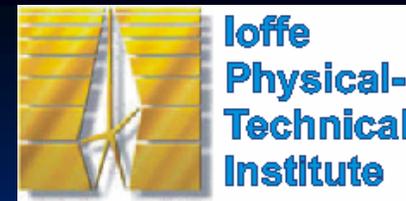


**Трехмерные фотонные и фононные
кристаллы на основе
синтетического опала для
управления световыми потоками**

Валерий Голубев

*Лаборатория физики аморфных полупроводников
ФТИ им. А.Ф.Иоффе
Санкт-Петербург, Россия*

Программы и кооперация



Программы и проекты (за 7 лет)

FP6 EC Program (2)

INTAS (2)

Russia-Italy (bilateral) (1)

РФФИ – DFG (1)

РФФИ (4)

РАН (4)

ФАНИ и Минпром (4)

НОЦ ФАНИ (1)

Опубликовано более 60 статей

План доклада

- Что представляет собой фотонный кристалл?
- Синтетический опал – совершенный модельный трехмерный фотонно – кристаллический материал
- Наноконпозиты опал-наполнитель (GaN, GaP, Pt, Cu, оксиды Fe, наноалмазы)
- Излучающие фотонно – кристаллические материалы
 - опал - Er (фотолюминесценция)
 - опал - фосфоры (электролюминесценция)
- Сверхбыстрое переключение фотонной запрещенной зоны в наноконпозитах опал-полупроводник (опал – AgI, опал - Si, опал - VO₂)
- Гиперзвуковая модуляция света и фильтрация гиперзвуковых волн в *фотонно-фононных* кристаллах на основе опала
- Заключение

Фотонные кристаллы - структуры, в которых диэлектрическая проницаемость модулируется с периодом, сравнимым с длиной волны света .

Современная история фотонных кристаллов началась в 1987г., когда была четко сформулирована **концепция фотонной запрещенной зоны** (*photonic band gap*) и показана глубокая аналогия между свойствами фотонных кристаллов и электронных кристаллических материалов, обладающих зонной структурой.

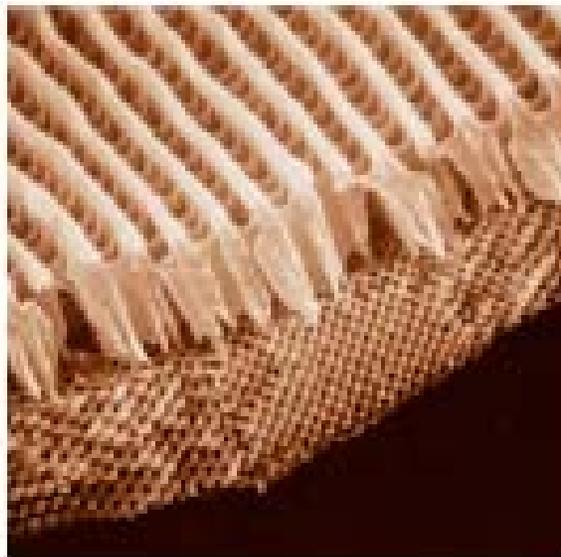
По аналогии с электронной зонной структурой в атомных кристаллических решетках эта **периодичность обуславливает существование фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ)** – энергетической области, в пределах которой распространение света внутри кристалла подавлено в **определенном (псевдо-ФЗЗ, стоп-зона, ФЗЗ) или во всех (полная ФЗЗ) направлениях.**

Именно наличие ФЗЗ позволяет осуществить **контроль спонтанной эмиссии**, приводит к **эффектам локализации света** и открывает путь для **применений фотонных кристаллов** в системах оптической связи и передачи информации, лазерной техники.

Фотонные кристаллы в природе

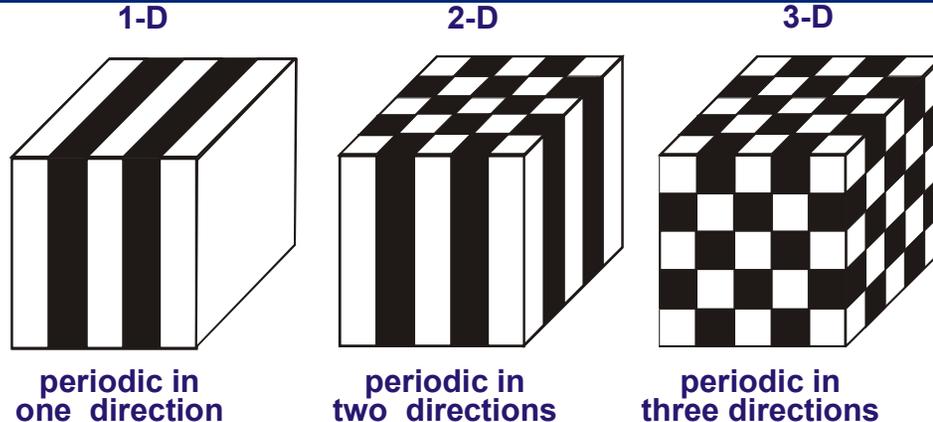


NATURAL PHOTONIC BAND GAPS occur in some butterfly wings (left) and in opals (right). In both cases, the band gap is incomplete—it is not effective in every direction—but it produces iridescent colors. A micrograph of a



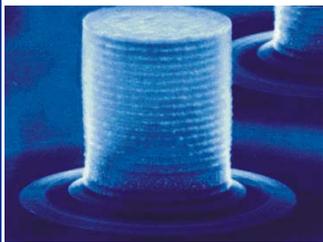
fractured iridescent green butterfly scale (center) shows the submicron-size face-centered cubic structure inside. Opals consist of submicron-size silica spheres arranged in a face-centered cubic (close-packed) structure.

Одномерные, двумерные и трехмерные фотонные кристаллы

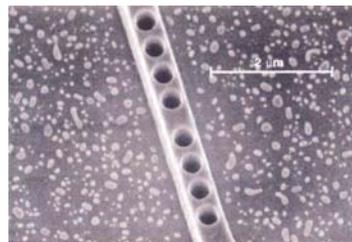


Simple example of one-, two, and three-dimensional photonic crystals. The different colors represent materials with different dielectric constants. The defining feature of a photonic crystal is the periodicity of dielectric material along one or more axes.

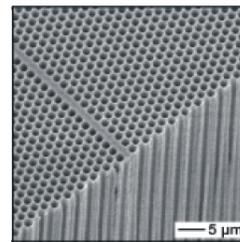
M. Bayer, PRL 81,
2582(1998).



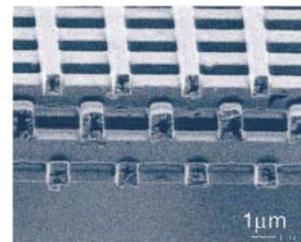
S. Foresi et al., Nature
310, 143(1997).



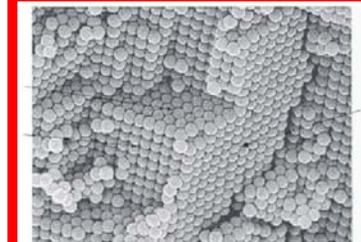
S. Leonov, APL
75,3063 (1999).



S.Y. Lin, APL
83, 593 (2003).



H. Miquès et al., APL
71, 1148 (1996).



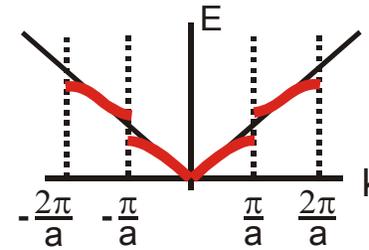
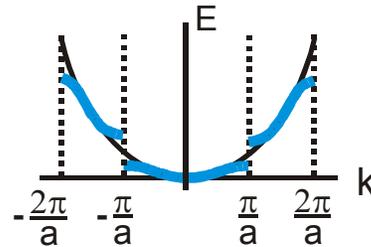
Фотонный кристалл – полупроводник для света



Semiconductor

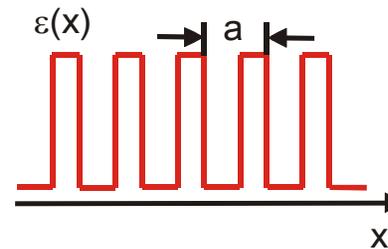
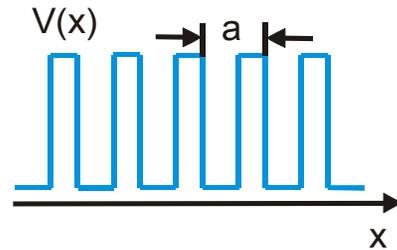
Photonic crystal

$$E_{fc}(k) = \hbar\omega(k) = \frac{\hbar^2}{2m} k^2$$



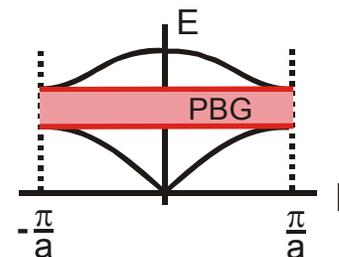
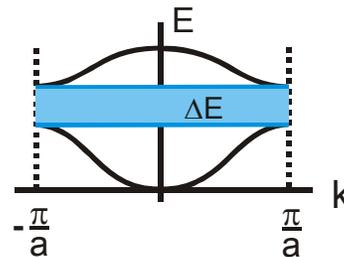
$$\omega = \frac{c k}{\sqrt{\epsilon}}$$

$$V(x+a) = V(x)$$



$$\epsilon(x+a) = \epsilon(x)$$

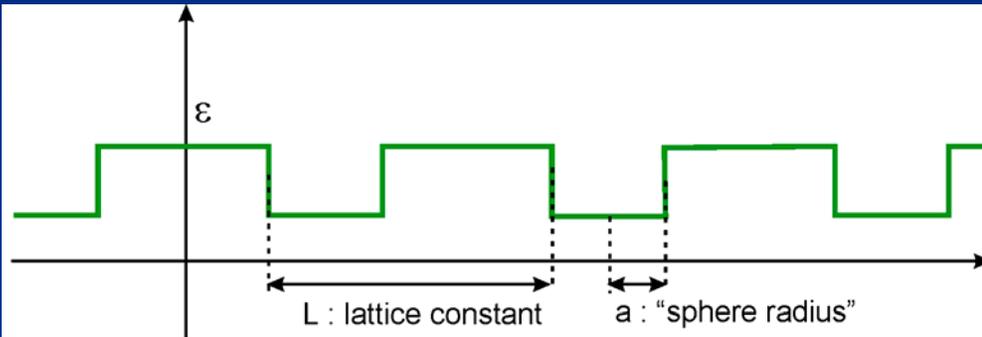
Electronic forbidden
band gap (ΔE)



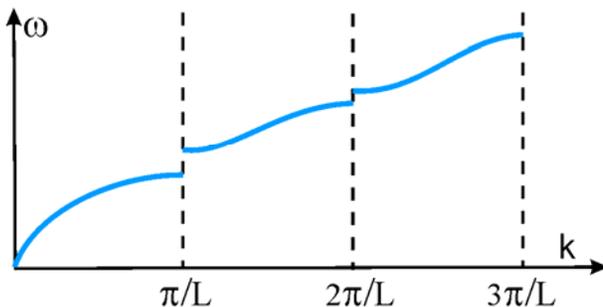
Photonic band gap
(PBG)

Одновременное выполнение условий для двух механизмов резонансного рассеяния – «макрорезонанса» (брегговская дифракция на упорядоченных рассеивателях) и «микрорезонанса» (рассеяние на элементарной ячейке)

Трансляционная симметрия и симметрия примитивной ячейки: взаимосвязь между двумя различными резонансными механизмами рассеяния



Macroscopic Bragg resonance: $\frac{\omega}{c} = \frac{m\pi}{L}$



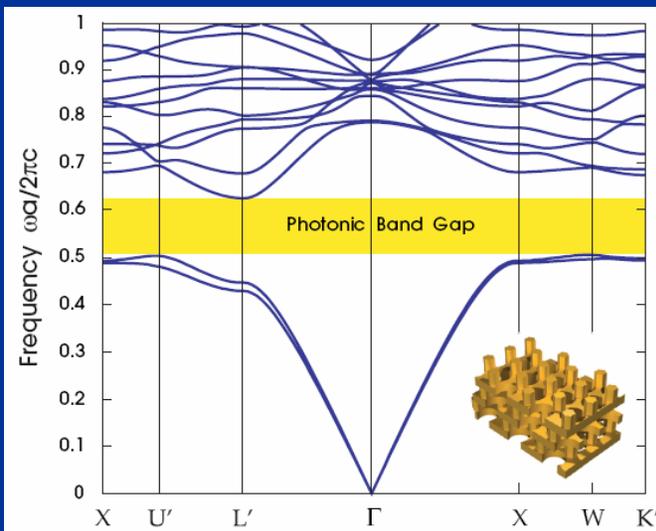
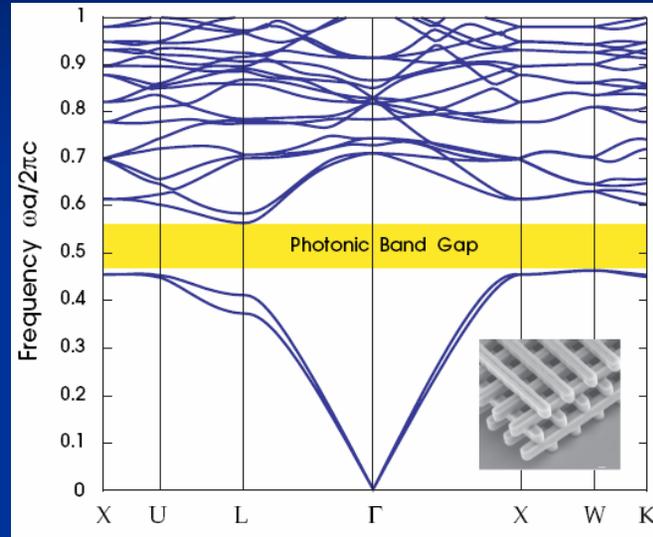
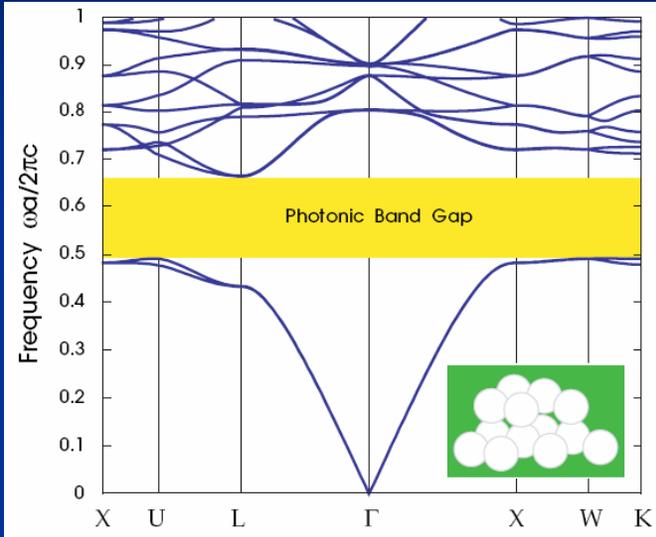
PBG formation can be regarded as the synergetic interplay between two distinct resonance scattering mechanisms. The first is the “macroscopic” Bragg resonance from a periodic array of scatterers. This leads to electromagnetic stop gaps when the wave propagates in the direction of periodic modulation when an integer number, $m=1,2,3\dots$, of half wavelengths coincides with the lattice spacing, L , of the dielectric microstructure. The second is a “microscopic” scattering resonance from a single unit cell of the material. In the illustration, this (maximum backscattering) occurs when precisely one quarter of the wavelength coincides with the diameter, $2a$, of a single dielectric well of refractive index n .

PBG formation is enhanced by choosing the materials parameters a , L , and n such that both the macroscopic and microscopic resonances occur at the same frequency.

Полная фотонная запрещенная зона (термин - Yablonovitch, 1993)

Решетка алмаза, $\epsilon_a/\epsilon_b=13$

Решетка типа поленницы,
 $\epsilon_a/\epsilon_b=13$

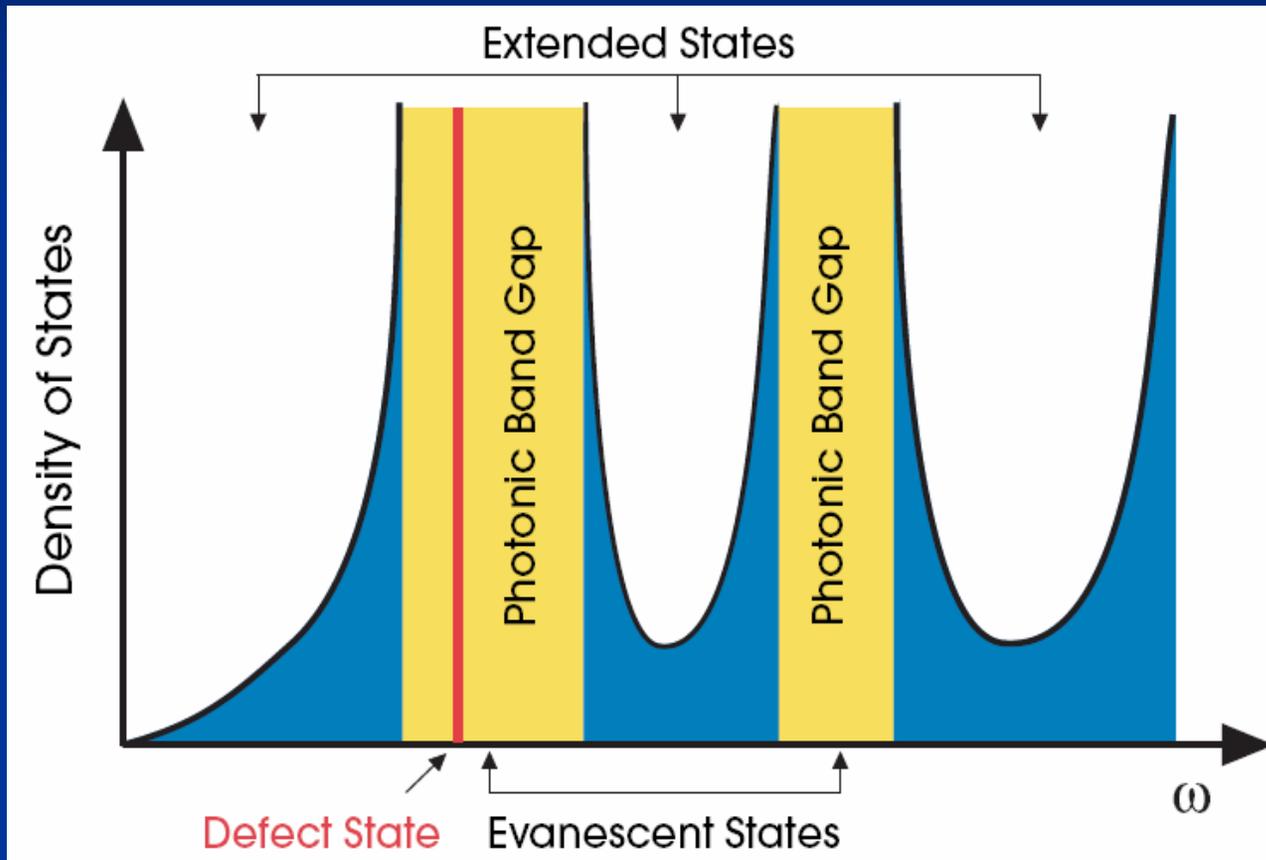


**БОЛЬШОЙ
ДИЭЛЕКТР.
КОНТРАСТ (ϵ_a/ϵ_b)
+
ТОПОЛОГИЯ !!**

Трехмерные фотонные кристаллы с **полной** фотонной запрещенной зоной.

Важнейшее обстоятельство - плотность электромагнитных мод внутри фотонного кристалла равна **нулю!**

Плотность фотонных состояний – важнейшая характеристика фотонных кристаллов!



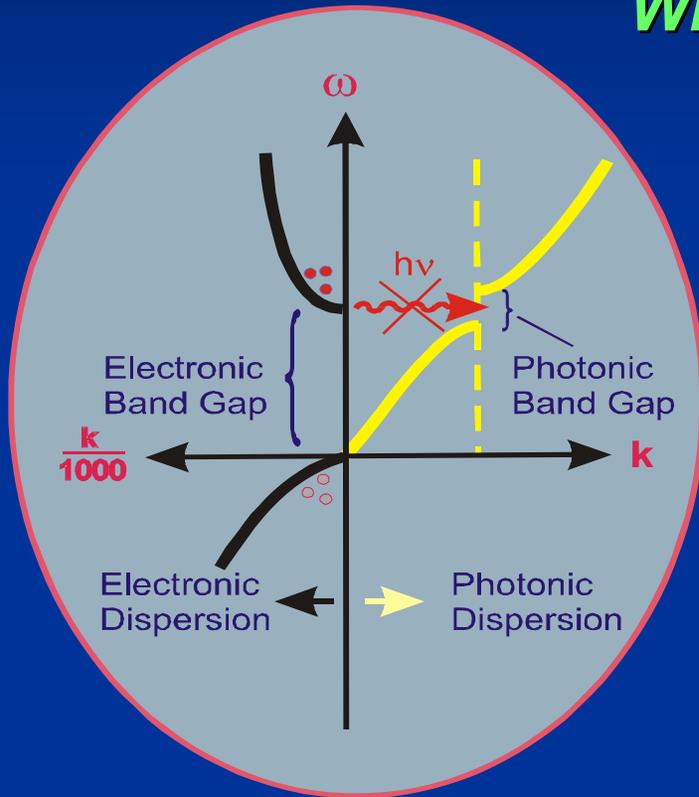
$$Wr \propto \rho(\omega)$$

Wr-вероятность
излуч. рекомбинации
 $\rho(\omega)$ -плотность
фотонных мод

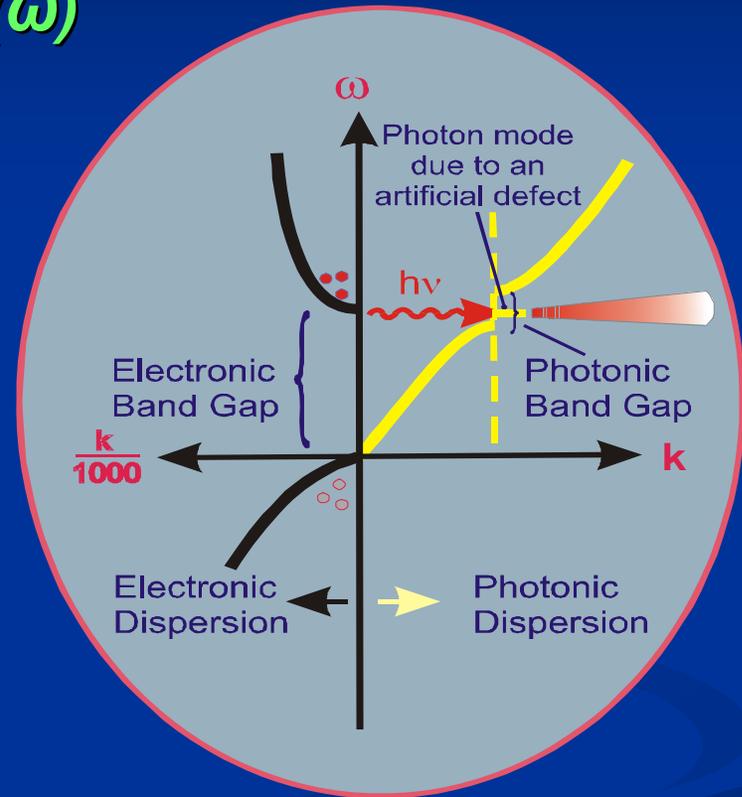
J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, R. D. Meade.
Photonic Crystals: Molding the Flow of Light, second edition (Princeton Univ. Press,
2008)

Подавление и увеличение интенсивности спонтанной эмиссии

$$W_r \propto \rho(\omega)$$



Подавление спонтанной
эмиссии ($\rho(\omega)=0$)



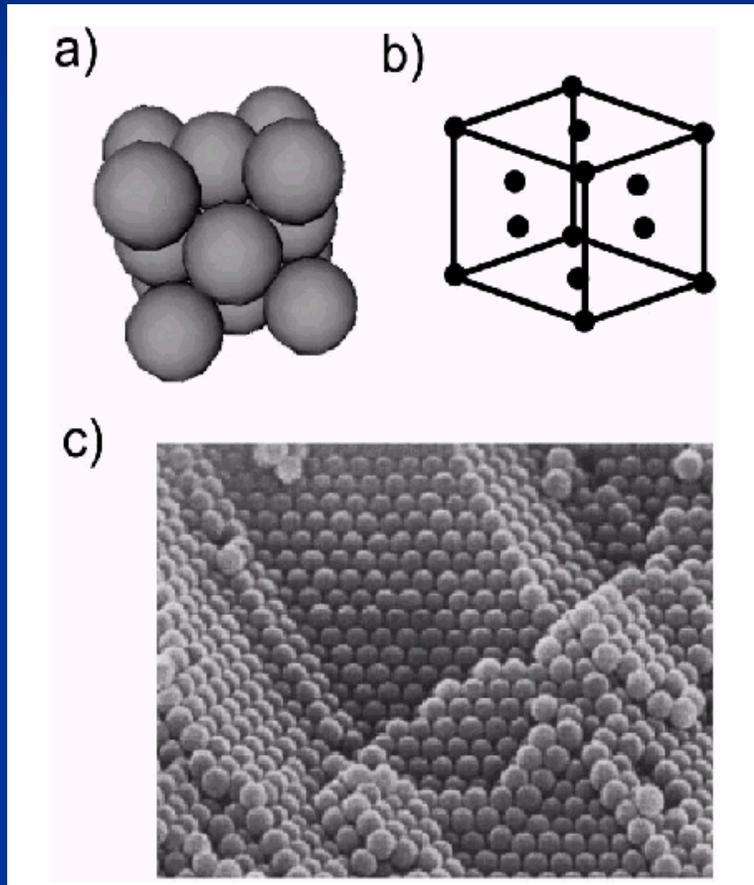
Увеличение интенсивности спонтанной
эмиссии (увеличение $\rho(\omega)$)

Технические применения

- Световоды
- Переключатели
- Сенсоры
- Низкопороговые лазеры
- Оптические интегральные схемы

Синтетический опал – модельный трехмерный фотонно – кристаллический материал

ФТИ 1995 год !!! В.Н.Богомолов, А.А.Каплянский и др.



Сферы диоксида кремния
диаметром 100 - 1000 нм

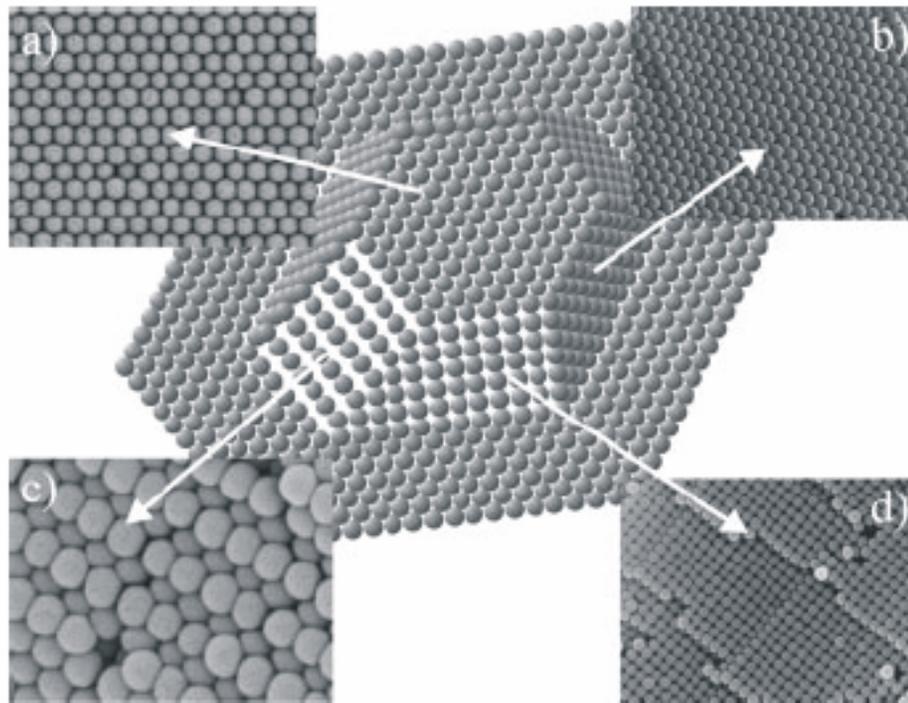
Расположение α - SiO_2 сфер в ГЦК решетке опала (a), ГЦК примитивная ячейка (b), СЭМ изображение синтетического опала (c), опалы с различным диаметром α - SiO_x сфер (d)



$$\lambda_{111} = 2d_{(111)} \sqrt{\langle \epsilon \rangle - \sin^2 \theta}$$

Кристаллическая структура синтетического опала

Crystalline structure of artificial opal

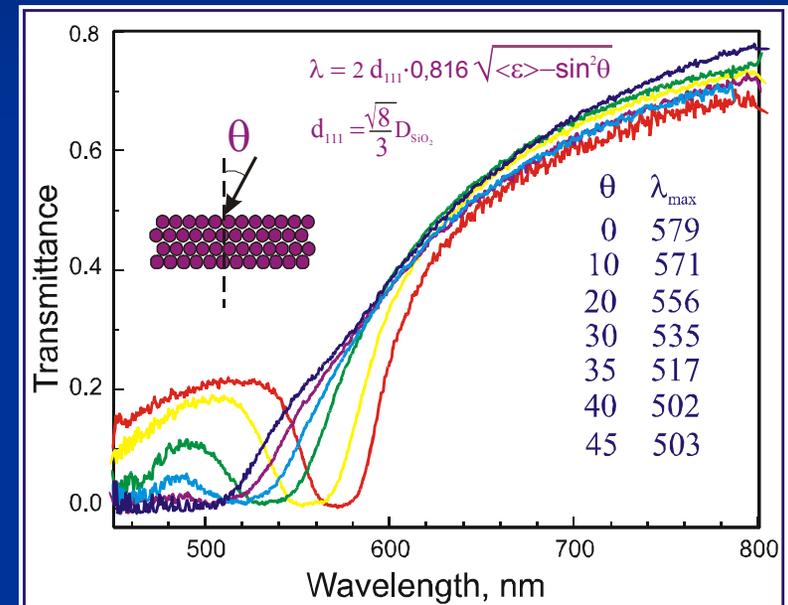
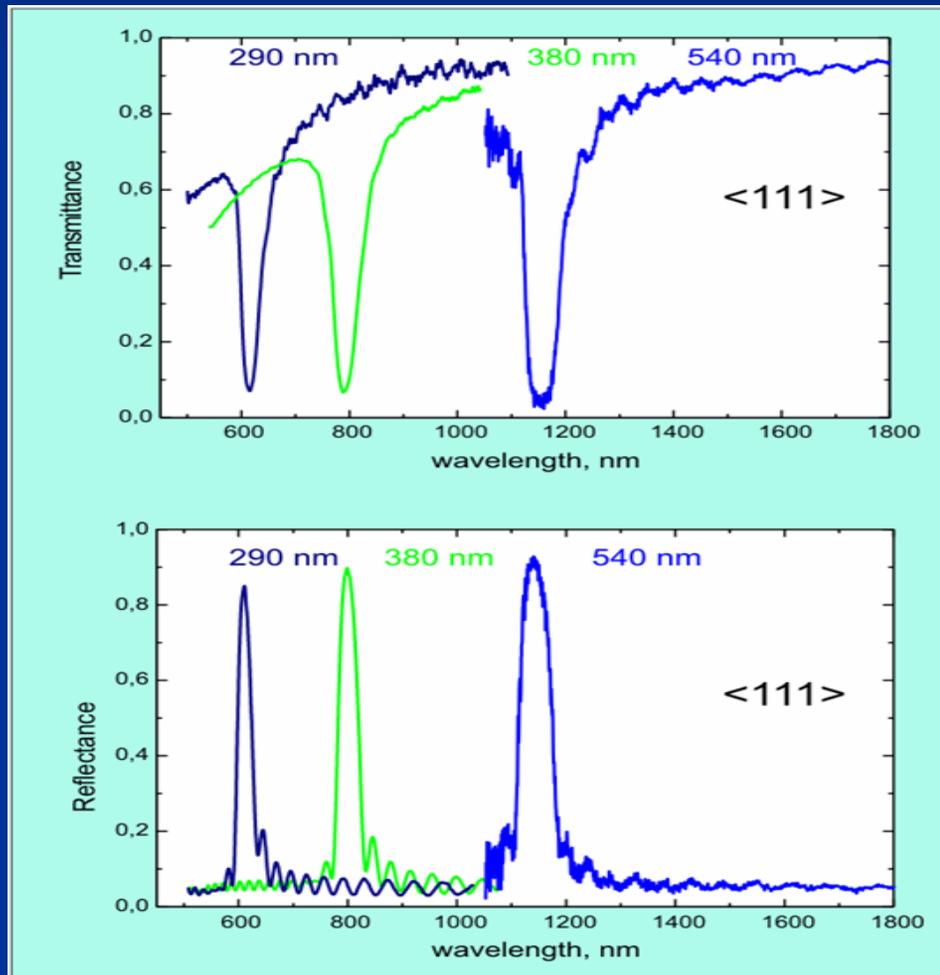


SEM images of four facets in a real opal to be compared with a model crystal (center)

a) (111), b) (111) c) (110) d) (100)

[C. Lopez, *Adv. Mater.* 15, 1679 (2003)]

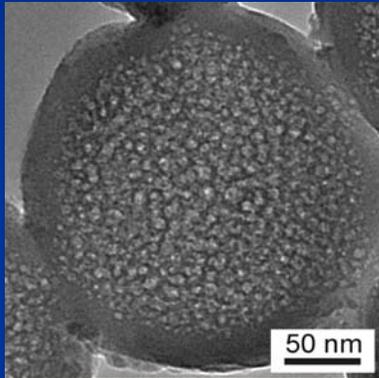
Спектры пропускания и отражения



Брэгговский резонанс

$$\lambda_{111} = 2d_{(111)} \sqrt{\langle \epsilon \rangle - \sin^2 \theta}$$

Изготовление объемных опалов (самоорганизующиеся коллоидные системы)



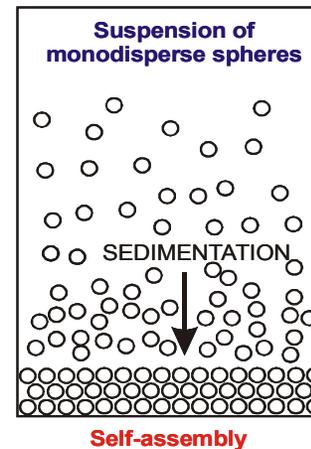
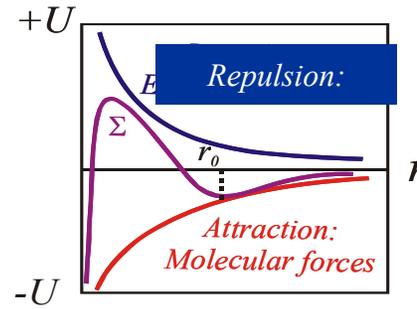
Внутреннее строение α - SiO_2 сферы

Formation of silica spheres

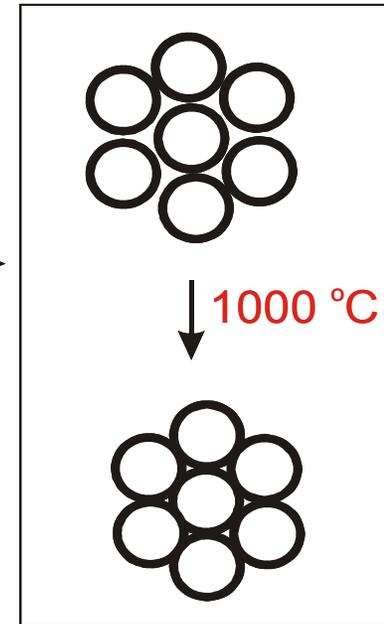


Диаметр 100-1000 нм

Formation of opaline structure

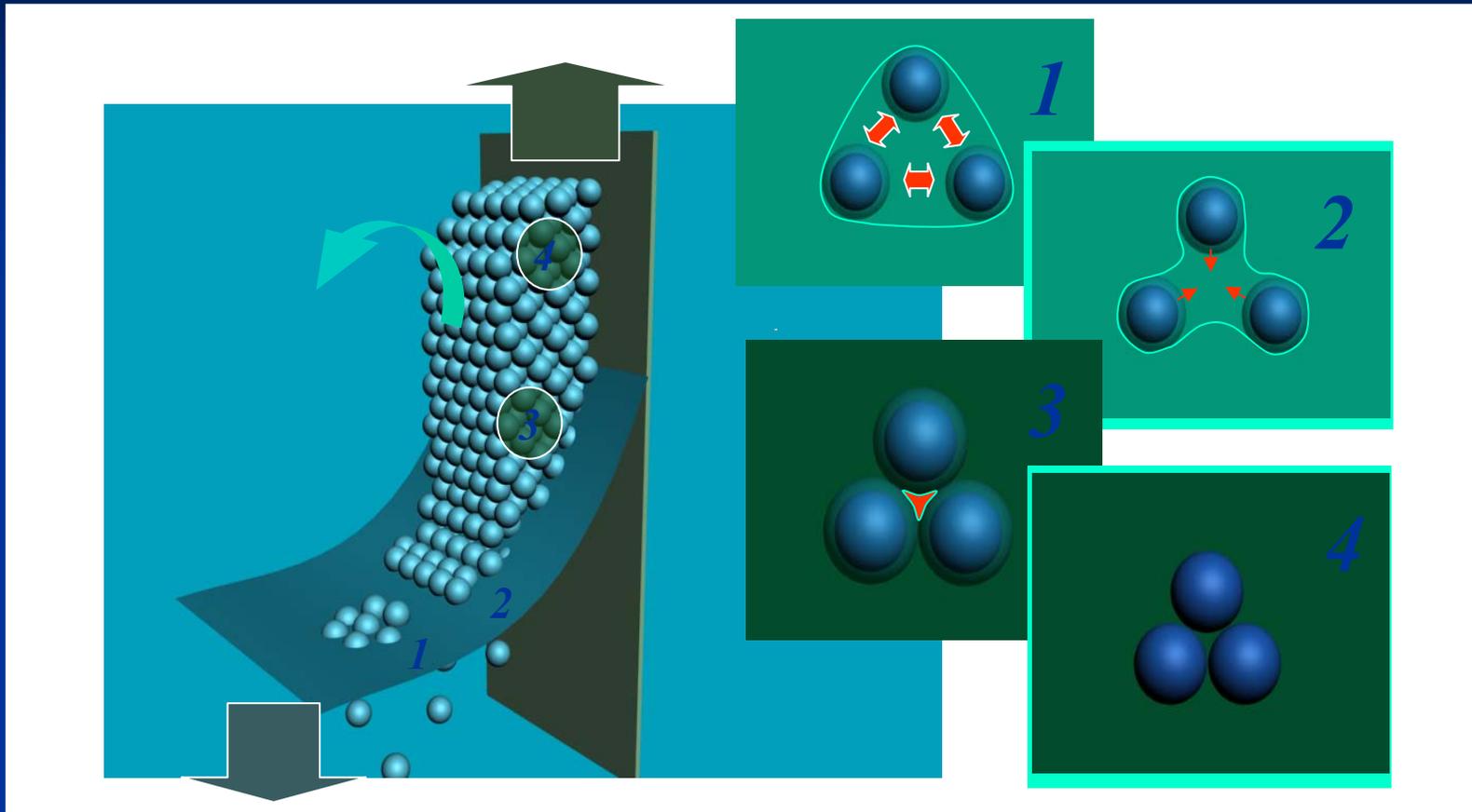


Drying and sintering



Метод седиментации или центрифугирования искусственно выращенных монодисперсных сферических глобул диоксида кремния, полученных гидролизом тетраэтоксисилана в присутствии гидроксида аммония (**переход беспорядок-порядок**). После седиментации опалы высушивают и упрочняют термическим отжигом.

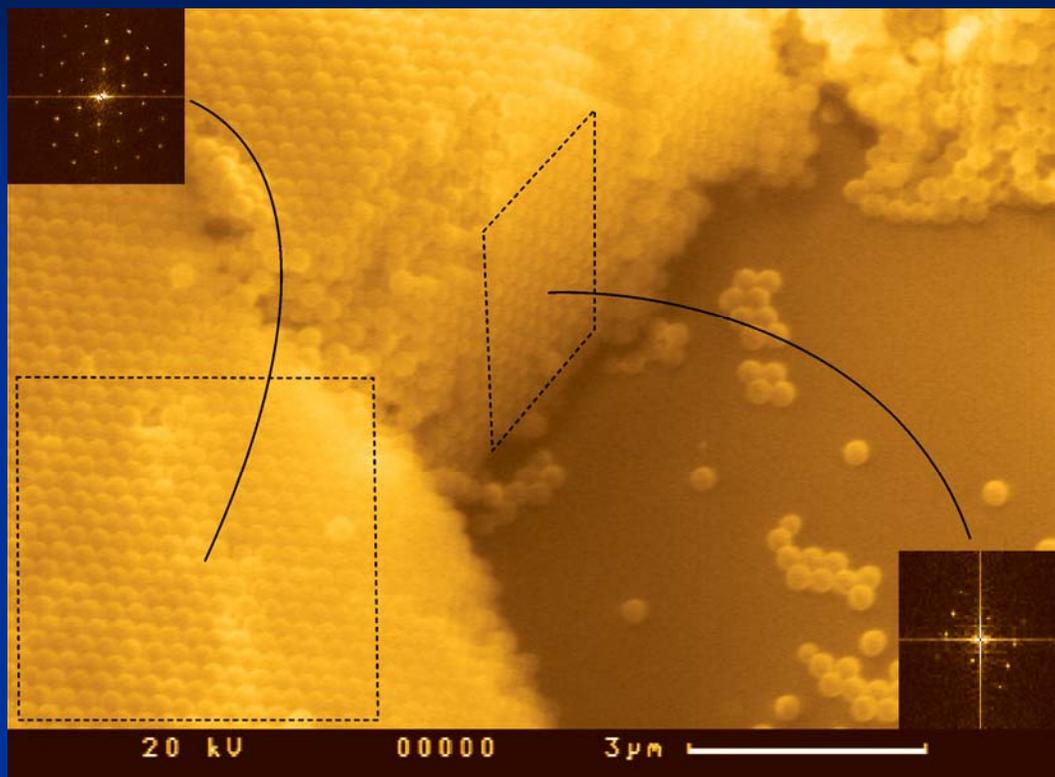
Изготовление опаловых пленок



Жидкофазная коллоидная эпитакия на вертикальной подложке: упорядочение (самосборка) частиц (**переход беспорядок-порядок**) в мениске жидкости под действием сил поверхностного натяжения.

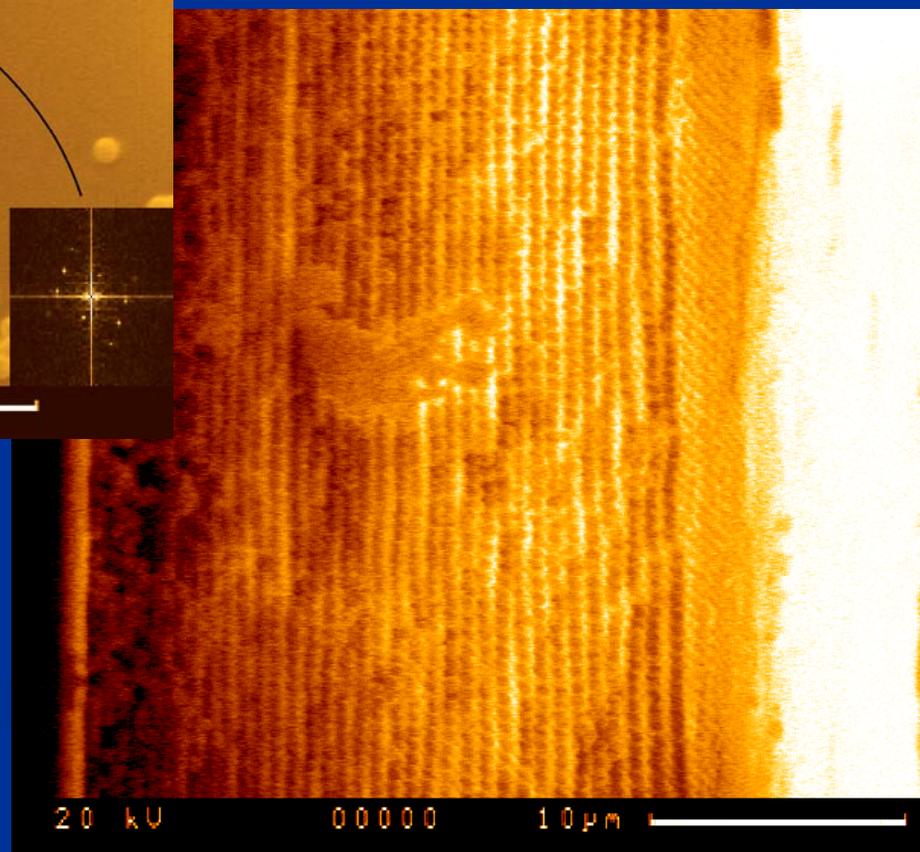
Вставки 1,2 – области действия сил поверхностного натяжения: упорядочение коллоидных частиц на поверхности жидкости вблизи мениска, 3-область действия капиллярных сил, 4 – полная утрата сольватной оболочки шаров, усадка и сушка коллоидного кристалла.

Пленки синтетического опала

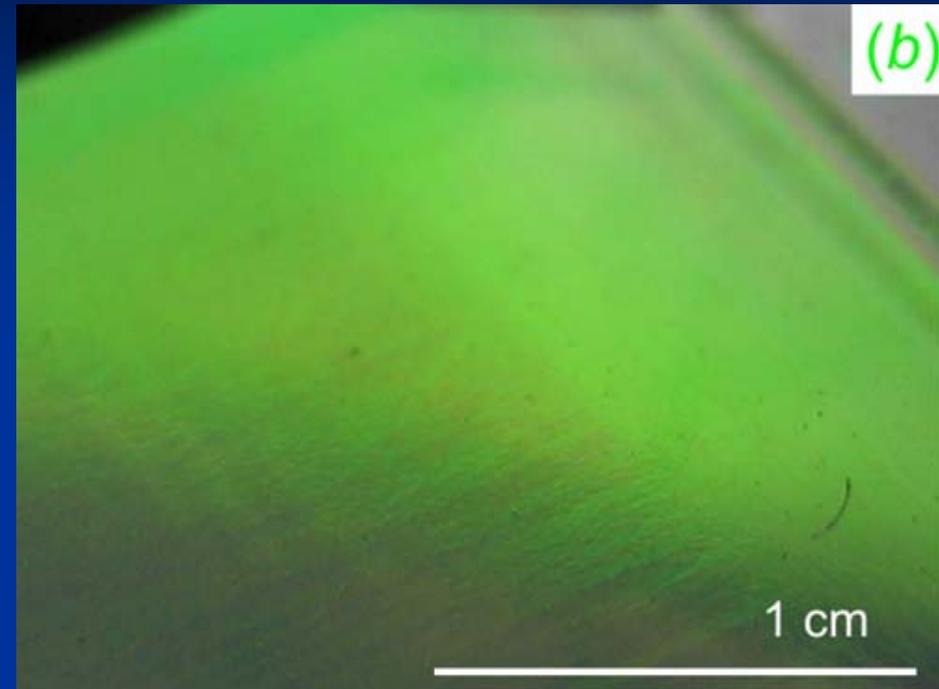
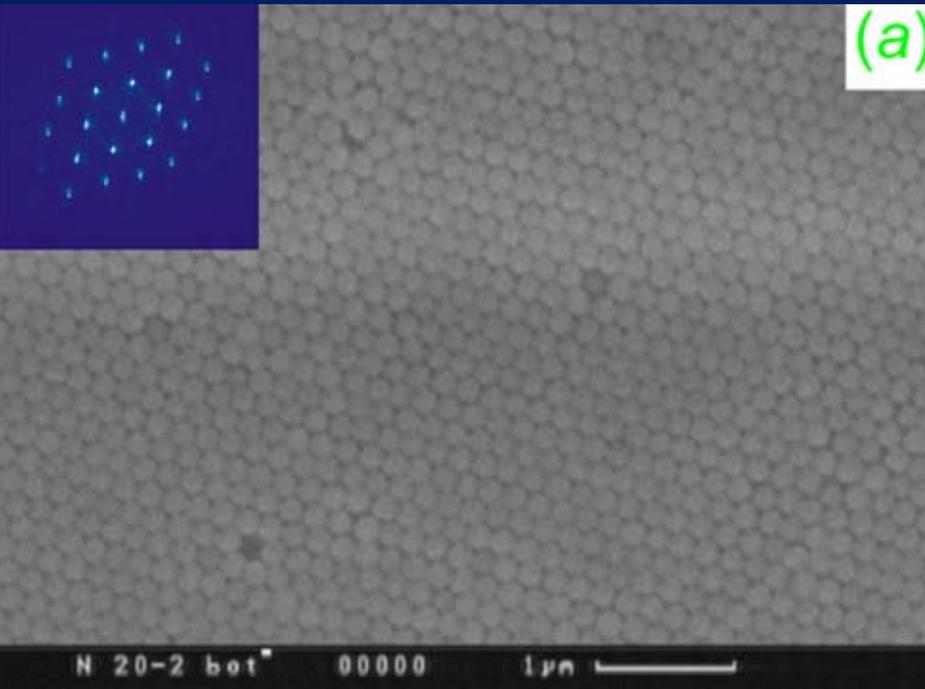


D=300 нм, 15 слоев

D=530 нм, 40 слоев



Пленки синтетического опала



Регулярная упаковка сфер (a)

и однородная иридесценция опаловых пленок (b)

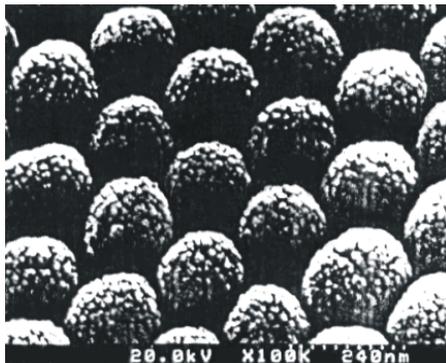
Однодоменные пленки!

Иридесценция объемного опала
Полидоменные пленки

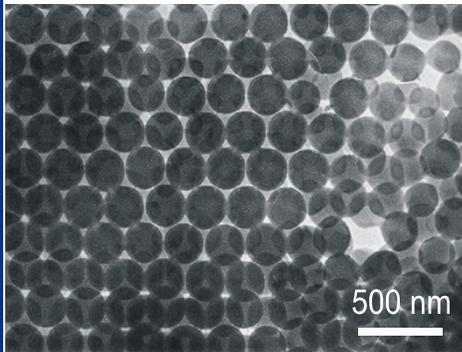


Подрешетка взаимосвязанных пор

SEM image of bare opal

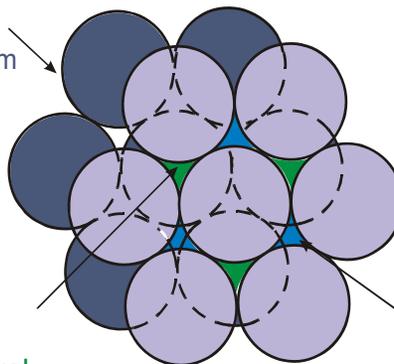


TEM image of bare opal



Opal structure

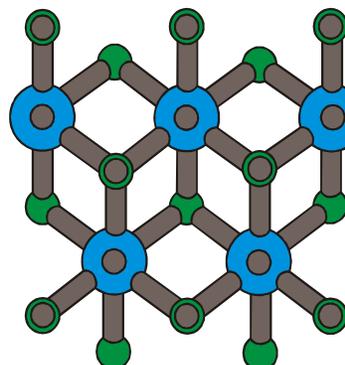
SiO₂ sphere
D=100-1000 nm



tetrahedral
cavity

octahedral
cavity

Void sublattice



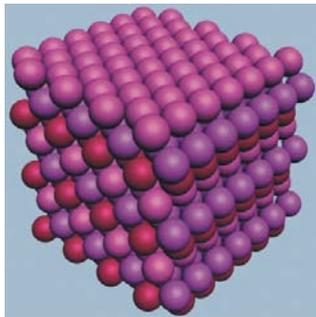
$$\lambda_{111} = 2d_{(111)} \sqrt{\langle \epsilon \rangle - \sin^2 \theta}$$

Положение ФЗЗ может быть изменено в УФ-ИК диапазоне изменением размера сфер и контролируемым заполнением подрешетки пор.

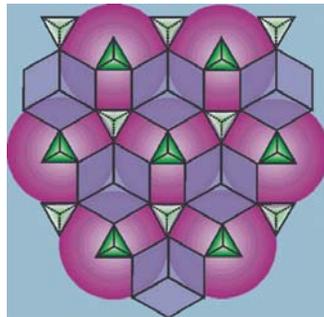
Заполнением пор получаем уникальный объект с функциональностью как фотонного кристалла, так и наполнителя!!!

Нанокompозиты на основе опала

Bare opal



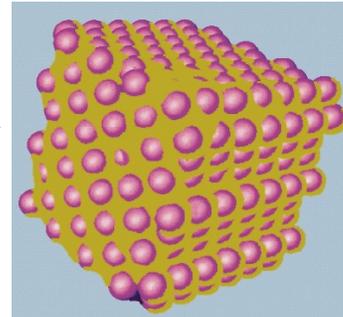
Sublattice of pores



Filling



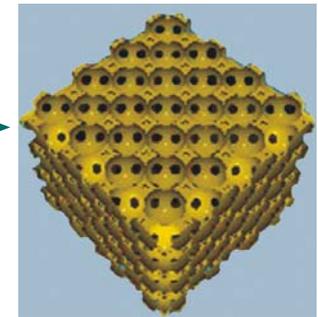
Filled opal



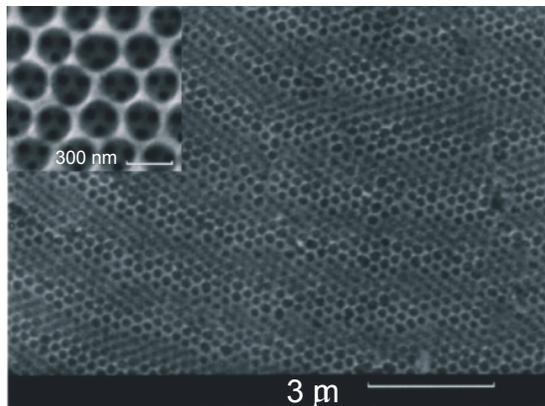
Etching



Inverted opal



SEM image of
inverted GaN opal



Более 60 статей

MATERIALS

Semiconductors (high dielectric contrast 3D photonic crystals)

Si, GaN, GaP, VO₂

Light-emitting materials

GaN_xP_{1-x}, GaN:Er, ZnS:Mn, Zn₂SiO₄:Mn, Er₂O₃, Er₂SiO₅, Er₂Si₂O₇

Materials with phase transitions (tunable 3D photonic crystals)

VO₂, AgI

Metals

Au, Ag, Pt, Cu, W, Sn, Pb, In, Ga, Bi

Magnetic materials

Co, Ni, Fe oxides

METHODS

Chemical bath deposition, chemical vapour deposition, high pressure

Characterization

XRD, Raman, optical measurements (T, R, PL), SEM, AFM

TEM, EDX, STM

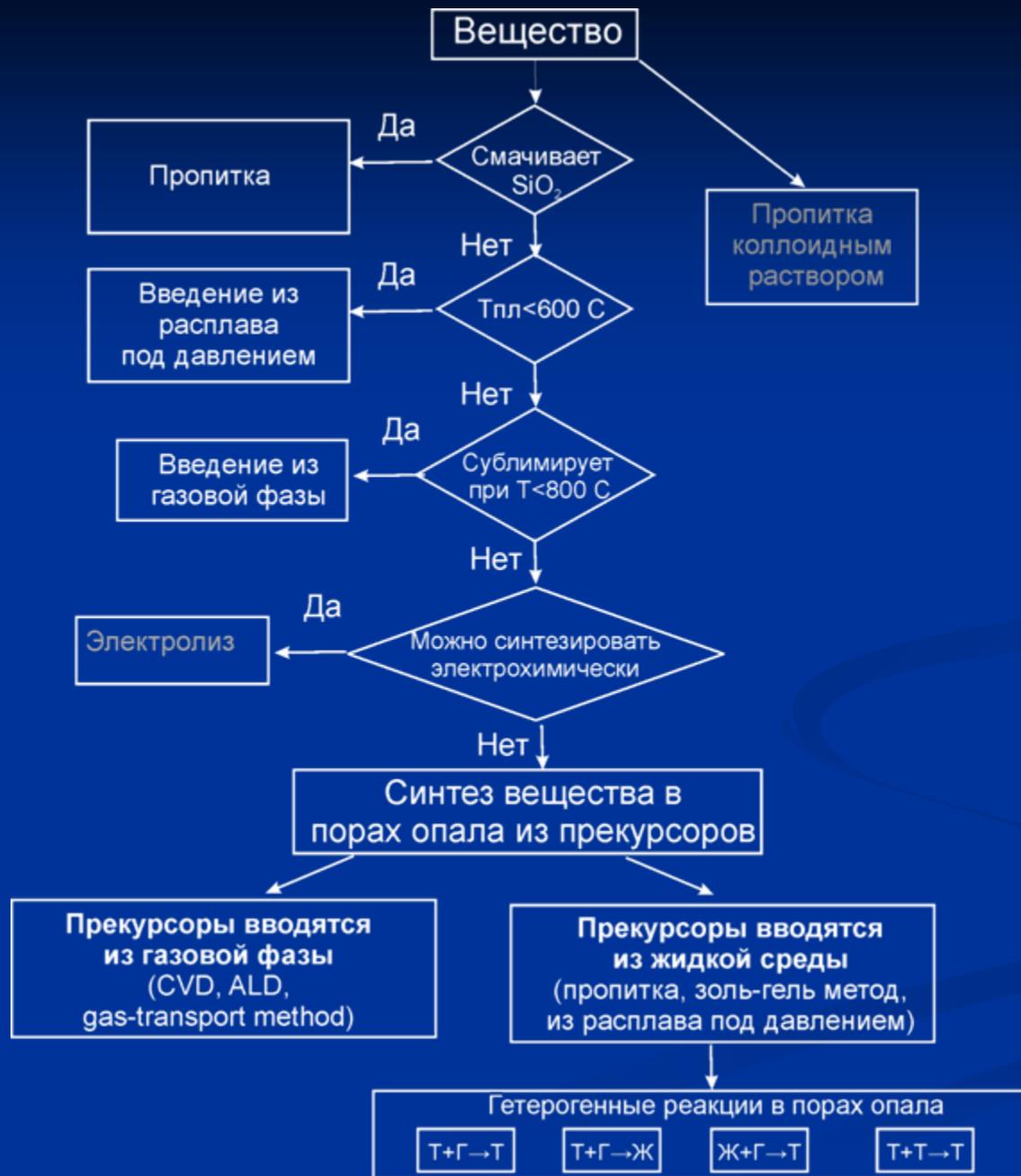
Основные методы заполнения

- Методы заполнения **из расплава**
- Методы заполнения **из растворов**
- **Газофазные** методы
- **Синтез** целевых веществ **в порах** опала с использованием твердых и жидких прекурсоров

Использование физико-химических свойств веществ (низкая температура плавления , высокое давление паров, контактные свойства расплава и поверхности и др.)

Осуществление или предотвращение (буферные слои) протекания физико-химических процессов на межфазной границе вещества-наполнителя и материала матрицы опала

Выбор метода синтеза нанокompозитов

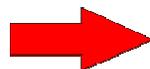
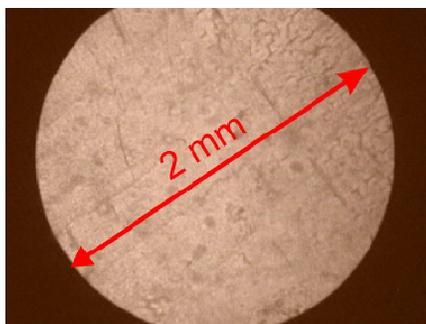


Термостойкость пленок опала

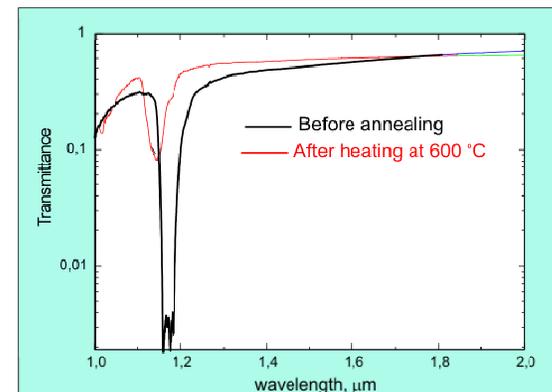
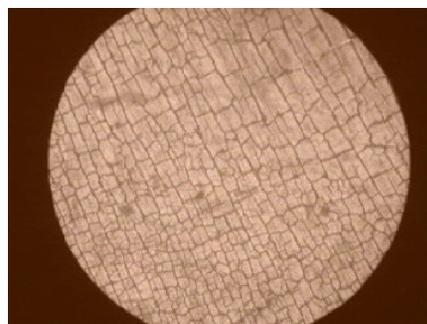
We apply special treatment to increase thermal stability of the thin-film opal matrices. No cracks are observed in the treated samples after heating up to temperature of Si infiltration (500-600 °C). Very small changes were found in optical properties of the treated samples after heating.

Untreated samples

Before annealing

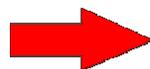
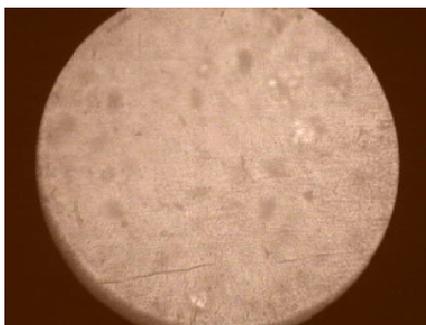


After heating at 600 °C

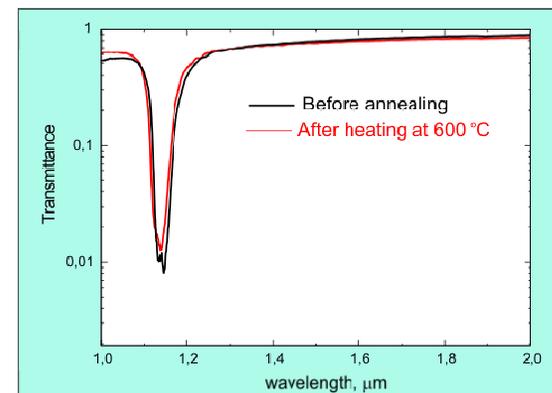
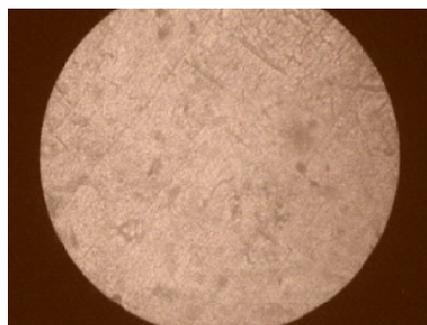


Treated samples

Before annealing

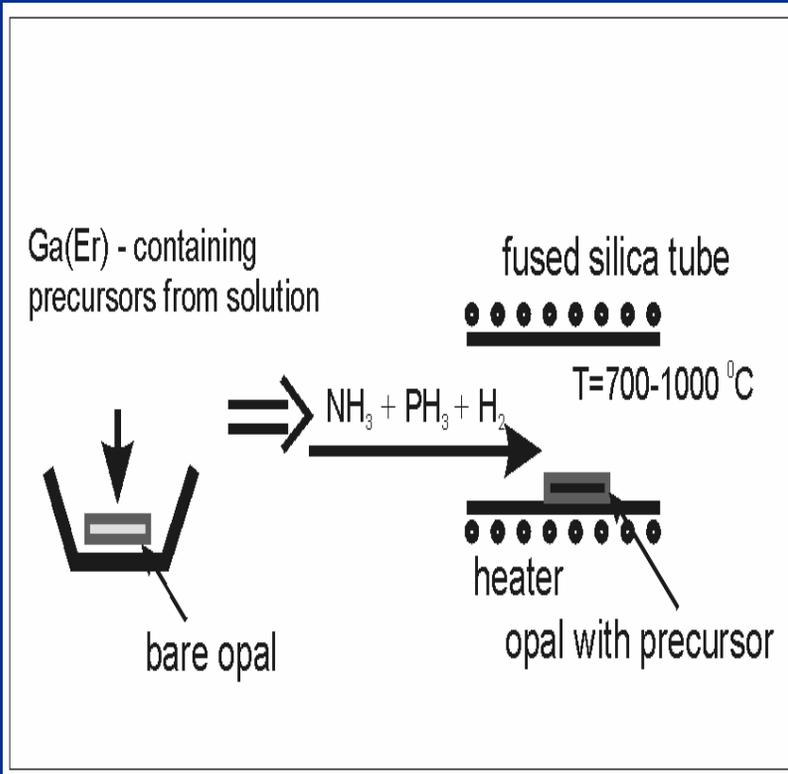


After heating at 600 °C

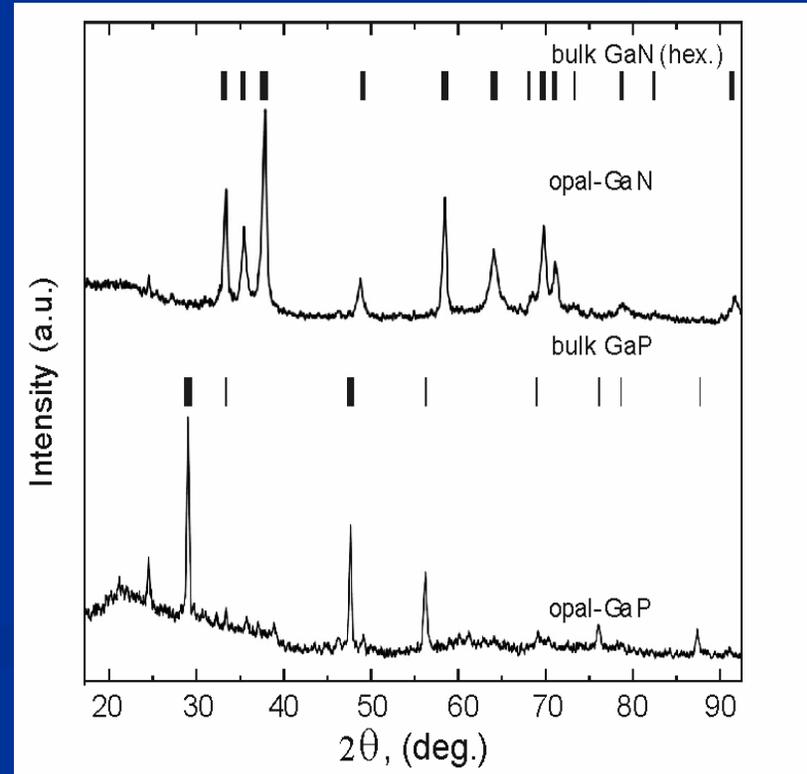


Получение GaN, GaN(Er), GaP и GaN_xP_{1-x} в порах опала

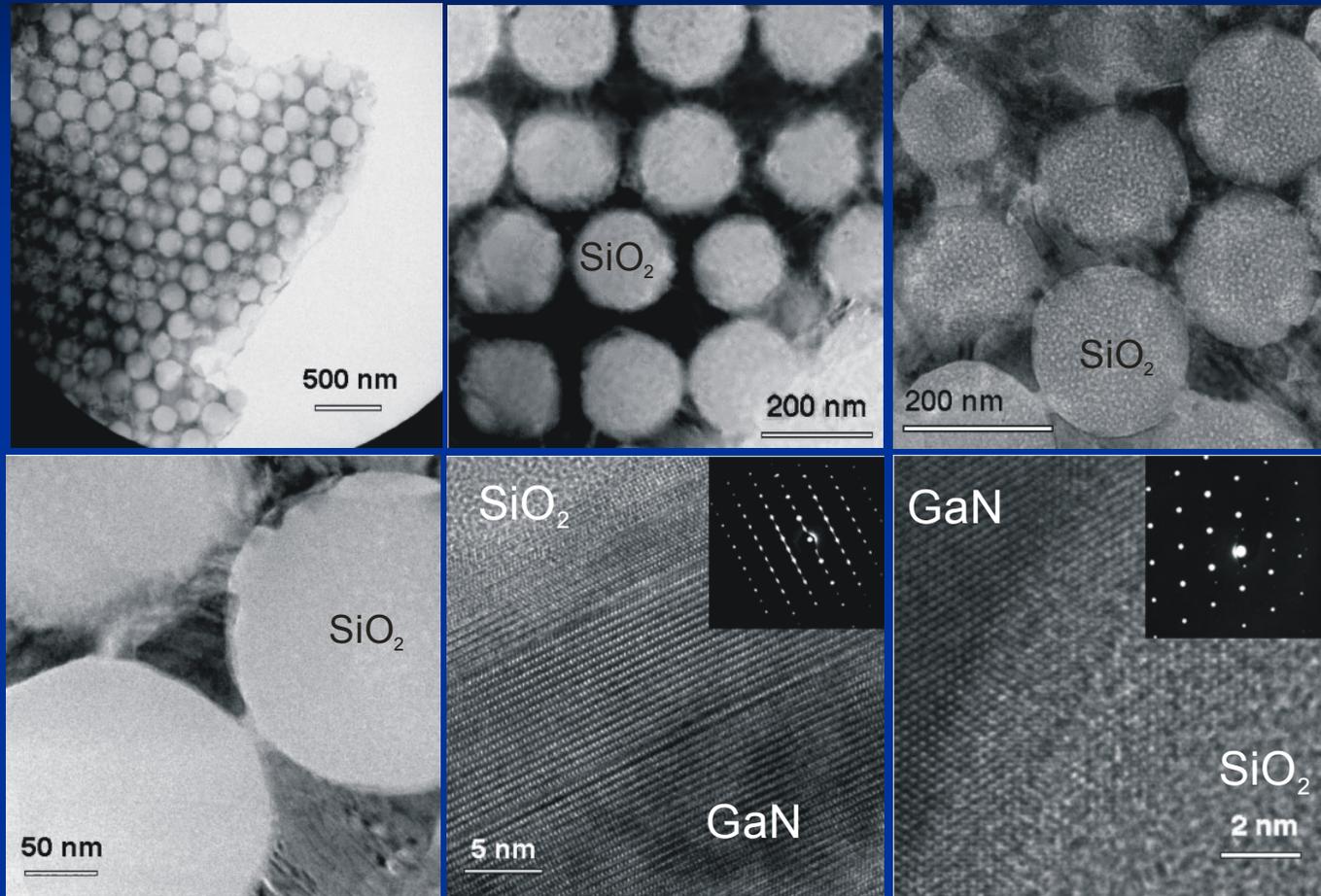
Экспериментальная методика



Рентгеновская дифракция нанокompозитов опал-GaN и опал-GaP



ПЭМ нанокompозитов опал-GaN (микрофотографии и микродифракционные картины) (Полное заполнение пор)



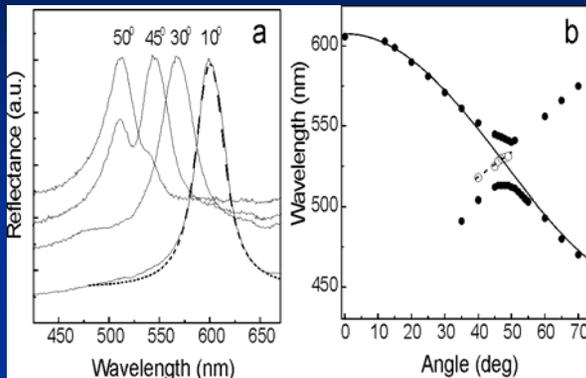
**Степень
заполнения**

**Распределение
наполнителя в
поре**

**Структурное
совершенство
наполнителя
(точечные
электрограммы)**

Nanotechnology (2000); ФТП (2001, 2003, 2005); Sem.Sci.Tech. (2001);
Phys.Stat.Sol.(b) (2002); Phys.Stat.Sol.(a) (2003); Phys.Rev.B (2005)

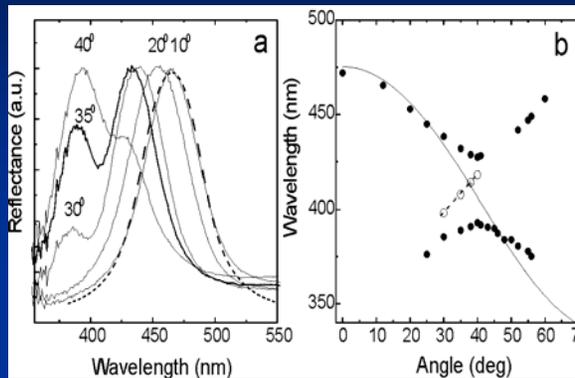
Композиты опал-GaN, опал-GaP и инвертированные структуры



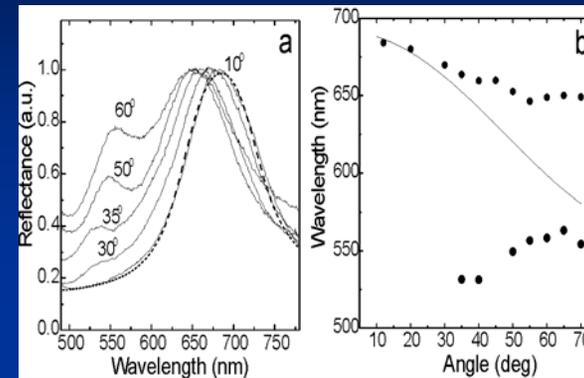
Композиты опал-GaN.

а) Спектры брэгговского отражения для различных углов падения s-поляризованного света.

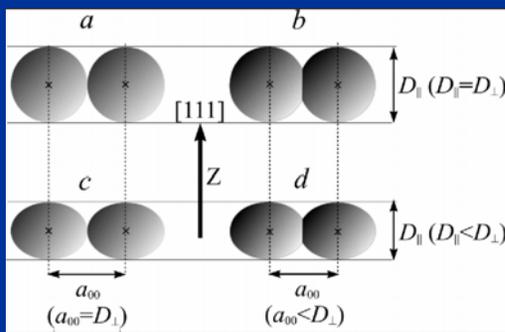
б) Угловая зависимость положения максимумов (заполненные кружки) брэгговских рефлексов, спектральные положения минимумов в дублетах



Инвертированные структуры на основе GaN.



Композиты опал-GaP.



Возможное расположение соседних элементов структуры в опалах.

Приближение планарной

слоисто-периодической среды

$$\epsilon_s(z) = \epsilon_a f_s(z) + \epsilon_b (1 - f_s(z))$$

Эффективная функция заполнения

$$f_s(z) = u(z) + u(z - L) \quad L - \text{период}$$

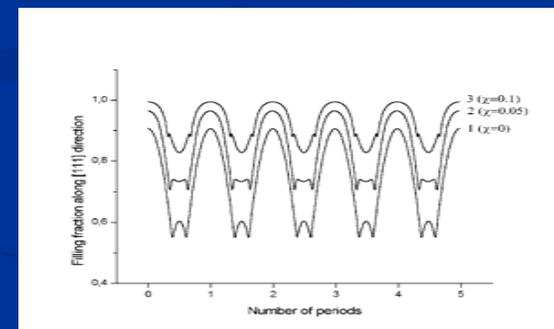
$$u = u(z, a_{00}, \chi, \eta)$$

Коэффициент спекания

$$\chi = \Delta a_{00} / D_{\perp} = \Delta L / L$$

Коэффициент анизотропного сжатия

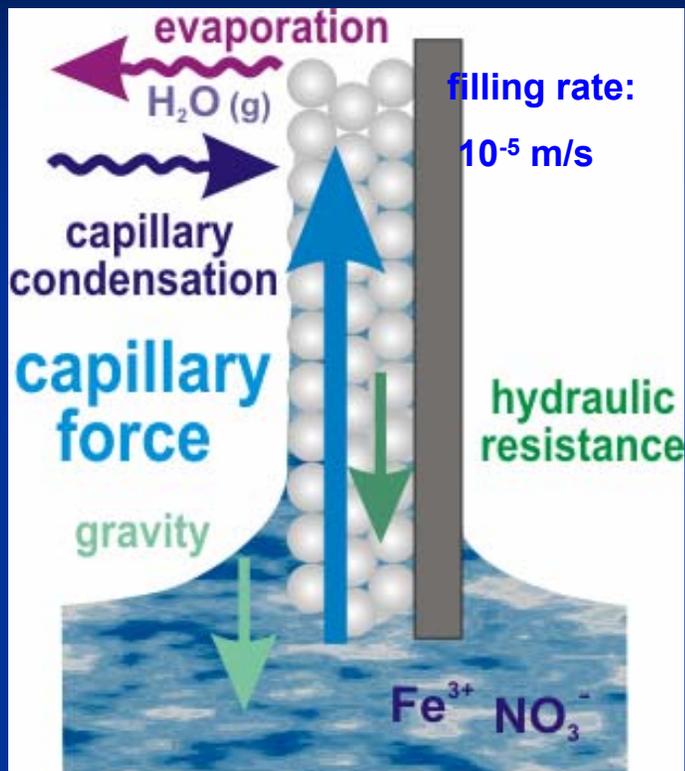
$$\eta = D_{\parallel} / D_{\perp}$$



Пространственные профили $f_s(z)$ для трех значений коэффициентов спекания χ .

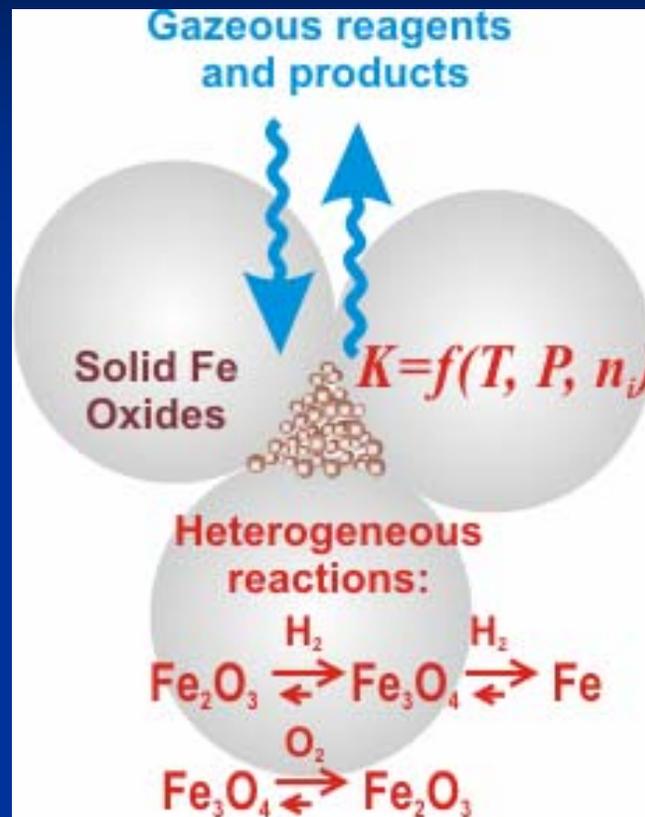
$$d_{111} = a_{00} \eta \sqrt{2/3}$$

Латеральное заполнение



На поверхности нет материала-наполнителя!

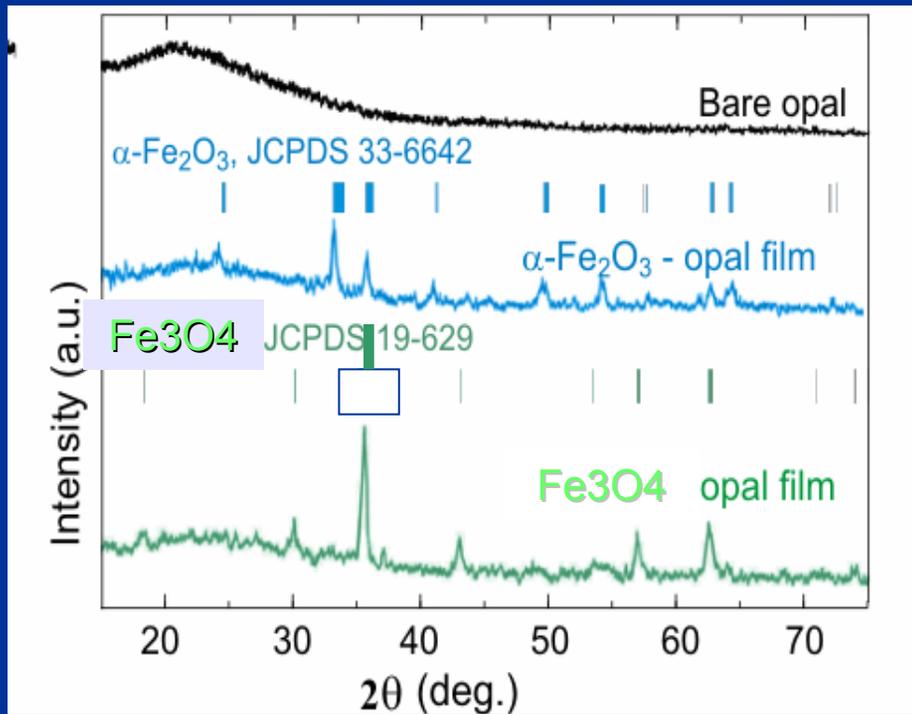
Термодинамически управляемый синтез в порах опала



Магнетит синтезирован в порах опала
восстановлением гематита в водороде в
термодинамически равновесных условиях
($T=630 \text{ K}$, $P=0.2 \text{ bar}$).

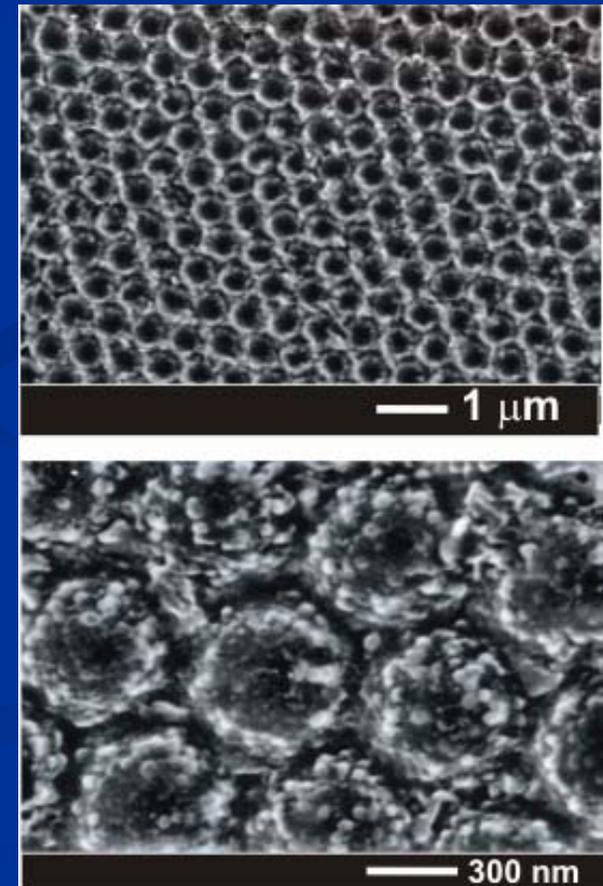
J. Phys. Chem. (2008)

Рентгеновская дифракция пленок опал-гематит и опал-магнетит

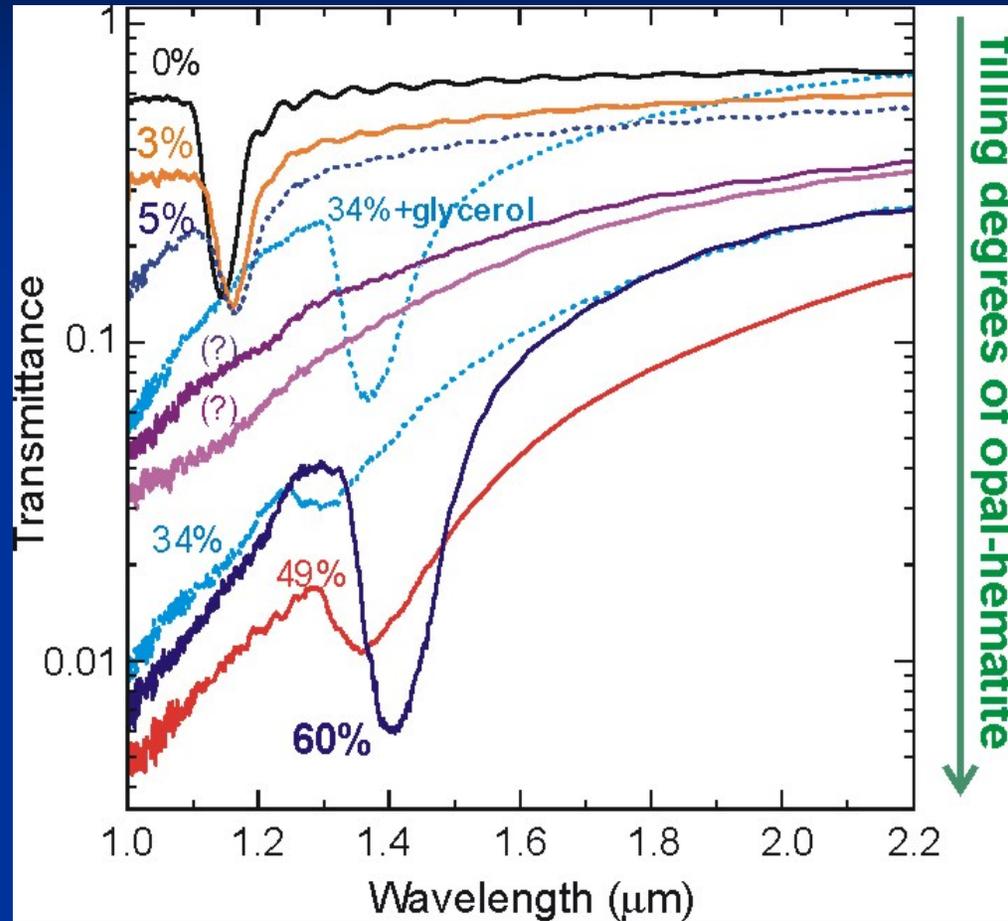


Средний размер нанокристаллитов Fe_3O_4
и $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ в порах порядка 20 нм.

СЭМ изображения пленок опал-гематит и опал-магнетит



Спектры пропускания нанокompозитов опал-гематит при различных степенях заполнения



$$\lambda = 2d_{111} \sqrt{\langle \varepsilon \rangle - \sin^2(\theta_{in})}$$

$$\langle \varepsilon \rangle = \sum_i \varepsilon_i \cdot f_i$$

ε_i и f_i - диэлектрическая константа и объемная доля i -ой компоненты

композита

Диэлектрический контраст:

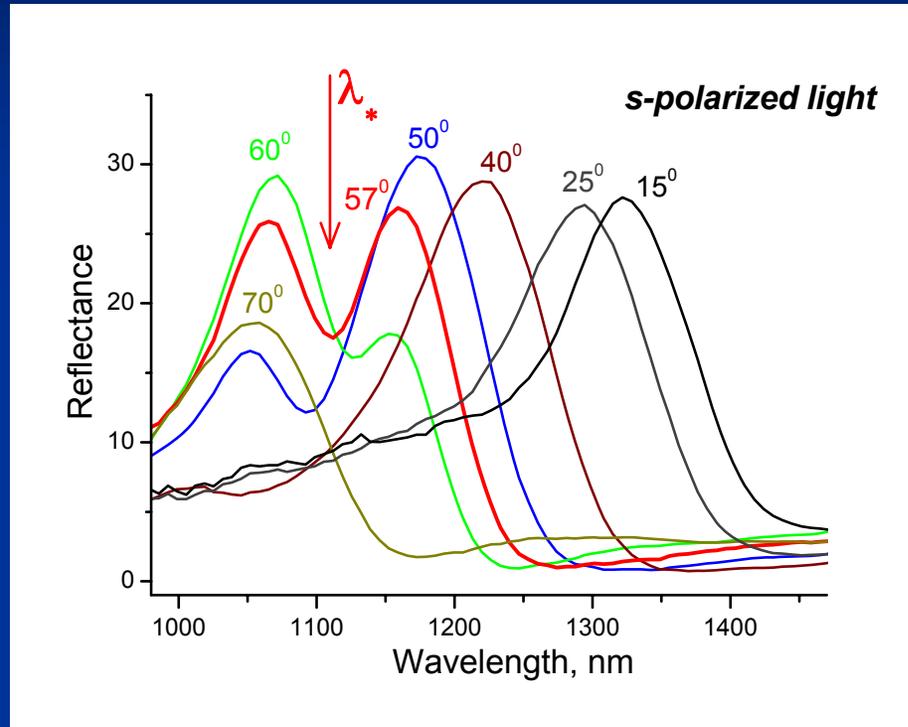
$$q = \left| 1 - \frac{\varepsilon_{\text{BEADS}}}{\langle \varepsilon \rangle_{\text{PORES}}} \right|$$

$q \rightarrow 0 \rightarrow$ Коллапс ФЗЗ

Диффузное рассеяние, а не поглощение гематита обуславливает уменьшение прозрачности композита опал-гематит вне спектральной области брэгговского пика

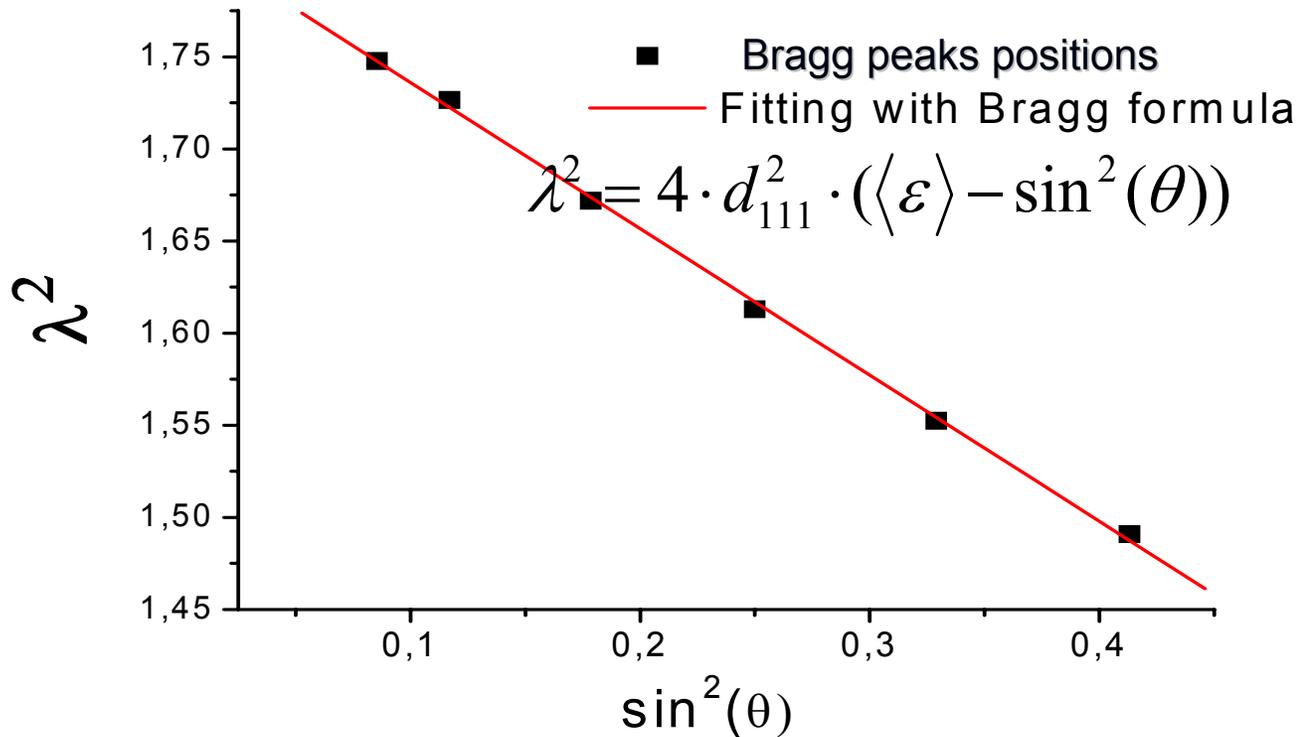
Многоволновая брэгговская дифракция

в пленках опал-гематит



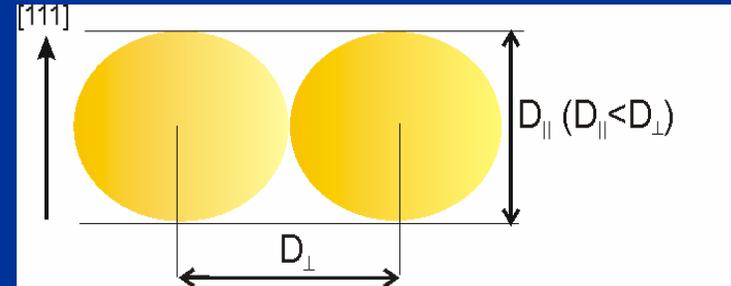
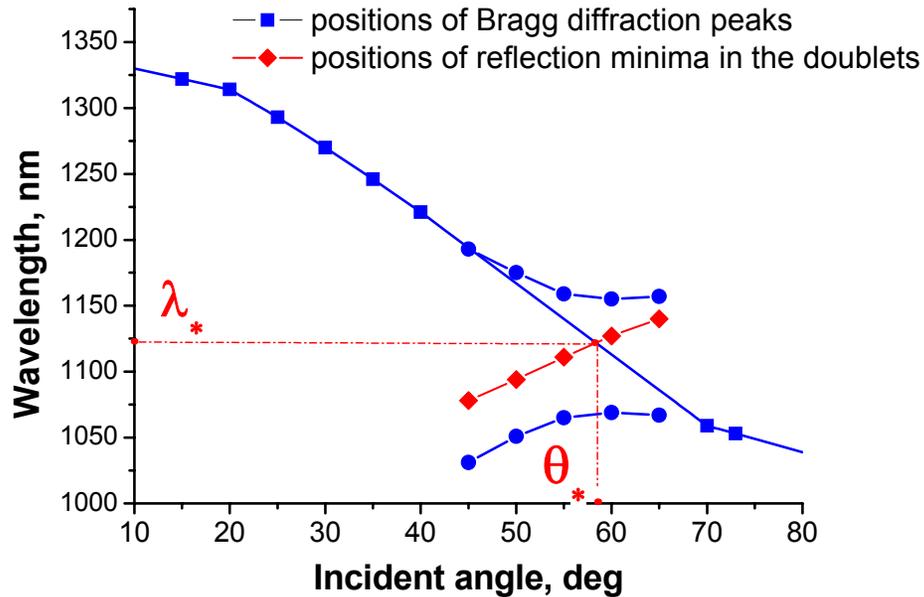
Дублетная структура спектров при наклонном падении света связана с многоволновой дифракцией на семействе плоскостей $\{111\}$ непараллельных поверхности образца

Угловая зависимость положения брэгговского пика отражения в диапазоне углов $0^\circ - 40^\circ$



Из подгонки определяется межплоскостное расстояние (d_{111}) в фотонном кристалле опал-гематит

Анализ многоволновой брэгговской дифракции



Анизотропный коэффициент сжатия

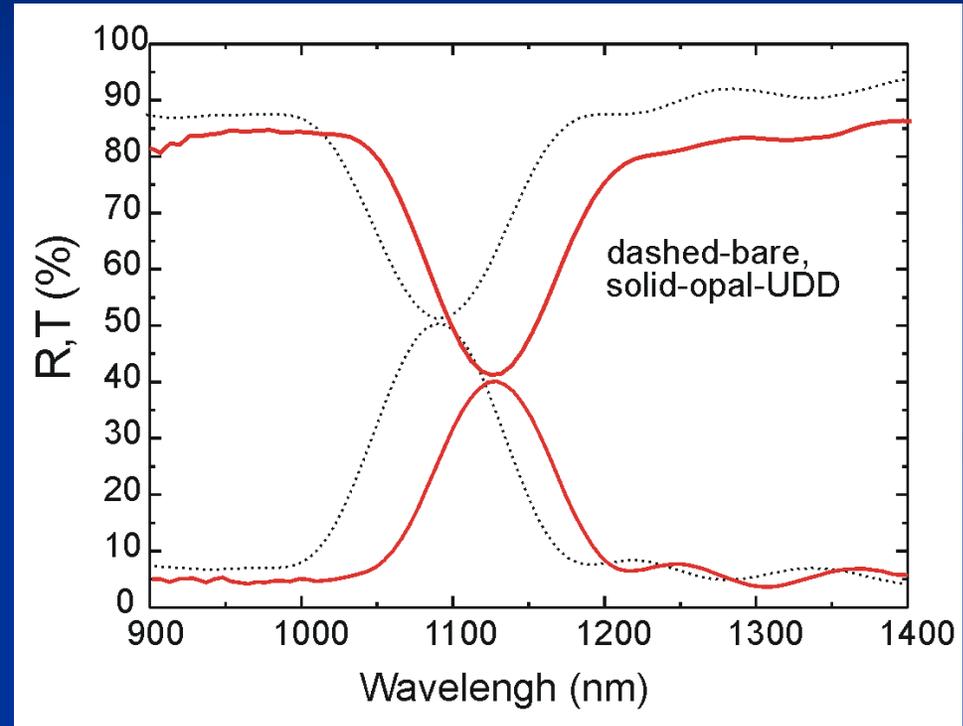
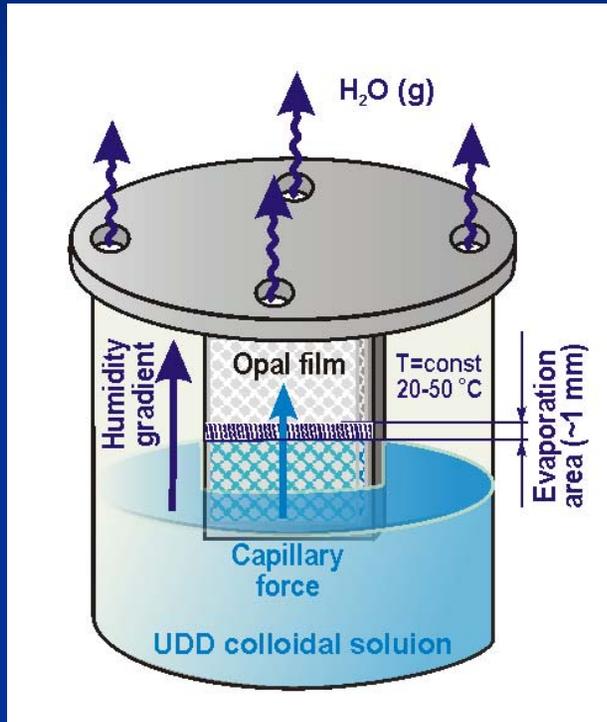
$$\eta = D_{\parallel} / D_{\perp}$$

$$\lambda_* = \frac{4D_{\perp} \sqrt{3}}{4 - \eta^{-2}} \sin \theta_*$$



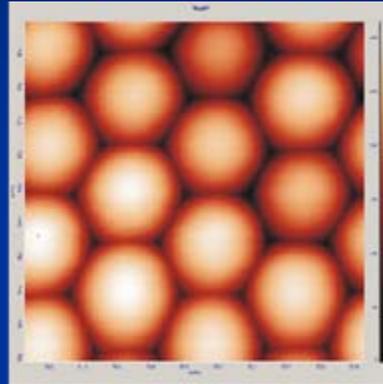
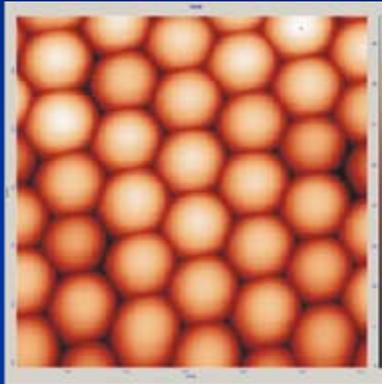
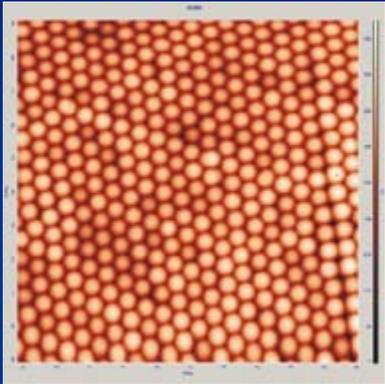
$$\eta = 0.98$$

Наноккомпозит опал-наноалмаз

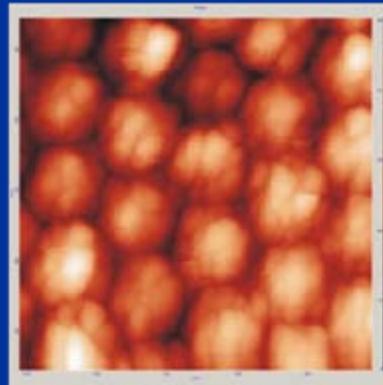
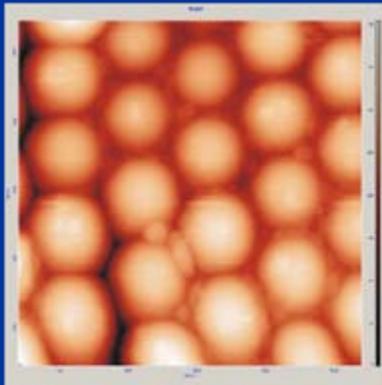
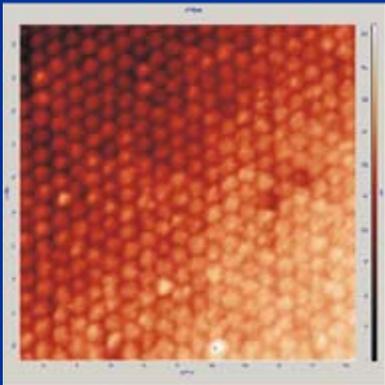


Заполнение пленки опала
суспензией УДА детонационного
синтеза

Спектры отражения и
пропускания незаполненной
пленки опала и пленки,
заполненной УДА

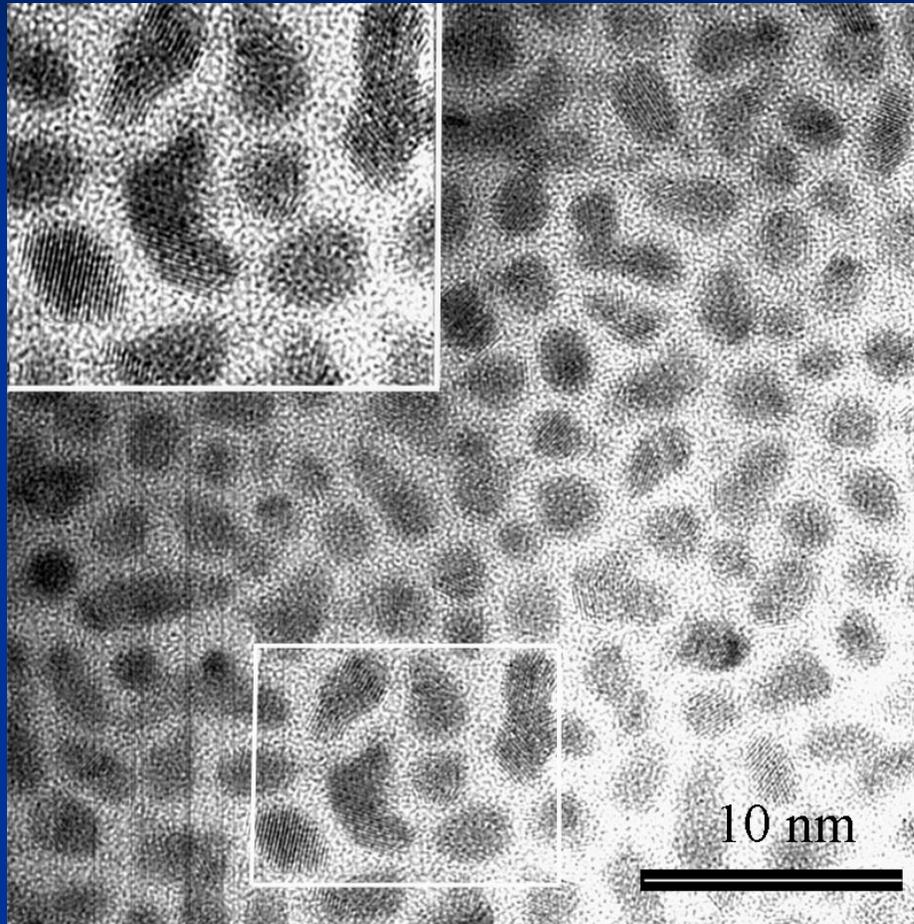


Незаполненная
пленка опала



Пленка нанокompозита
опал-наноалмаз

Наноккомпозит опал- Pt

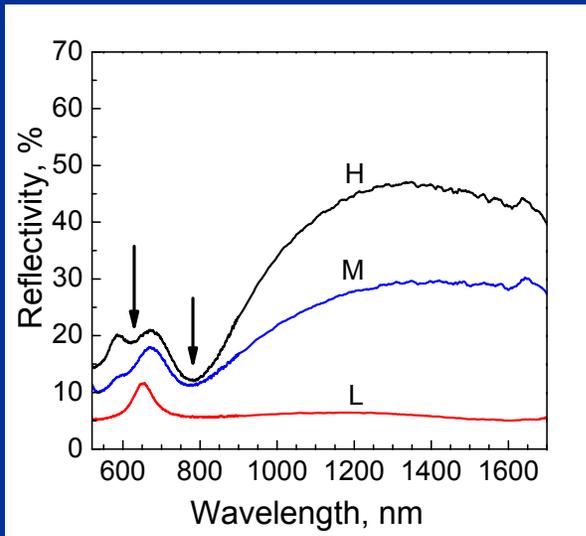


J. Non-Cryst. Sol. (2000)
Appl. Phys. Lett. (2000)
Sem. Sci. Technol. (2001)

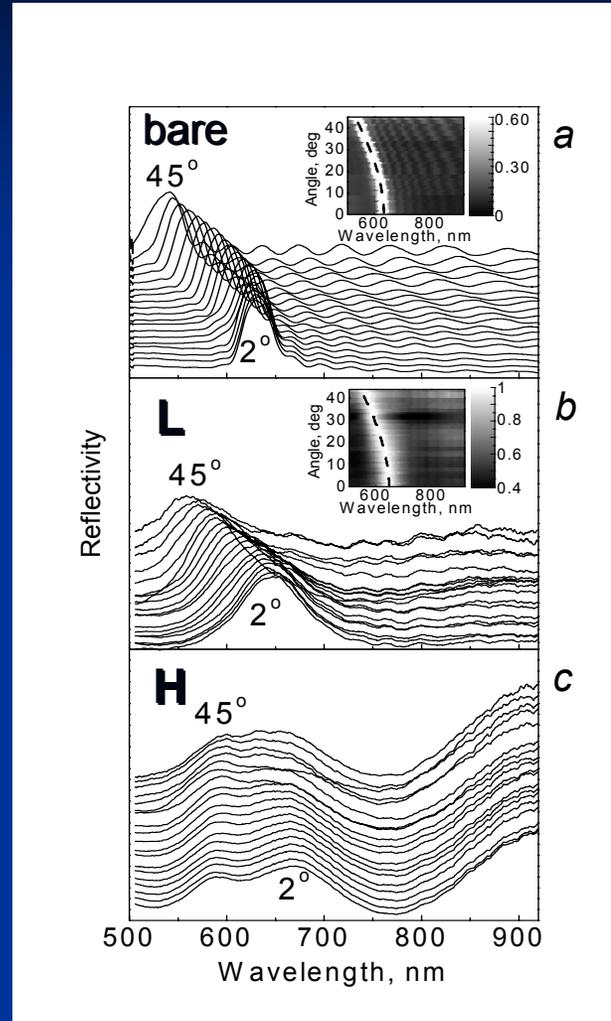


Наноконпозиты опал - Cu

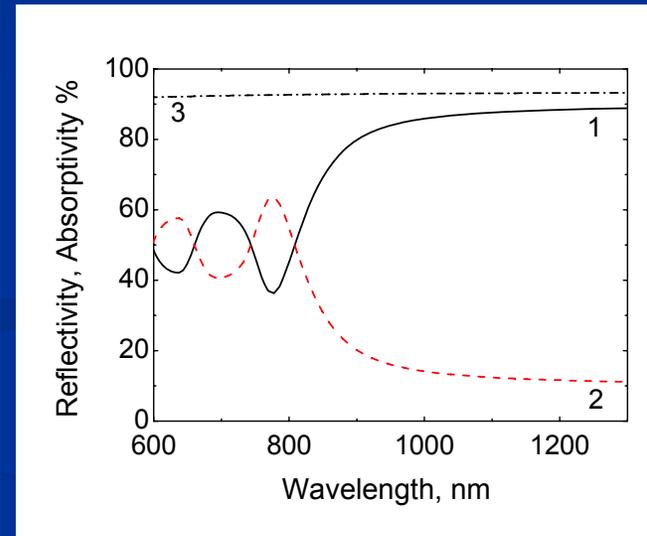
ФТТ
(2010)



Спектры отражения от пленки опала для трех различных степеней заполнения пор медью: малой (L), средней (M) и большой (H)

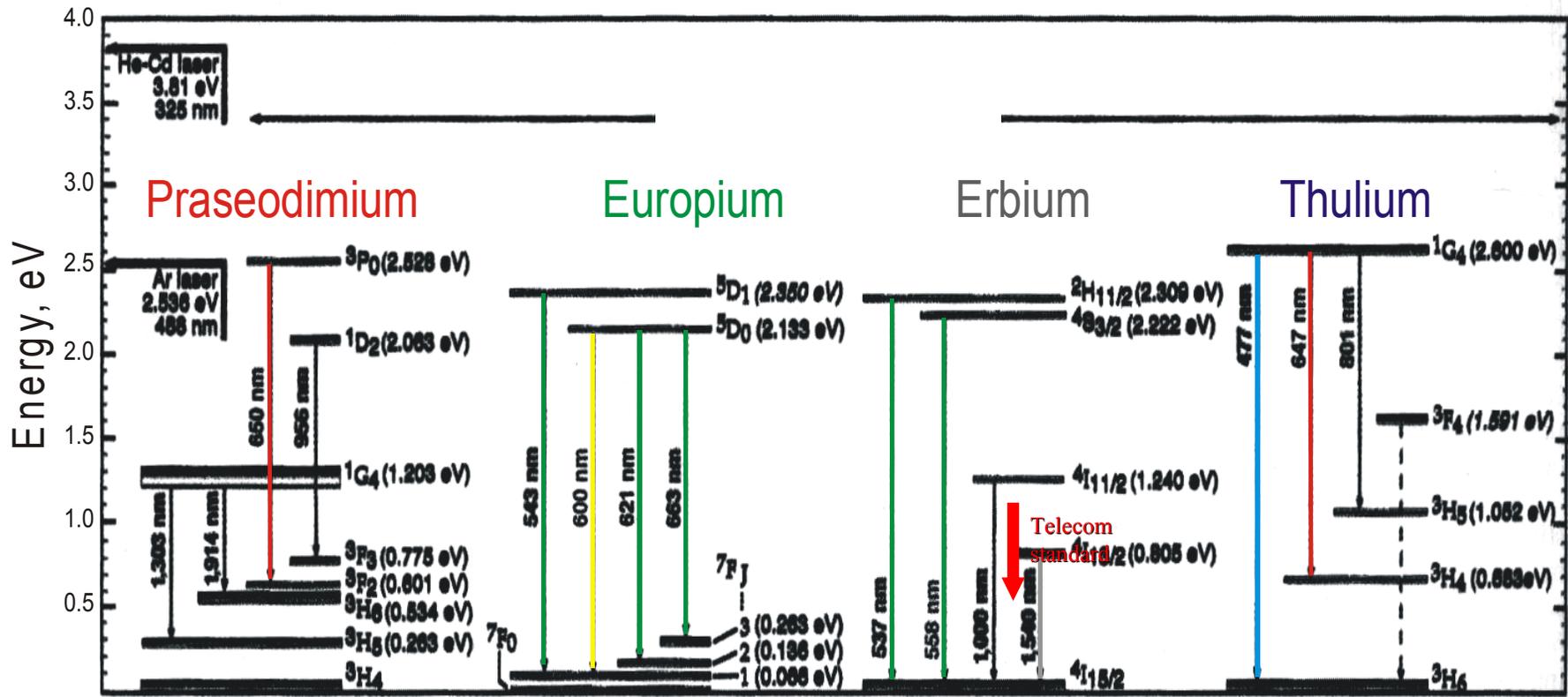


Спектры отражения при различных углах падения света



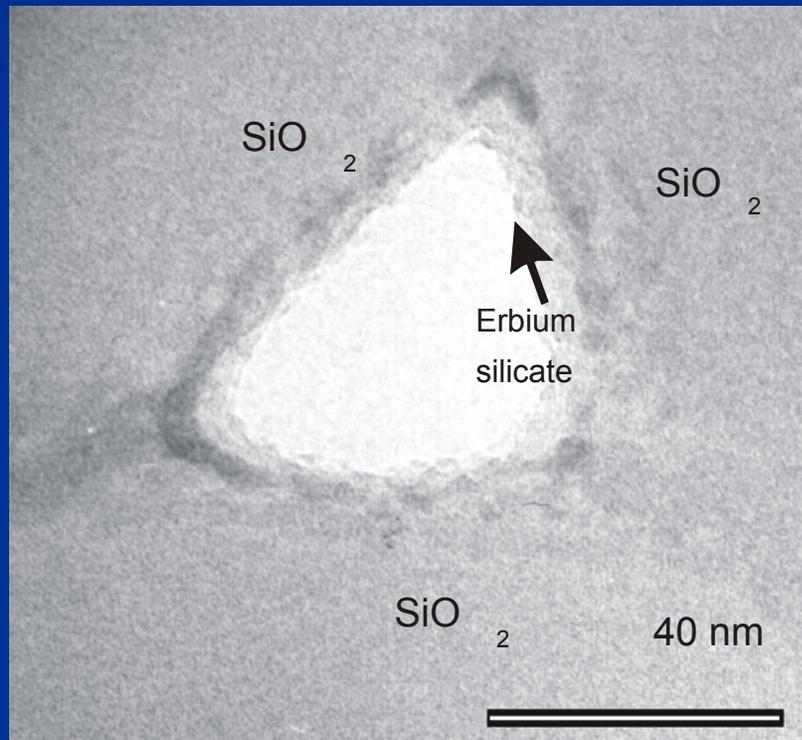
Спектр отражения (1) и поглощения (2) композита опал-Cu, рассчитанный методом FDTD, и рассчитанный спектр отражения медной пленки толщиной 50 нм

Редкоземельные эмиттеры

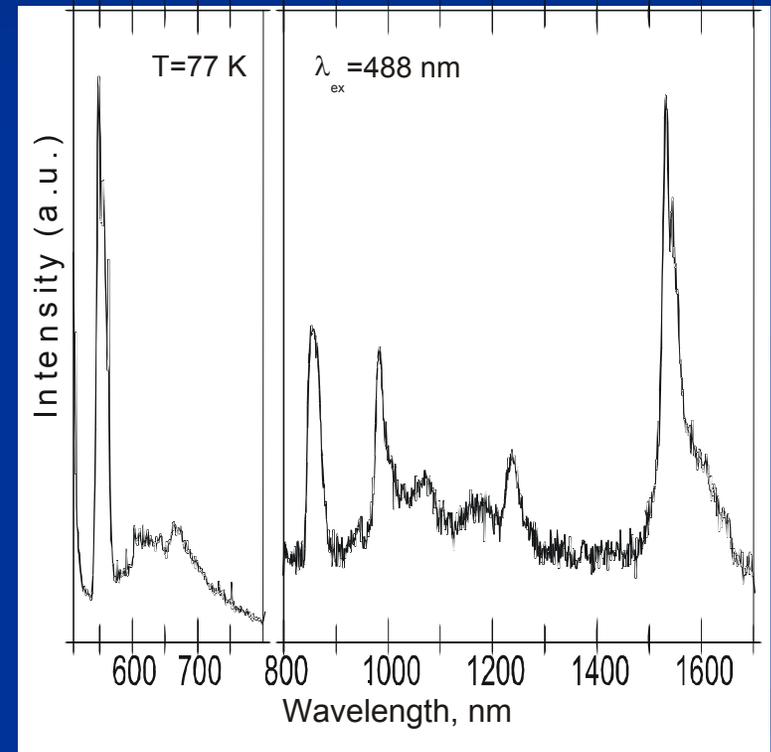


Светоизлучающие наноконпозиты опал-Er

Электронно-микроскопическое
изображение поры в наноконпозите
опал-Er (осаждение нанослоев)



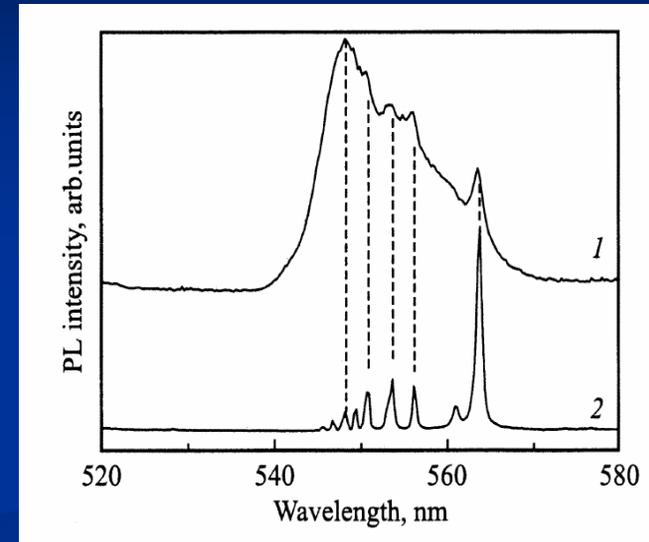
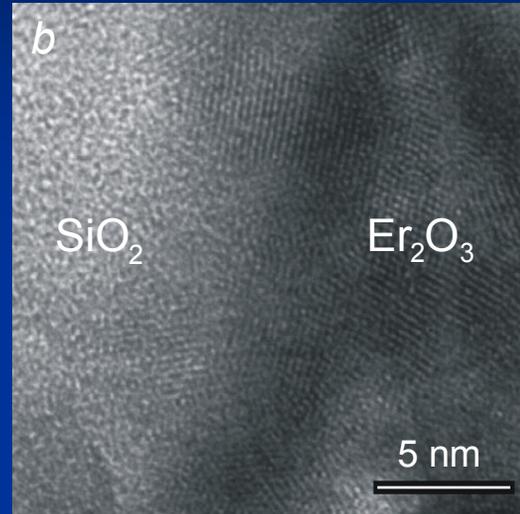
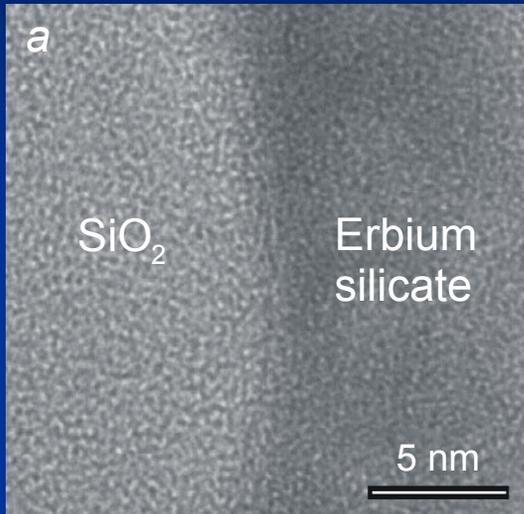
Фотолюминесценция
опал - Er



- 1) Пропитка пор опала 0.2М водным раствором $\text{Er}(\text{NO}_3)_3$
- 2) $4\text{Er}(\text{NO}_3)_3 \rightarrow 2\text{Er}_2\text{O}_3 + 12\text{NO}_2 + 3\text{O}_2$

ФТП (2002)

Светоизлучающие нанокompозиты опал-Er



Электронно-микроскопическое изображение высокого разрешения границы α -SiO₂ сферы и тонкого аморфного слоя, содержащего Er (*a*) и границы α -SiO₂ сферы и поры, полностью заполненной поликристаллическим Er₂O₃ (*b*).

Линия фотолюминесценции, соответствующая излучательному переходу $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ионов Er³⁺ в композите опал-эрбий (1) и в кристаллической пленке Er₂O₃ (2).

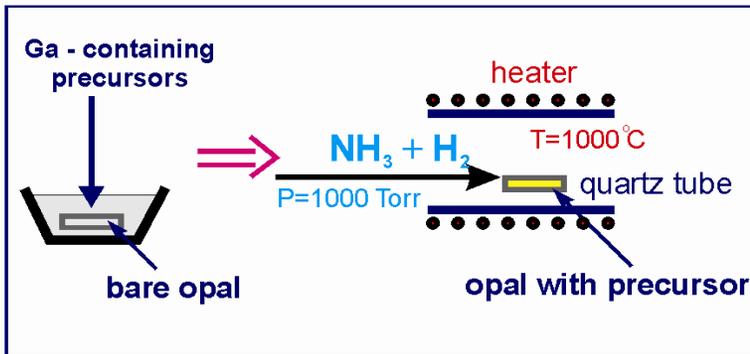
Нанокompозиты опал-фосфор

($ZnS:Mn$, $Zn_xCd_{1-x}S:Mn$, $Zn_xCd_{1-x}S:Ag$, $Zn_2SiO_4:Mn$ – сульфаты и силикаты Zn с Mn)

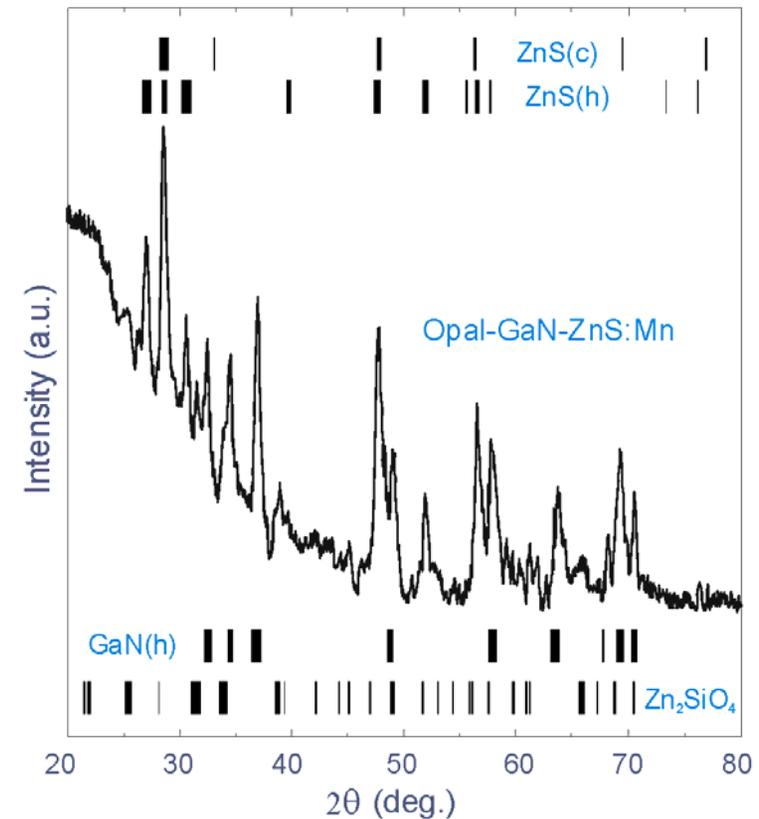
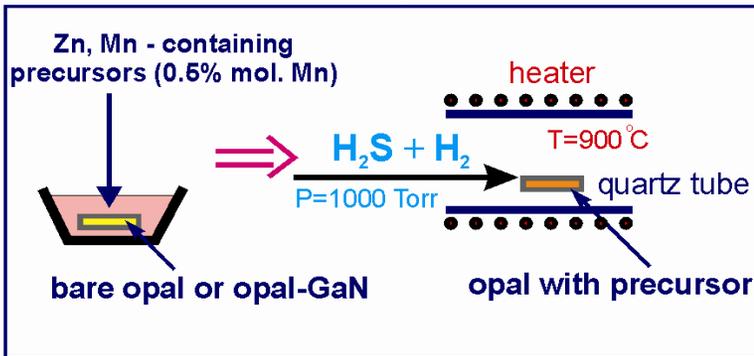
Изготовление композитов

Рентгеновская дифракция

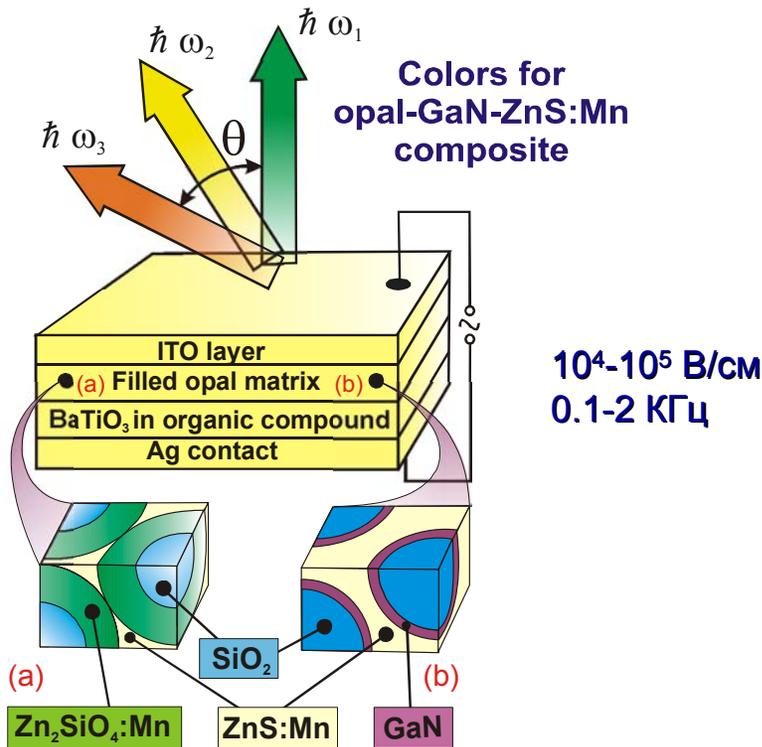
Infiltration of an opal with GaN



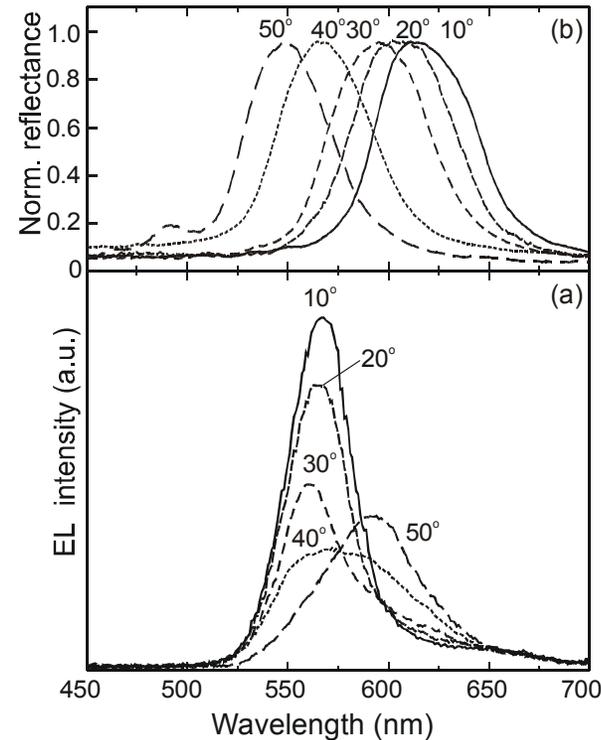
Infiltration of an opal with ZnS:Mn



Электролюминесцентные фотонные кристаллы на основе нанокompозитов опал-фосфоры (Анизотропная электролюминесценция)



A schematic electrochromic structure. The schemes of different active layers are shown:
(a) - opal-Zn₂SiO₄:Mn composite,
(b) - opal-GaN-ZnS:Mn composite.

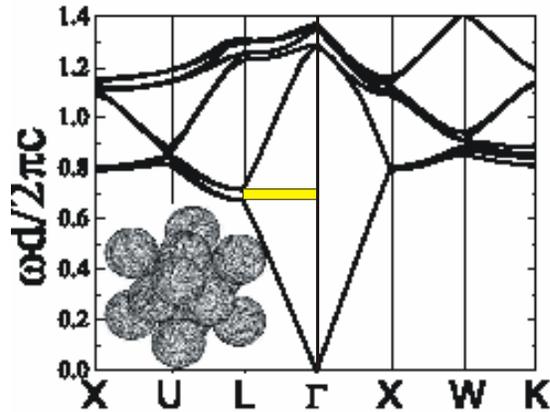


Переход в 3d оболочке Mn²⁺

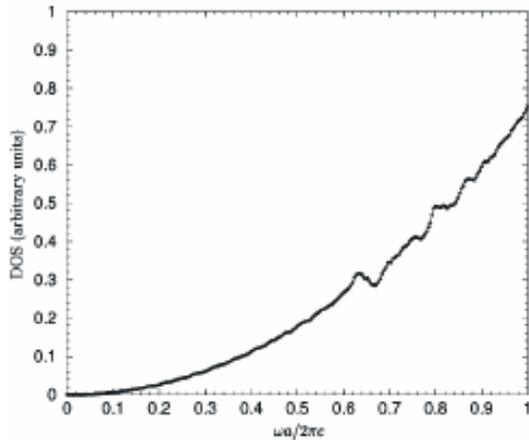
The EL spectra (a) and the spectra of reflection (b) of the composite opal-GaN-ZnS:Mn registered at various angles relative to the normal to the (111) surface of the composite.

Опал (стоп-зона, $\Phi 33$)

Band structure of SiO_2 opal (2.1).



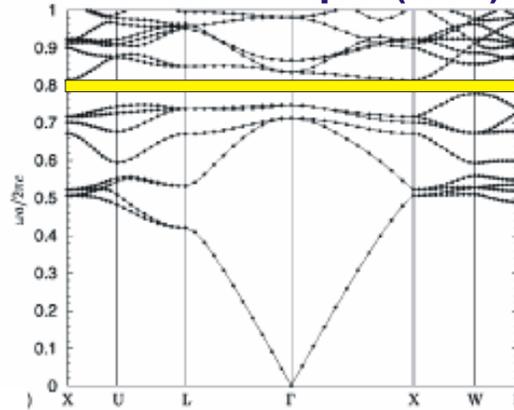
DOS of silica opal (2.1).



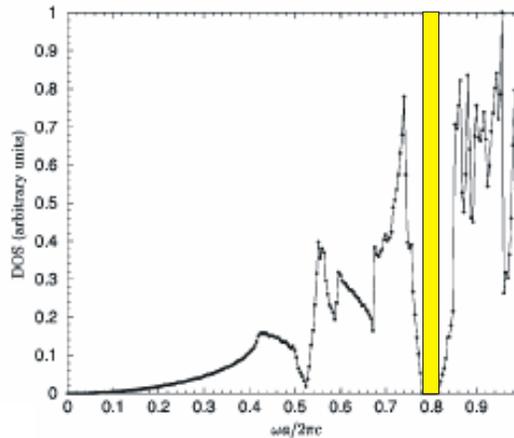
(K. Busch and S.John. Phys. Rev. E, 58, 3896 (1998)).

Инвертированный опал

Band structure of Si inverted opal (12.5).



(K. Busch and S.John. Phys. Rev. E, 58, 3896 (1998)).
 DOS of Si inverted opal (12.5).

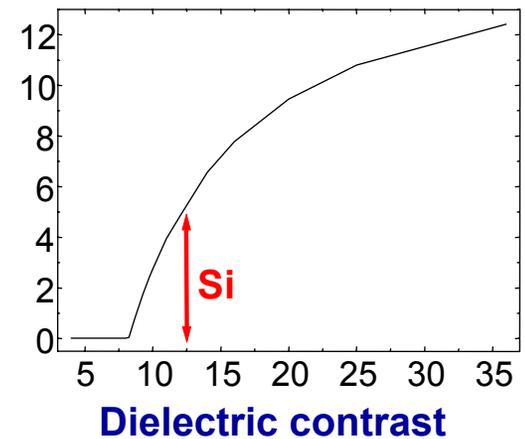


(K. Busch and S.John. Phys. Rev. E, 58, 3896 (1998)).

Полная фотонная запрещенная зона

(возникает при диэлектр. контрасте больше 8.4)

Относительная ширина полной фот. запр. зоны, %

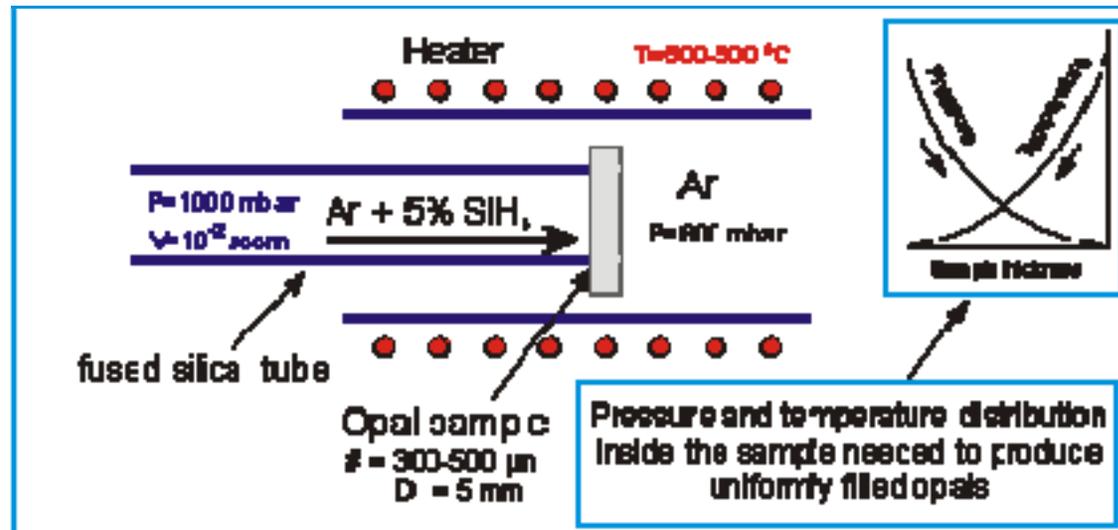


Топология инвертированного опала и большой диэл. контраст

$$\epsilon_H / \epsilon_L = 12.5 (> 8.4)$$

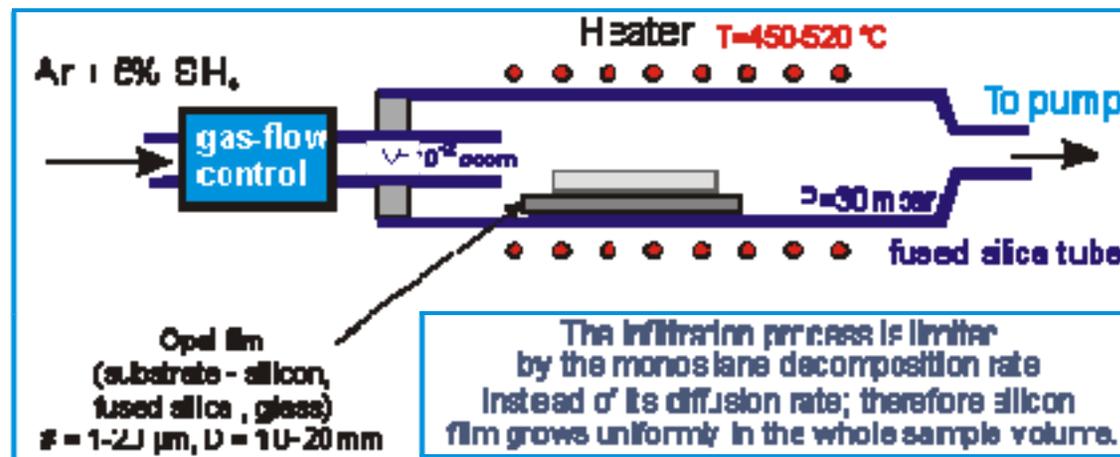
Заполнение объемных и пленочных опалов кремнием

CVD infiltration of bulk opals with amorphous silicon



ИЖТФ, 1998!
(Nature 2000)

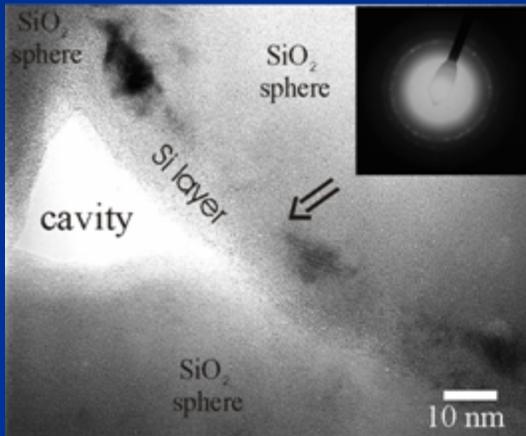
CVD infiltration of opal films with amorphous silicon



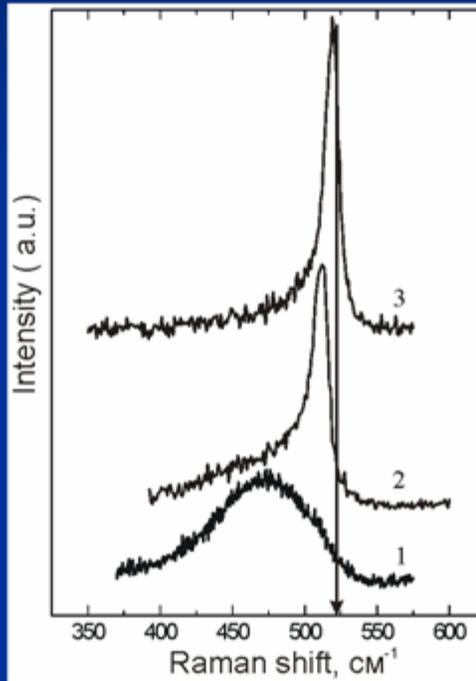
Наноконтропозиты опал-Si

Structural characterization of opal-silicon composites

HRTEM image of as-prepared opal-Si composite

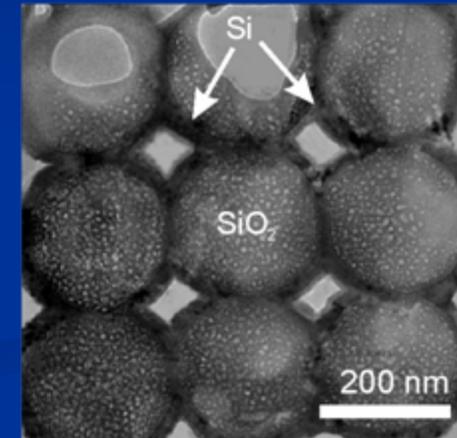


Raman spectra



1 - as-prepared opal-Si,
2 - opal-Si, annealed at 800 °C for 30 min,
2 - opal-Si, annealed at 800 °C for 2 h.
The phonon frequency corresponding to c-Si is marked.

TEM image of annealed opal-Si composite



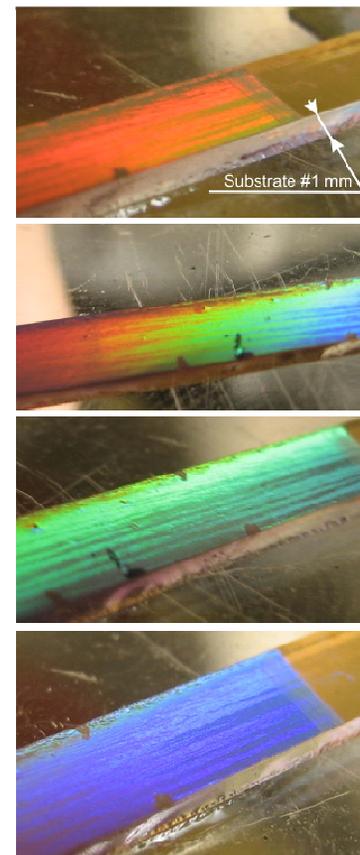
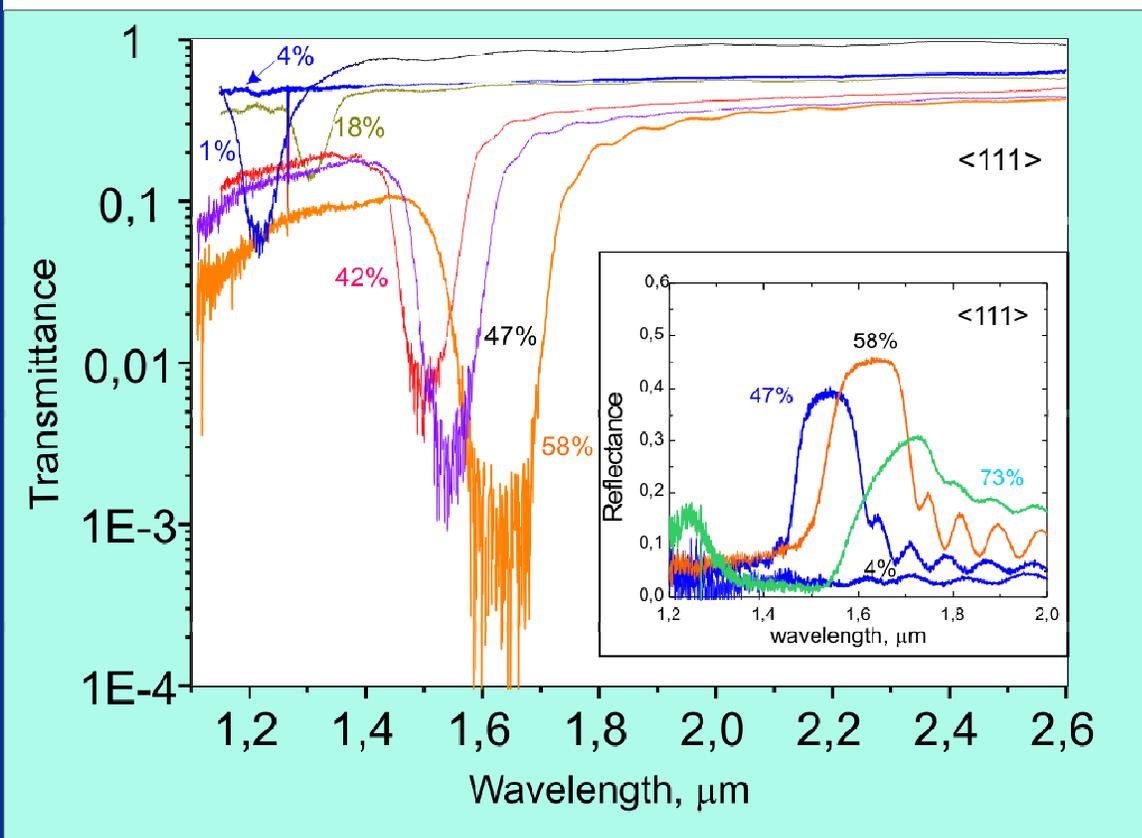
ПЖТФ (1998); Appl. Phys.Lett. (2000, 2005); J.Appl.Phys. (2001); ФТП (2001); J.Non.-Cryst. Sol. (2000, 2002, 2004); Sem.Sci.Tech. (2001); Phys.E (2003); Phys.Rev.Lett. (2003); J.Lumin. (2004)

Заполненные опаловых пленок кремнием

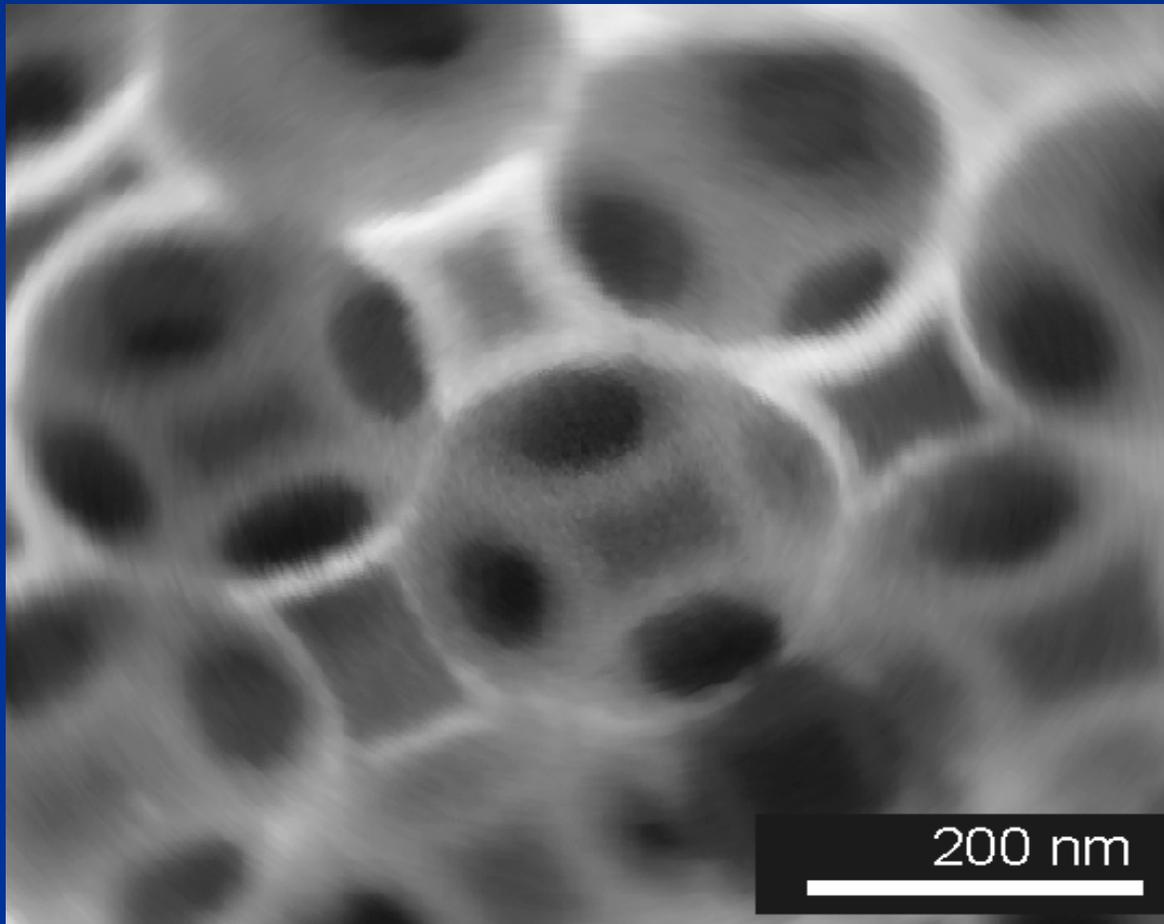
We developed the technique of infiltration of opal films with silicon. Photonic properties of the composites depend on the fill factor of pores.

Transmission spectra of a thin-film opal (540 nm beads) filled with silicon (various fill factors)

Photos of an opal film filled with Si at various angles of observation



Инвертированные кремниевые опаловые пленки

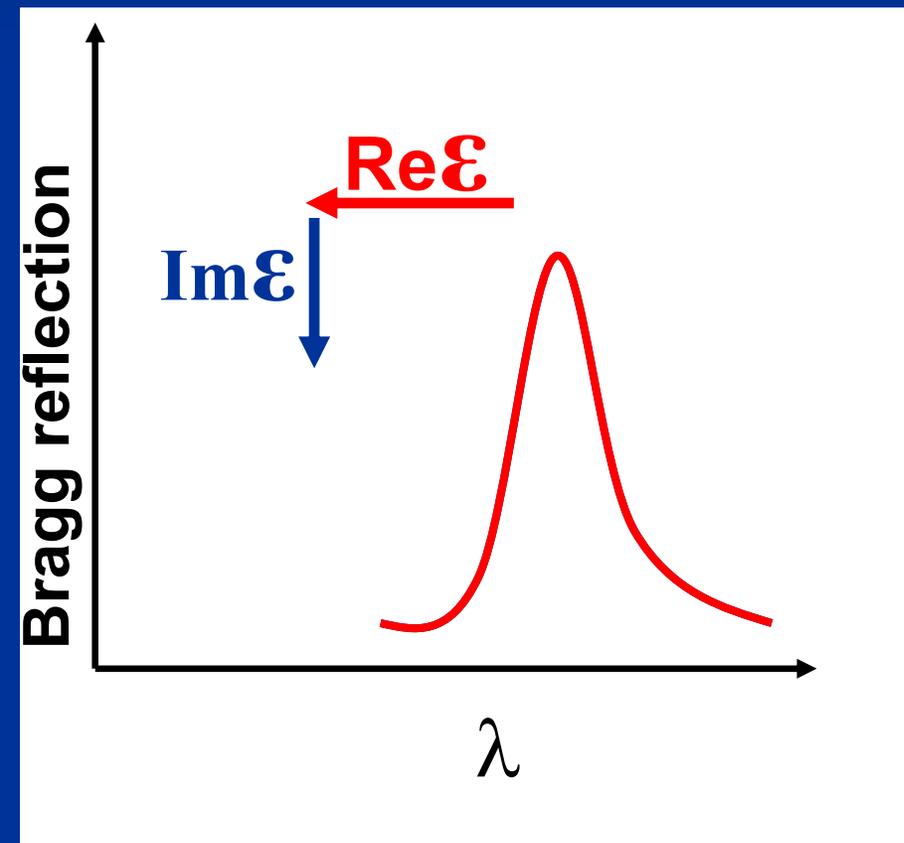


Опал-Si фотонные кристаллы:

- Полная фотонная запрещенная зона
- Слабое поглощение в ближнем ИК диапазоне
- Малые времена жизни носителей заряда
- Интеграция с кремниевой технологией
- Могут быть легированы излучающими редкоземельными металлами

Как управлять фотонной запрещенной зоной?

$$\lambda = 2d\sqrt{\langle \varepsilon \rangle}$$



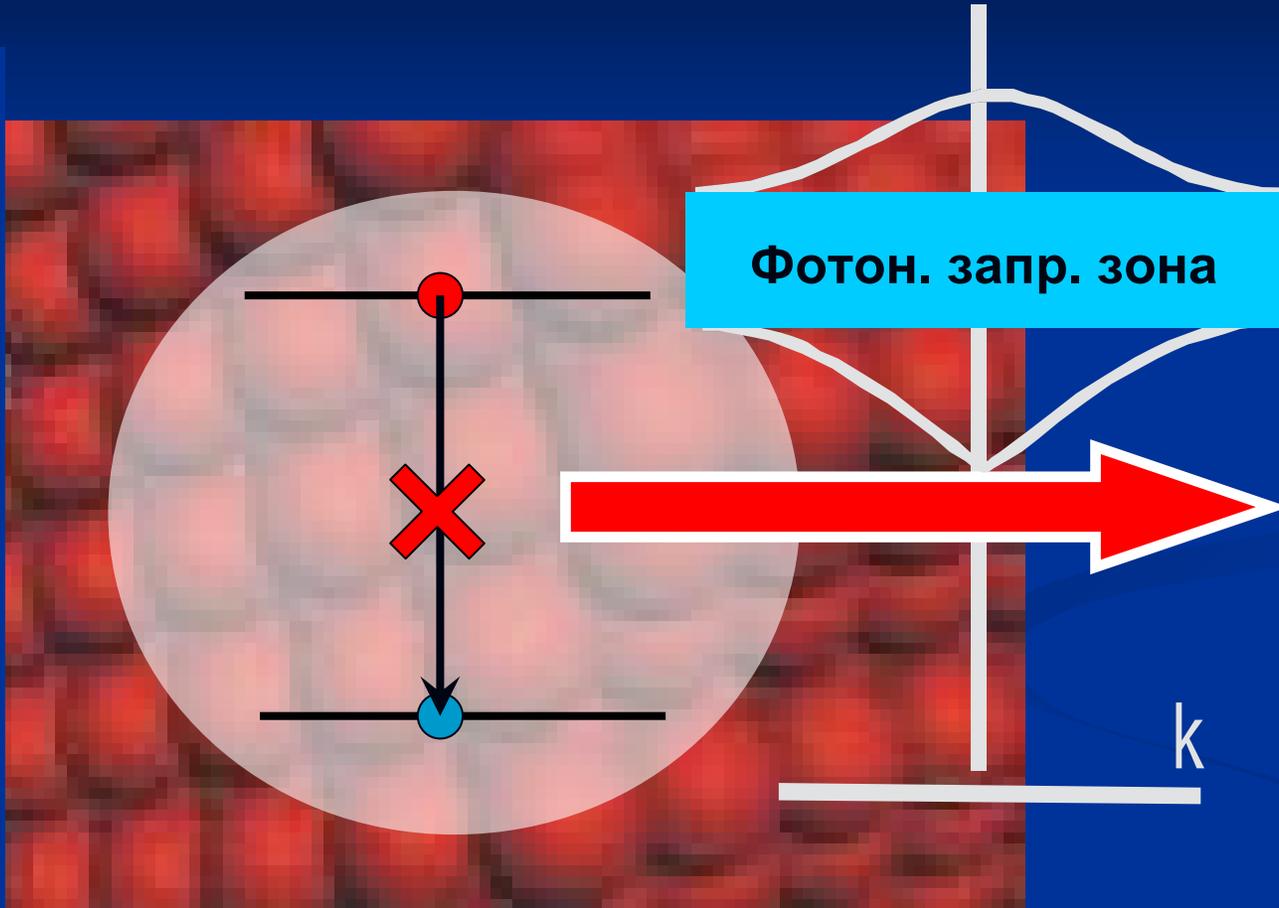
Изменять $\langle \varepsilon \rangle$

Температура
Генерация свободных
носителей

Изменять d

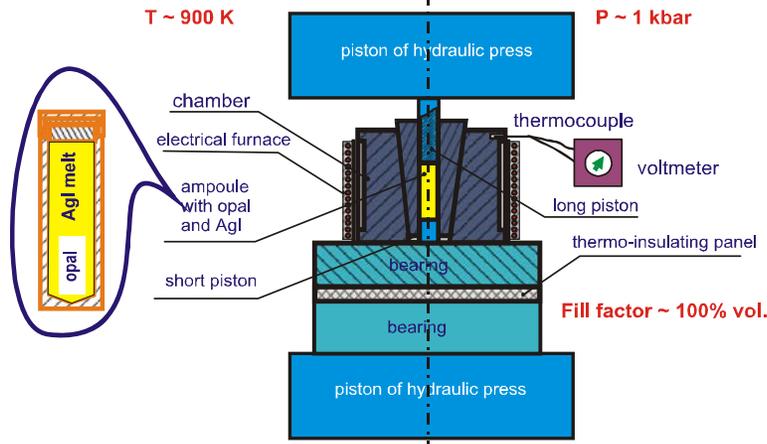
Деформация

Управление спонтанной эмиссией

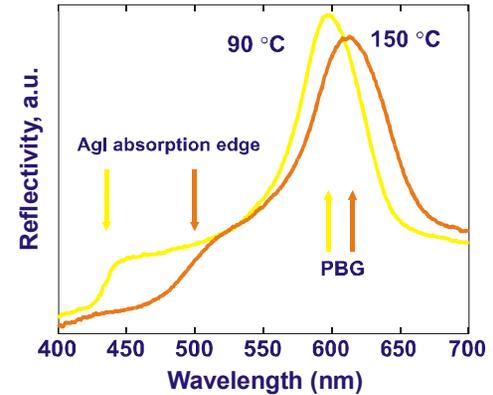


Структурный фазовый переход первого рода полупроводник-суперионный проводник и управление оптическими свойствами нанокompозитов опал-AgI

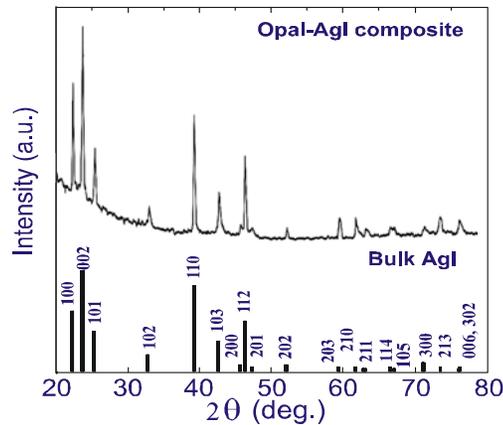
Infiltration of the opal with AgI
by high-pressure technique



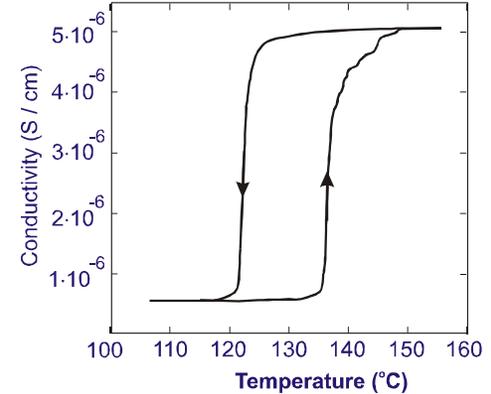
Shift of the band edge and the PBG



XRD patterns



Conductivity hysteresis loop
of the opal-AgI composite



ТРЕБОВАНИЯ К НАПОЛНИТЕЛЮ

ФИЗИЧЕСКИЕ

- *высокий диэлектрический контраст*

$$g = \max(\varepsilon_a/\varepsilon_b, \varepsilon_b/\varepsilon_a)$$

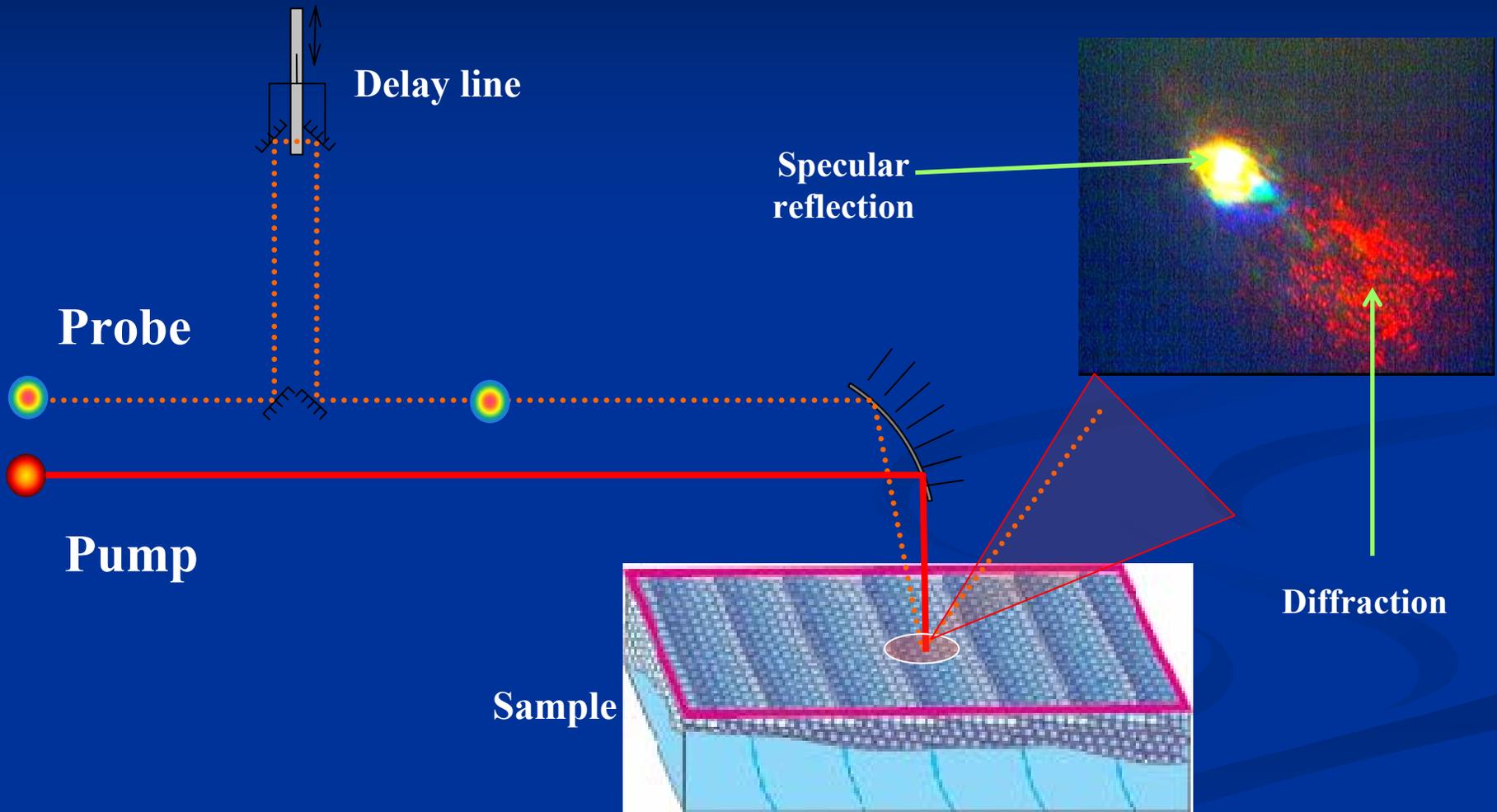
- *возможность сверхбыстрого управления свойствами*

Si, VO₂

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ

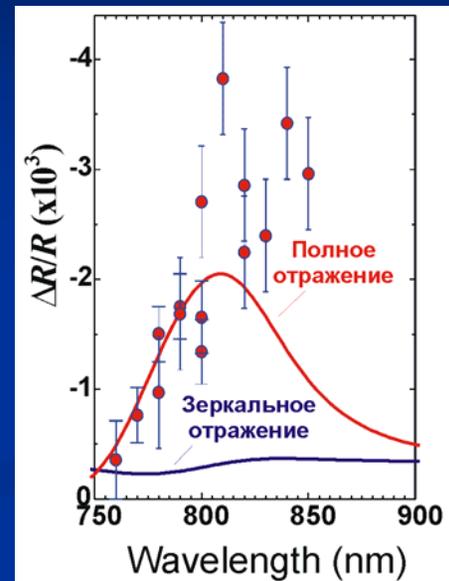
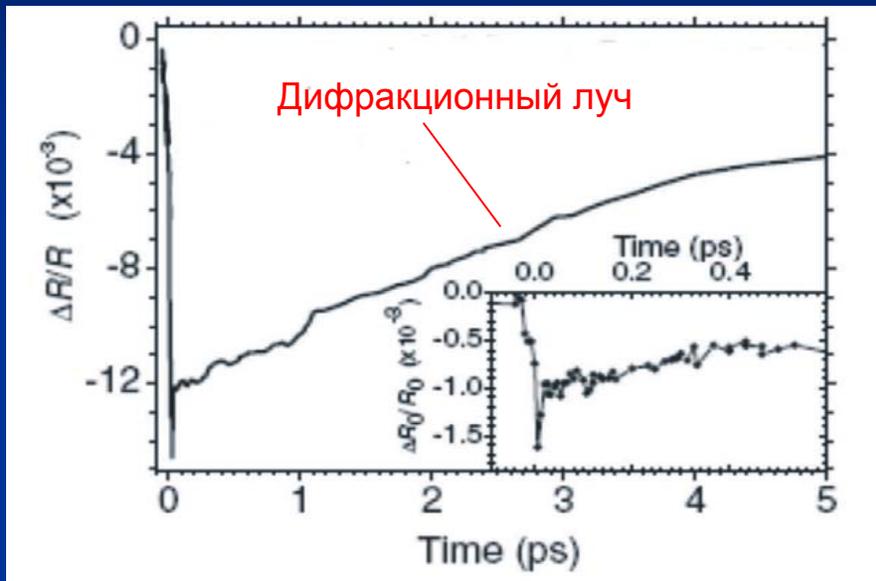
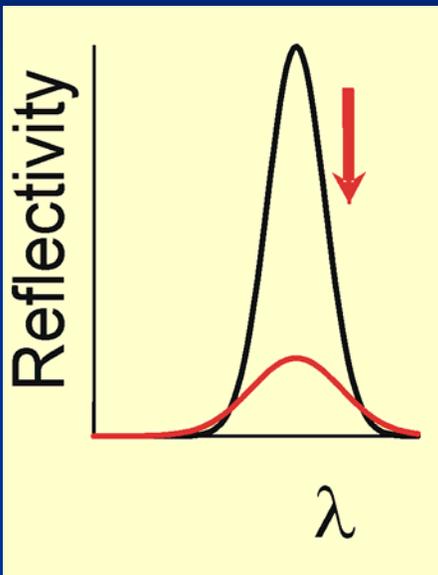
- *температура синтеза < 800 °C*
- *равномерное заполнение пор опала*
- *варьирование степени заполнения пор*
- *«мягкое» инвертирование*

Pump-probe experiment



Фотоиндуцированное фемтосекундное переключение в опал-Si умеренная мощность возбуждения

$\text{Im}\epsilon$



Мощность накачки: 0.7 Дж/м^2 $\lambda_{\text{pump}} = \lambda_{\text{probe}} = 800 \text{ нм}$

- Изменение интенсивности дифракционного сигнала в 10 раз больше, чем зеркального

- Величина $\Delta R/R \sim 1\%$

- Время переключения короче

30 фс

Phys. Rev. Lett. (2003)

Теория Друде

$$\Delta \epsilon'_{Si} = \frac{-N e^2}{m^* \epsilon_0 (\omega^2 + \tau_d^{-2})}$$

$$\Delta \epsilon''_{Si} = \frac{-\Delta \epsilon'_{Si}}{\omega \tau_d}$$

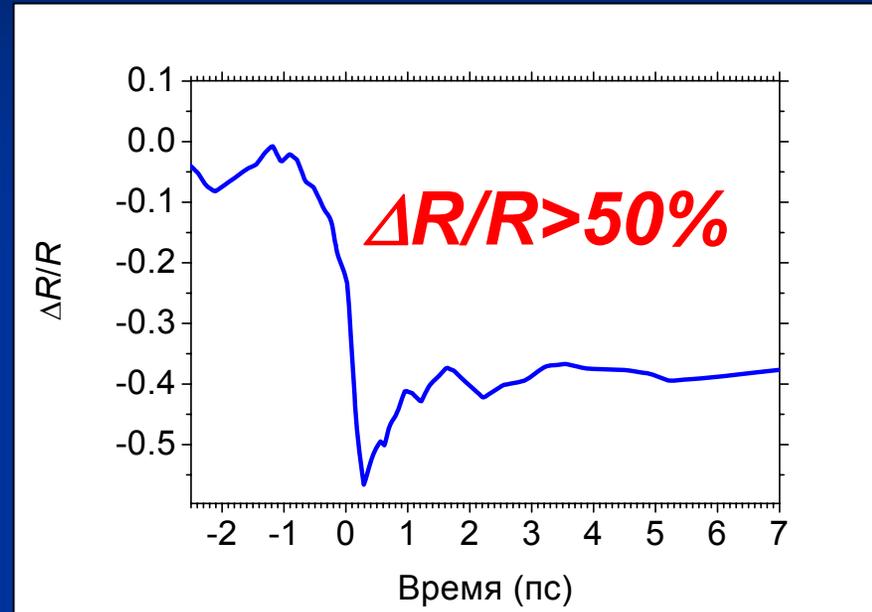
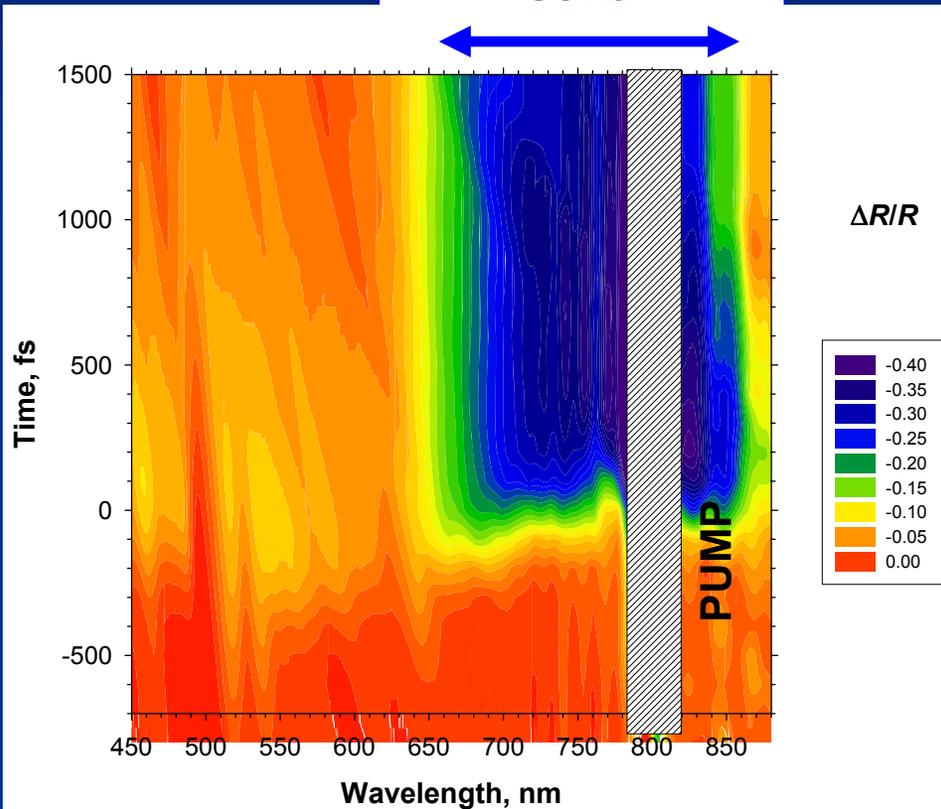
$$\Delta \epsilon_{Si} = (-6.2 + 5.3i) \times 10^{-3}$$

$$\frac{\Delta \epsilon'_{Si}}{\epsilon'_{Si}} \approx 5 \times 10^{-4} \quad \frac{\Delta \epsilon''_{Si}}{\epsilon''_{Si}} \approx 1.2 \times 10^{-2}$$

Эволюция спектра брэгговского отражения во времени при высокой мощности лазерного импульса

J.Non.-Cryst. Sol. (2004), J.Lumin. (2004)

Фотонная
запрещенная
зона



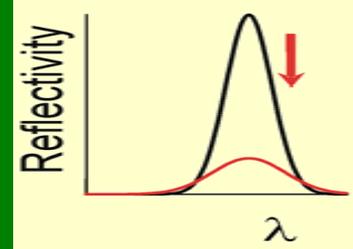
Интенсивность накачки: 50 Дж/м²

$\lambda_{\text{pump}} = 800 \text{ нм}$ $\lambda_{\text{probe}} = 770 \text{ нм}$

Фотоиндуцированное поглощение
подавляет конструктивную
интерференцию
в ФК опал-Si



Интенсивность
брэгговского
отражения
уменьшается



Фазовый переход

полупроводник – металл в VO_2

$\text{Re}\epsilon \downarrow$

Горячая фаза

Тетрагональная решетка,
металл

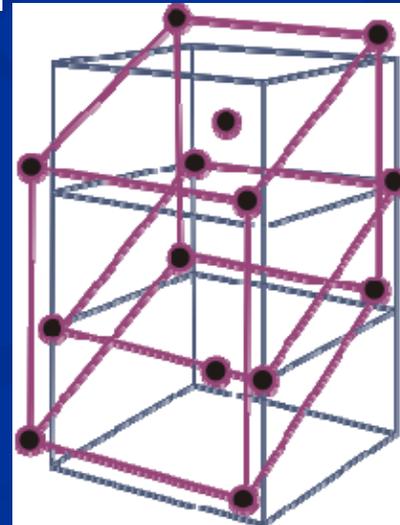
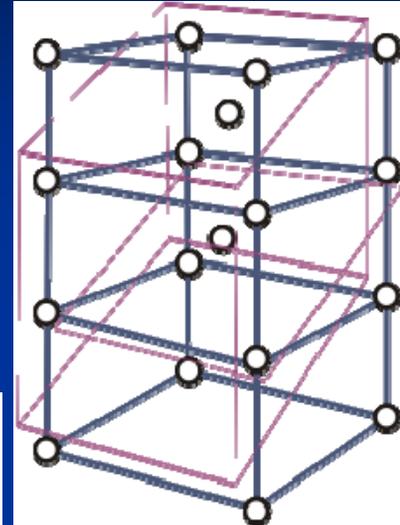
Диэл. константа $\epsilon \approx 5.3$

Время перехода $< 500 \text{ fs}$!

Холодная фаза

Моноклинная решетка,
полупроводник

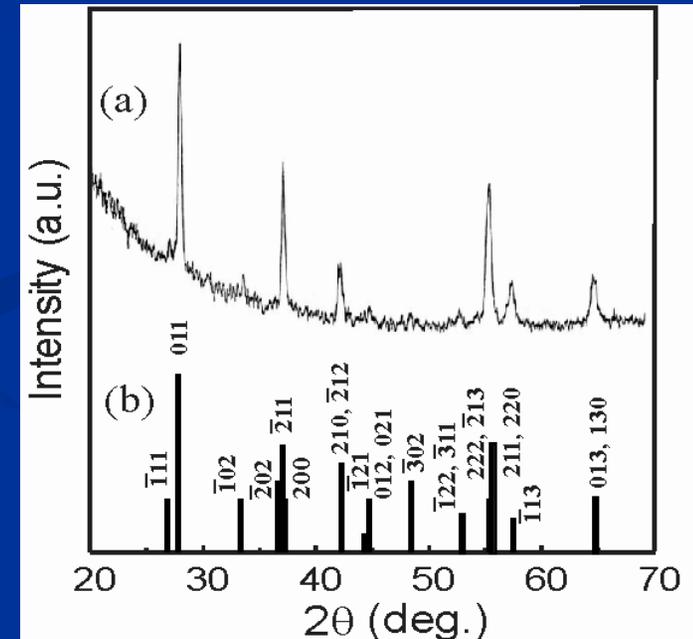
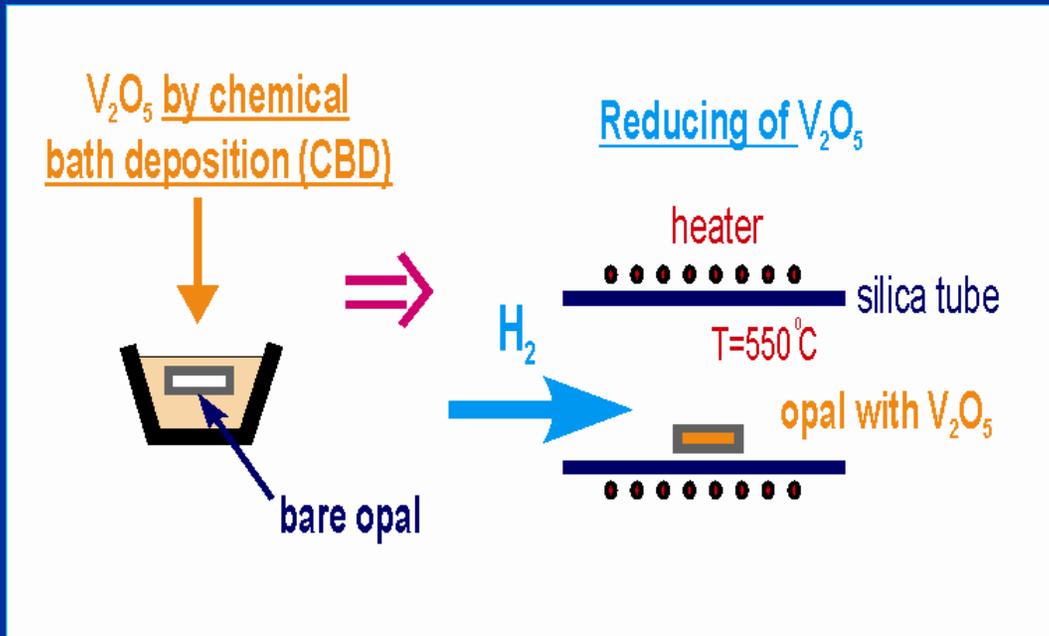
Диэл. константа $\epsilon \approx 8.4$



Изготовление объемных нанокомпозитов опал-VO₂

Методика заполнения пор
опала диоксидом ванадия

Рентгеновская дифракция
опал-VO₂ (a) и объемного VO₂ (b)



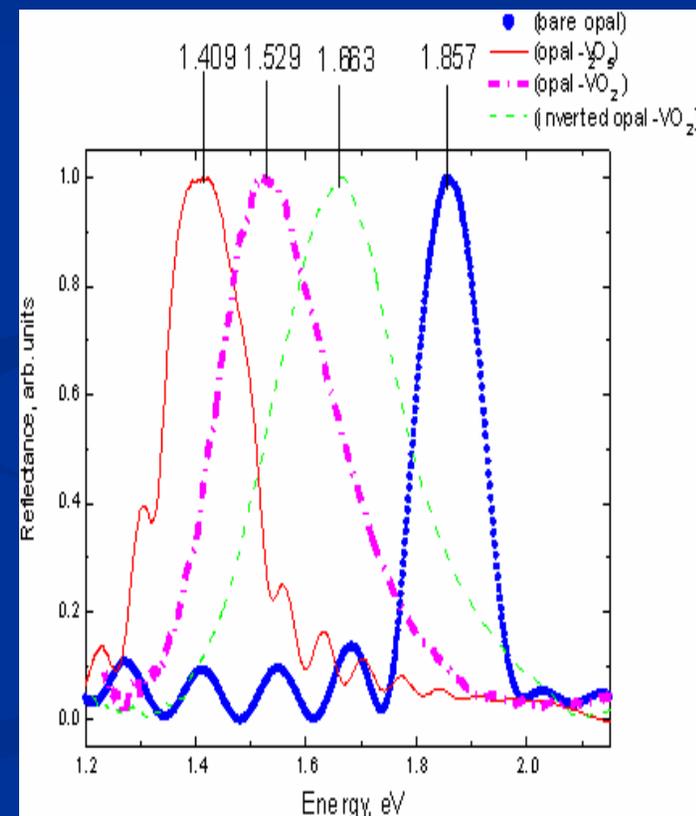
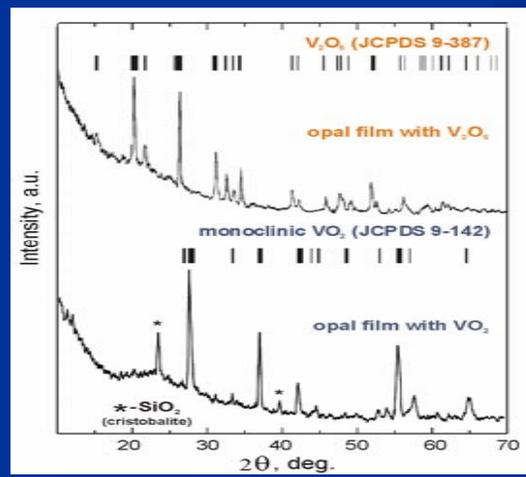
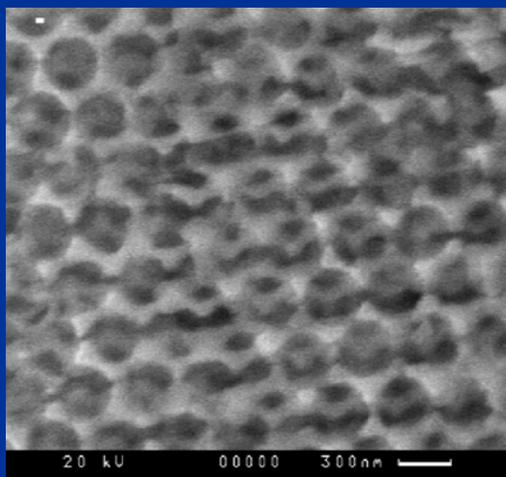
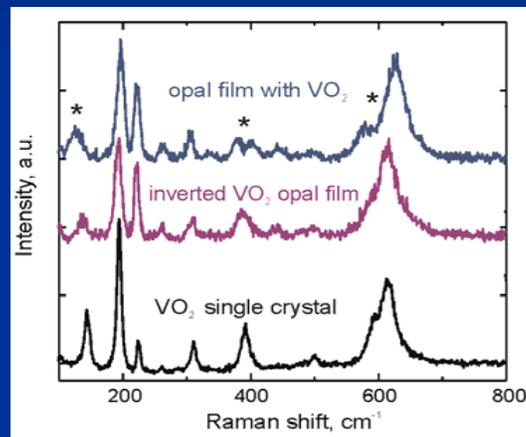
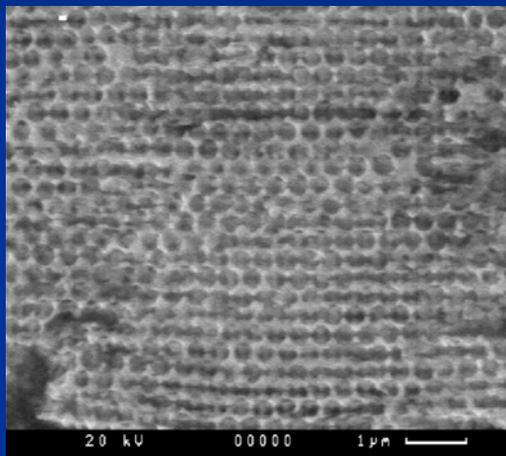
Appl. Phys. Lett. (2001)

Структурное совершенство и фазовый состав пленок опал- VO_2

СЭМ

Спектры рамановского рассеяния и рентгеновской дифракции

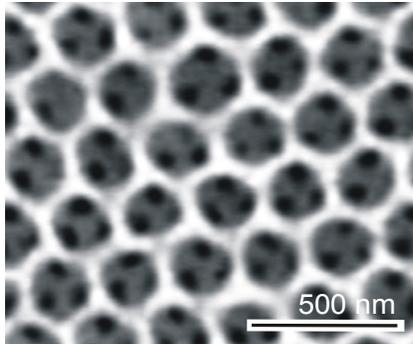
Спектры брэгговского отражения



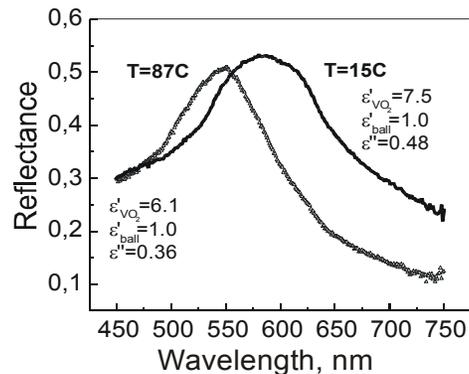
Управляемый фазовым переходом инвертированный опал-VO₂ фотонный кристалл

Обратимый процесс

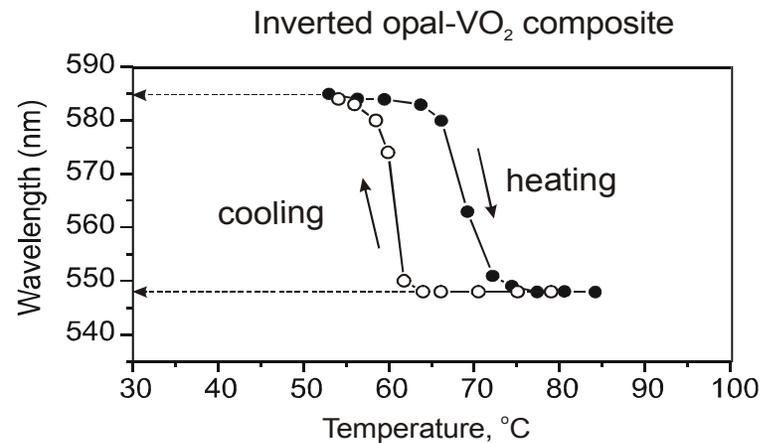
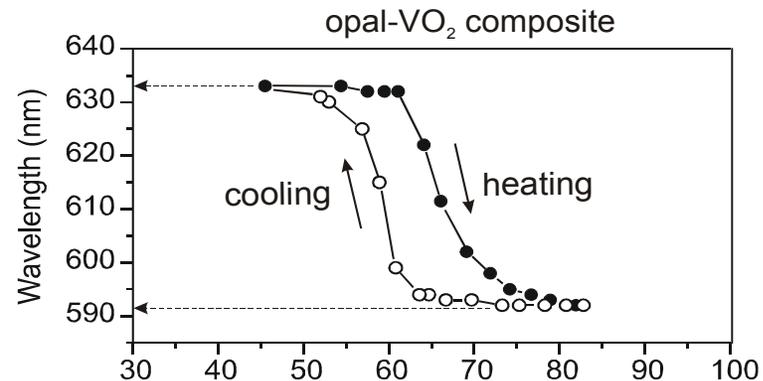
SEM image
of the VO₂ photonic crystal
(inverted opal-VO₂ composite)



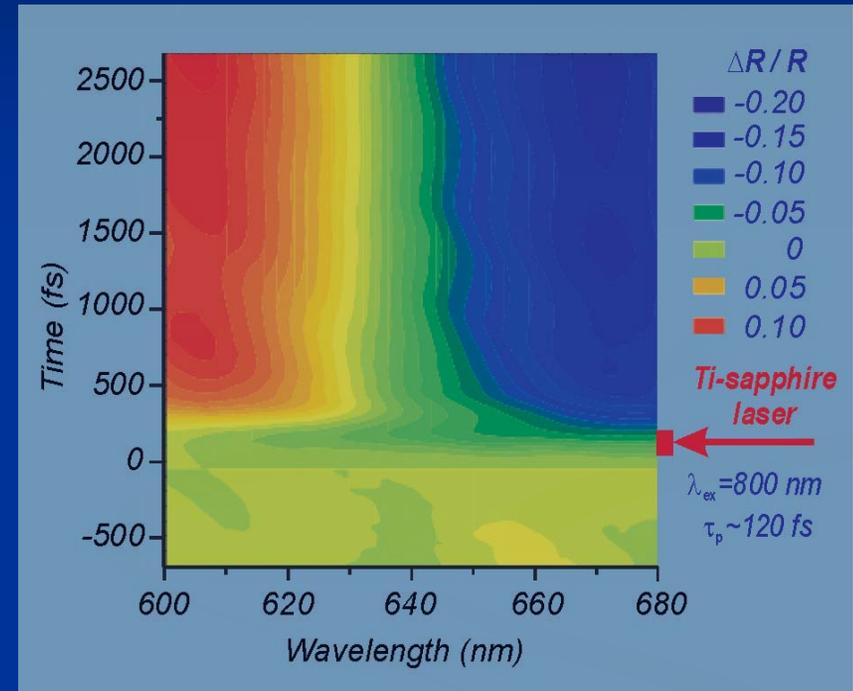
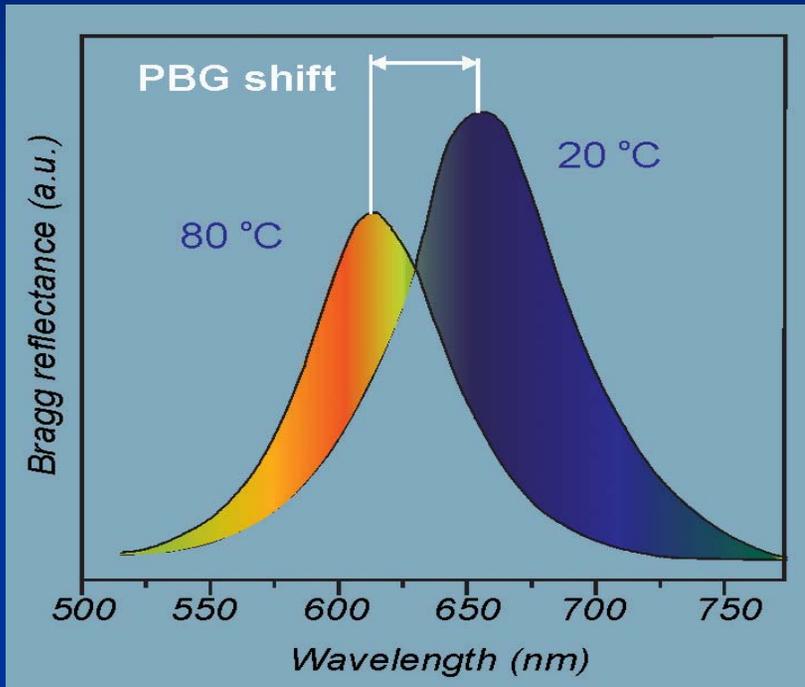
Experimental reflectance spectra
from the (111) surface of the
VO₂ photonic crystal
(inverted opal-VO₂ composite)



Thermal hysteresis loop
of the photonic band gap position



Переключение брэгговского отражения за счет фотоиндуцированного фазового перехода в фотонных кристаллах опал-VO₂

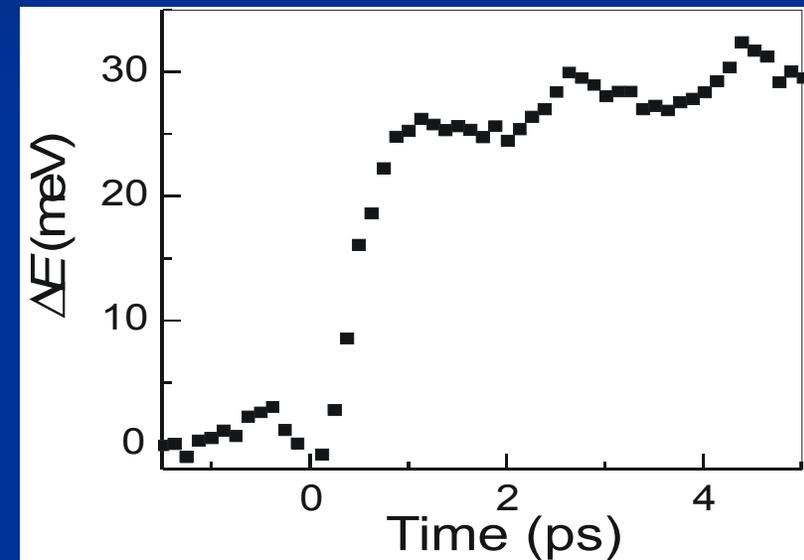
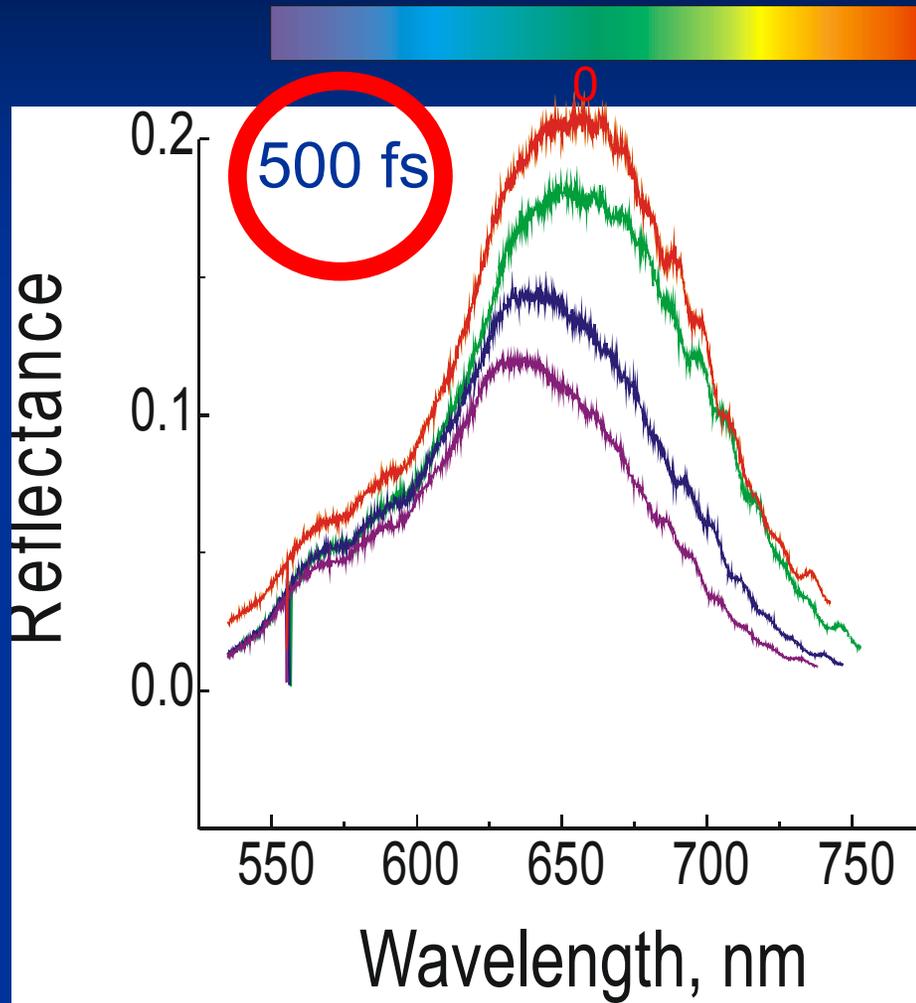
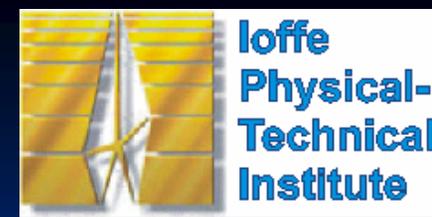


Линейные спектры отражения

Сверхбыстрое спектрально-временное изменение интенсивности брэгговского отражения (pump-probe)

Appl.Phys.Lett. (2001,2005); ФТП (2002); ФТТ (2003);
Phys.E (2003); Phys.Rev.B (2007)

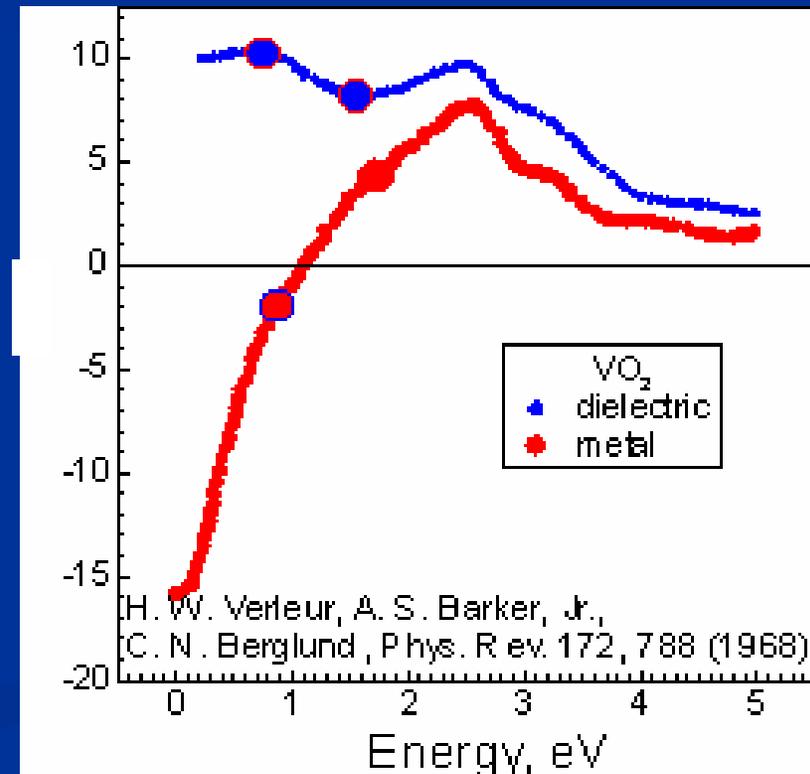
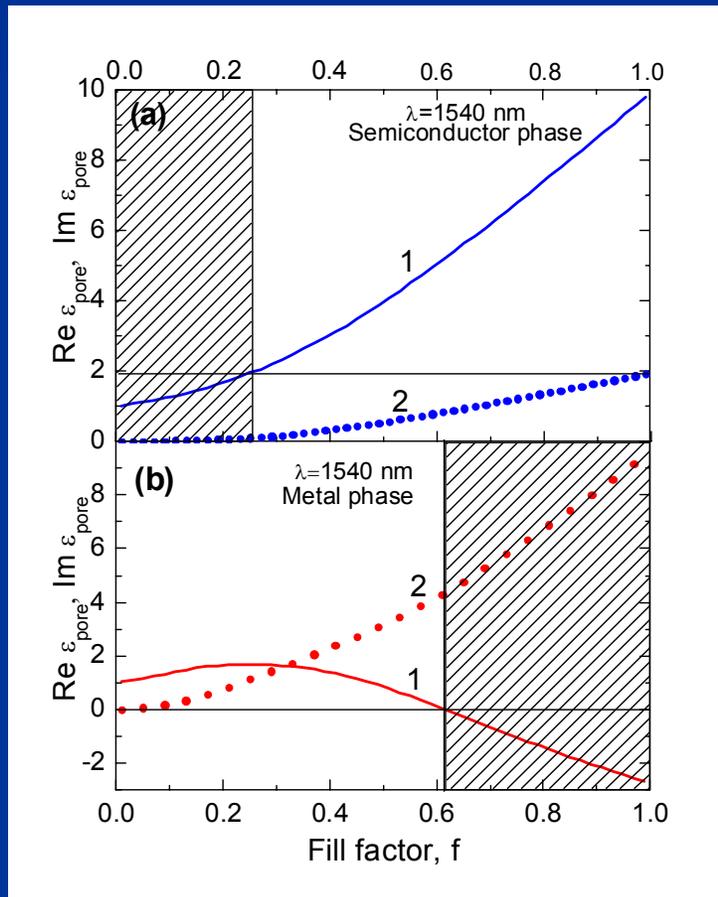
Фотоиндуцированное фемтосекундное переключение в опал-VO₂



$\Delta E \sim 25$ meV

Зависимость вещественной и мнимой части усредненной диэлектрической проницаемости пор нанокompозита опал-VO₂ на длине волны 1.5 мкм в зависимости от фактора заполнения пор

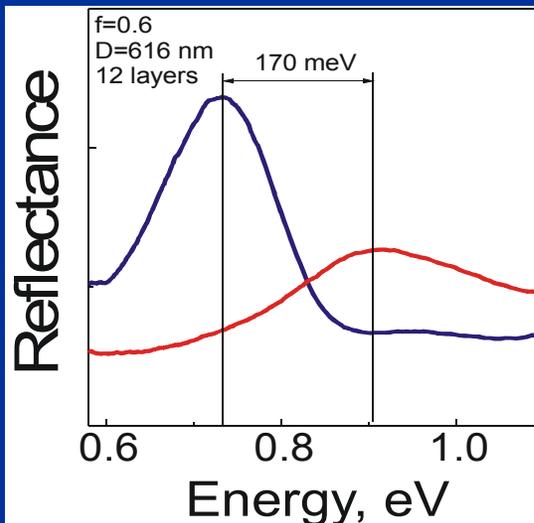
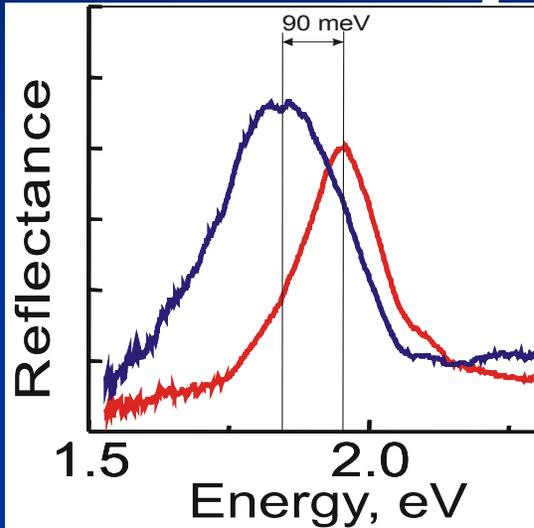
Вещественная часть диэлектрической проницаемости диоксида ванадия



Перестройка фотонной запрещенной зоны в опал-VO₂

в различных спектральных диапазонах

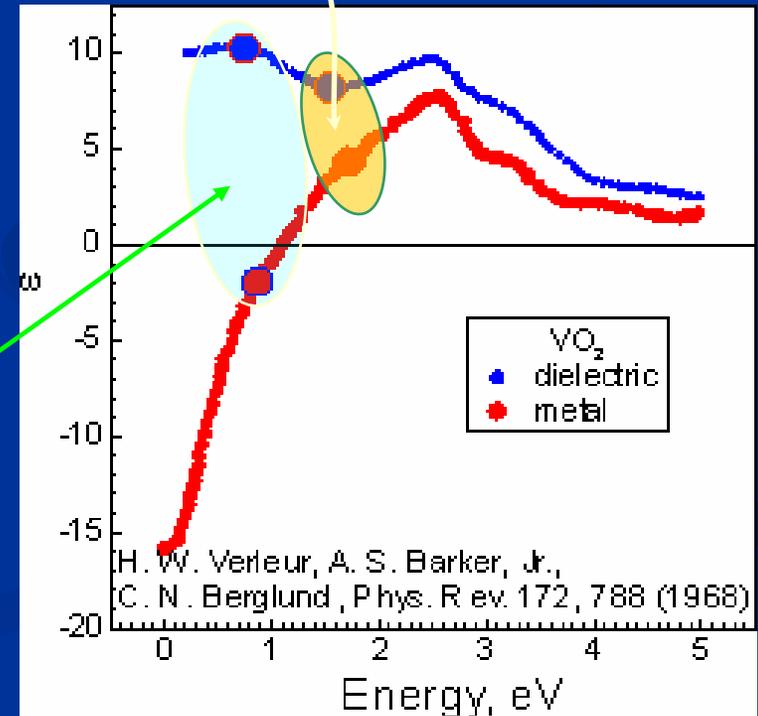
Пленка опал-VO₂



$$\lambda = 2d\sqrt{\langle \epsilon \rangle}$$

310 nm

Дисперсия диэлектрических констант

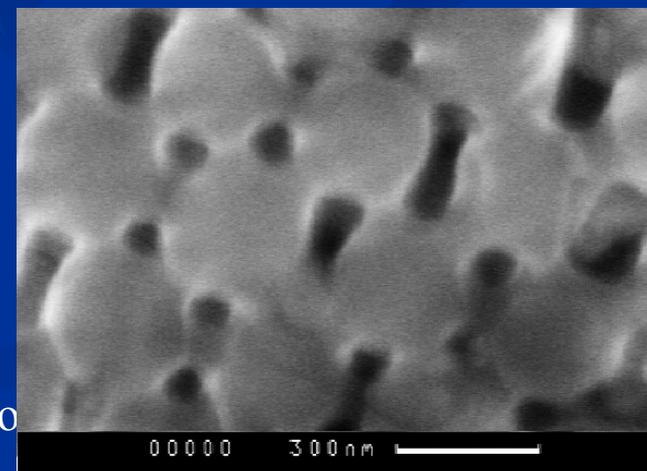
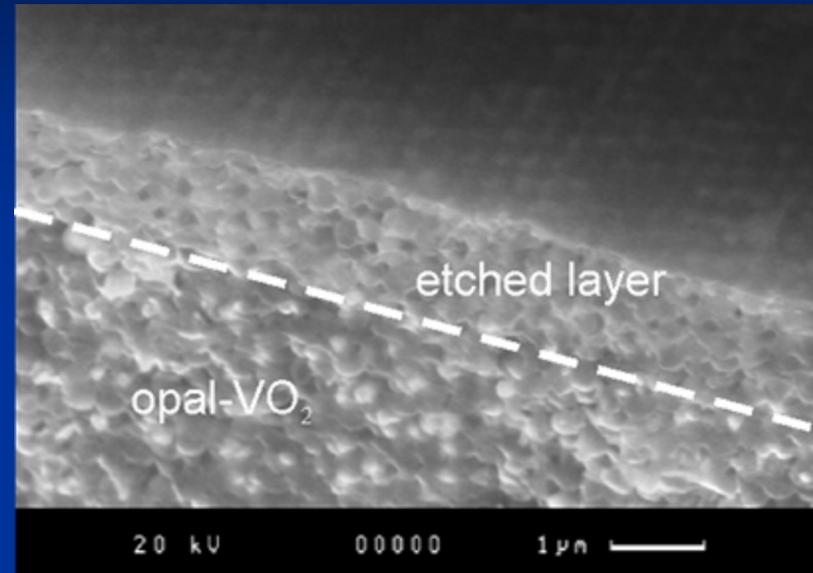
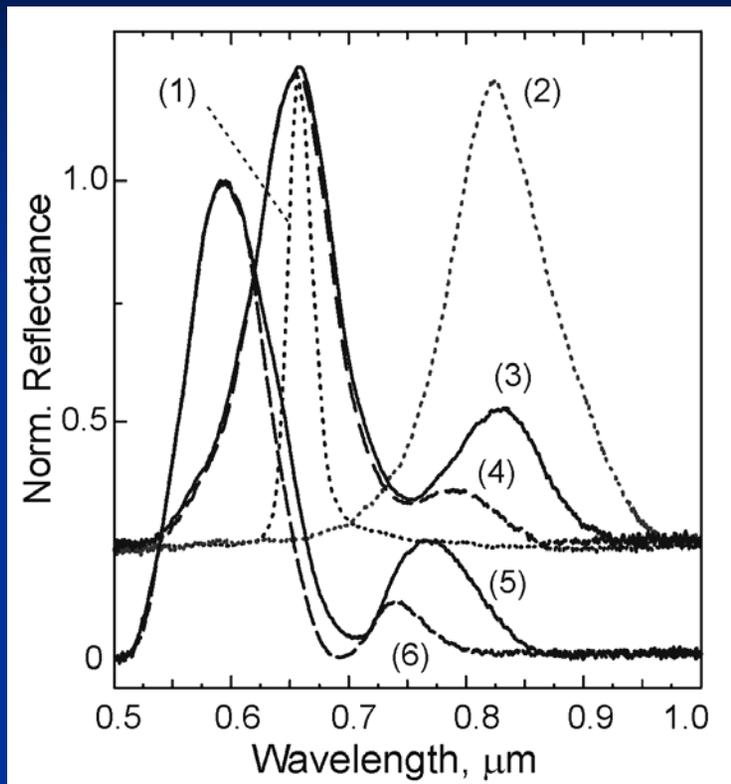


600 nm

Visible

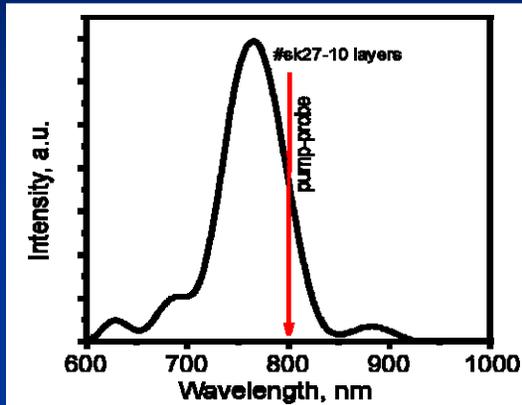
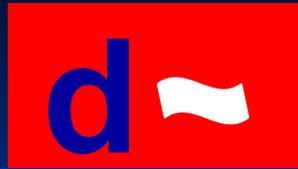
Near infrared

Фотонно-кристаллическая гетероструктура



Нормализованные спектры отражения: 1 – незаполненный опал, 2 – опал- VO_2 композит, протравленный в 0.3М HF в течение 1 час, 3-6 – фотонно-кристаллическая гетероструктура до (3,5) и после (4,6) фазового перехода в VO_2 при разных углах падения: 3,4 - 10° ; 5,6 - 40° .

Гиперзвуковая модуляция фотонной запрещенной зоны

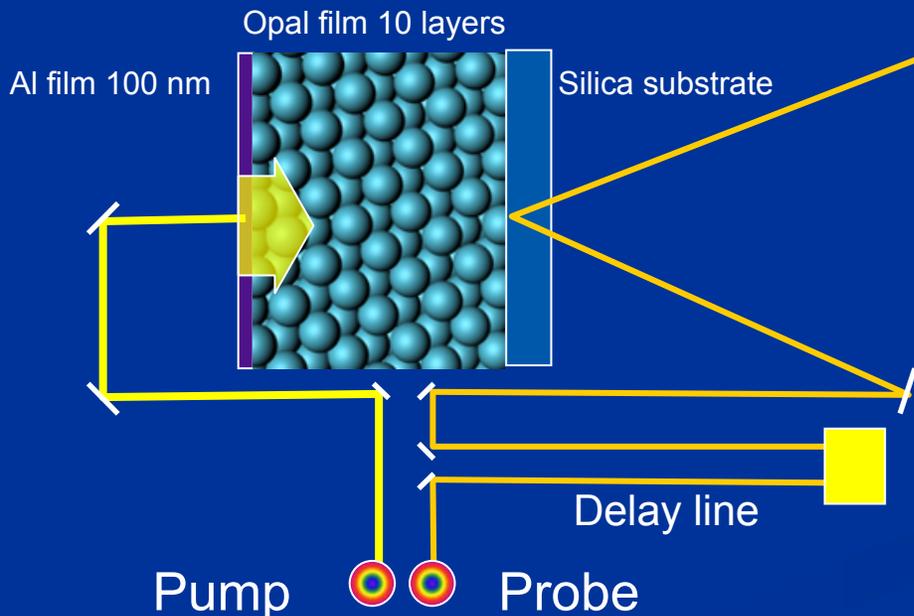


Импульс Тi-сапфирового лазера индуцирует нагрев металлической пленки. Пленка быстро расширяется вследствие термоупругого эффекта и **пикосекундный импульс деформации** (упругий волновой пакет) инжектируется в опаловую пленку.

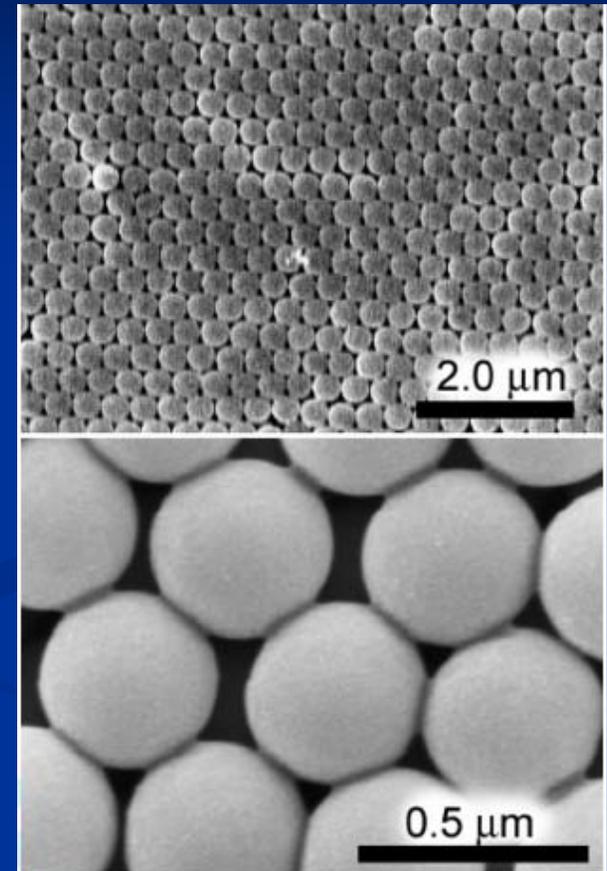
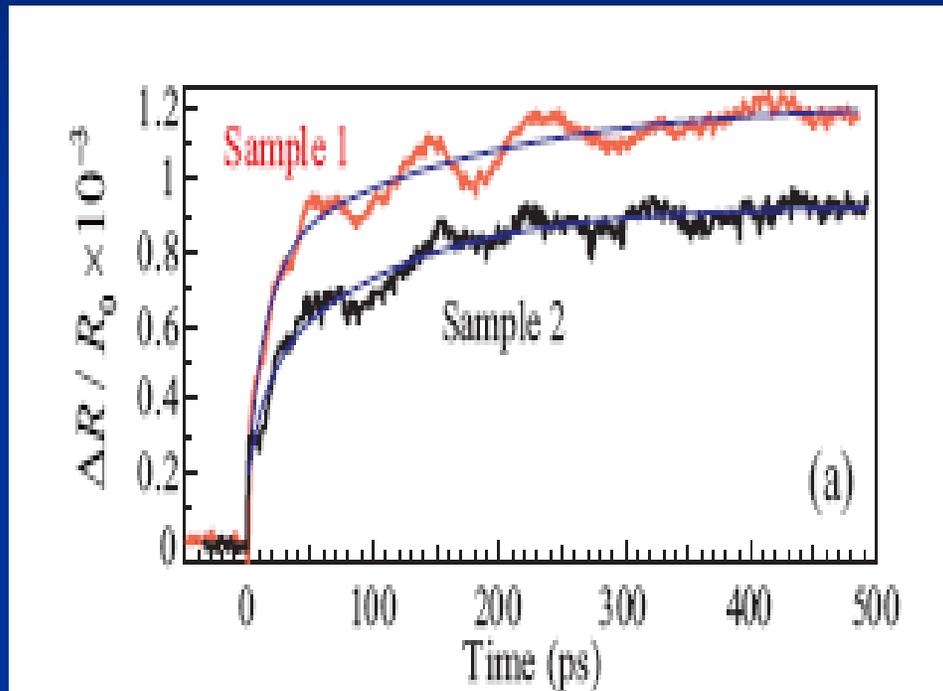
Возникают **когерентные** (за счет упругой связи) **колебания опаловых сфер**

--- модуляция периода фотонного кристалла

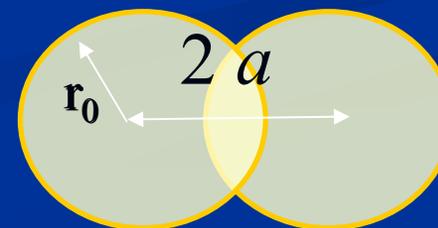
--- модуляция спектра брэгговского отражения



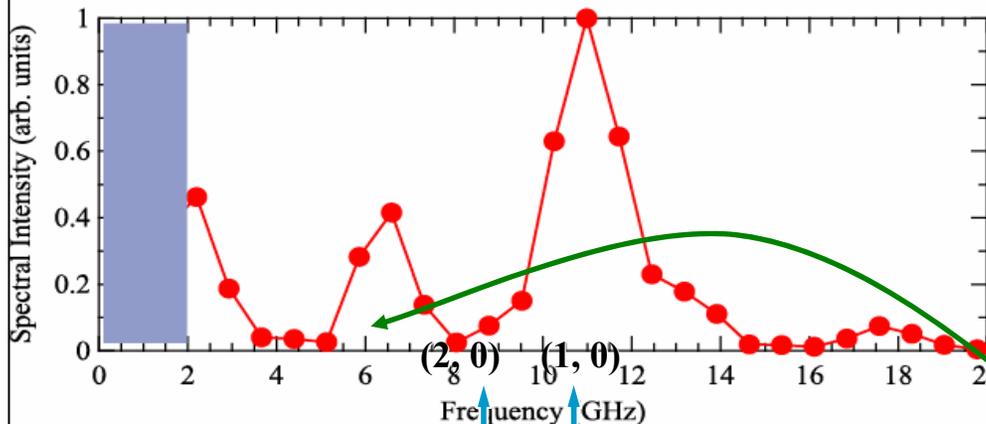
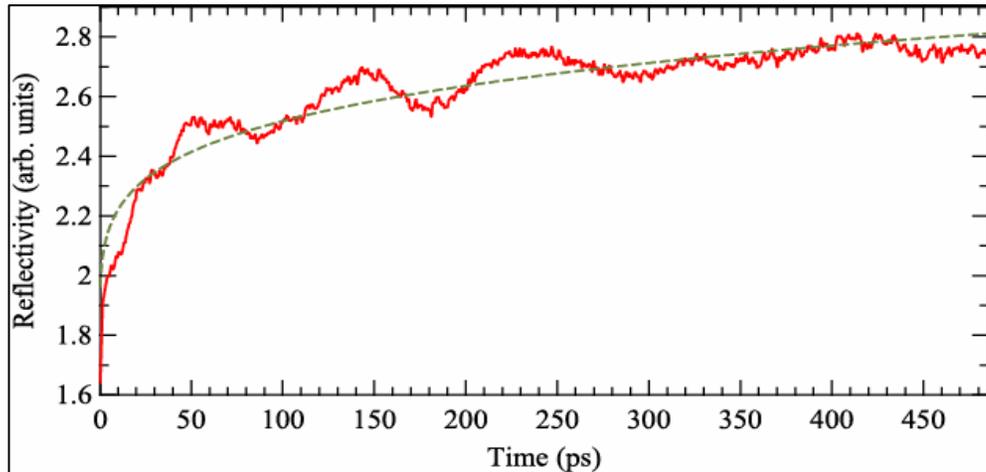
Гиперзвуковая модуляция света опаловыми фотонно-фононными кристаллами



Неоднородность спекания шаров нарушает когерентность фононов и тем самым ограничивает глубину проникновения гиперзвукового пакета.



$$\chi = \frac{r_0}{a} - 1$$



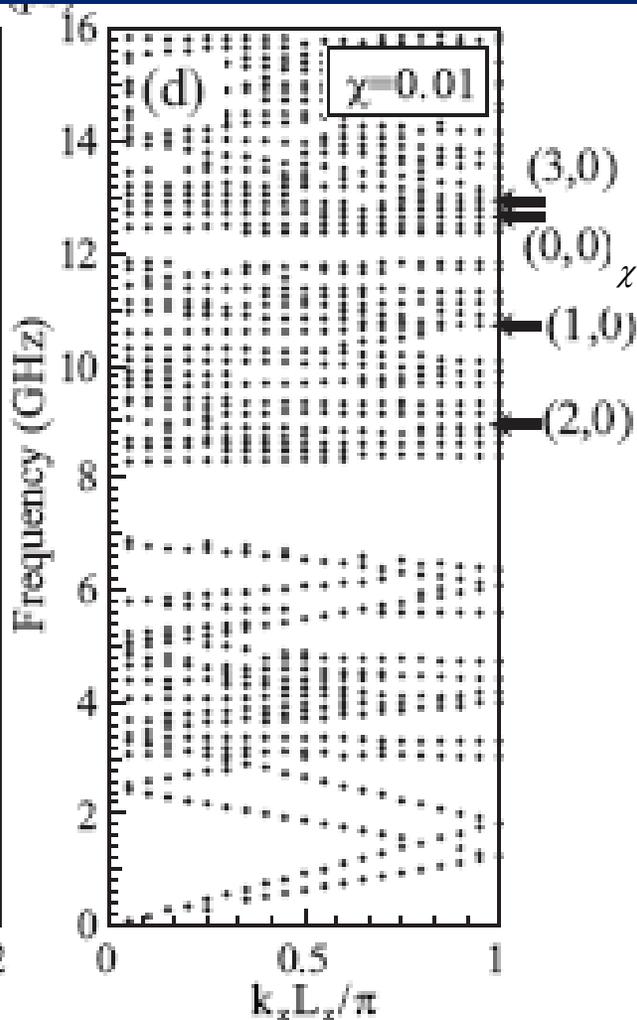
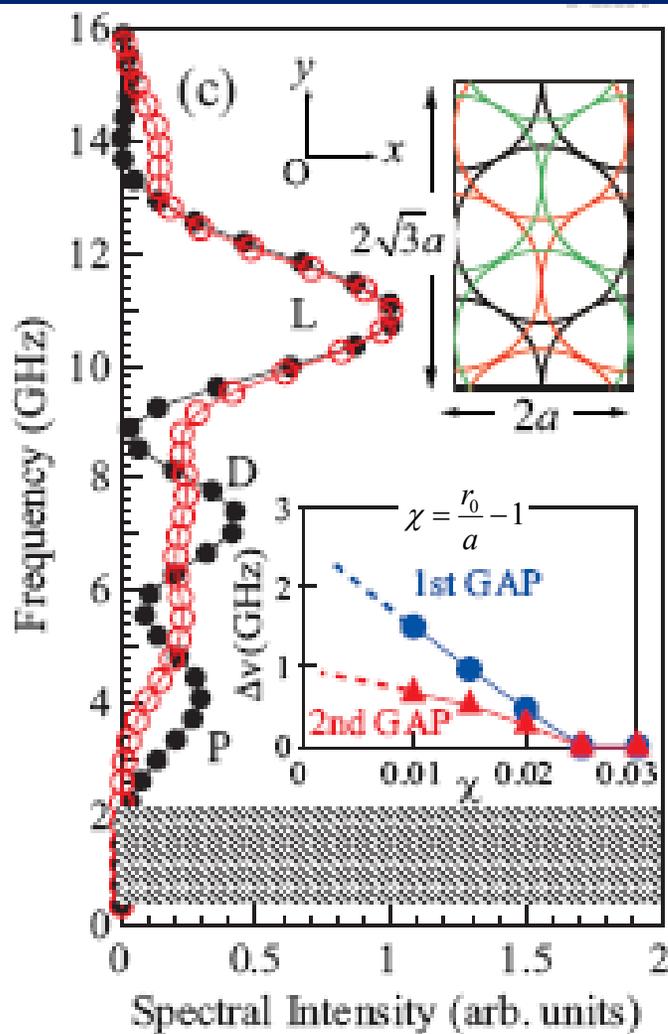
**Эволюция сигнала
отражения во времени**

**Фурье-преобразование
сигнала отражения**

***В измеренном спектре
регистрируются колебания
с частотами меньше
низшей квадрупольной
лэмбовской моды!***

Phys. Rev. Lett. (2008)

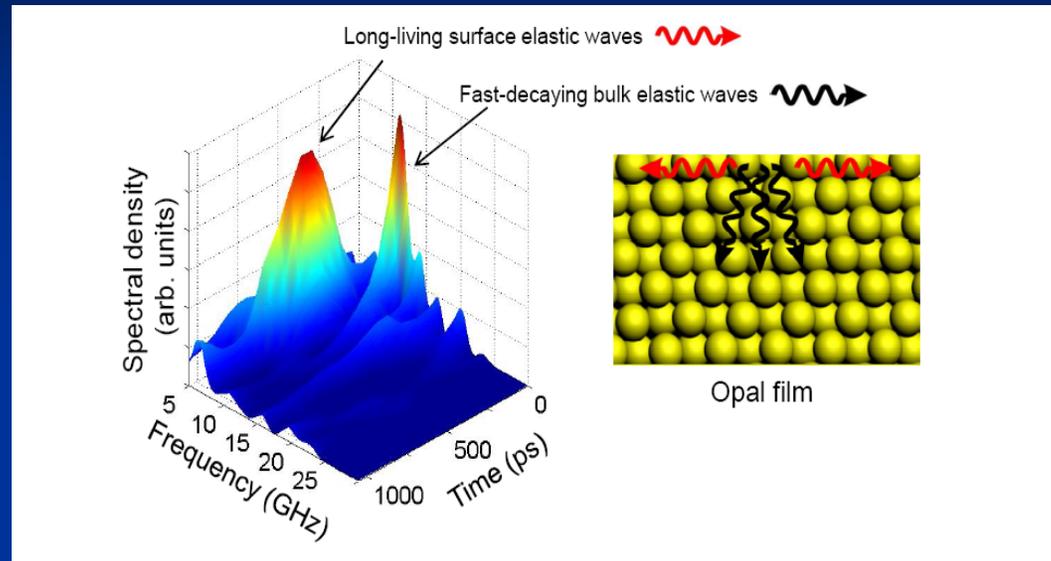
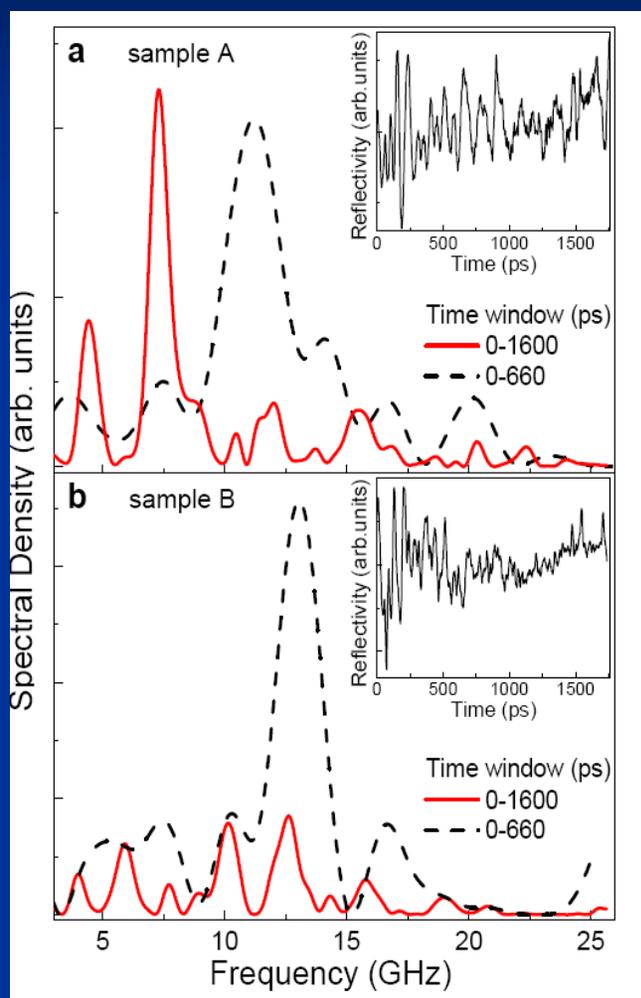
Сопоставление экспериментальных данных со спектром колебательных мод опалового фононного кристалла



Периодическое изменение акустических параметров приводит к возникновению **ПОЛНОЙ фононной запрещенной зоны**

Phys. Rev. Lett. (2008)

Фильтрация упругих волн гиперзвуковым кристаллом на основе опалов – основа создания управляемых фононных интегральных схем



Зарегистрирована долгоживущая упругая мода с частотой 7.5 ГГц. Время жизни этой генерируемой на поверхности когерентной моды (порядка 1 нс) существенно превышает время затухания (порядка 100 пс) мод с частотами более 10 ГГц. Сопоставление с теорией позволило сделать вывод, что долгоживущая мода связана с локализованными на поверхности колебаниями с частотой в области полной фононной зоны.

Фотонно-фононные кристаллы на основе синтетических опалов

- Полная фотонная и фононная зоны
- Акусто-оптические приборы в ГГц –ТГц диапазоне
- Термоизоляторы (управление тепловым транспортом, увеличение эффективности термоэлектрических преобразователей)
- Управление в *полупроводниковых фотонно-фононных кристаллах* каналами релаксации электронов, обусловленной электрон-фононным взаимодействием (новое поколение эффективных излучательных полупроводниковых наноструктур !!!)

Заключение

- Представлены результаты по методам получения, а также исследованию структурных и оптических свойств трехмерных фотонных кристаллов на основе синтетических опалов
- Основное внимание уделено излучающим и управляемым фотонным кристаллам, в которых поры опаловой матрицы были заполнены Er, GaN, фосфорами, Si, VO_2
- Продемонстрированы результаты по управлению световыми потоками, включая эксперименты по сверхбыстрой фемтосекундной перестройке отражательных свойств нанокompозитов опал-полупроводник (Si, VO_2)
- Показано, что опалы обладают свойствами трехмерных фотонно-фононных кристаллов. Это открывает пути применения синтетических опалов в новом поколении акустооптических, термоэлектрических и светоизлучающих устройств

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !!!