптические устройства
- Перспективны глобулярные фотонные кристаллы (ГФК)
- Избирательное управление свойствами ГФК
- Будущее современной электроники и оптических устройств
- Интенсивная разработка теории и ее реализация в устройствах



# Цель работы

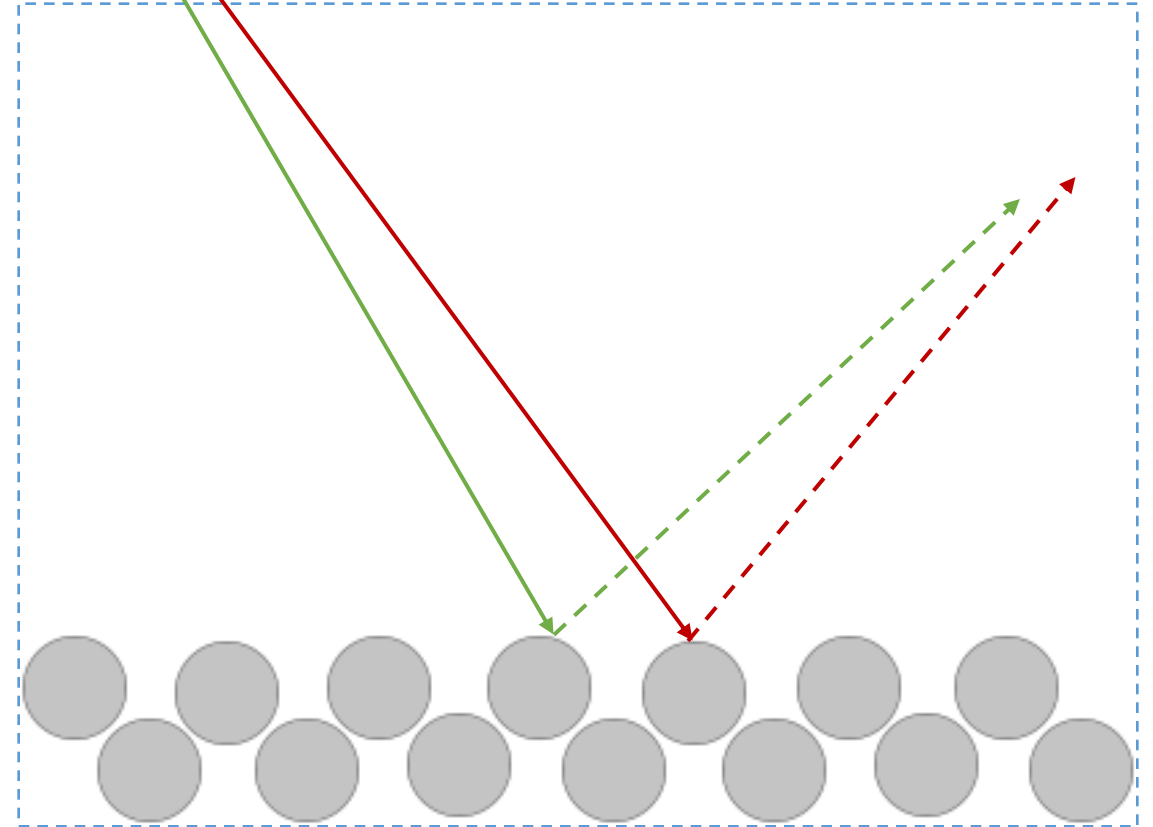
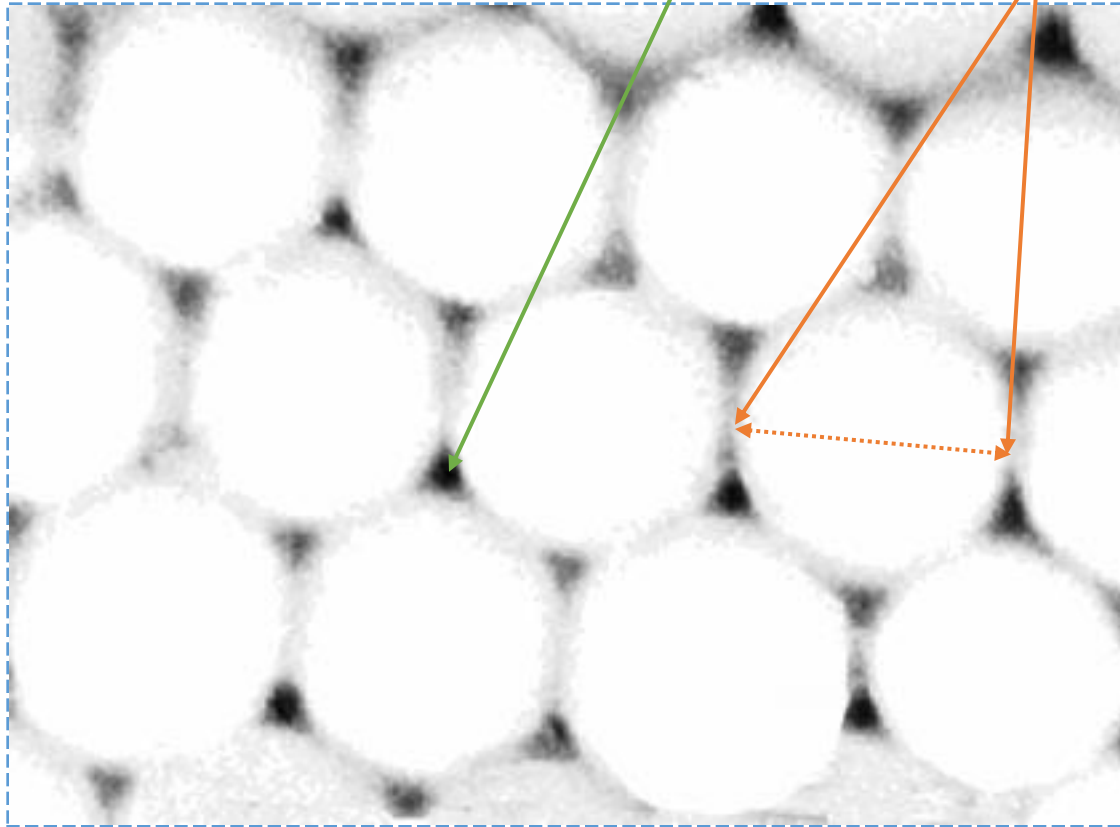
Изучение влияния

пористости

диаметра глобул

длины волны

на коэффициент отражения ГФК

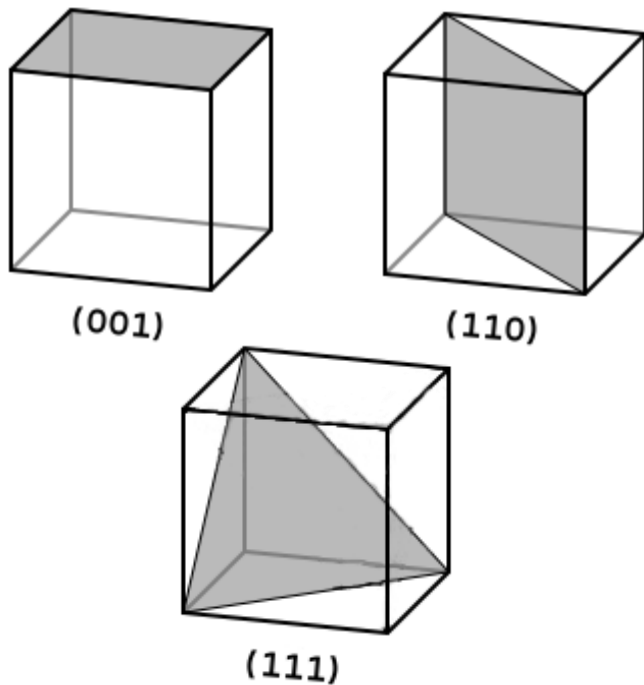


# Этапы работы

1

Моделирование

Получить сечения ГФК

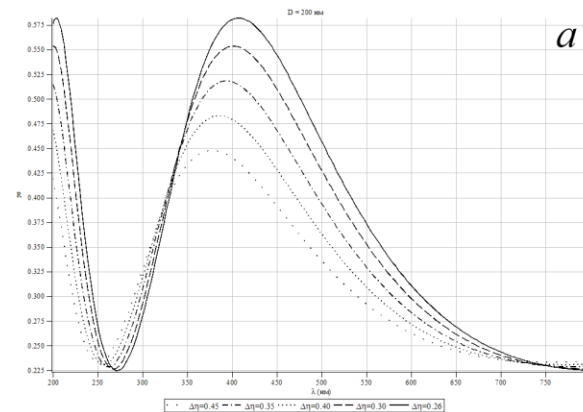


2

Построение теории

Вывести зависимости коэффициента отражения ГФК от:

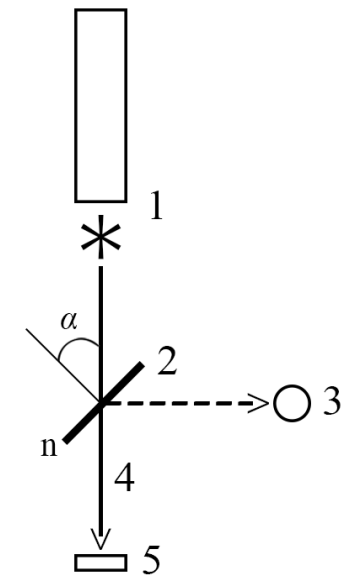
- пористости,
- диаметра глобул,
- длины волны.



3

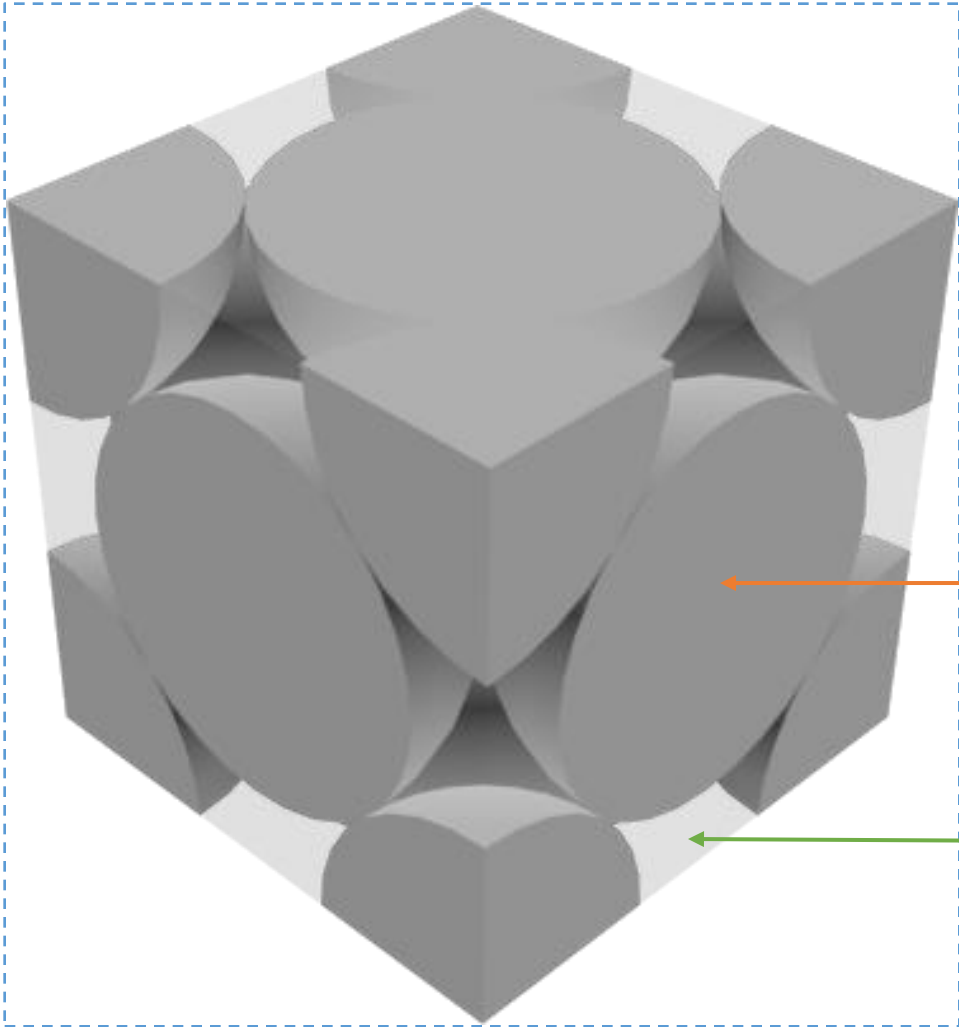
Постановка опыта

Экспериментально проверить полученные зависимости



# 1.1

# Трехмерное моделирование



## Инструмент

Система трехмерной графики Autodesk 3ds Max 2015

## Объект

Элементарная ячейка глобулярного фотонного кристалла

Глобулы  $D \approx 200$  нм

Поры

## 1.2

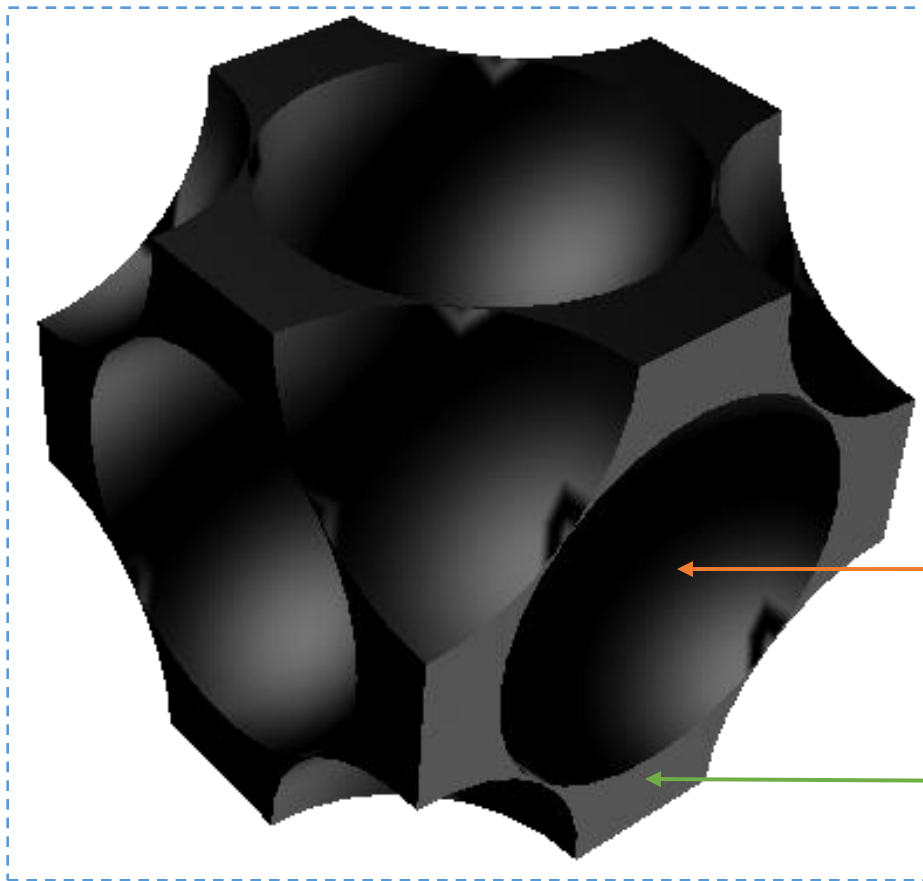
# Трехмерное моделирование

## Инструмент

Система трехмерной графики Autodesk 3ds Max 2015

## Объект

Инвертированная ячейка глобулярного фотонного кристалла

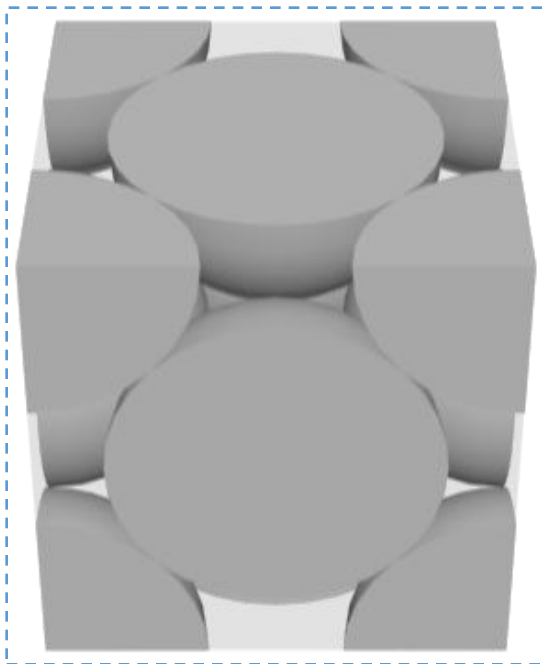


Пора на месте глобулы

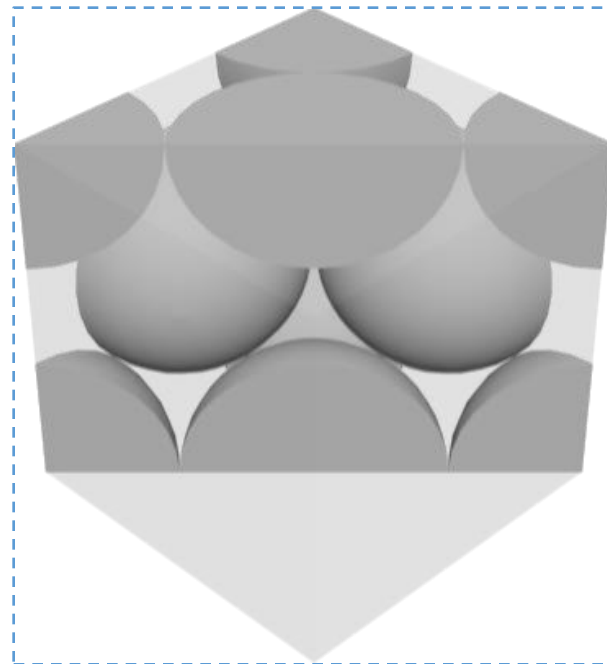
Заполненная материалом пора

# 1.3

# Трёхмерное моделирование



<001>



<110>



<111>

Сечения элементарной ячейки глобулярного фотонного кристалла

# 1.4

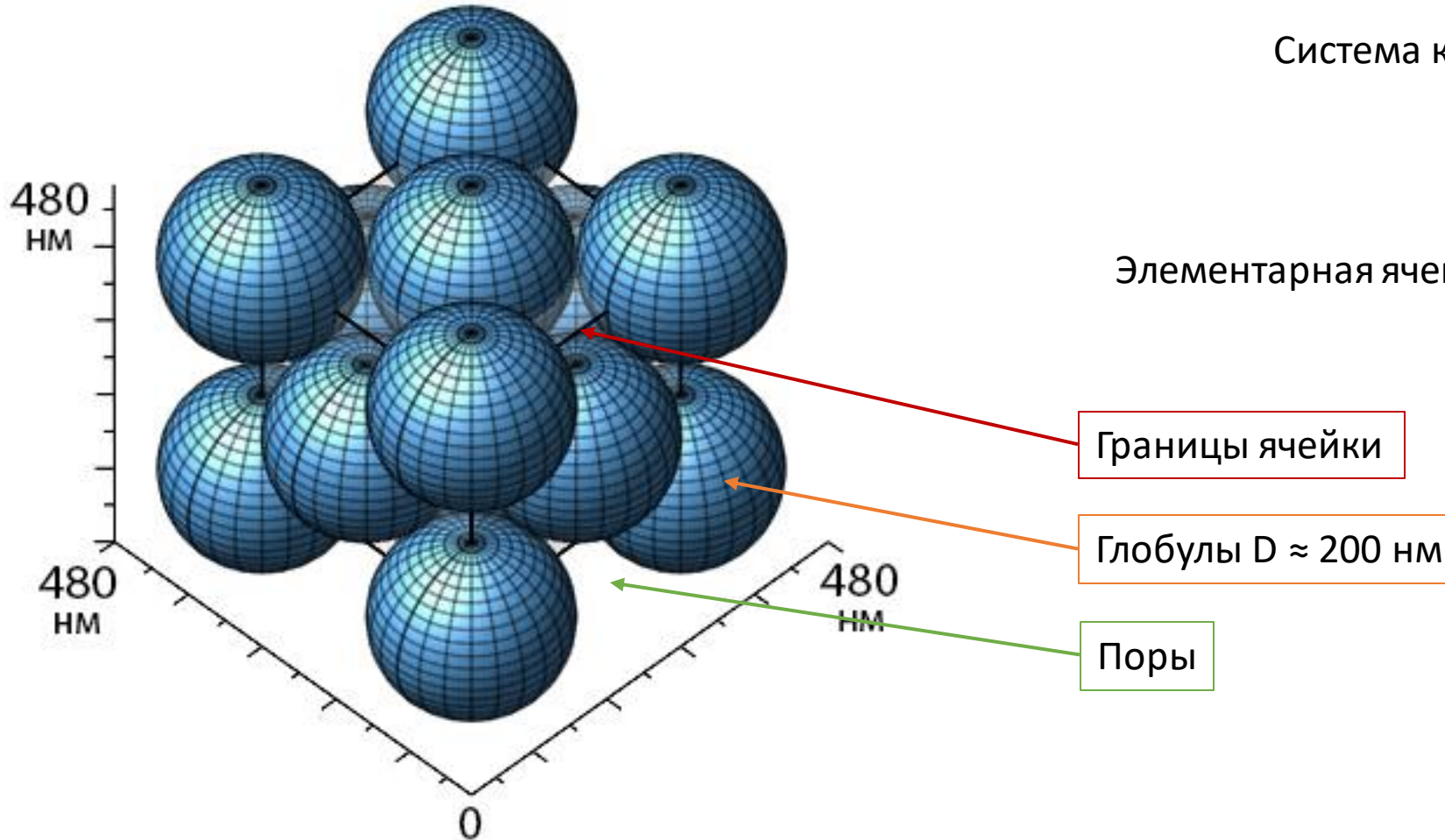
# Математическое моделирование

## Инструмент

Система компьютерной алгебры Maple 18

## Объект

Элементарная ячейка глобулярного фотонного кристалла





# 1.5

# Математическое моделирование

```

> with(plottools) :
> sector_001_1 := plottools[sector]([0, 0], r_g, 0 .. pi, color = black) :
> sector_001_2 := plottools[sector]([0, 0], r_g, pi .. 2*pi, color = black) :
> sector_001_3 := plottools[sector]([0, 0], r_g, 0 .. pi, color = black) :
> sector_001_4 := plottools[sector]([0, 0], r_g, pi .. 2*pi, color = black) :
> sector_001_5 := disk([0, 0], a_n) :
<001>

> with(plottools) :
> sector_011_1 := plottools[sector]([0, 0], r_g, 0 .. pi/3, color = black) :
> sector_011_2 := plottools[sector]([0, 0], r_g, pi/3 .. 2*pi/3, color = black) :
> sector_011_3 := plottools[sector]([0, 0], r_g, 2*pi/3 .. pi, color = black) :
> sector_011_4 := plottools[sector]([0, 0], r_g, pi .. 4*pi/3, color = black) :
> sector_011_5 := plottools[sector]([0, 0], r_g, 4*pi/3 .. 3*pi/2, color = black) :
> sector_011_6 := plottools[sector]([0, 0], r_g, 3*pi/2 .. 2*pi, color = black) :
<110>

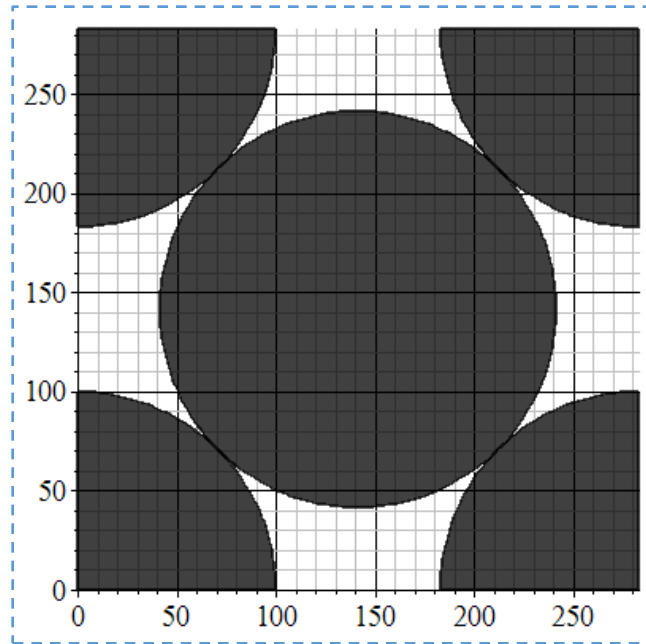
> with(plottools) :
> sector_111_1 := plottools[sector]([0, 0], r_g, 0 .. pi/3, color = black) :
> sector_111_2 := plottools[sector]([2*r_g, 0], r_g, 0 .. pi, color = black) :
> sector_111_3 := plottools[sector]([4*r_g, 0], r_g, pi .. 2*pi/3, color = black) :
> sector_111_4 := plottools[sector]([2*r_g, 2*r_g*sqrt(3)], r_g, -pi/3 .. -2*pi/3, color = black) :
> sector_111_5 := plottools[sector]([r_g, r_g*sqrt(3)], r_g, pi/3 .. -2*pi/3, color = black) :
> sector_111_6 := plottools[sector]([3*r_g, r_g*sqrt(3)], r_g, -pi/3 .. -4*pi/3, color = black) :
<111>

```

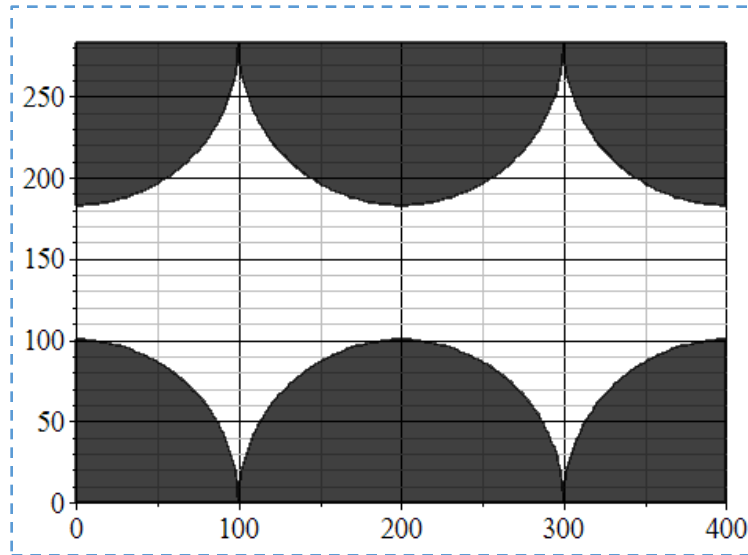
Расчетные модули сечений элементарной ячейки глобулярного фотонного кристалла

# 1.6

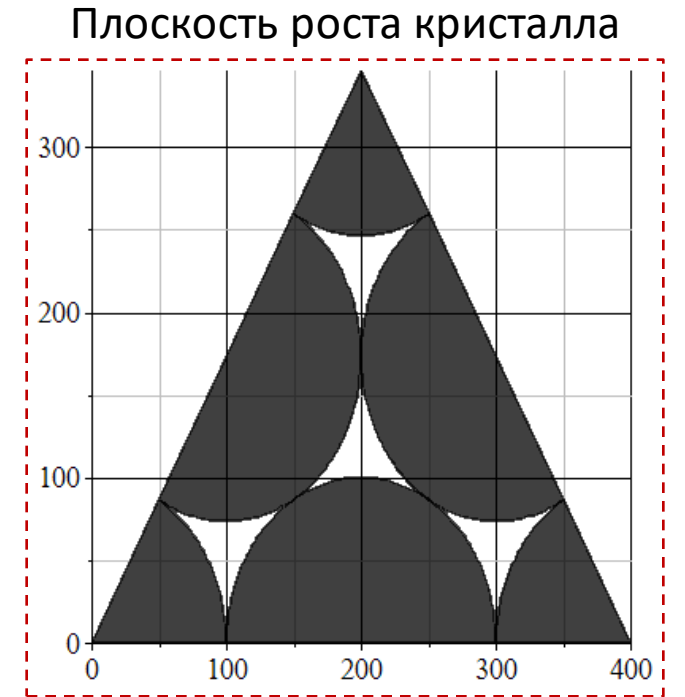
# Математическое моделирование



$\langle 001 \rangle$



$\langle 110 \rangle$



$\langle 111 \rangle$

Сечения элементарной ячейки глобулярного фотонного кристалла (нм)

## 2.1

# Теория: диапазон пористости

Пористость ГФК (сплошные глобулы)

$$\eta_0 \approx 0.26$$

Пористость ГФК (пористые глобулы)

$$\eta_{\max} = \eta_0 + \eta_0(1 - \eta_0) \approx 0.45$$

Диапазон пористости ГФК

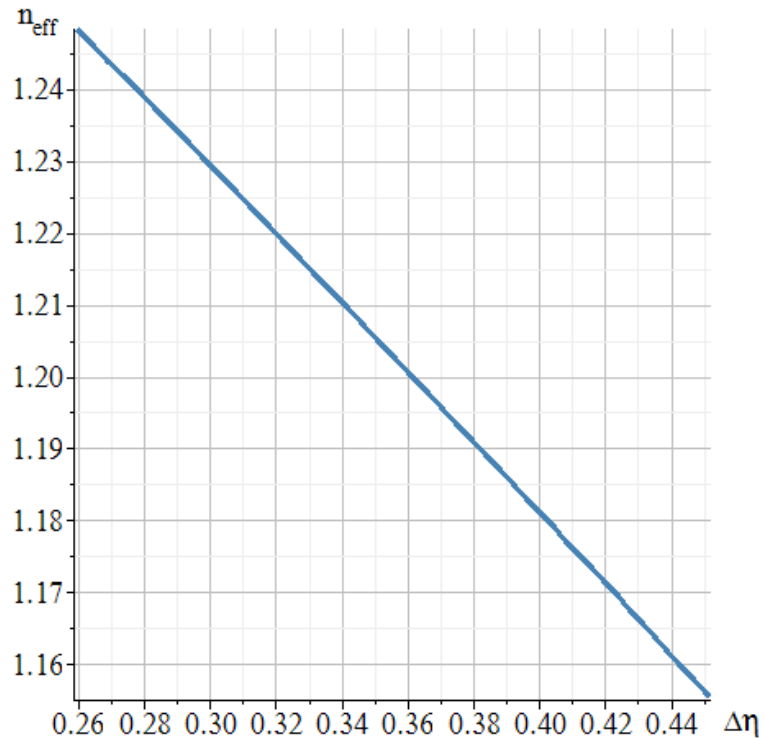
$$\Delta\eta \in [\eta_0; \eta_{\max}]$$

## 2.2

# Теория: коэффициенты от пористости

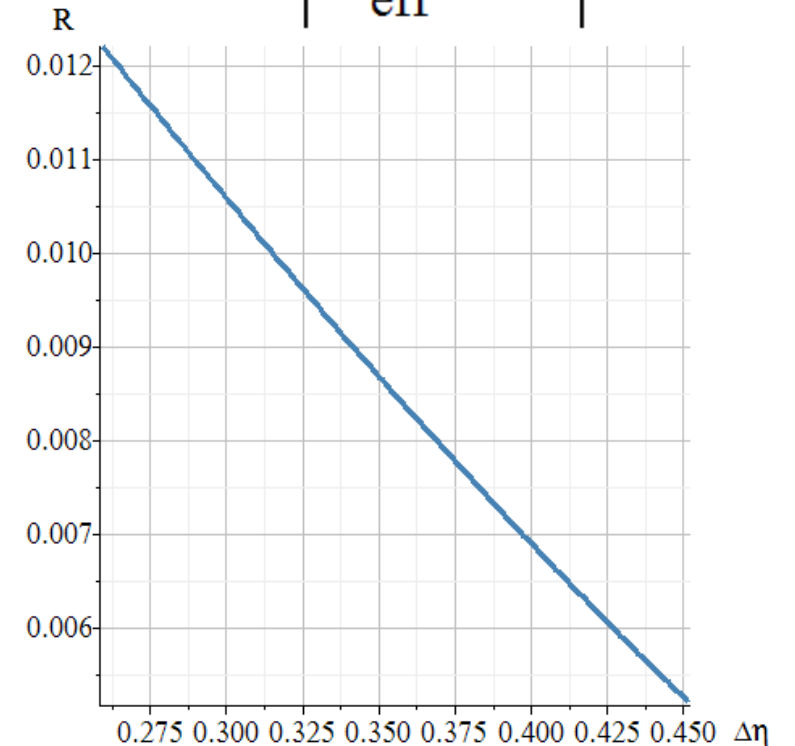
Коэффициент преломления

$$n_{\text{eff}} = \sqrt{n_{\text{SiO}_2}^2 (1 - \eta_0 - \Delta\eta) + (\eta_0 + \Delta\eta)}$$



Коэффициент отражения

$$R = \left| \frac{n_{\text{eff}} - 1}{n_{\text{eff}} + 1} \right|^2$$



## 2.3

# Теория: учет доп. факторов

Коэффициент отражения:  $R = \left| r_1 - \frac{(1 - r_1) e^{2i\alpha}}{2 + r_1 e^{i\alpha}} \right|^2$

Диаметр глобулы  
(от 200 до 300 нм)

$$r_1 = \frac{1 - n_{\text{eff}}}{1 + n_{\text{eff}}}$$

$$\alpha = 4\pi \left( \frac{2}{3} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{n_{\text{eff}} D}{\lambda}$$

Длина волны  
(от 200 до 800 нм)

## 2.4

## Теория: расчет коэф. отражения

$$[ > \eta_0 := 0.2595195098 :$$

$$[ > n_{SiO_2} := 1.47 :$$

$$[ > n := \eta \rightarrow \sqrt{n_{SiO_2}^2 (1 - \eta_0 - \eta) + (\eta_0 + \eta)} :$$

$$[ > r_1 := \frac{1 - n_{eff}}{1 + n_{eff}} :$$

$$[ > r_2 := -0.5 :$$

$$[ > q := r_1 \cdot r_2 :$$

$$[ > d := \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot T :$$

$$[ > \alpha := \frac{4 \cdot \pi \cdot n_{eff} \cdot d}{\lambda} :$$

$$[ > u := \frac{\cos(\alpha) - q}{1 - 2 \cdot q \cdot \cos(\alpha) + q^2} :$$

$$[ > v := \frac{\sin(\alpha)}{1 - 2 \cdot q \cdot \cos(\alpha) + q^2} :$$

$$[ > b := r_2 \cdot (1 - r_1)^2 :$$

$$[ > R := (r_1 + b \cdot u)^2 + (b \cdot v)^2 :$$

Расчетный модуль коэффициента отражения ГФК с учетом

диаметра глобул

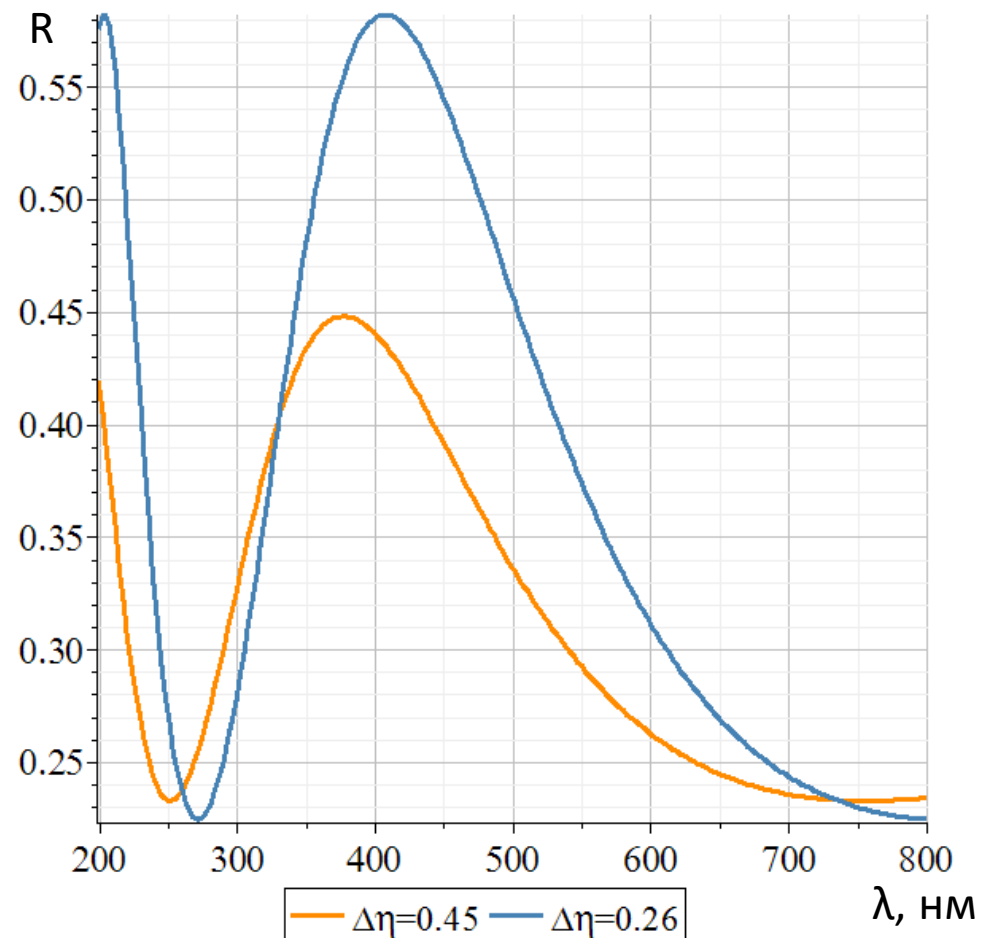
пористости

длины волны

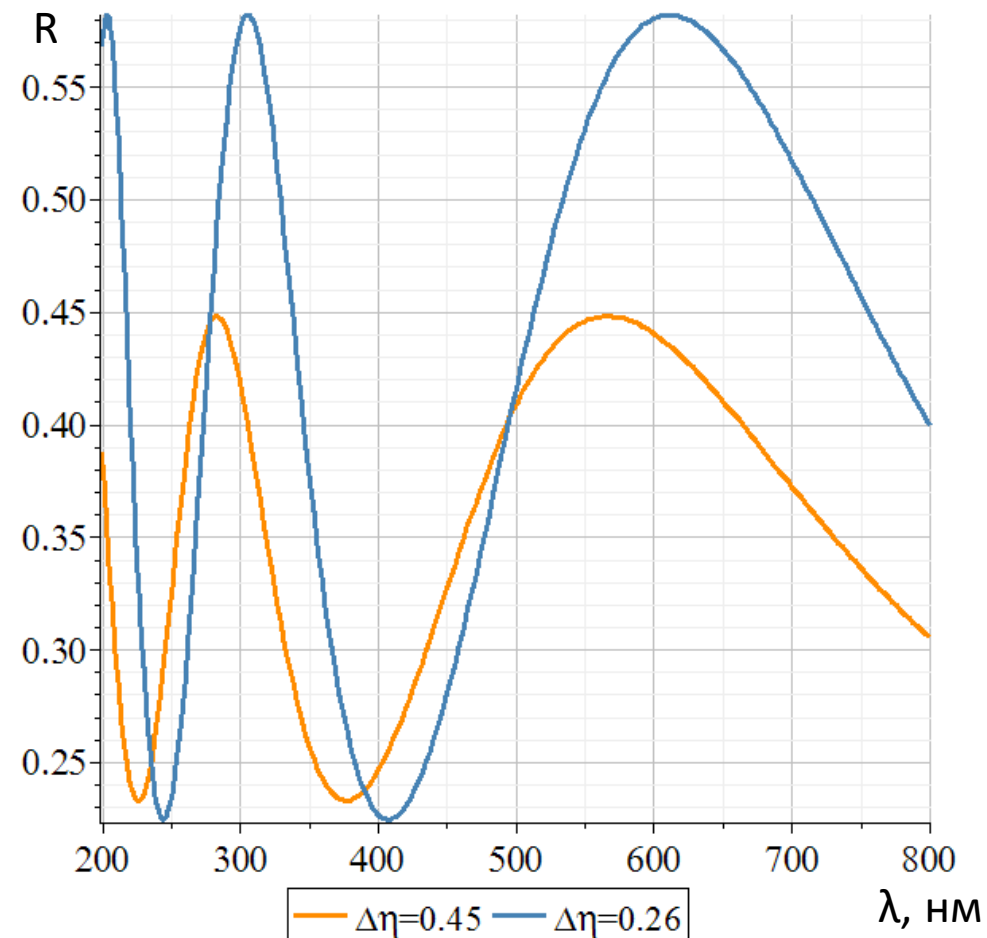
## 2.5

# Теория: зависимость коэф. отражения

D = 200 нм



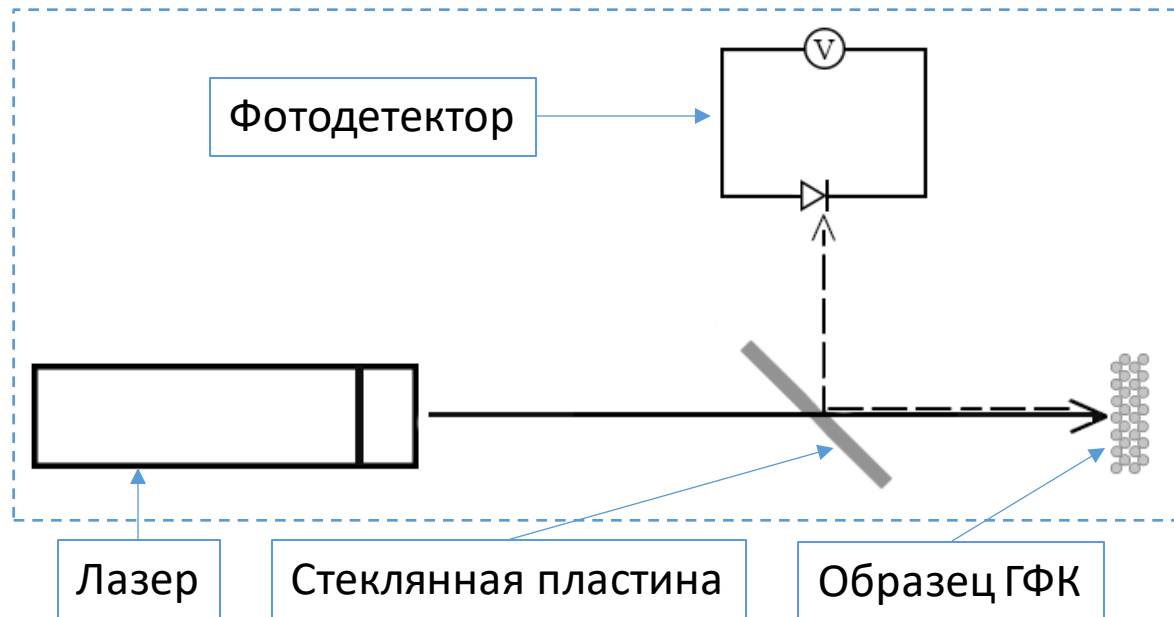
D = 300 нм



# 3.1

## Подготовка эксперимента

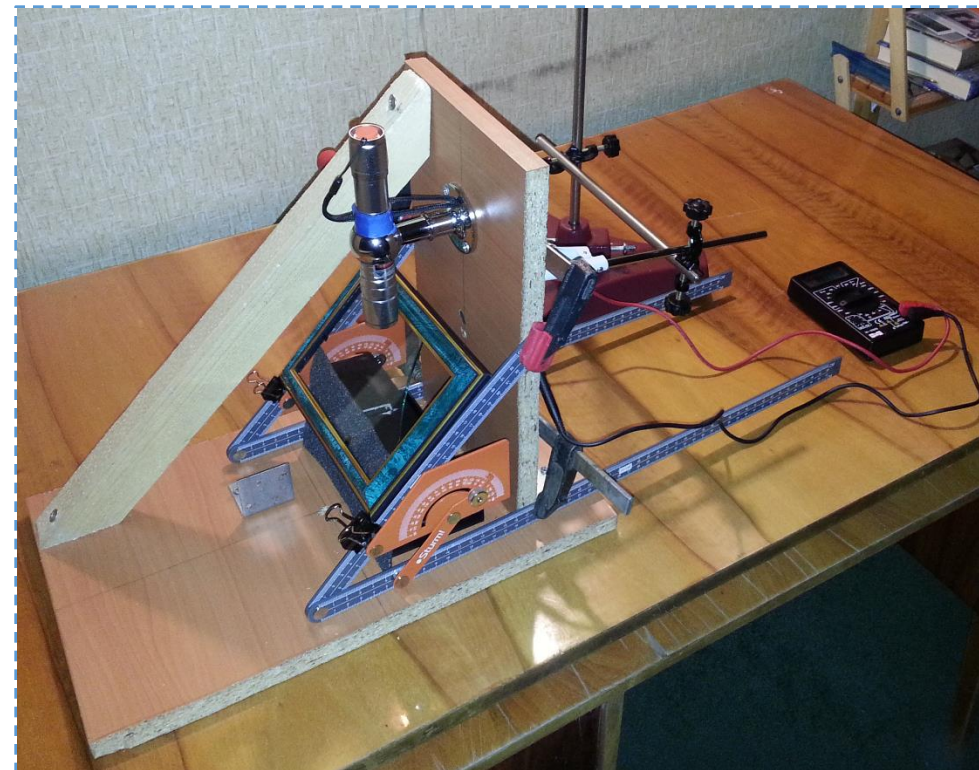
Принципиальная схема



Лазерные указки Dragon (532 нм, 650 нм)

ГФК на опаловой основе с  $D=290$  нм и  $\eta=0.26$

Экспериментальная установка





## 3.2 Проведение эксперимента

### А. Характеристики стеклянной пластины

#### Расчет коэффициента преломления

$$n_c = \sqrt{1 + \left(\frac{b}{d}\right)^2 \sin(\alpha)}$$

$d$  – толщина стеклянной пластины  
(1.2 мм ± 0.5 мм);

$b$  – расстояние между нормальными в точке  
входа и выхода луча (1.5 мм ± 0.5 мм);

$\alpha$  – угол падения луча лазера на стеклянную  
пластинку ( $80^\circ \pm 1^\circ$ ).

$$n_c \approx 1.57$$

#### Расчет коэффициента отражения

$$R_c = \sqrt{|r_s|^4 + |r_p|^4}$$

$$r_s = \frac{\sqrt{n_c^2 - \sin^2\left(\frac{\pi}{4}\right)} - \cos^2\left(\frac{\pi}{4}\right)}{\sqrt{n_c^2 - \sin^2\left(\frac{\pi}{4}\right)} + \cos^2\left(\frac{\pi}{4}\right)}$$

$$r_p = r_s \frac{\cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \sqrt{n_c^2 - \sin^2\left(\frac{\pi}{4}\right)} - \sin^2\left(\frac{\pi}{4}\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \sqrt{n_c^2 - \sin^2\left(\frac{\pi}{4}\right)} + \sin^2\left(\frac{\pi}{4}\right)}$$

$$R_c \approx 0.20$$

## 3.3

# Проведение эксперимента

## Б. Коэффициент отражения образца ГФК

### Замер освещенности (мВ)

$E_{v1}$  – уровень освещенности на месте нахождения образца ГФК

$E_{v2}$  – уровень освещенности отраженного от образца ГФК света

№	$\lambda = 532$ нм		$\lambda = 650$ нм	
	$E_{v1}$	$E_{v2}$	$E_{v1}$	$E_{v2}$
1	457	0,4	434	5,80
2	461	0,3	431	7,2
3	467	0,4	411	6,1
4	473	0,3	406	6
5	485	0,4	401	6
Среднее	468,6	0,36	416,6	6,22

### Расчет коэффициентов отражения ГФК

$$R_{\text{э}} = \frac{E_{v2}}{E_{v1} R_c}$$

При  $\lambda = 532$  нм

$$R_{\text{э}} \approx 0.004$$

При  $\lambda = 650$  нм

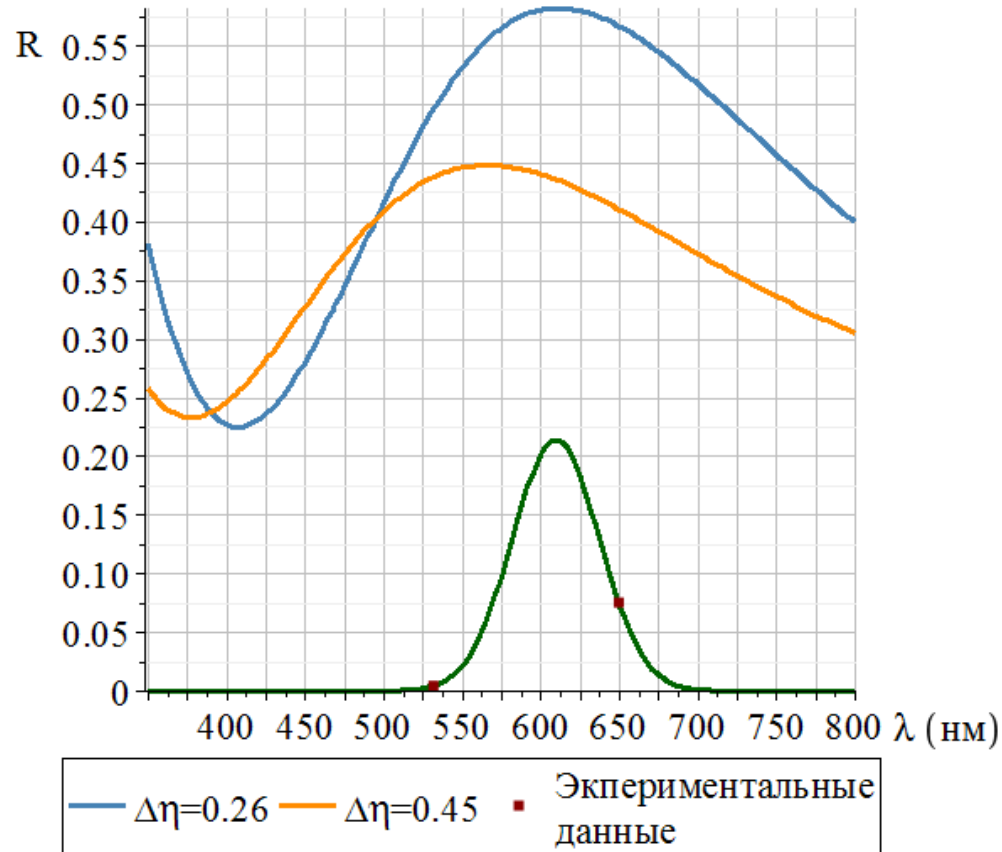
$$R_{\text{э}} \approx 0.075$$

Погрешность расчета  $R_{\text{э}}$  составляет  $\pm 25\%$ .

## 3.4

# Итоги эксперимента

$D = 290 \text{ нм}$



1. Максимум коэффициента отражения в теории и эксперименте наилучшим образом соответствует пористости, равной 0.26.

Внутренние поры глобул, по-видимому, не оказывают влияния на коэффициент отражения.

2. Экспериментально полученный коэффициент отражения сильно ниже предсказанного.

Это можно объяснить дефектами поверхности образца.

# Выводы

- Проведена трехмерная визуализация ячейки ГФК и сечений в Autodesk 3Ds Max 2015.
- Построены математические модели сечений в Maple 18.
- Проведен расчет зависимости коэффициента отражения ГФК от пористости, диаметра глобул и длины волны.
- Разработана экспериментальная установка для измерения коэффициента отражения ГФК.
- Получены данные, подтверждающие выведенную теоретическую зависимость.
- Путем сравнения расчета и эксперимента возможно оценить качество поверхности реального ГФК.

# Перспективы

- Создание методики тестирования образцов ГФК для оценки качества их поверхности.
- Получение ГФК с оптическими параметрами, обеспечивающими максимальные коэффициенты отражения.
- Использование ГФК для получения монохроматического излучения с меньшей шириной спектра излучения.
- Создание зеркал с избирательным отражением света с более высокими характеристиками.

# Список литературы

- [1] E. Yablonovitch, «Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics,» Phys. Rev. Lett., т. 58, № 20, pp. 2059-2062, 18 Май 1987.
- [2] E. Yalonovitch и Т. J. Gmitter, «Photonic Band Structure: The Face-Centered-Cubic Case Employing Nonspherical Atoms,» Phys. Rev. Lett., т. 67, № 17, pp. 2295-2298, 21 Октябрь 1991.
- [3] В. С. Горелик, «Оптика глобулярных фотонных кристаллов,» Квантовая Электроника, т. 37, № 5, р. 410, Май 2007.
- [4] Ю. Я. Голубь, В. С. Горелик, Л. Злобина, В. Моисеенко и П. Свербиль, Необратимые процессы в природе и технике, А. Морозов и В. Горелик, Ред., Москва: ФИАН, 2005.
- [5] Г. Мякишев и А. Синяков, Физика. Оптика. Квантовая физика. 11класс., 2 ред., Дрофа, 2002, р. 56.
- [6] Л. Д. Ландау, А. И. Ахиезер и Е. М. Лившиц, Курс общей физики. Механика и молекулярная физика, КДУ, 2009, р. 126.
- [7] Н. И. Юрасов и И. И. Юрасова, «Влияние углеродной пленочной наноструктуры на коэффициент отражения от фотонного кристалла из искусственного опала» Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана, № 44, pp. 30-35, 2012.