

# Оптика наносистем



Тимошенко Виктор Юрьевич

---

*Московский Государственный Университет  
им. М. В. Ломоносова, Физический факультет  
Научно-Образовательный Центр по нанотехнологиям*

# Содержание курса

Лекция 1. Основные понятия оптики конденсированных фаз вещества.

Лекция 2. Взаимодействие света с металлами и диэлектриками.

Лекция 3. Поглощение света в полупроводниках.

Лекция 4. Экситонное и примесное поглощение света.

Лекция 5. Эмиссия излучения из твердых тел.

Лекция 6. Оптические явления в неоднородных твердотельных системах.

Лекция 7. Оптические свойства твердотельных нанокомпозитов.

Лекция 8. Фотонные кристаллы и микрорезонаторы.

Лекция 9. Рассеяние света в твердых телах.

Лекции 10,11. Влияние размеров тел на их оптические свойства.

Лекции 12-14. Экситоны в полупроводниковых наноструктурах.

Лекция 15. Оптические свойства и применения полупроводниковых наноструктур.

Лекция 16. Элементы спиновой оптики и спинтроники.

Лекция 17. Нелинейные оптические явления в твердотельных системах.

**Лекция 18. Элементы нелинейной оптики наноструктур и нанокомпозитов.**

# Лекция 18.

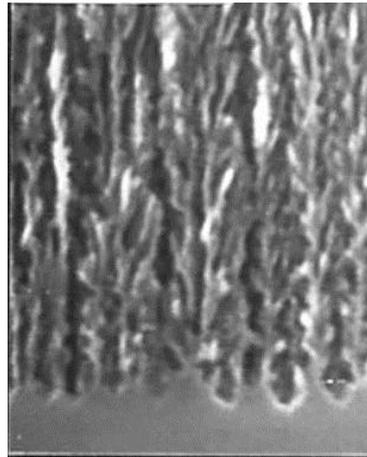
## Элементы нелинейной оптики наносистем и нанокомпозитов.

**Примеры наноструктурированных сред и их эффективных оптических характеристик. Фактор локального поля и нелинейная поляризуемость среды. Механизмы усиления оптических нелинейностей в твердотельных нанокомпозитах. Генерация оптических гармоник в анизотропных наноструктурах. Особенности фазового синхронизма в наноструктурах с двулучепреломлением формы. Фазовый синхронизм и генерация гармоник в фотонных кристаллах. Примеры применения фотонных кристаллов и анизотропных наноматериалов.**

# Пористый кремний как эффективная оптическая среда

Пористый кремний может быть получен электрохимическим травлением (анодированием) монокристаллов кремния в растворах плавиковой кислоты (HF)

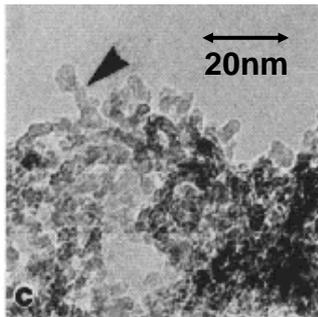
Mesoporous Si



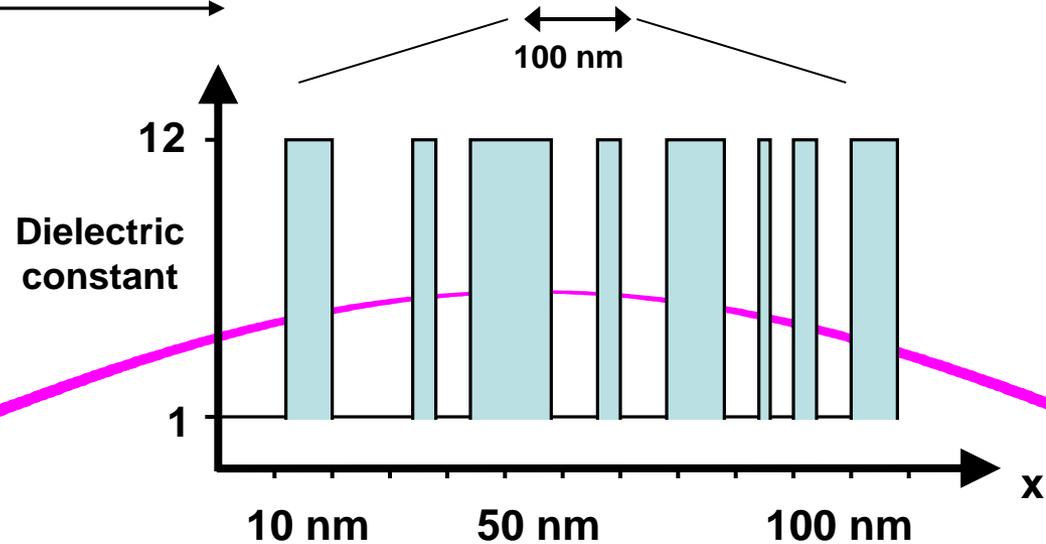
300 nm

Пористый кремний с размерами нанокристаллов кремния от 1 до 5 нм (микропористый кремний) и 5-50 нм (мезопористый кремний) может быть рассмотрен как эффективная оптическая среда для света видимого и ИК диапазонов спектра  $\lambda > 400$  нм

Microporous Silicon



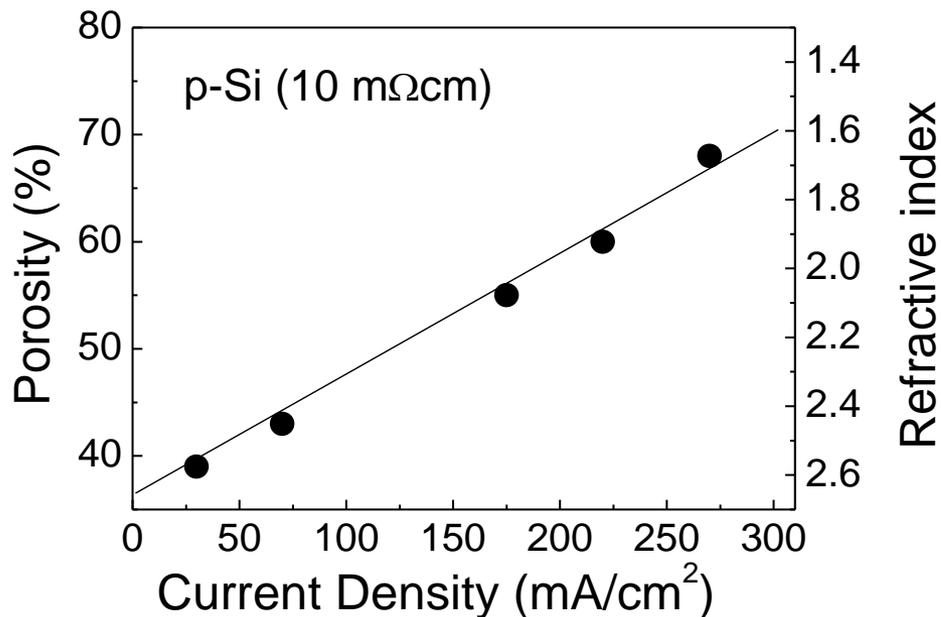
20 nm



$\lambda_{\text{visible light}} \gg d_{\text{Si}}, d_{\text{pores}}$

$\epsilon_{\text{eff}} (\epsilon_{\text{Si}}, \epsilon_{\text{Pores}}, P)$

# Управление величиной показателя преломления пористого кремния



W.Theiss, Surf. Sci. Rep. (1997).

Показатель преломления:

Приближение эффективной среды (модель Бругемана)

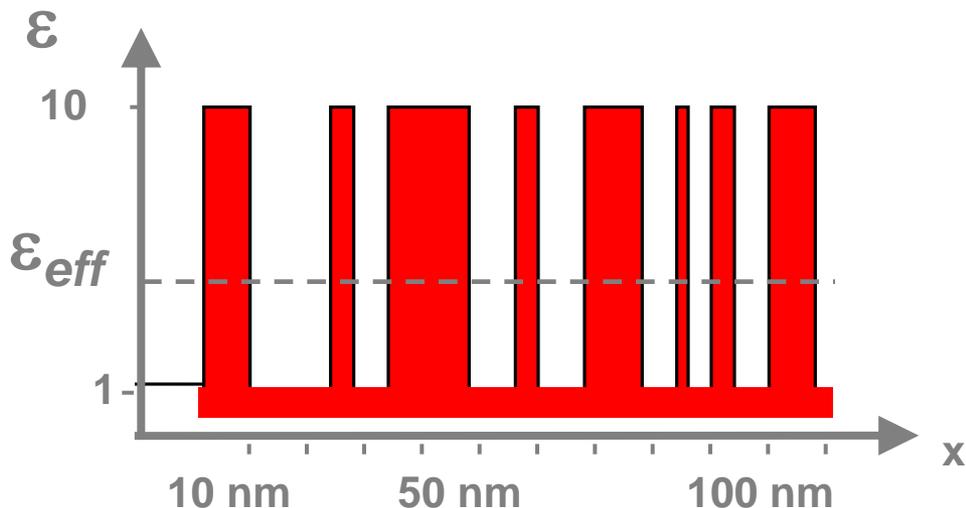
$\epsilon^{eff}$  для неупорядоченной гетерогенной смеси:

$$P \frac{\epsilon_d - \epsilon^{eff}}{\epsilon_d + 2\epsilon^{eff}} + (1-P) \frac{\epsilon_{Si} - \epsilon^{eff}}{\epsilon_{Si} + 2\epsilon^{eff}} = 0$$

где  $P$ - пористость

$$n = \sqrt{\epsilon^{eff}}$$

# Флуктуации локального поля как причина роста эффективной оптической нелинейности в наноструктурированных средах



$$E(r) = [1 + \delta(r)] E_a$$

Среднее (эффективное) поле:

$$E_a = \langle E(r) \rangle = E_{\text{ext}} / \epsilon_{\text{eff}}$$

Отклонения (флуктуации) от  $E_a$  :

$$\langle \delta \rangle = 0, \quad \langle \delta^2 \rangle \neq 0$$

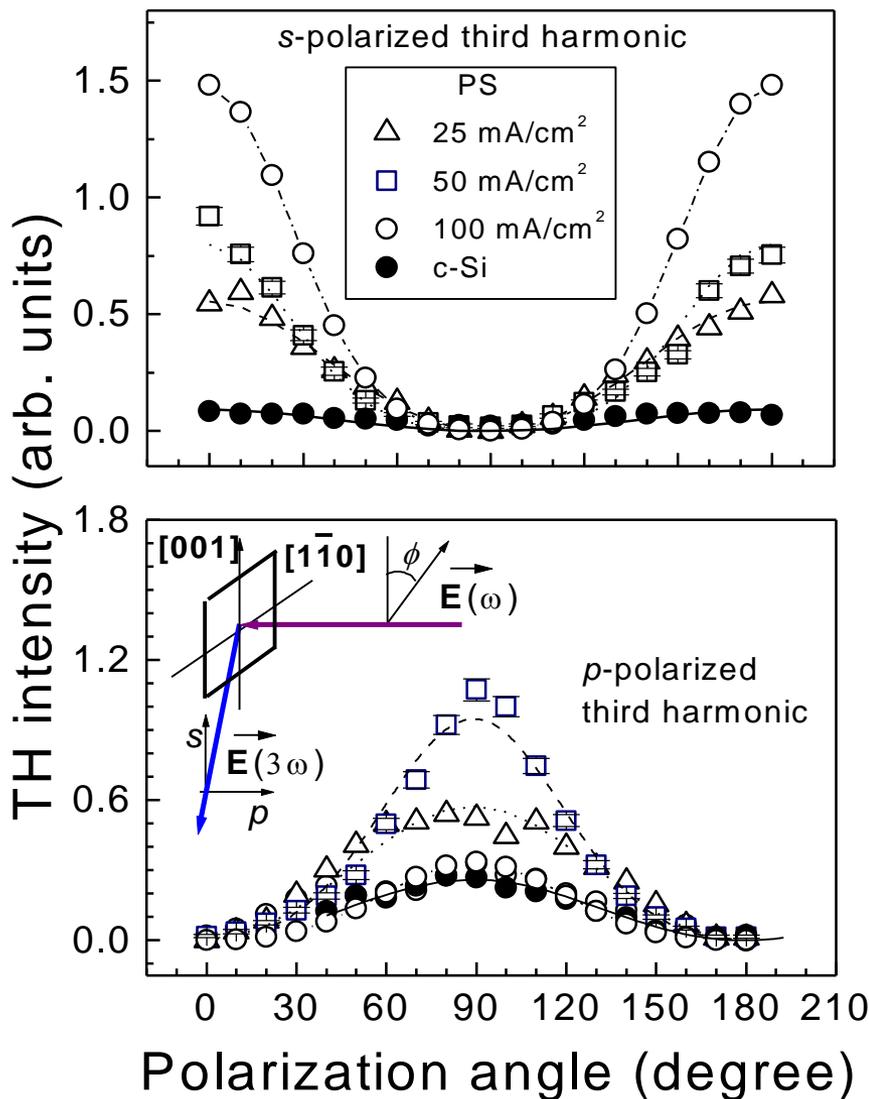
Для ГВГ :  $\langle P(2\omega) \rangle \sim \chi^{(2)} \langle E^2 \rangle = \chi^{(2)} [1 + 2 \langle \delta(r)^2 \rangle] E_a^2$

$N$ -я гармоника:  $\langle P(N\omega) \rangle \sim \langle E^N \rangle = [1 + N \langle \delta(r)^2 \rangle] E_a^N$

$$\chi_{\text{eff}}^{(N)} = \chi^{(N)} \left[ 1 + N \langle \delta^2 \rangle \right]$$

Эффективная нелинейная восприимчивость возрастает вследствие флуктуаций локального электрического поля в наноструктурах тем больше, чем выше порядок нелинейности.

# Генерация третьей гармоники в слоях пористого кремния ориентации (110)



Sample	Porosity %	Refractive index $(n_o+n_e)/2$	Birefringence $\Delta n = n_o - n_e$	Nonlinear-optical anisotropy $\zeta / \chi_{1111}^{(3)}$
c-Si	0	3.4	$10^{-5}$	0.05
PS 25 mA/cm <sup>2</sup>	65	1.74	0.08	0.14
PS 50 mA/cm <sup>2</sup>	75	1.54	0.13	0.65
PS 100 mA/cm <sup>2</sup>	82	1.50	0.15	0.68

$$P_i^{(3)} = \zeta E_i^3 + (\chi_{1111}^{(3)} - \zeta) E_i |E|^2$$

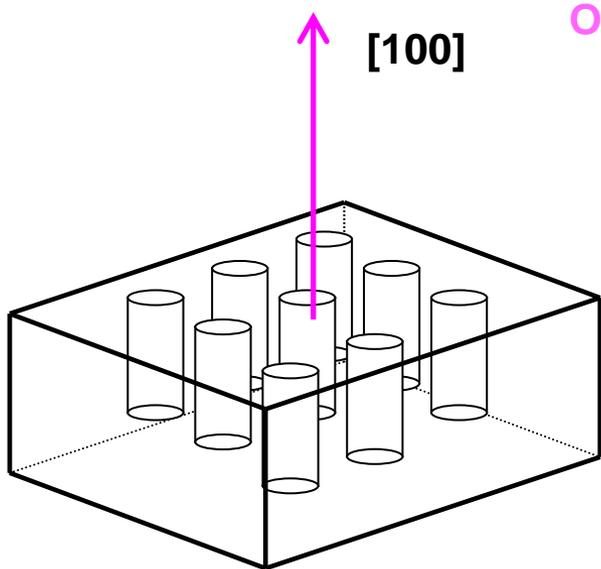
$$\zeta = \chi_{1111}^{(3)} - (\chi_{1212}^{(3)} + \chi_{1221}^{(3)} + \chi_{1122}^{(3)})$$

$$I_{THG} \propto (\zeta \cos^3 \phi + (\chi_{1111}^{(3)} - \zeta) \cos \phi)^2$$

**Рост эффективности ГТГ и изменение анизотропии тензора коррелируют с величиной двулучепреломления при изменении пористости слоя**

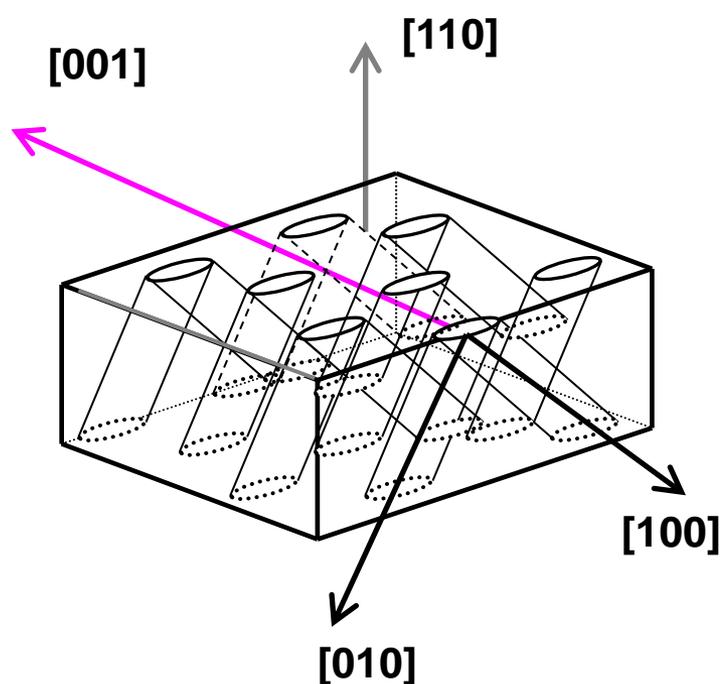
# Оптическая анизотропия пленок пористого кремния с ориентацией поверхности (100) и (110)

c-Si (100)



Positive crystal ( $n_e > n_o$ )

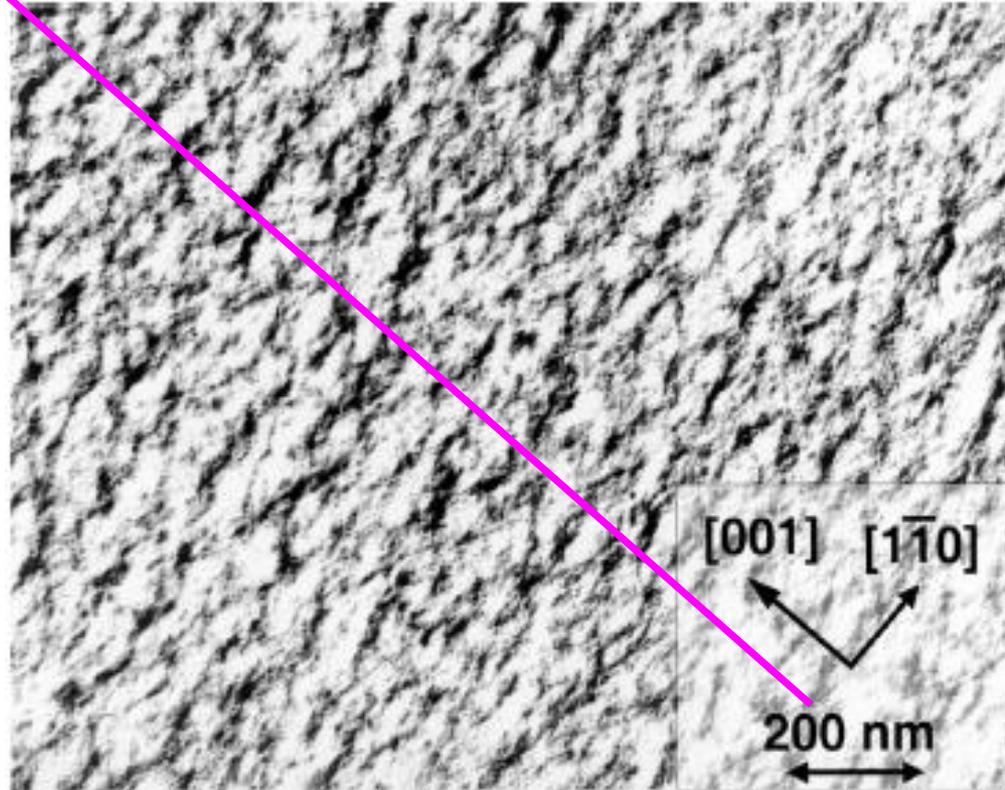
c-Si (110)



Negative crystal ( $n_o > n_e$ )

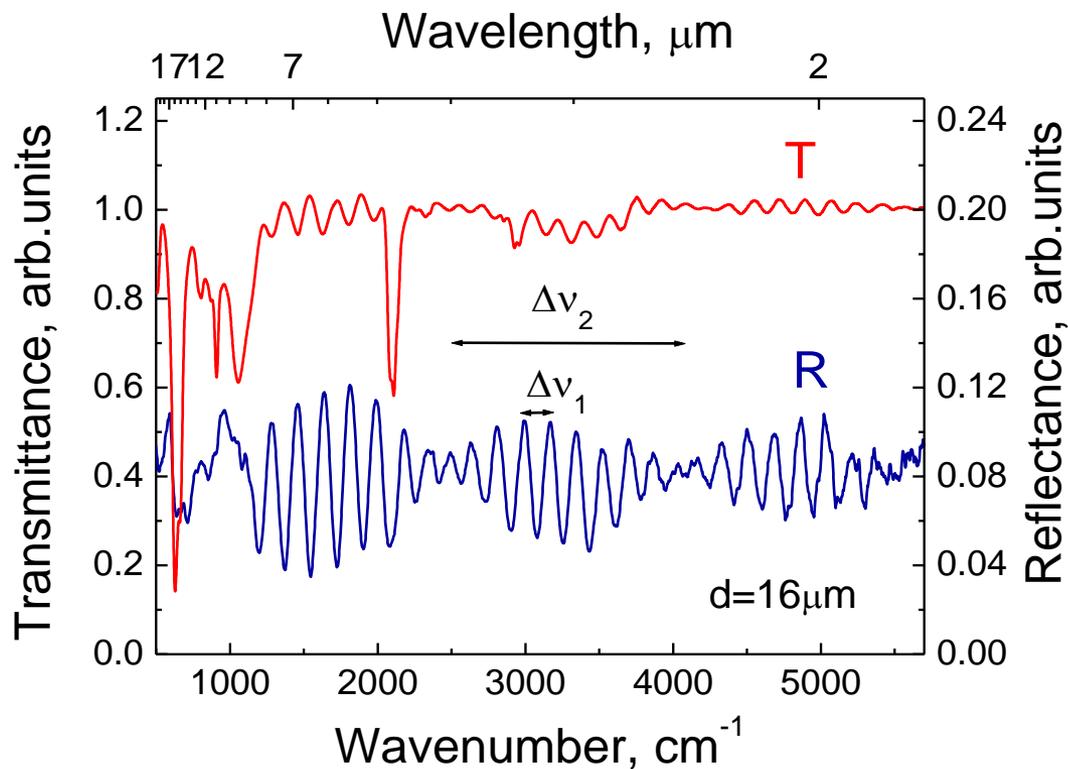
# Электронная микроскопия (110) слоев пористого кремния

Optical  
axis



Поры (светлые области) и кремниевые нанокристаллы (темные области) имеют преимущественную ориентацию в плоскости слоя в направлениях  $[001]$  и  $[1\bar{1}0]$

# ИК спектры двулучепреломляющих слоев пористого кремния в неполяризованном свете



$$\Delta \nu_1 = \frac{1}{d(n_o + n_e)}$$

$$\Delta \nu_2 = \frac{1}{2d|n_o - n_e|}$$

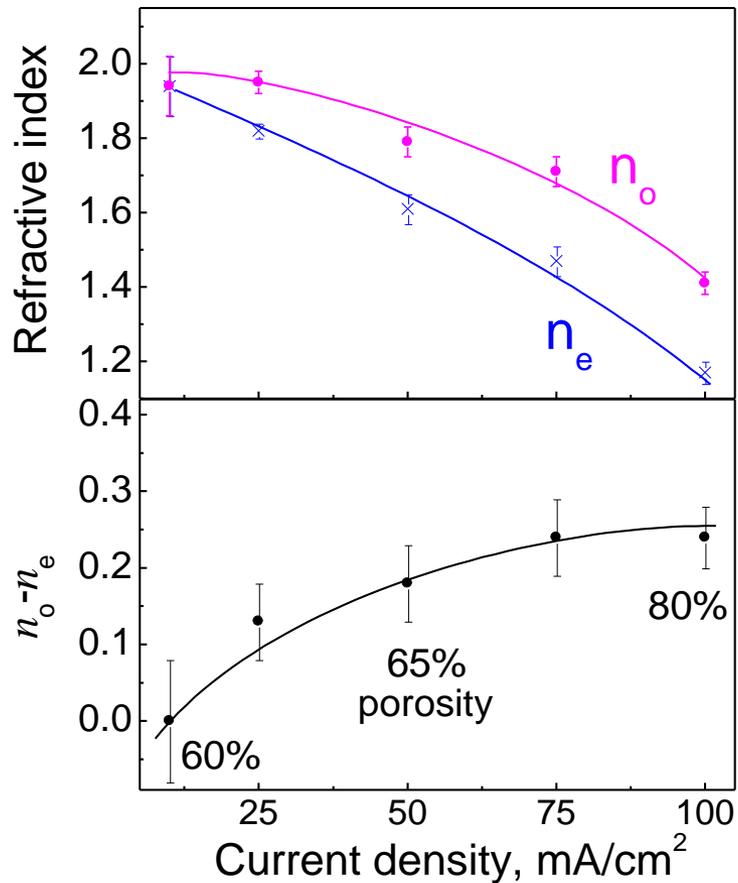


$$n_o = 1.76, n_e = 1.58$$

$$\langle n \rangle = (n_o + n_e)/2 = 1.67$$

$$\Delta n = 0.18$$

# Влияние плотности тока травления на двулучепреломление пористого кремния



For layers prepared

at  $j = 100 \text{ mA/cm}^2$  :

$$\Delta n = 0.24$$

$$\langle n \rangle = (n_o + n_e) / 2 = 1.3$$

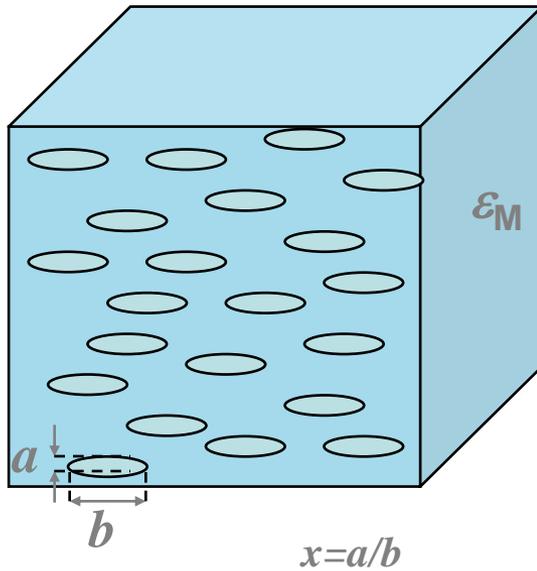
$$\delta n = \Delta n / \langle n \rangle = 0.18$$

at  $\lambda = 1-10 \mu\text{m}$

medium	$\Delta n$
Crystalline Si	$5 \cdot 10^{-6}$
Iceland Spar (CaCO <sub>3</sub> )	0.15
<b>Por-Si (110)</b>	<b>0.24</b>

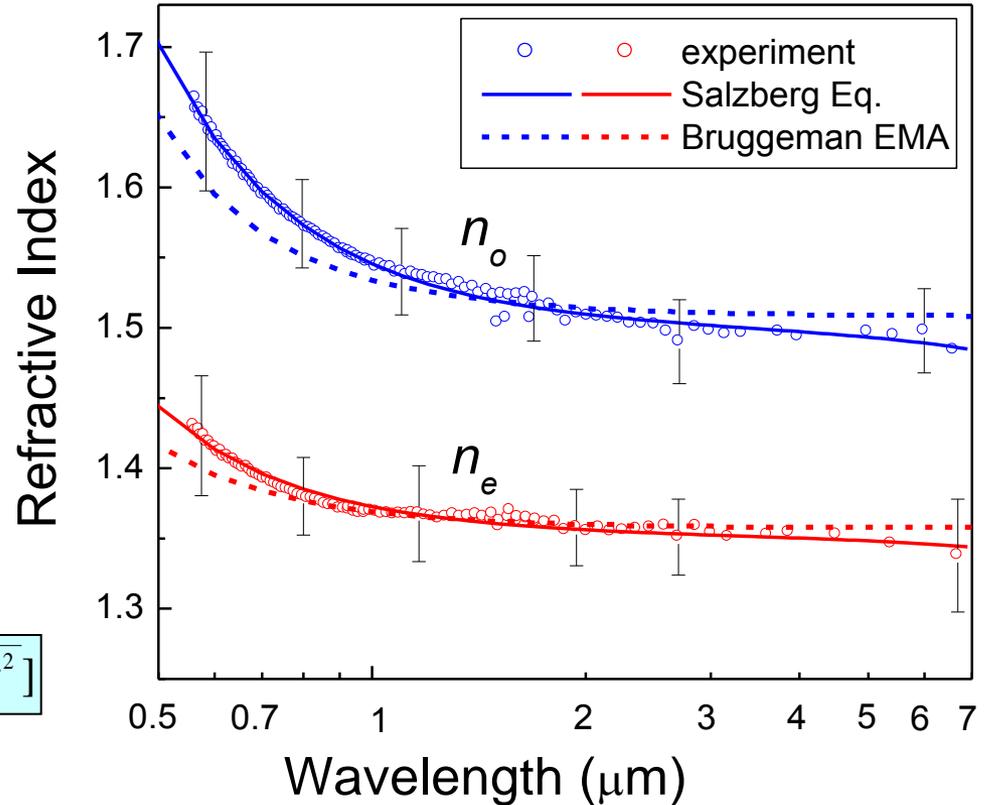
Анизотропные наноструктурированные слои пористого кремния обладают сильным двулучепреломлением, большим, чем, например, в исландском шпате, и в более широком спектральном диапазоне !

# Дисперсия показателя преломления света в por-Si



$$L_{\parallel} = 1/(1-x^2) \cdot [((1-x) \cdot \arcsin(\sqrt{1-x^2}))/\sqrt{1-x^2}]$$

$$2L_{\perp} + L_{\parallel} = 1$$



## Generalized Bruggeman model (EMA):

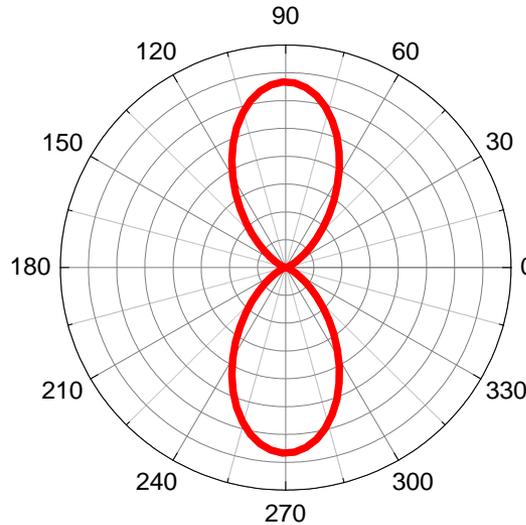
$$P \frac{\epsilon_M - \epsilon_{\text{eff}}^{o,e}}{\epsilon_{\text{eff}}^{o,e} + L_{o,e}(\epsilon_M - \epsilon_{\text{eff}}^{o,e})} + (1-P) \frac{\epsilon_{Si} - \epsilon_{\text{eff}}^{o,e}}{\epsilon_{\text{eff}}^{o,e} + L_{o,e}(\epsilon_{Si} - \epsilon_{\text{eff}}^{o,e})} = 0$$

## For c-Si :

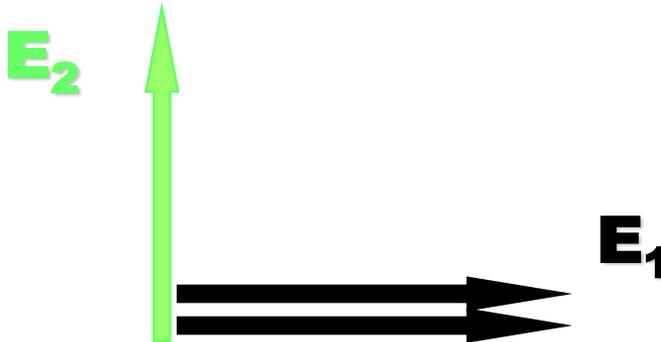
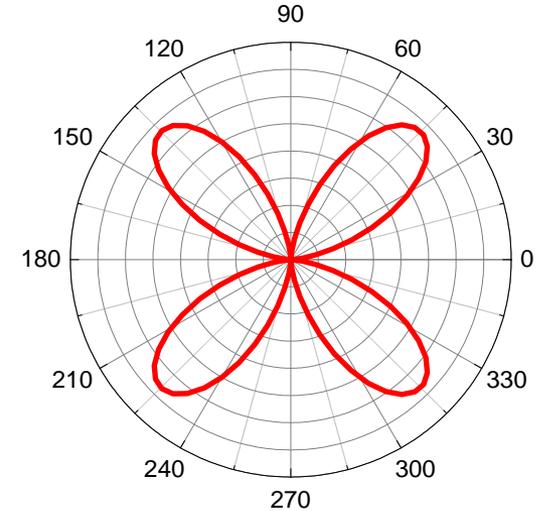
$$n_{o,e}^2 = A_{o,e} + K_{o,e} / (\lambda^2 - B_{o,e}) + C_{o,e} \lambda^2$$

# Два типа синхронизма в отрицательном двулучепреломляющем кристалле

**$\text{Sin}^2\phi$**

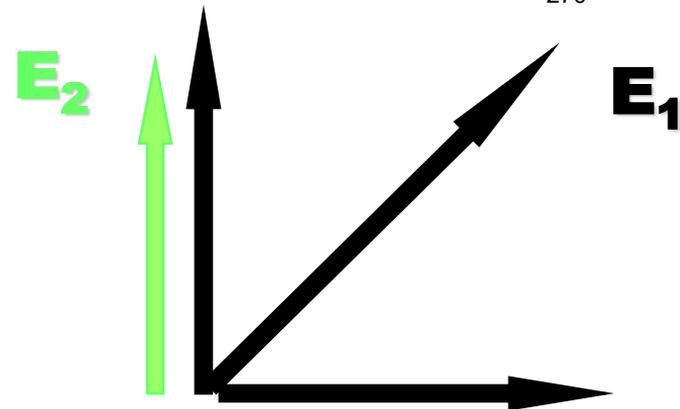


**$\text{Sin}^4 2\phi$**



**1 type (ooe):**

$$n_e(2\omega) = n_o(\omega)$$

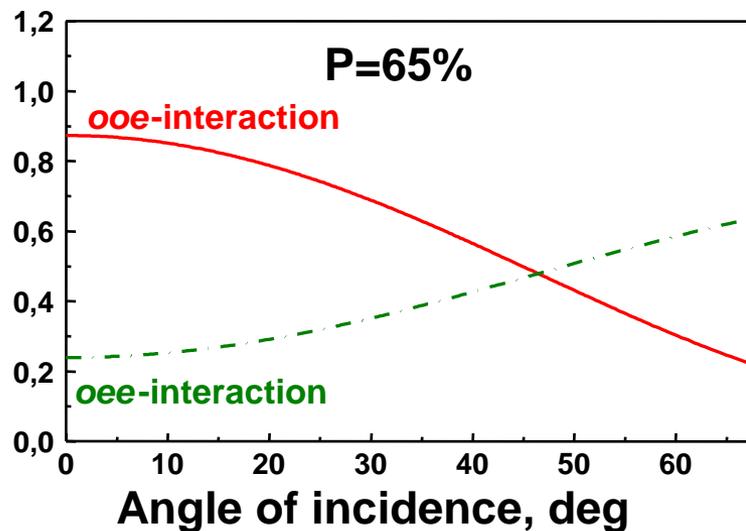
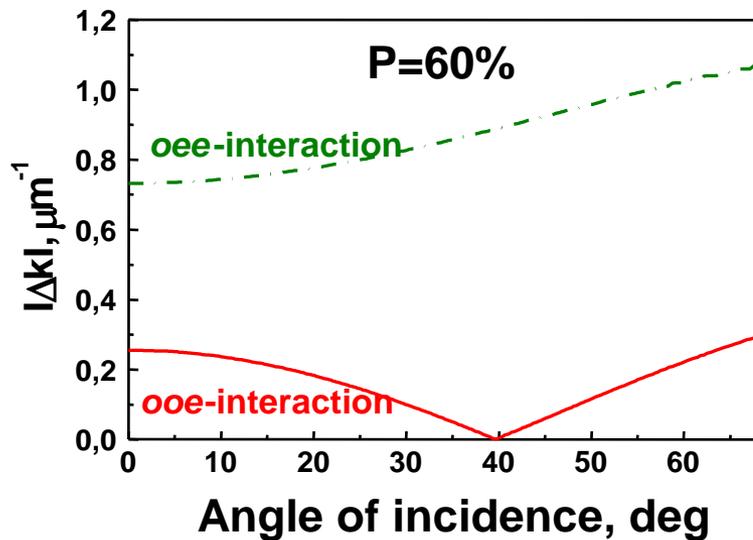


**2 type (oee):**

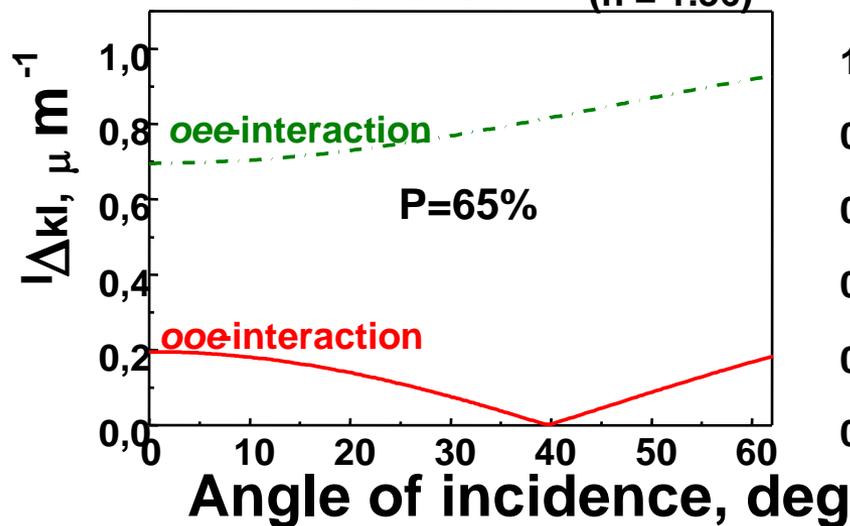
$$n_e(2\omega) = 1/2(n_o(\omega) + n_e(\omega))$$

# Угловые зависимости фазовой расстройки для ГВГ в слоях por-Si

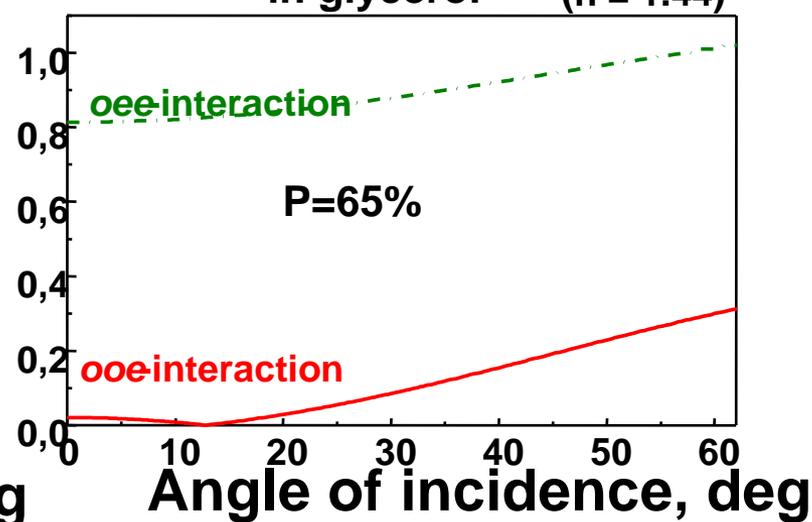
Porous Si (110) in vacuum



in ethanol ( $n = 1.36$ )



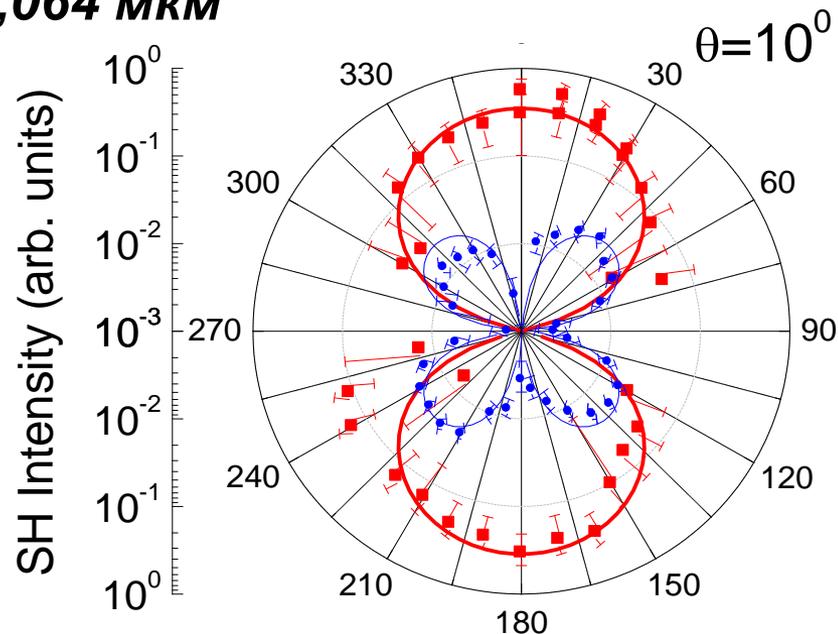
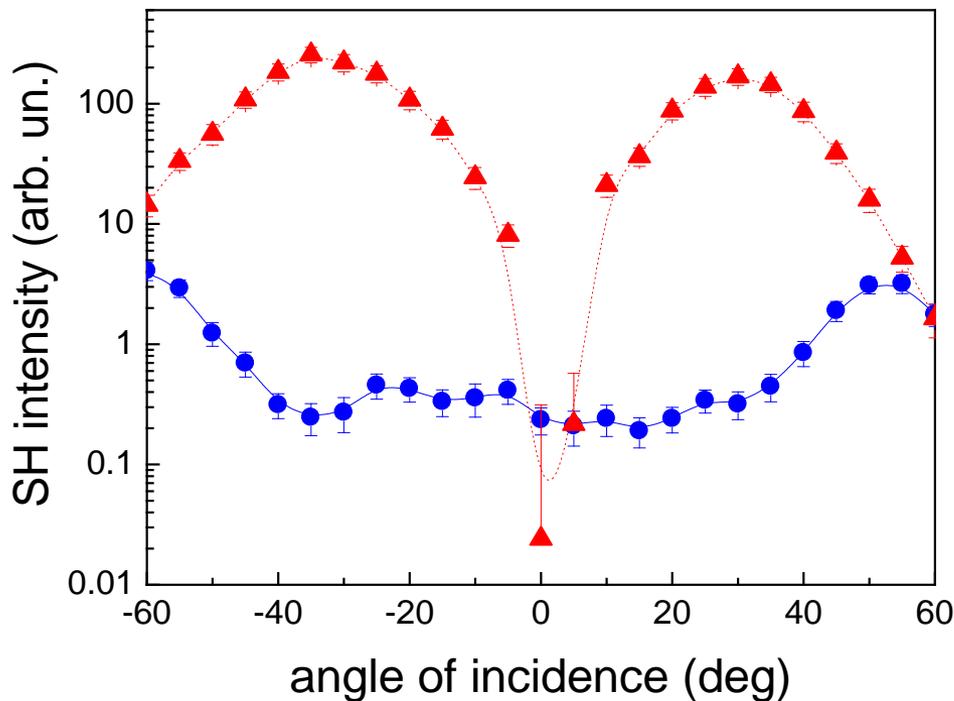
in glycerol ( $n = 1.44$ )



# Управление эффективностью генерации второй гармоники путем заполнения пор диэлектрическими жидкостями

$$ГВГ : \omega = 2\omega_0$$

$$\lambda_0 = 1,064 \text{ мкм}$$



Вследствие реализации условий фазового синхронизма для определенных углов падения света в пористых матрицах, заполненных молекулами воздуха или другим веществом (глицерином), интенсивность сигнала второй гармоники возрастает

**Поры заполнены:**

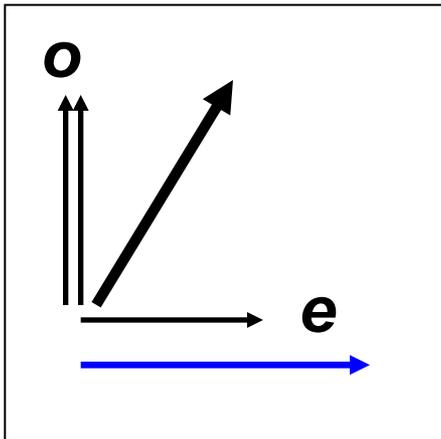


**глицерином**

**воздухом**

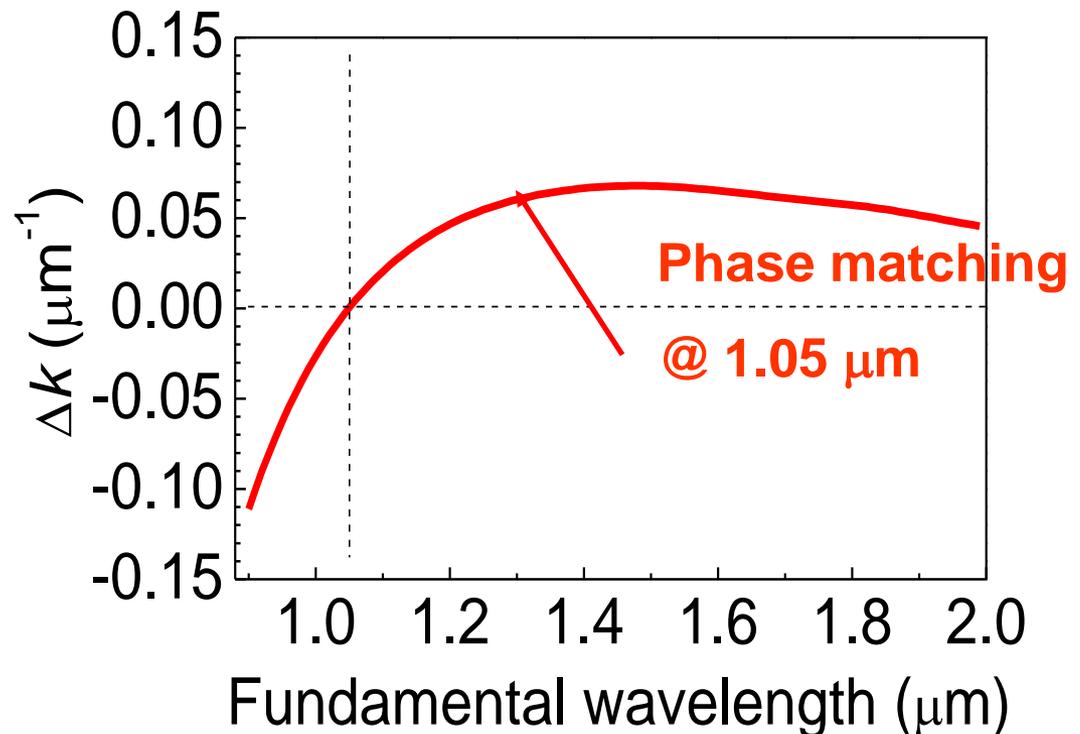
# ГТГ в окисленном пористом кремнии в условиях фазового синхронизма

ooe - e



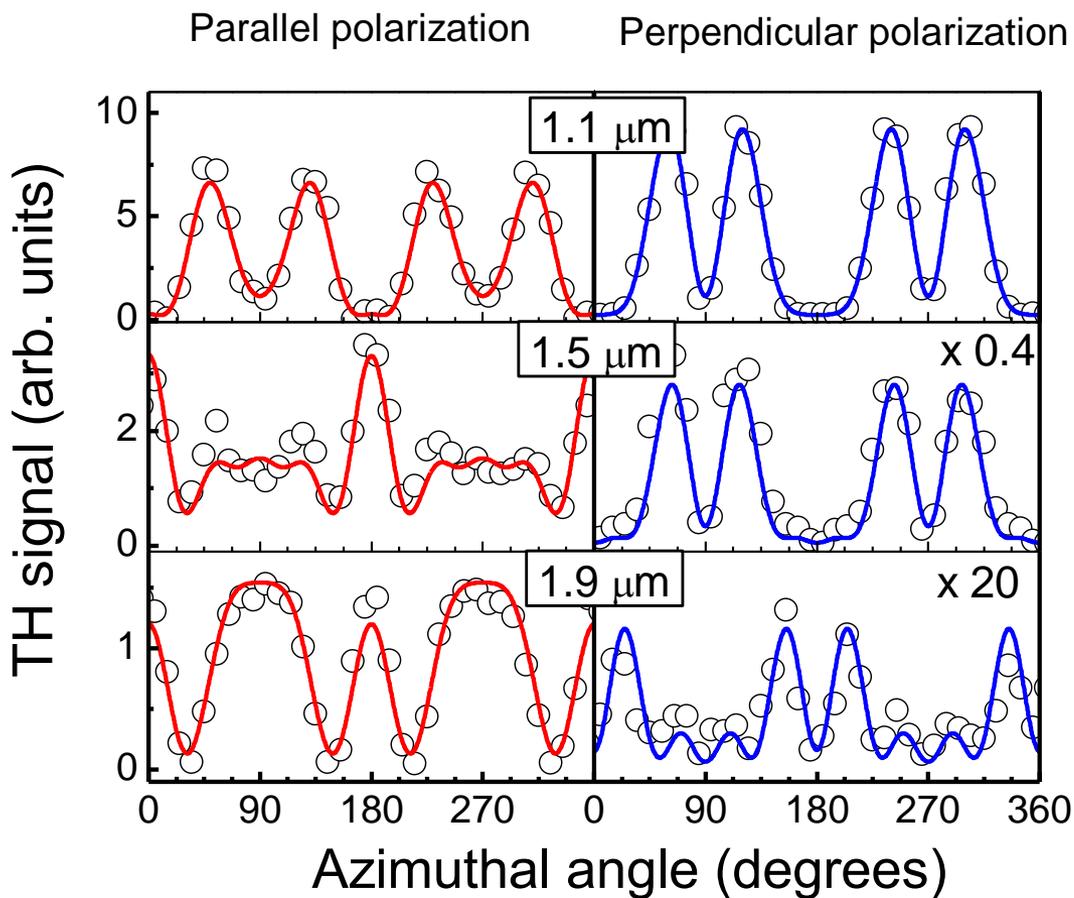
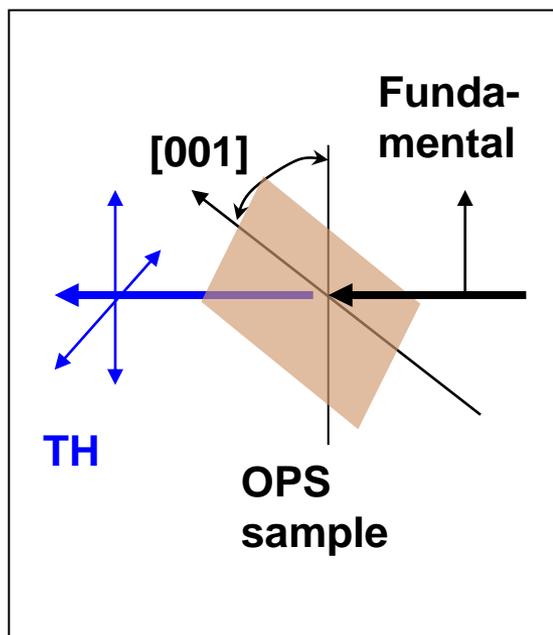
$$\Delta k = k_{3,e} - 2k_{1,o} - k_{1,e} = \frac{2\pi}{\lambda} [3n_e(3\omega) - 2n_o(3\omega) - n_e(\omega)]$$

В окисленном пористом кремнии за счет перехода части кремниевых нанокристаллов в прозрачный оксид кремния при одновременном сохранении анизотропии формы (двулучепереломления) возможна генерация третьей гармоники (ГТГ) в условиях фазового синхронизма.

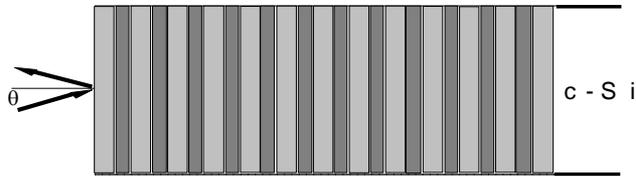


# Генерация третьей гармоник Эксперимент

## Orientation dependence



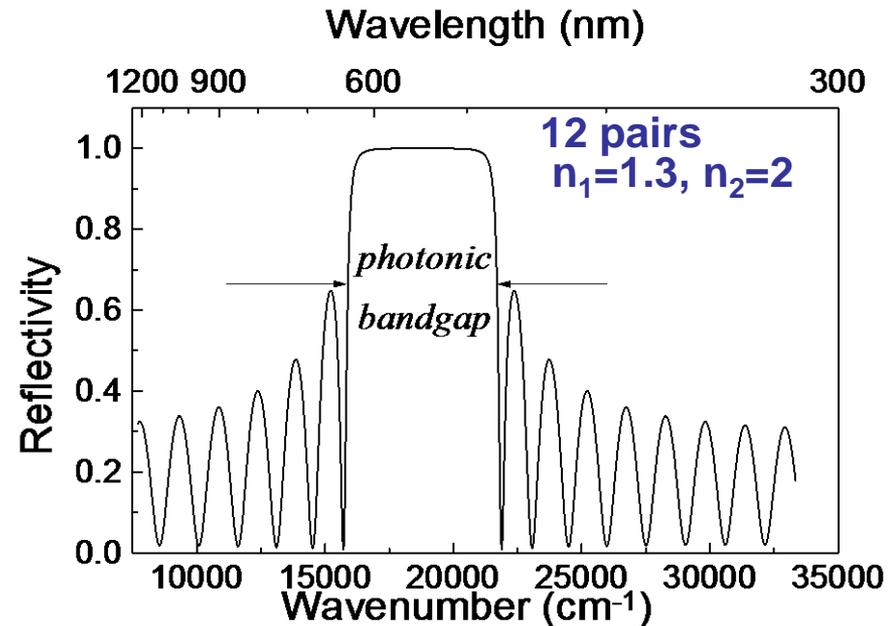
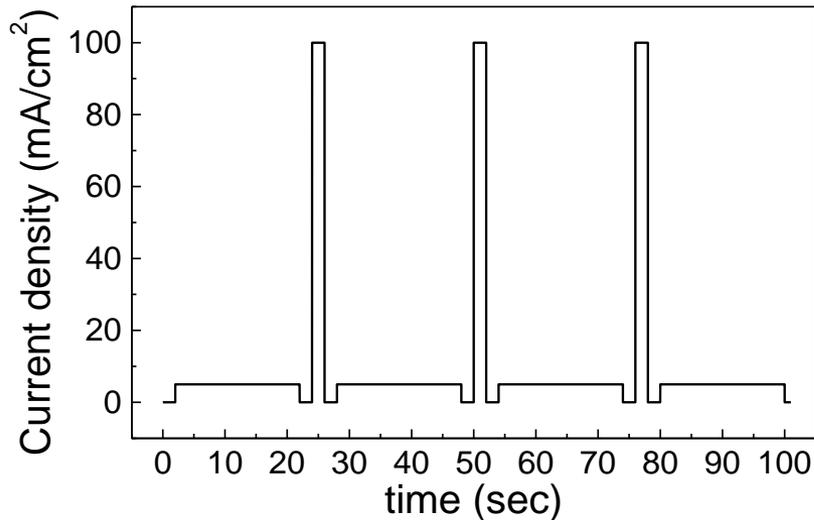
# Одномерные фотонные кристаллы на основе пористого кремния



Идеальное брэгговское зеркало

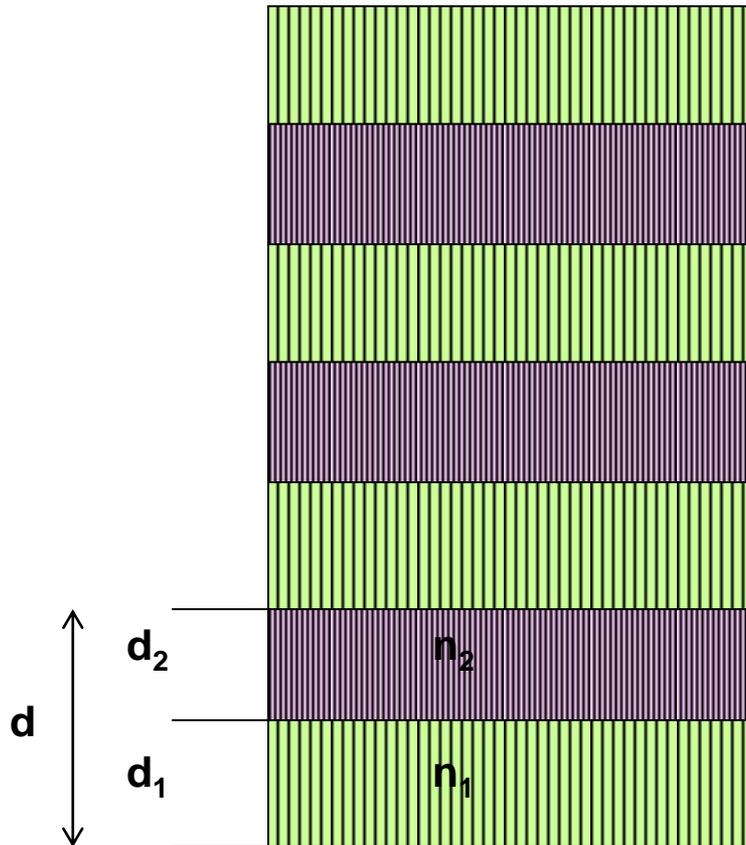
Условие Брэгга:

$$n_1 d_1 + n_2 d_2 = \lambda/2$$

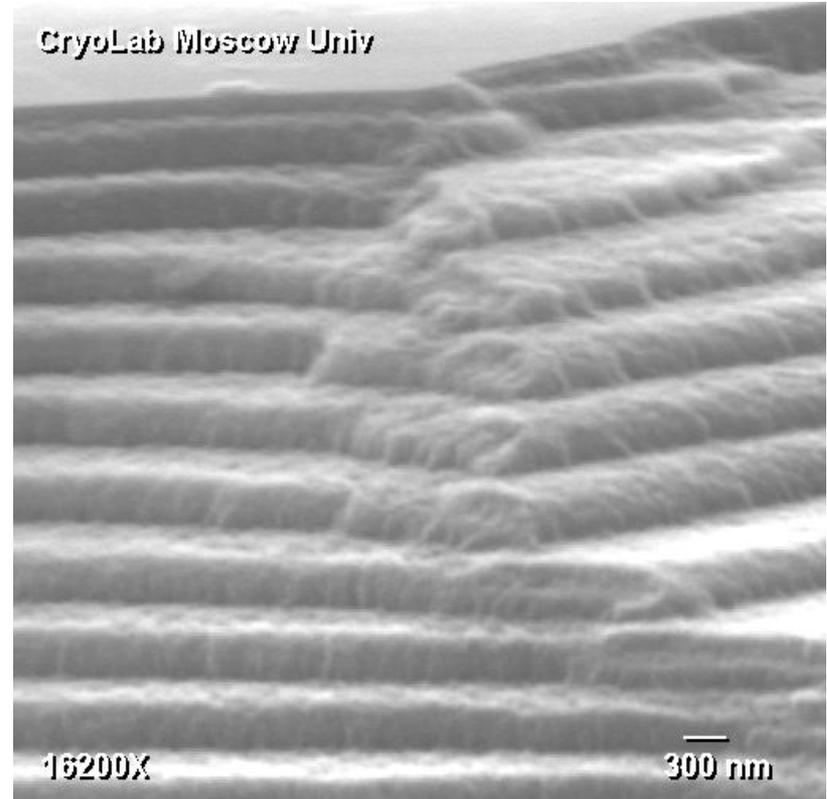


# Одномерные фотонные кристаллы на основе пористого кремния

Положение фотонных запрещенных зон зависит от толщин слоев и показателей преломления:

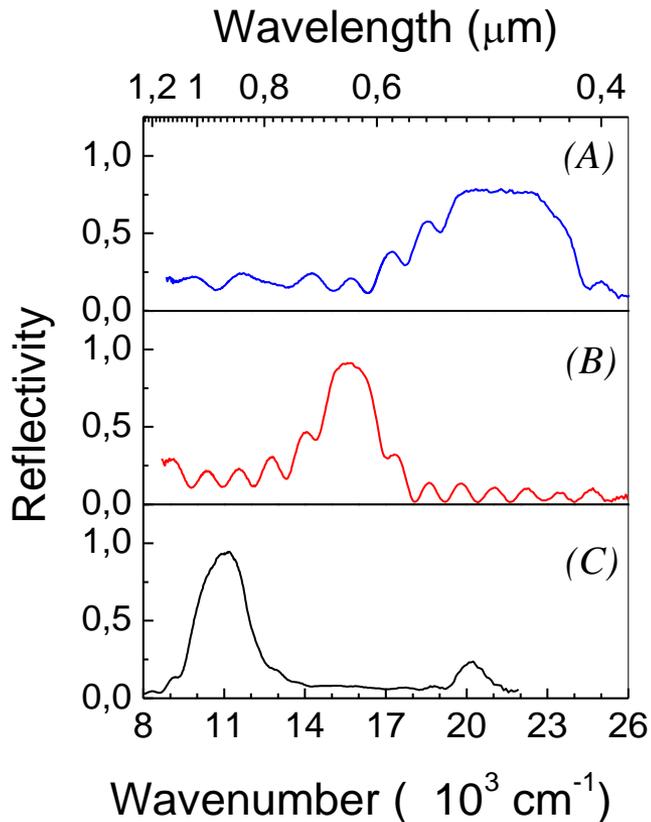


$$2(d_1 n_1 + d_2 n_2) = m\lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots$$



Общий вид бокового склоа 1D-фотонного кристалла из слоев пористого кремния В сканирующем электронном микроскопе

# Спектры отражения и дисперсия эффективного показателя преломления 1D-фотонных кристаллов на основе апористого кремния



Положение фотонной запрещенной зоны зависит от периода структуры, который различен для показанных выше образцов А, В и С.

При достаточно слабом поглощении, когда  $\tilde{n} \approx n$  для коэффициента отражения при нормальном падении можно записать:

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

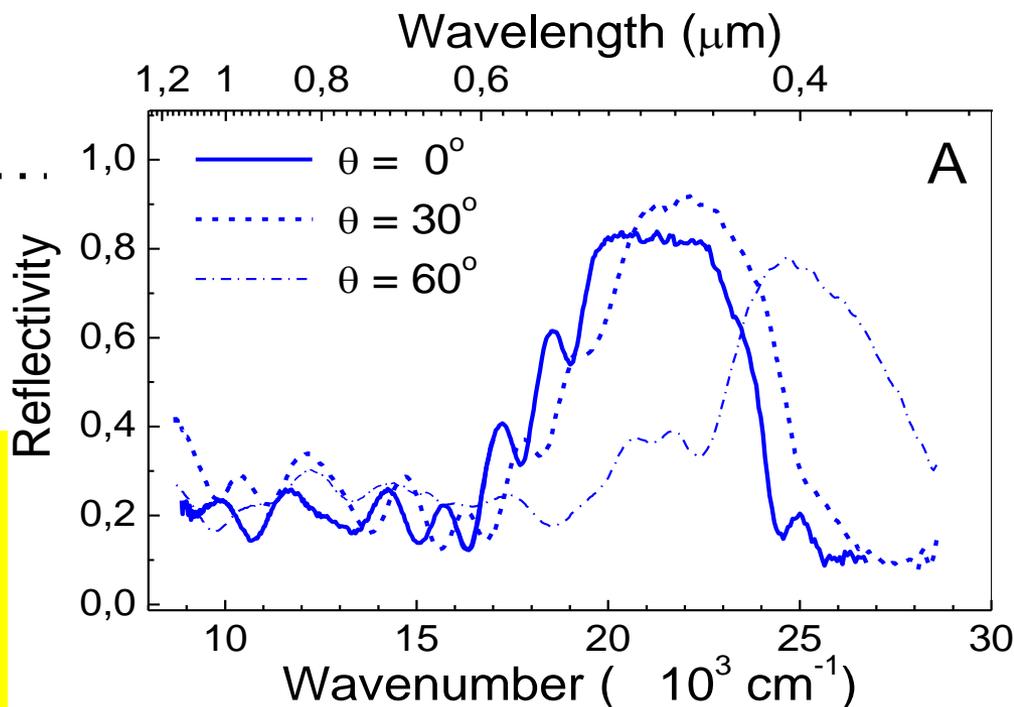
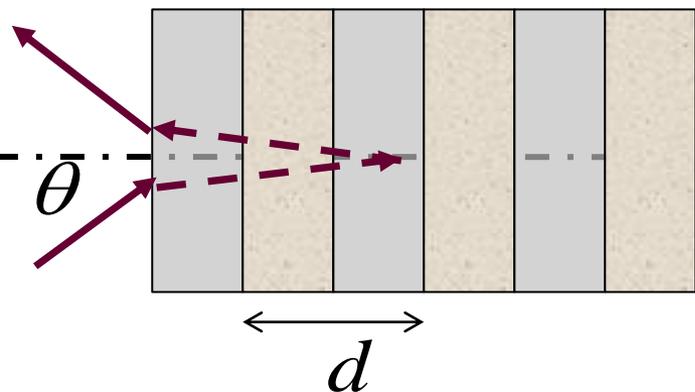
Эффективный показатель преломления для области вне фотонной запрещенной зоны :

$$n_{eff} = \frac{1 + \sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}}$$

Величина волнового вектора будет зависеть как от частоты света (частотная дисперсия), так и от направления :

$$k = \frac{\omega}{c} n_{eff}$$

# Угловые зависимости спектров отражения одномерных фотонных кристаллов на основе пористого кремния



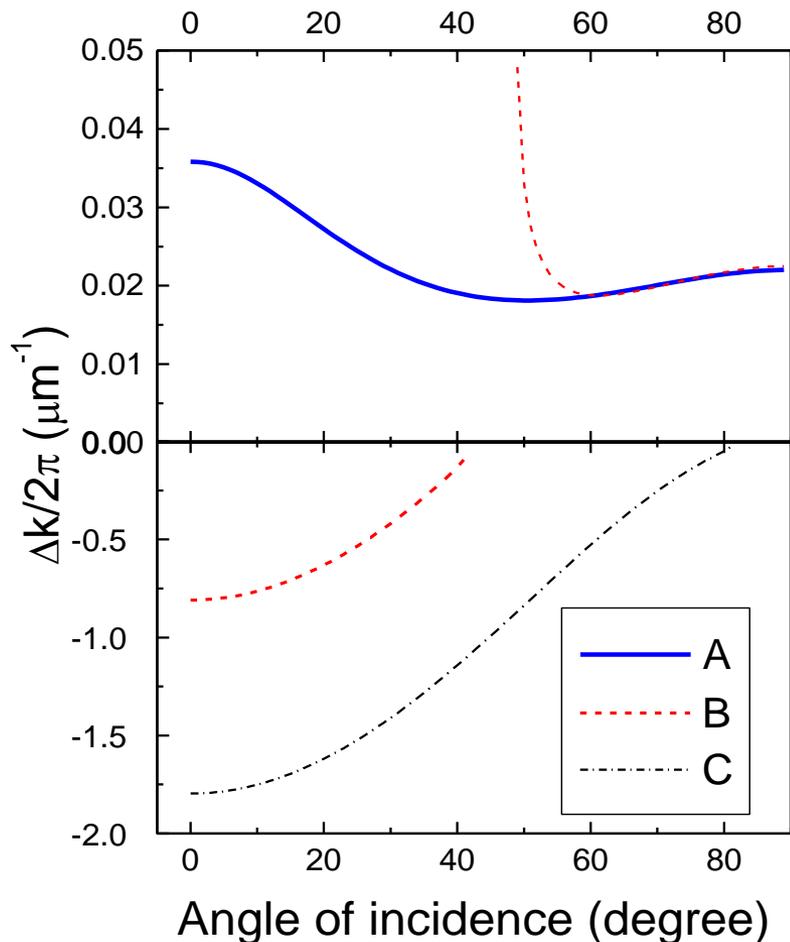
При увеличении угла падения уменьшается проекция периода структуры на направления светового луча, что приводит к сдвигу фотонной запрещенной зоны в коротковолновую область спектра.

Изменяя угол падения излучения можно управлять дисперсией и значением величины волнового вектора.

$$k(\theta) = \frac{\omega}{c} n_{eff}(\theta) = \frac{\omega}{c} \frac{1 + \sqrt{R(\theta)}}{1 - \sqrt{R(\theta)}}$$

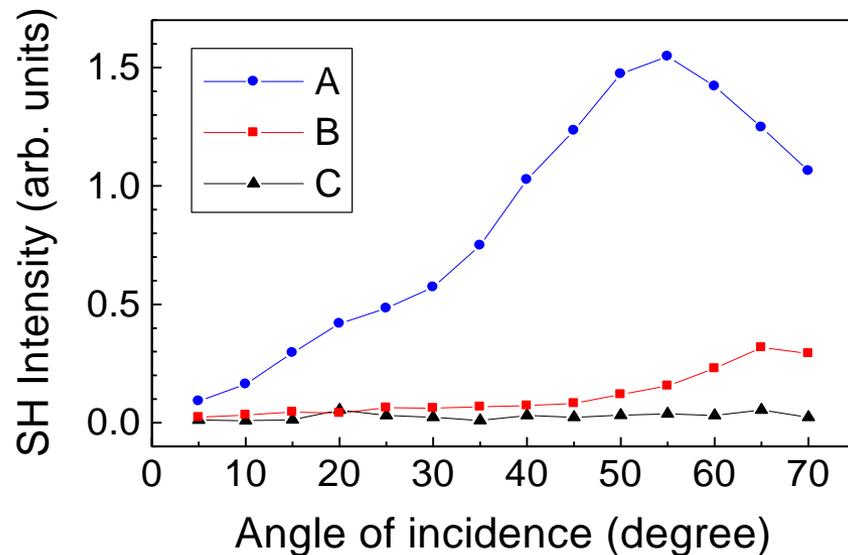
# Реализация фазового синхронизма в одномерных фотонных кристаллах для ГВГ

Зависимость фазовой расстройки от угла падения



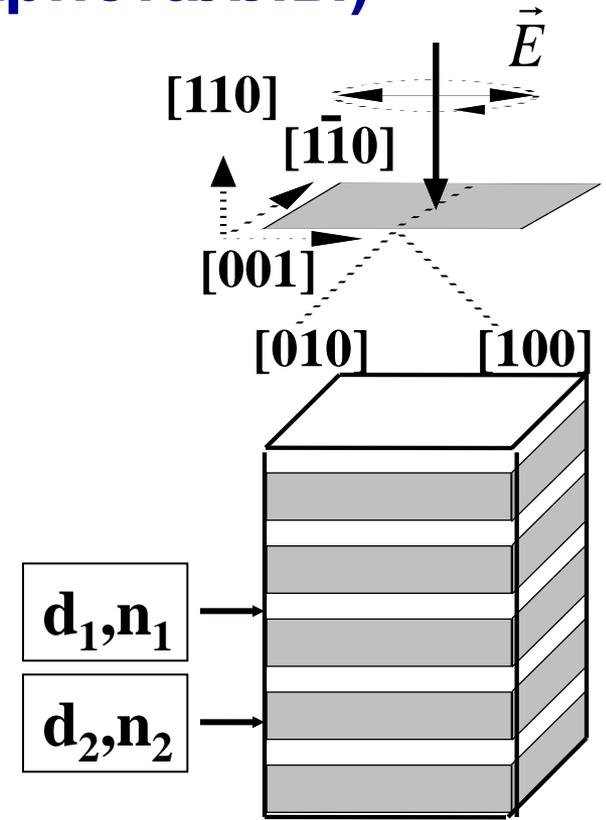
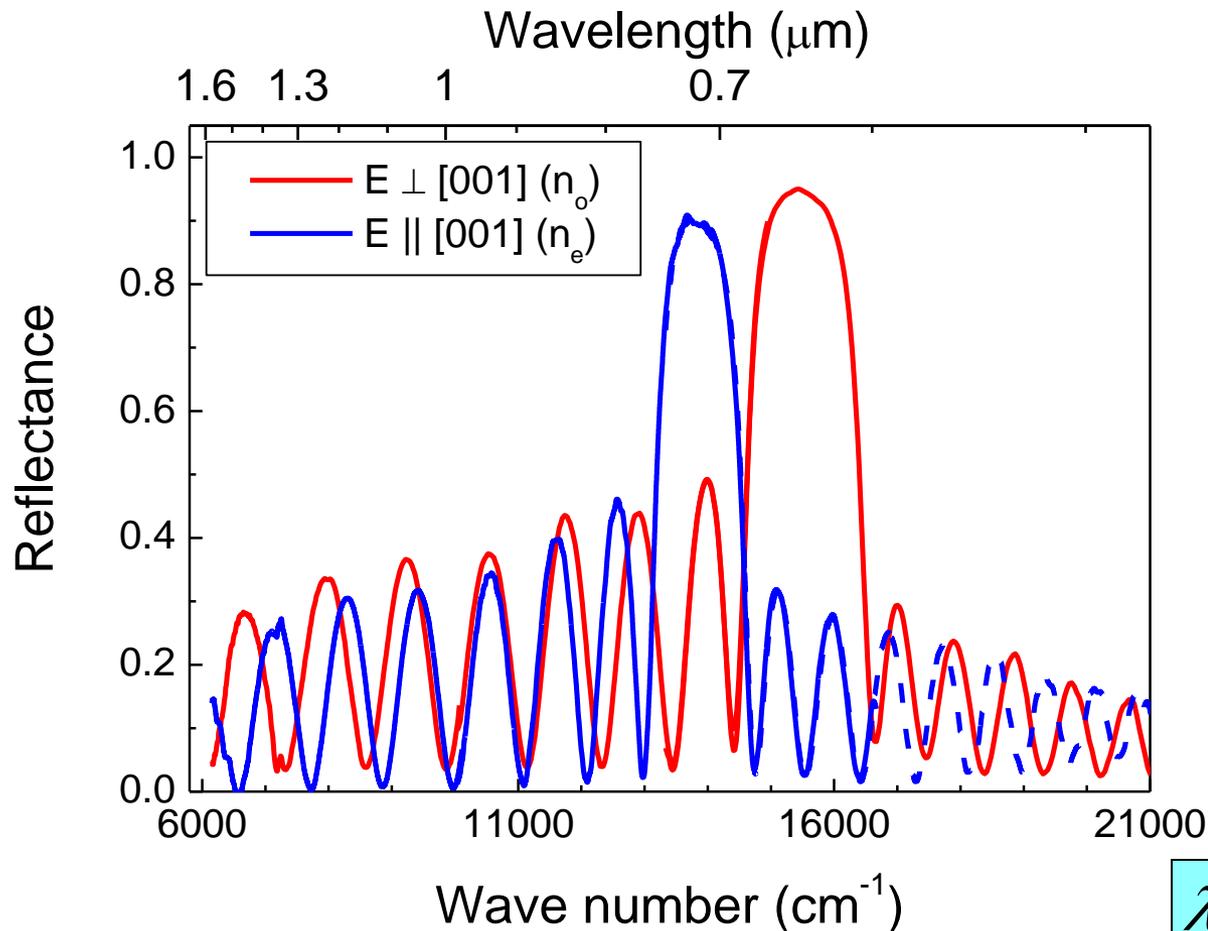
$$|\Delta\vec{k}| = |2\vec{k}_1 - \vec{k}_2|$$

Зависимость интенсивности сигнала второй гармоники от угла падения на образец



Наблюдается рост сигнала второй гармоники при углах падения, соответствующих минимуму фазовой расстройки

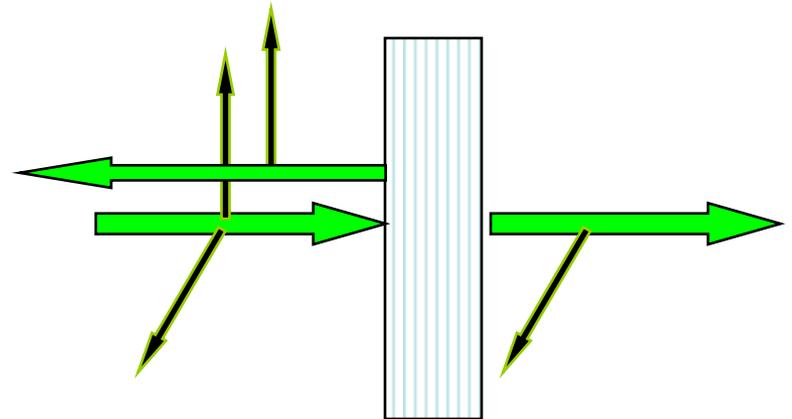
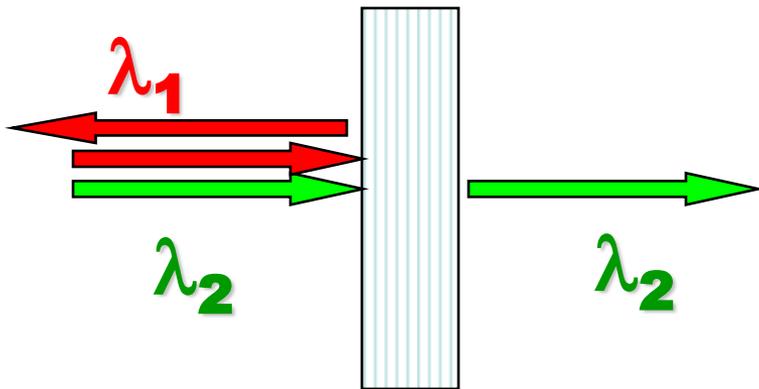
# Фотонные кристаллы с поляризационно - перестраиваемой запрещенной зоной (дихроичные 1D-фотонные кристаллы)



$$\lambda_{\text{Bragg}}^{o,e} = 2(d_1 n_1^{o,e} + d_2 n_2^{o,e})$$

# Применения анизотропного пористого кремния

- Волновые пластинки ( $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$  :  $\lambda=0.5-8 \mu\text{m}$  и  $12 \mu\text{m} \rightarrow \infty$  )
- Фазовосогласующие среды для генерации гармоник
- Дихроичные зеркала
- Плоские «окна Брюстера»



# Образцы дихроичных 1D-фотонных кристаллов из анизотропно-наноструктурированного



# Контрольные вопросы к Лекции 18:

- Каковы причины усиления оптических нелинейностей в твердотельных нанокompозитах?
- Как зависит эффективность генерации оптических гармоник от свойств нанокompозитов?
- От чего зависит положение фотонной запрещенной зоны структур на основе пористого кремния?
- Какие возможны применения фотонных кристаллов?