



# НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

## ЛЕКЦИЯ 2

**Фотоника: обзор достижений и перспектив**

## Определение

Фотоника – область науки и техники, связанная с использованием светового излучения (потока фотонов) в системах, обеспечивающих генерацию, усиление, модуляцию и детектирование оптических сигналов

Первоначально термин «фотоника» являлся эквивалентом термина «электроника» для систем, использующих для передачи информации оптическое излучение. В настоящее время это понятие включает в себя не только системы передачи информации при помощи оптического излучения, но также связанные с ними системы генерации, преобразования, детектирования оптических сигналов, а также системы хранения информации.



**Википедия**  
Свободная энциклопедия

## Другие определения

**фотоника** — это наука о генерации, управлении и обнаружении фотонов, особенно в видимом и ближнем инфракрасном спектре, а также о их распространении на ультрафиолетовой (длина волны 10...380 нм), длинноволновой инфракрасной (длина волны 15...150 мкм) и сверхинфракрасной части спектра (например, 2...4 ТГц соответствует длине волны 75...150 мкм), где сегодня активно развиваются квантовые каскадные лазеры.

**фотоника** также может быть охарактеризована как область физики и технологии, связанная с излучением, детектированием, поведением, последствиями существования и уничтожения фотонов. Это означает, что фотоника занимается контролем и преобразованием оптических сигналов и имеет широкое поле для своего применения: от передачи информации через оптические волокна до создания новых сенсоров, которые модулируют световые сигналы в соответствии с малейшими изменениями окружающей среды.

Термин «фотоника» в области современной оптики наиболее часто обозначает возможность создания фотонных технологий обработки сигналов, то же самое, что «электроника»

Некоторые источники отмечают, что термин «оптика» постепенно заменяется новым обобщённым названием — «фотоника».



## Основные направления исследований в области фотоники

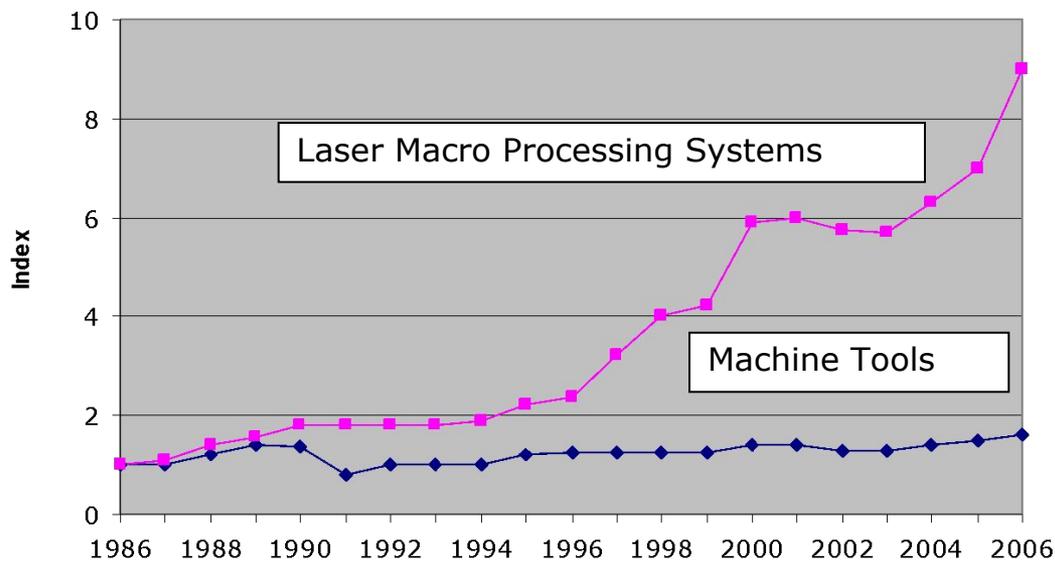
- Разработка оптических, электрооптических и оптоэлектронных устройств и исследование возможности их применения.
- Разработка устройств волоконной и интегральной оптики, в том числе – полупроводниковых лазеров, электронных СВЧ-устройств, электрооптических модуляторов, фильтров, фазовращателей и проч.
- Фундаментальные исследования процессов, сопровождающих распространение электромагнитного излучения в веществе и взаимодействие электромагнитного излучения с веществом: генерация гармоник, условия поглощения, отражения и рассеяния света различными средами, разные виды люминесценции и др.
- Разработка устройств высокоскоростной передачи информации

## Фотоника как отрасль индустрии

**Мировой рынок фотоники – около 300 млрд евро (прогнозируемый рост на 6,5% ежегодно)**

**Европейский рынок фотоники – более 60 млрд евро (прогнозируемый рост – на 8% ежегодно)**

**Европейская фотоника в 2008г. – это 2517 компаний и 748 исследовательских организаций. Общее число занятых – 300 тыс. чел., в 2005-2008г.г. фотоника создала в Европе 40 тыс. новых рабочих мест.**



Data: Optech Consulting, VDW

## Разделы фотоники



## Лазерные технологии – основа фотоники

**Принципиальная особенность лазерного луча** – когерентность, следствием которой являются малая угловая расходимость и высокая монохроматичность.

Отсюда: возможность концентрации энергии лазерного излучения

- в пространстве
- во времени
- в спектральном диапазоне

Энергия лазерного излучения «хорошо управляема».

## Лазерные информационные технологии

- ❑ запись и хранение информации (оптические диски)
- ❑ воспроизведение аудио- и видеозаписей (лазерные проигрыватели)
- ❑ отображение информации (дисплеи, лазерное телевидение)
- ❑ передача информации по световолокну, связь
- ❑ передача информации по открытому лучу в атмосфере и в космосе
- ❑ обработка информации, квантовые компьютеры
- ❑ квантовая криптография

# Технологические платформы для развития и модернизации отечественной науки и технологий



Направления	Количество технологических платформ
1. Медицинские и биотехнологии	3
2. Информационно-коммуникационные технологии	2
3. Фотоника	2
4. Авиакосмические технологии	3
5. Ядерные и радиационные технологии	3
6. Энергетика	4
7. Технологии транспорта	2
8. Технологии металлургии и новые материалы	2
9. Добыча природных ресурсов и нефтегазопереработка	3
10. Электроника и технологии машиностроения	3
11. Экологическое развитие	1



## Технологические платформы по направлению «Фотоника»

1. Инновационные лазерные, оптические и оптоэлектронные технологии – фотоника.
2. Развитие российских светодиодных технологий



«...Полупроводники – это почти весь окружающий нас неорганический мир»

А.Ф. Иоффе

## ПОЛУПРОВОДНИКИ

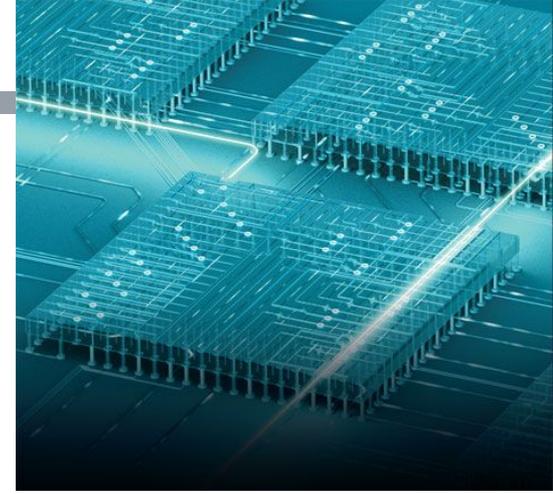
СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ

ФЕРРОМАГНЕТИКИ

- Тонкие пленки (1 – 100 нм)
- Нанослои и многослойные наноструктуры
- Квантовые точки
- Нано – трубки, стержни, нити и т.д.
- Нанодомены
- Фотонные кристаллы
- Неупорядоченные и квазиупорядоченные наноструктуры

МУЛЬТИФЕРРОИКИ

ОРГАНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ



## *Чувствительность*

- к малым объемам( surface-sensitive)
- к химическим элементам в малых количествах
- к функциональным свойствам

## *Разрешение*

- пространственное(X-Y, Z)
- спектральное(энергетическое)
- временное

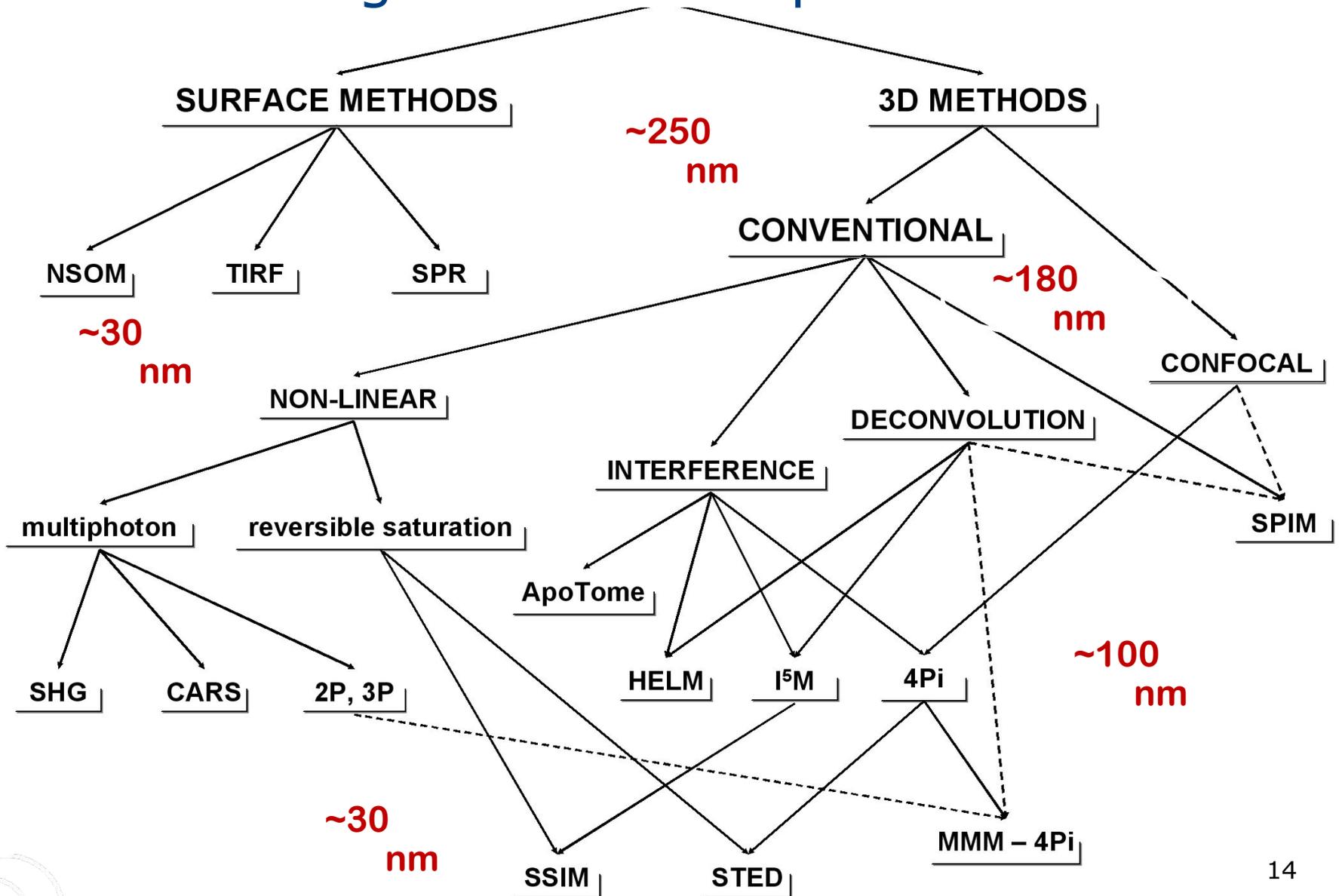
## *Недеструктивность*

## *Интерпретация*

## Оптические и нелинейно-оптические методики

- Оптическая микроскопия
- Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия (SNOM)
- Оптическая спектроскопия
- Генерация второй оптической гармоники
- Фотолюминесценция

# Practice: High-resolution optical methods



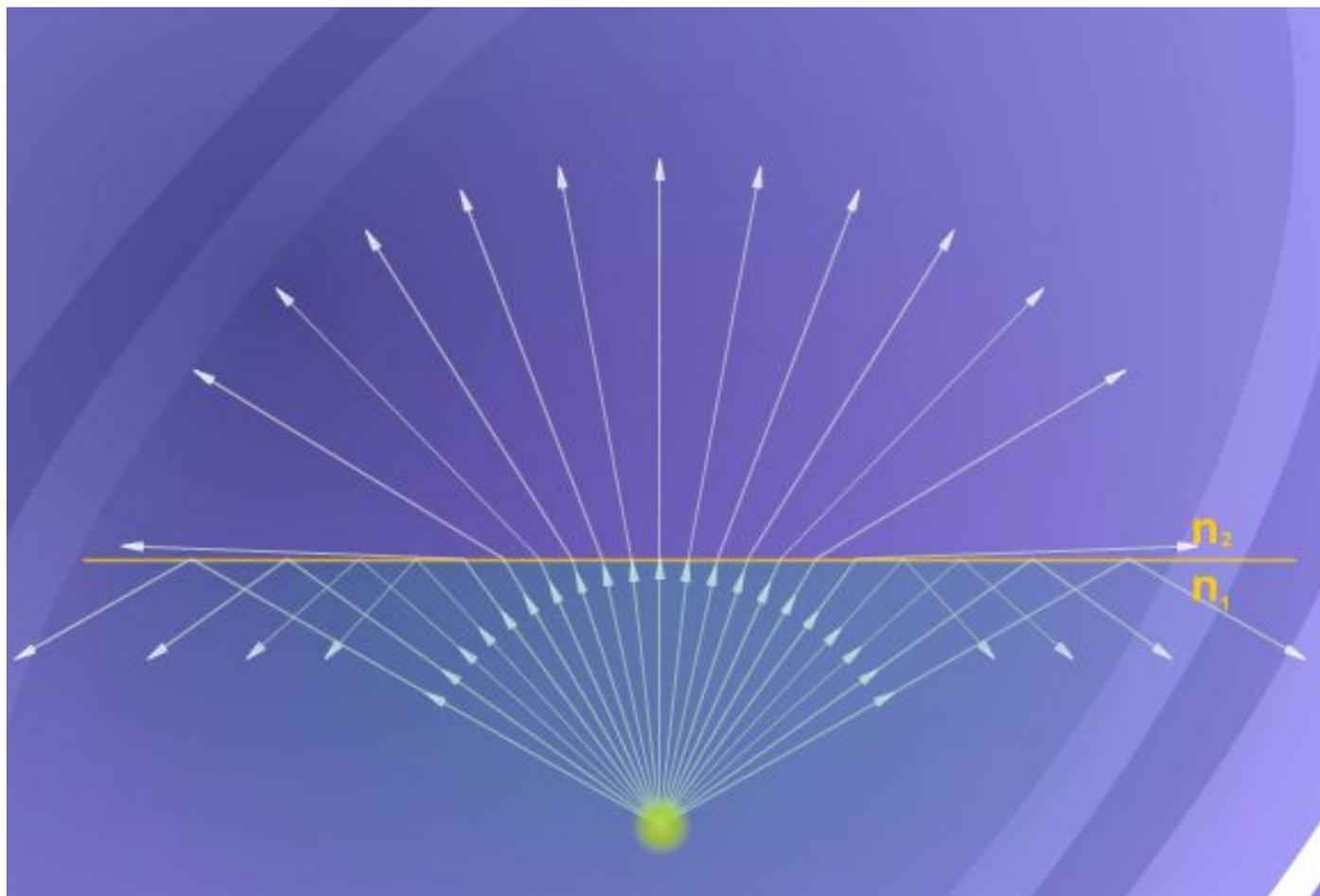
# Фундаментальные положения оптики, используемые в устройствах фотоники

**Дисперсия света – зависимость показателя преломления от частоты света**



Разложение в спектр белого света при 15  
помощи линзы Ньютона

## Полное внутреннее отражение



Для разных частот – разные направления полного отражения<sup>16</sup>

# Фотонные кристаллы

Фотонные кристаллы - среды, у которых диэлектрическая проницаемость периодически меняется в пространстве с периодом, допускающим брэгговскую дифракцию света.

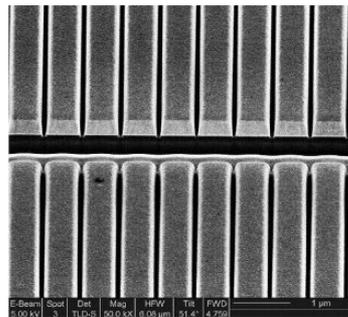
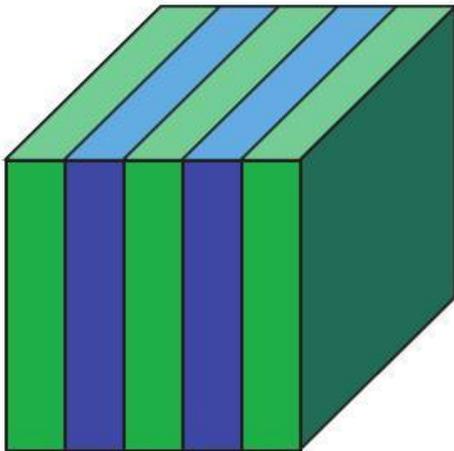
Фотонные кристаллы, благодаря периодическому изменению коэффициента преломления, позволяют получить разрешённые и запрещённые зоны для энергий фотонов, аналогично полупроводниковым материалам, в которых наблюдаются разрешённые и запрещённые зоны для энергий носителей заряда.

Понятие разрешенных и запрещенных энергетических зон - один из столпов твердотельной электроники. В оптике твердого тела схожее понятие появилось лишь в 1987 году, когда Эли Яблонович (Eli Yablonovitch), сотрудник Bell Communications Research (ныне профессор Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе), ввел понятие запрещенной зоны для электромагнитных волн (**electromagnetic band gap**)

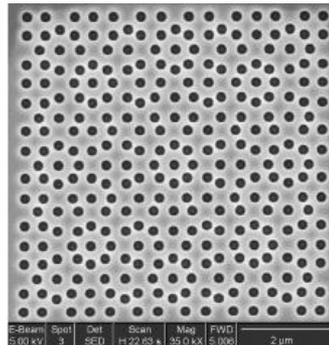
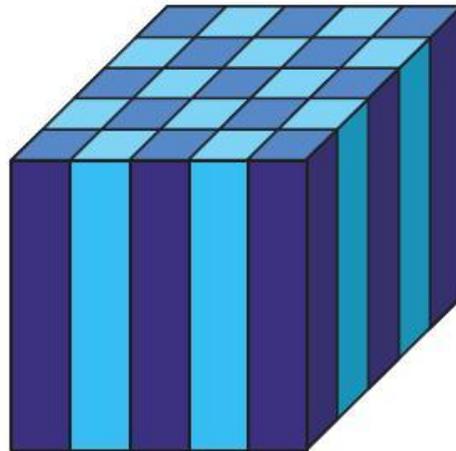
# Фотонные кристаллы

С общей точки зрения фотонный кристалл является **сверхрешеткой** (crystal superlattice) - средой, в которой искусственно создано дополнительное поле с периодом, на порядки превышающим период основной решетки. Для фотонов такое поле получают периодическим изменением коэффициента преломления среды - в одном, двух или трех измерениях (1D-, 2D-, 3D-фотонные структуры соответственно). Если период оптической сверхрешетки сравним с длиной электромагнитной волны, то поведение фотонов кардинально отличается от их поведения в решетке обычного кристалла, узлы которого находятся друг от друга на расстоянии, много меньшем длины волны света.

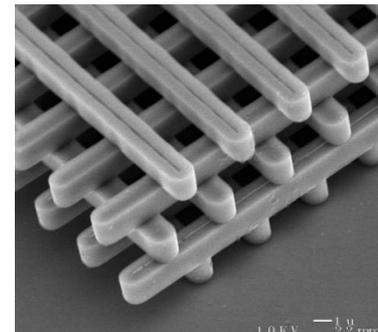
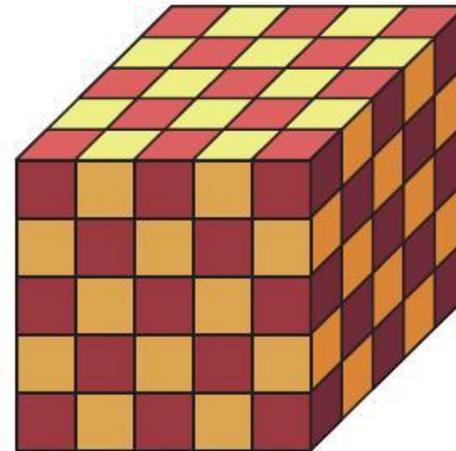
1-D



2-D



3-D



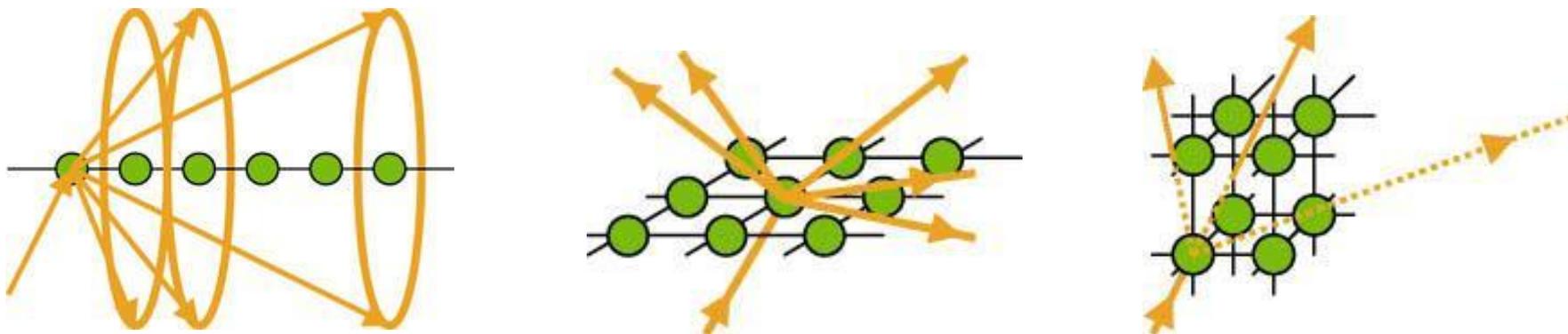
Принцип действия фотонного кристалла

*Используемые понятия и явления:*

- Интерференция
- Дисперсия света
- Полное внутреннее отражение

# Фотонные кристаллы

Фотонные кристаллы по аналогии с 1D дифракционными решетками называют иногда **трехмерными дифракционными решетками**. Распространение излучения в таких решетках определяется **условием максимума интерференции света, рассеянного на узлах**, и зависит от угла между направлением волнового вектора и осями дифракционной решетки - фотонного кристалла



При рассеянии фотонов на 1D- и 2D-структурах всегда находятся такие **направления распространения дифрагировавших лучей, для которых выполнено условие максимума интерференции**. Для одномерного кристалла - нити (а), такие направления образуют конические поверхности, а в двумерном случае (б) - совокупность отдельных, изолированных друг от друга лучей

Трехмерный случай (в) принципиально отличается от одномерного и двумерного тем, что **условие максимума интерференции для данной длины волны света может оказаться невыполнимым ни для одного из направлений в пространстве**. Распространение фотонов с такими длинами волн в трехмерном кристалле невозможно, а соответствующие им энергии образуют запрещенные фотонные зоны.

## Фотонные кристаллы в природе

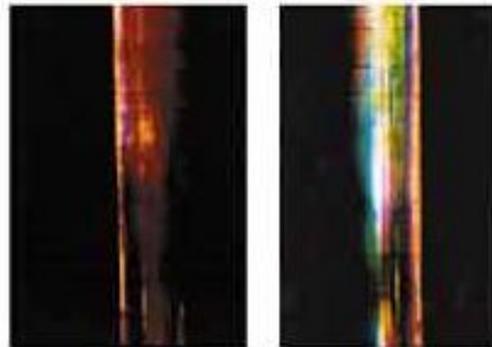
**Морской червь**  
***Genus aphrodita*** и его  
**радужные иголки**



а



б



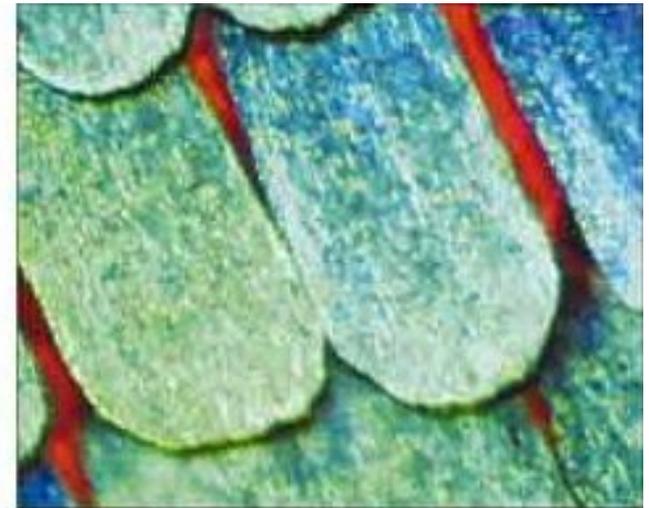
в



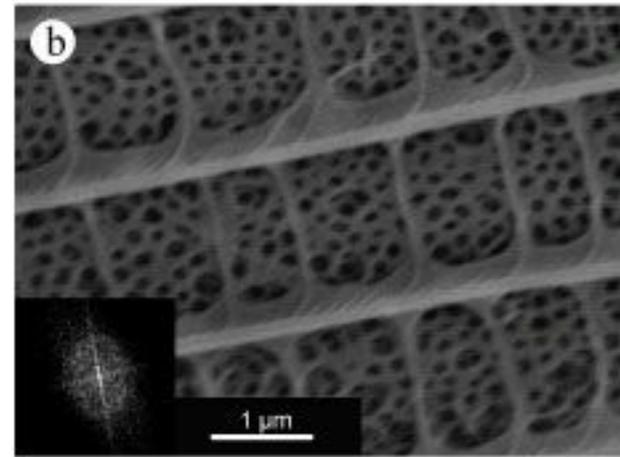
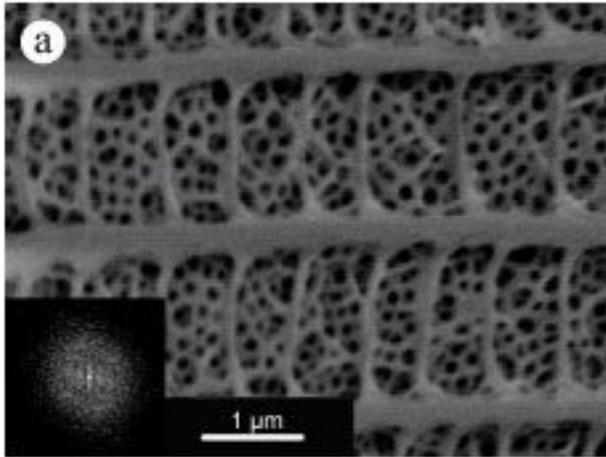
г



Фотонные  
кристаллы в  
природе

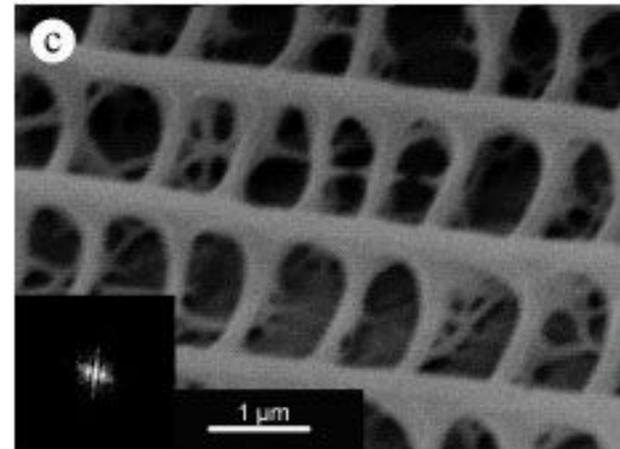


## Структура крыльев бабочки

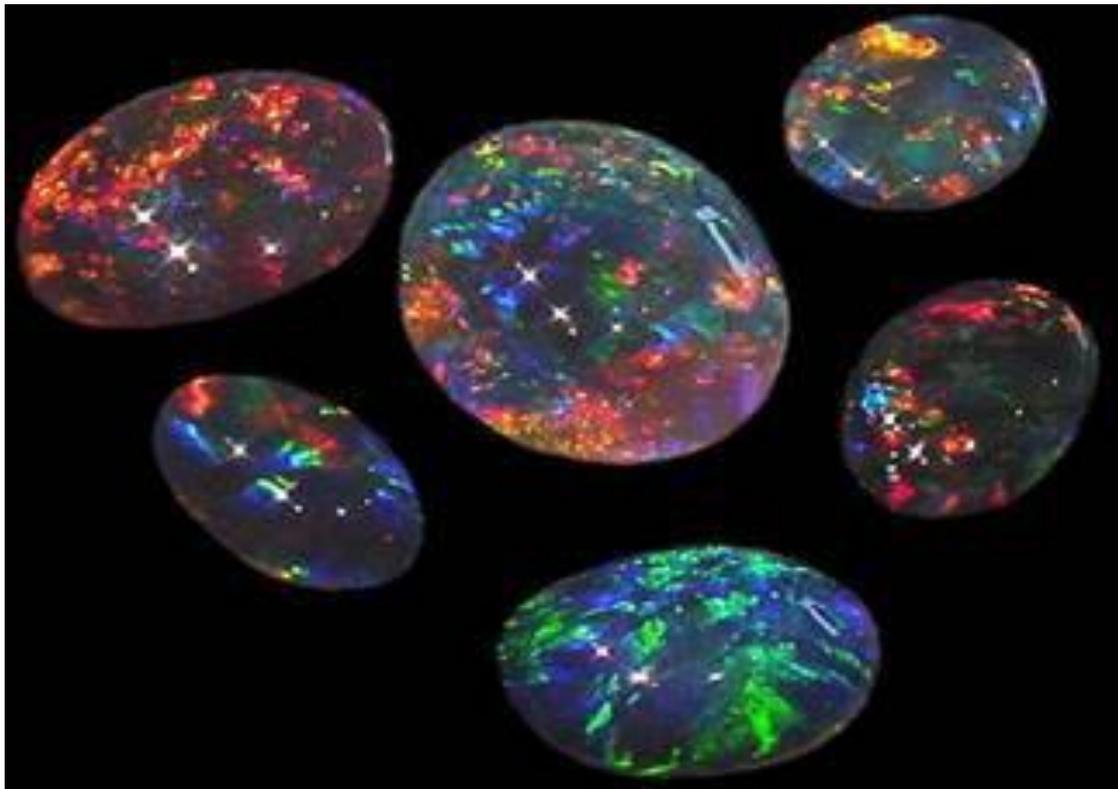


а) и б) - сине-фиолетовый цвет  
с переливами

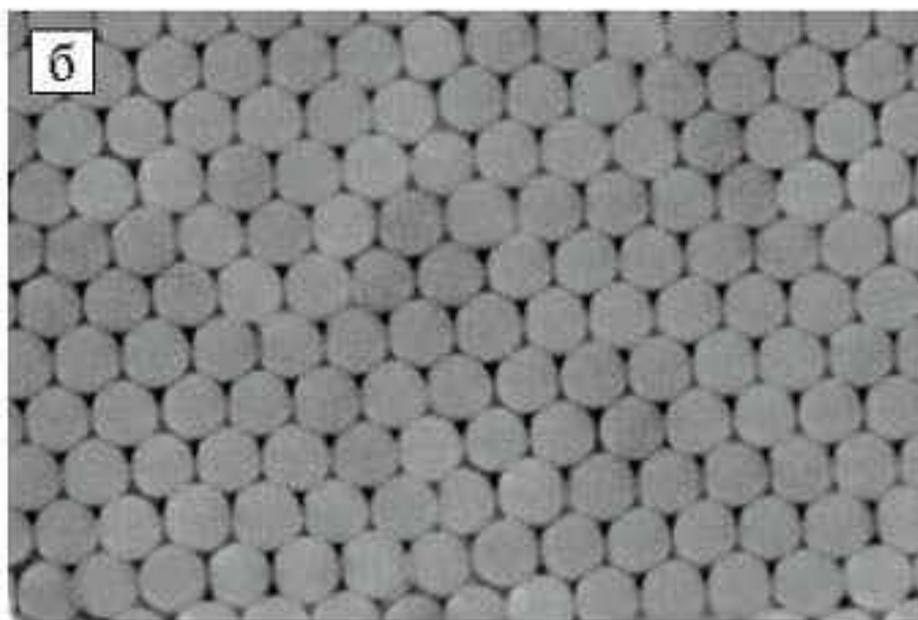
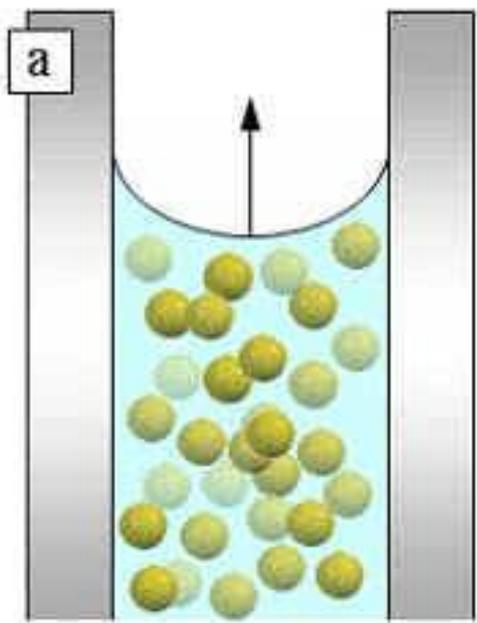
с) – коричневый цвет

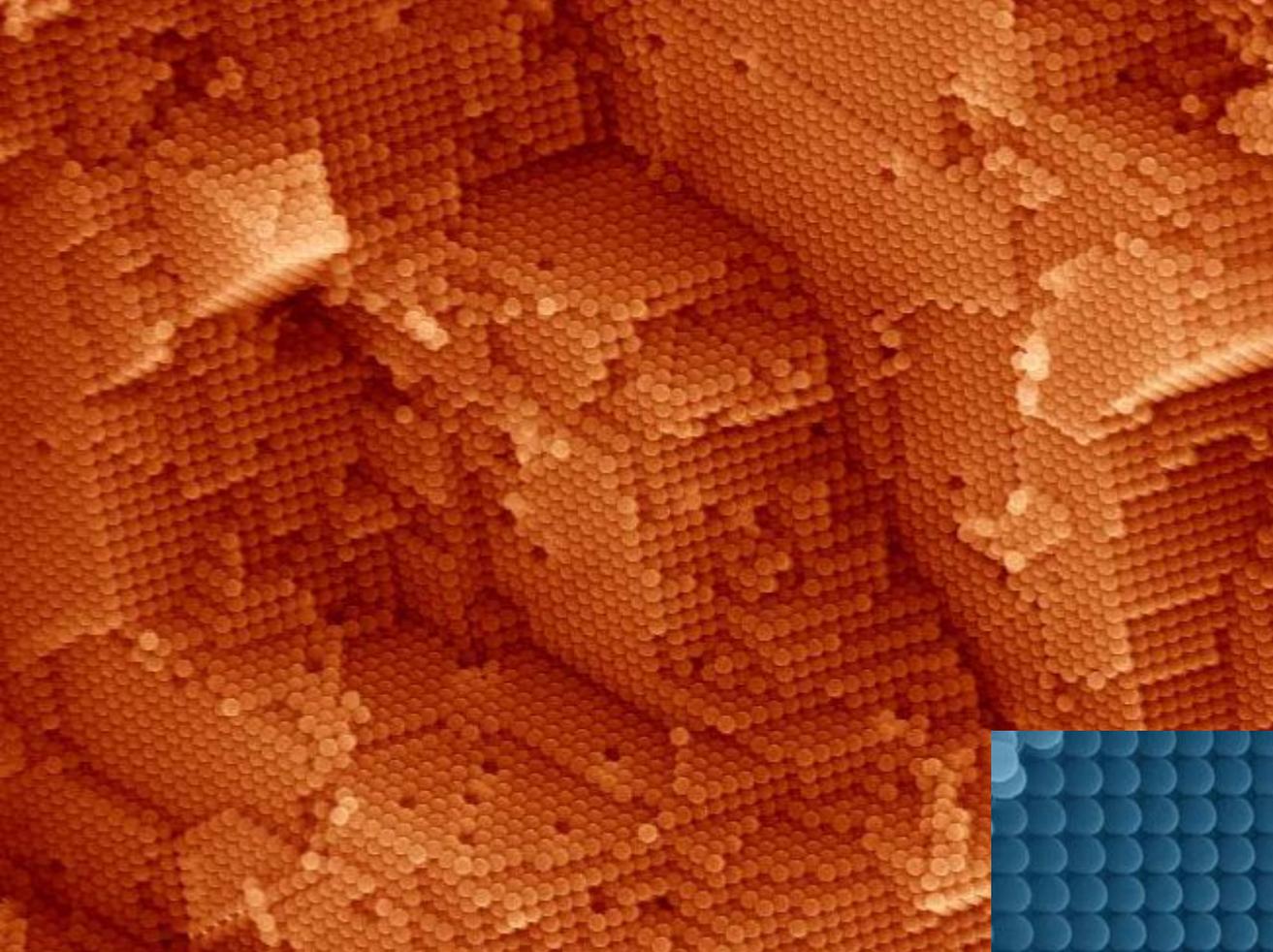


## Опалы



# Спонтанная кристаллизация коллоидного раствора $\text{SiO}_2$





## Фотонные кристаллы

26

Mag = 25.00 K X 1µm

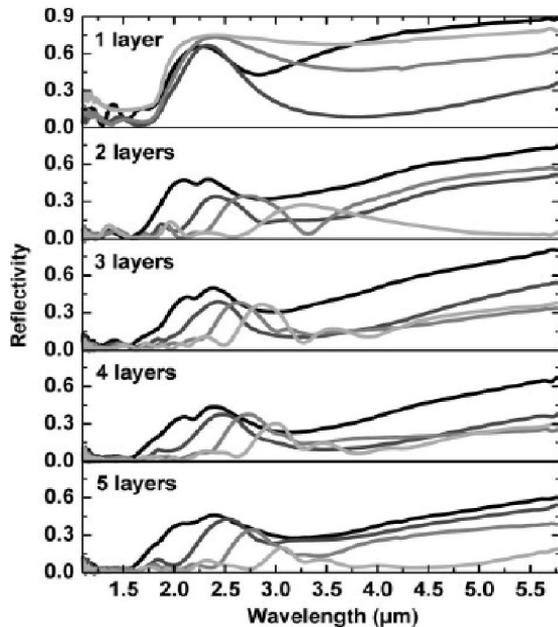
EHT = 20.00 kV  
WD = 11 mm

Signal A = SE2  
Photo No. = 1950

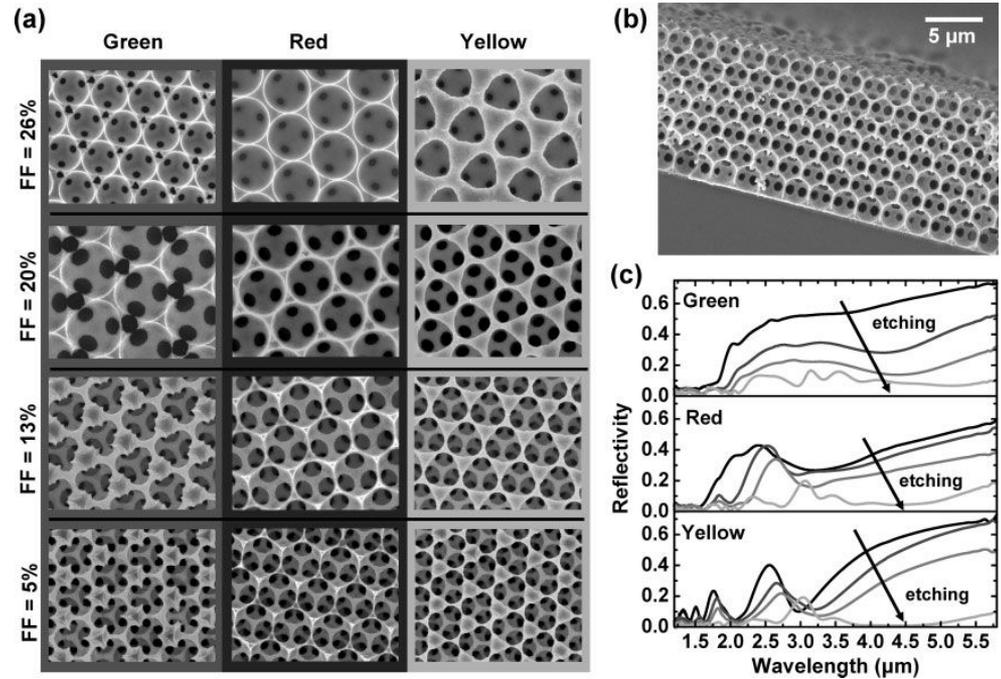
MSU HSMS  
Date :11 Nov 2005

## Ni опалы

Xindi Yu, Yun-Ju Lee, Robert Furstenberg, Jeffrey O. White, Paul V Braun в статье «Filling fraction dependent properties of inverse opal metallic photonic crystals» исследуют никелевые фотонные кристаллы с различными топографиями. Спектр отражения был измерен с помощью FTIR. Для того чтобы увеличить глубину проникновения излучения, образцы постепенно растравливались.



Спектральная зависимость отражения для разного количества слоев для опалов с «красной» топографией.



а) СЭМ изображения Ni инвертированных опалов с различной топографией и растравленностью пор; б) срез инвертированного опала; в) Эволюция спектра отражения в зависимости от растравленности 26%-20%-13%-5%

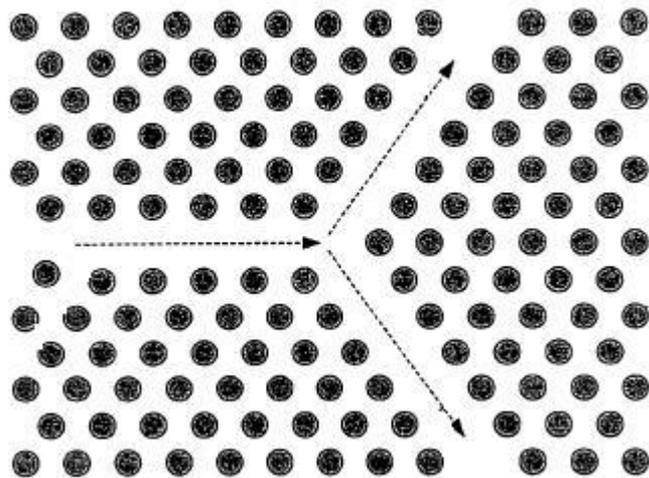


# ФОТОННОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ФОТОНИКИ И ПРИНЦИПЫ ИНТЕГРАЦИИ

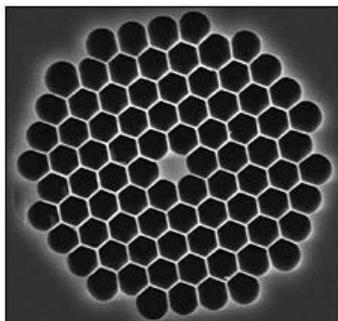


# Устройства на ФК

Оптический  
разветвитель



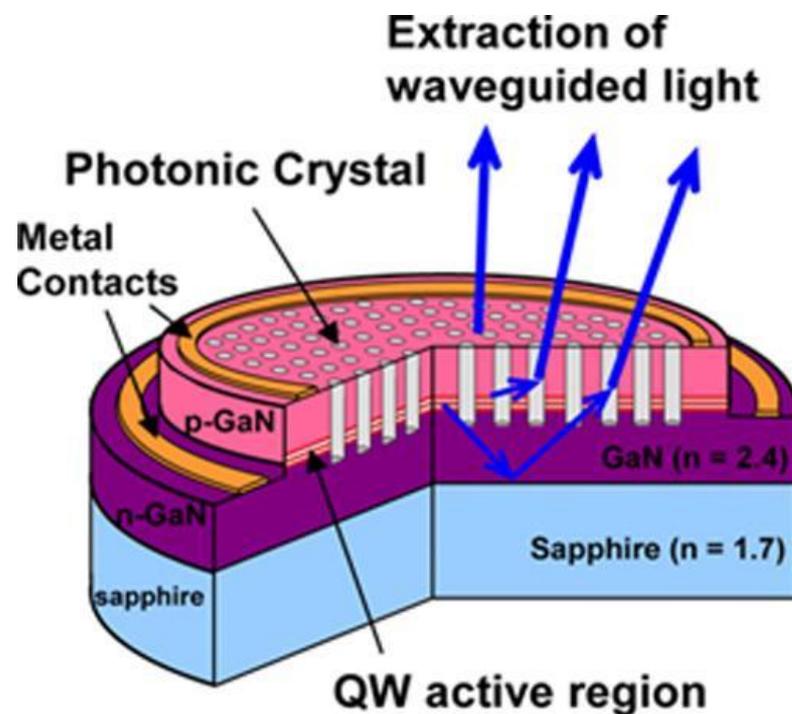
Wei Wu. US 7,315,663 B2. //  
Electronically controlled photonic crystal  
optical switch. - 2008.



Фотонно-  
кристаллический  
волновод

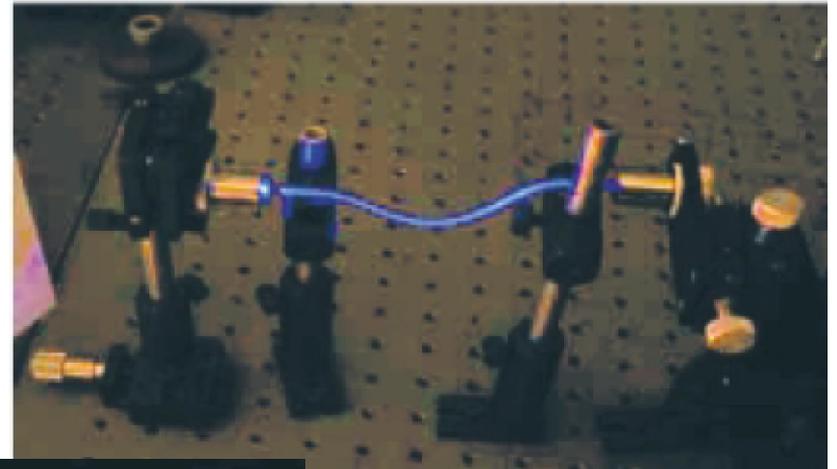
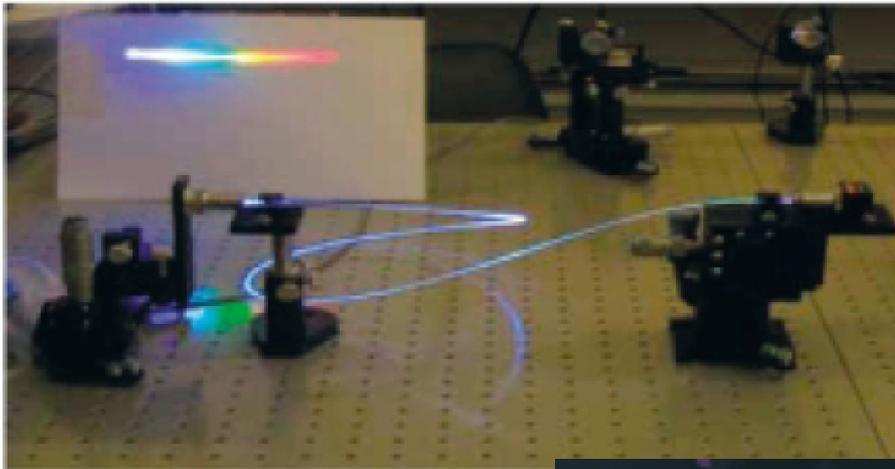
NL-1.5-670-02

Фотонно-кристаллический светодиод

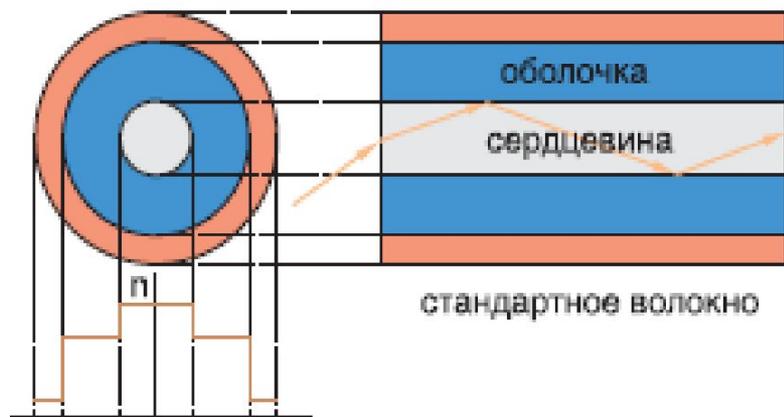


Daniel L. Barton and Arthur J. Fischer  
Semiconductor Material and  
Device Sciences, Sandia National Labs.

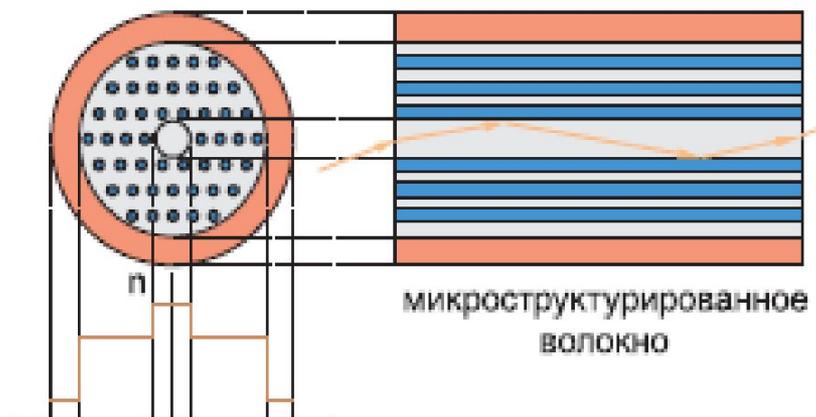
# Область применения – волоконные оптические линии связи



# Распространение света по сердцевине волокна

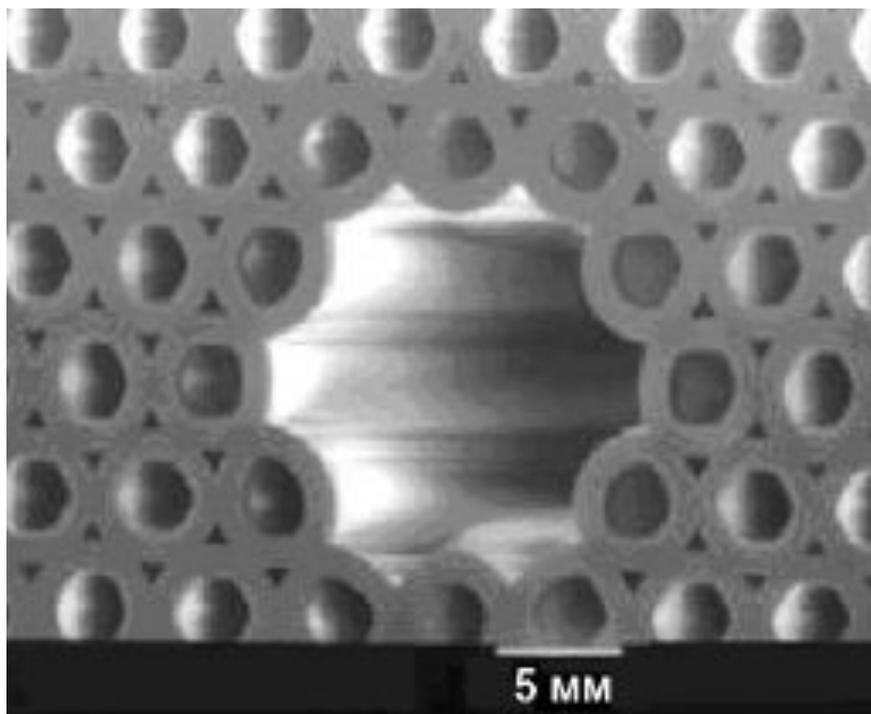


полное отражение

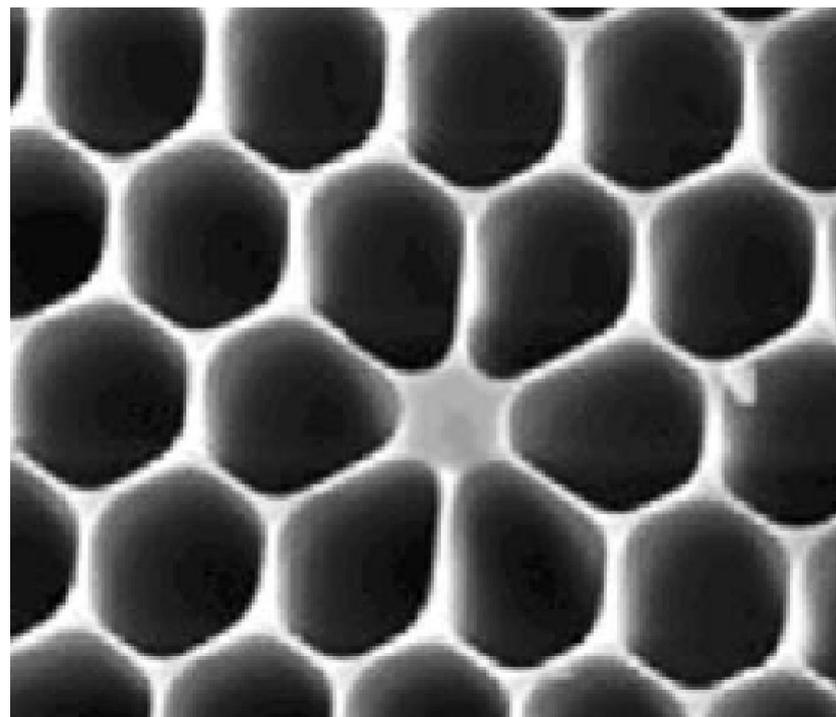


запрещенные зоны

# Виды фотонных волокон

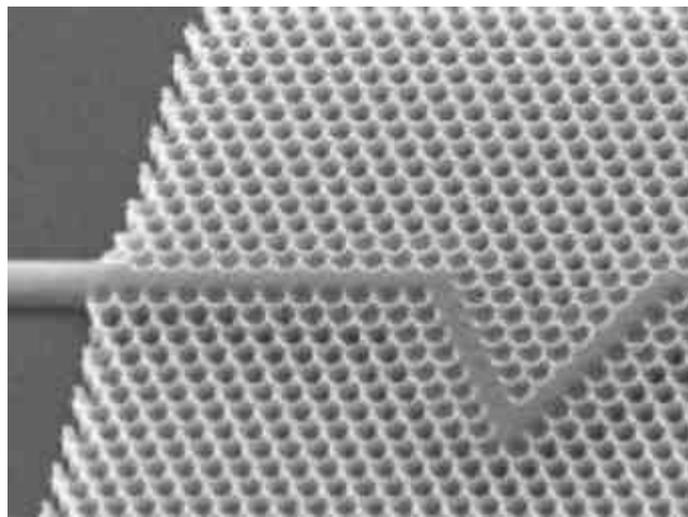
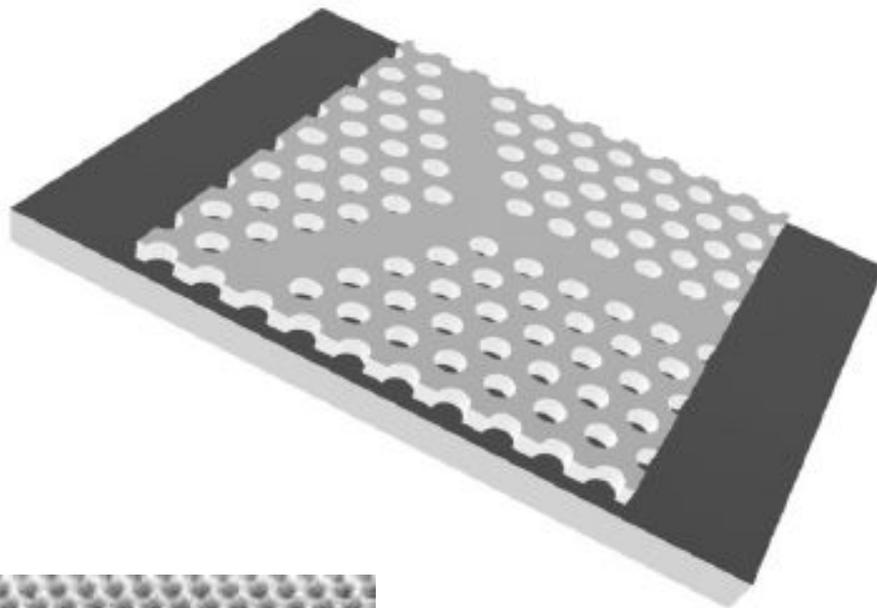
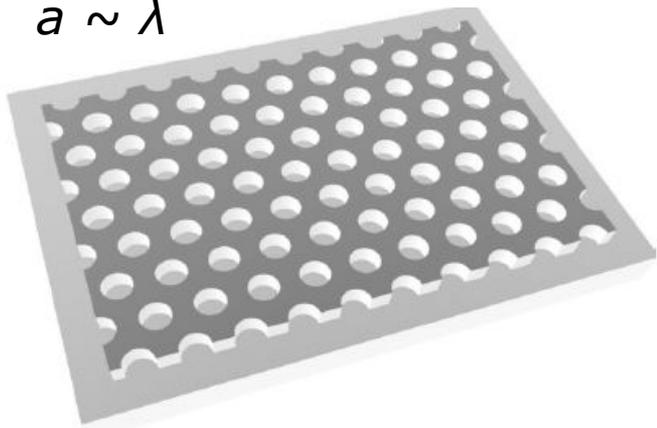


полая сердцевина



проводящая сердцевина 32

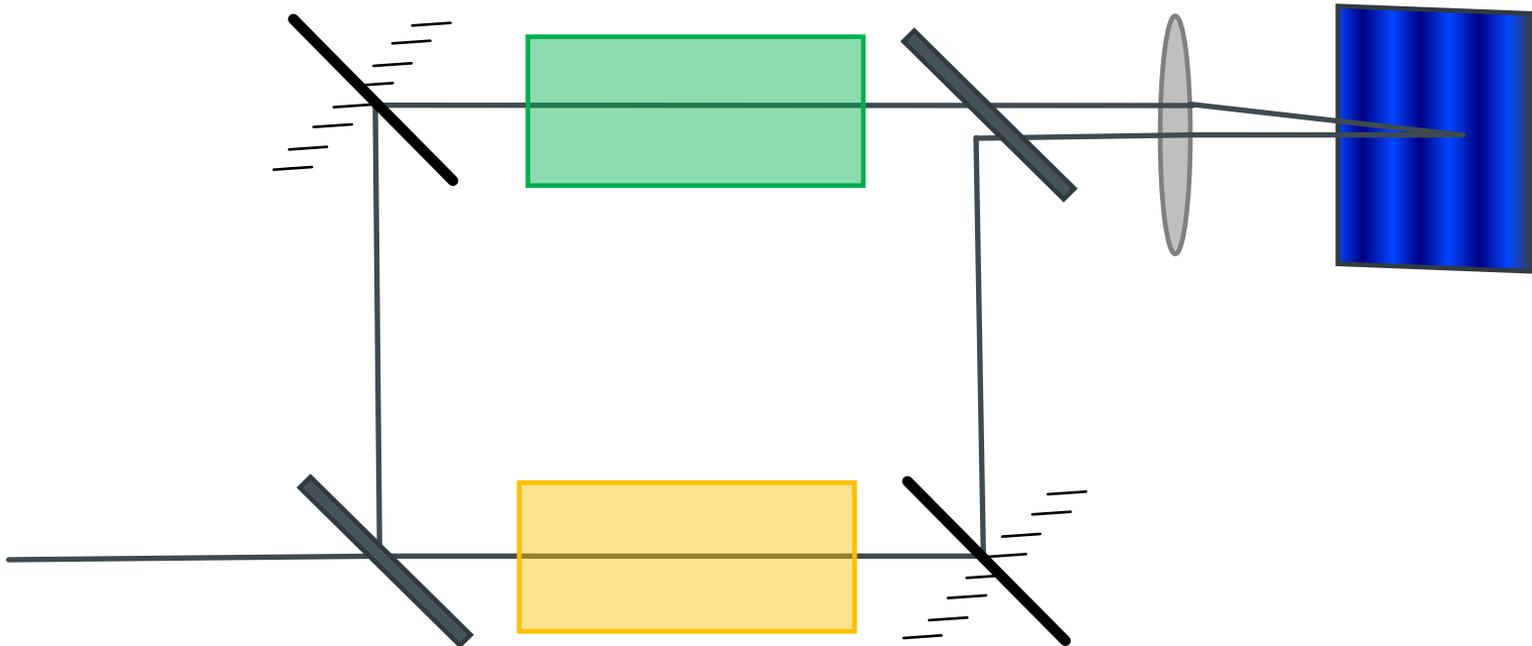
$$a \sim \lambda$$



Структура фотонного кристалла, иллюстрация с сайта SoftPedia.com

# Электро-оптические модуляторы

## Интерферометр Маха-Цандера



# High-precision optical interference in Mach-Zehnder-type photonic crystal waveguide

Yoshimasa Sugimoto\*, Hitoshi Nakamura, Yu Tanaka, Naoki Ikeda, Kiyoshi Asakawa\*

The Femtosecond Technology Research Association (FESTA), Tsukuba, 300-2635, Japan

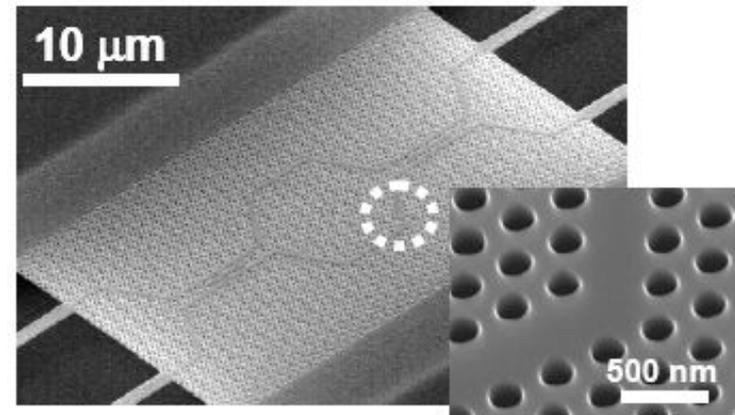
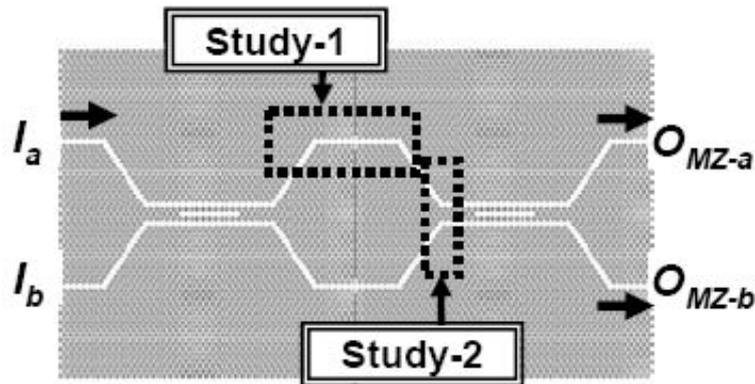
\*TARA Center, University of Tsukuba, 1-1-1, Tennodai, Tsukuba, 305-8577, Japan

[ysugi@festa.or.jp](mailto:ysugi@festa.or.jp)

Kuon Inoue

Chitose Institute of Science and Technology, Chitose 066-8655, Japan

Toyota Physical and Chemical Research Institute, Nagakute, Aichi-gun, Aichi 480-1192, Japan



**Abstract:** Excellent optical interference was experimentally demonstrated in the near infrared region using asymmetric Mach-Zehnder (MZ) type GaAs-based two-dimensional photonic crystal (2DPC) slab waveguides with directional couplers (DCs). As one of two MZ arm lengths changed in units of the lattice constant, the output intensities exhibited sinusoidal curves in excellent agreement with coupled-mode theory. In another experiment where the DCs were operated by two incident optical beams with externally controlled phase's difference, a sinusoidal change was observed also in output intensities according to the theory of the DC. These results were obtained by virtue of excellent nano-fabrication of the 2DPC structures and pave the way to successful operation of a PC-based ultra-small symmetrical MZ (SMZ) all-optical switch.

©2004 Optical Society of America

Samples used in the experiments were fabricated in epitaxial hetero-structures grown by molecular beam epitaxy. A 250-nm-thick GaAs core layer was grown on top of a 2- $\mu$ m-thick  $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$  sacrificial clad layer on a GaAs substrate. An air-bridge waveguide was fabricated using high-resolution electron-beam (EB) lithography, dry etching, and selective wet-etching techniques. Lattice constants were 360 nm and 450 nm, corresponding to air-hole diameters of 210 nm and 260 nm, respectively. A single-line defect was formed by leaving a row of perforated air-holes in the  $\Gamma$ -K direction.

1,3 – 1,55  $\mu\text{m}$

# 2D Photonic crystal thermo-optic switch based on AlGaAs/GaAs epitaxial structure

Edilson A. Camargo<sup>1,2</sup>, Harold M. H. Chong<sup>1</sup> and Richard M. De La Rue<sup>1</sup>

1. Optoelectronic Research Group, Department of Electronics and Electrical Engineering, University of Glasgow, Oakfield Avenue, Glasgow G12 8LT, Scotland

2. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Centro Técnico Aeroespacial, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos, 12228-901, São Paulo, Brazil.  
[camargo@elec.gla.ac.uk](mailto:camargo@elec.gla.ac.uk)

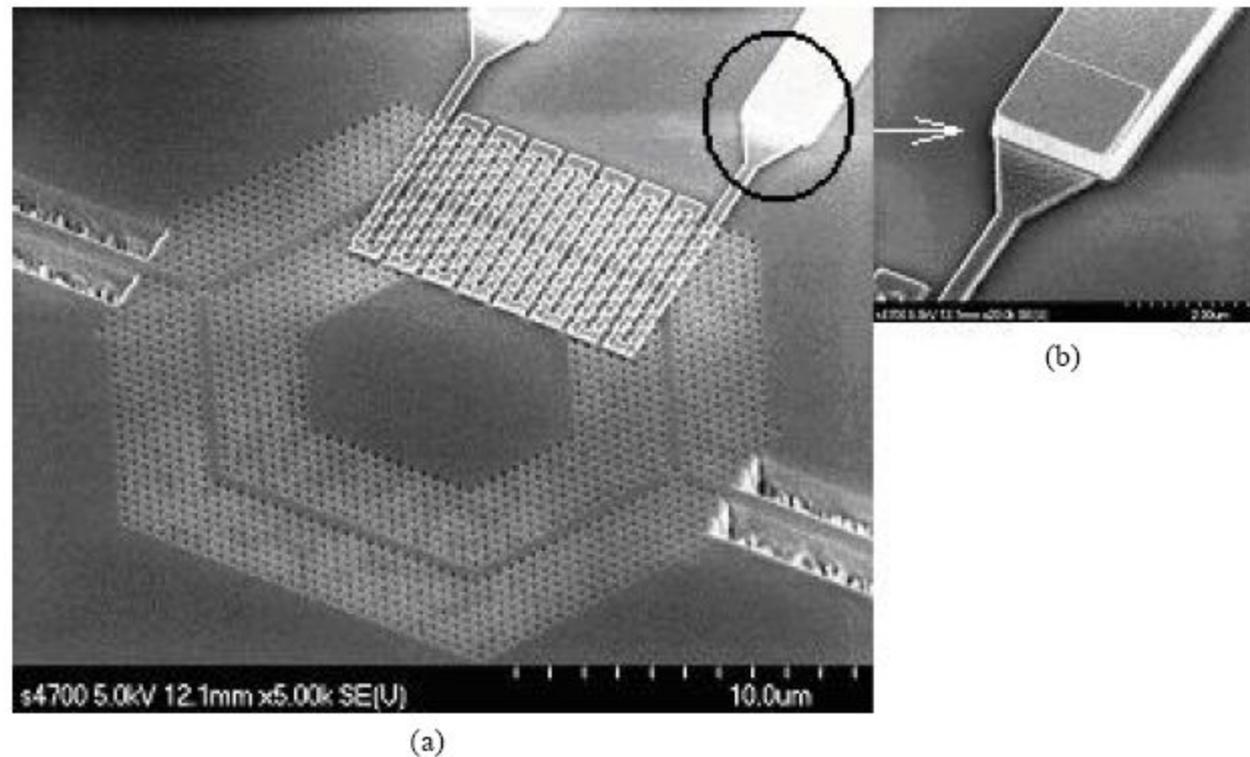


Fig. 1. (a) Scanning electron micrograph of Mach-Zehnder switch device showing the NiCr<sub>36</sub> heater on top of one arm of the structure. (b) Detail of interface between 150 nm thick NiCr heater layer and 300nm thick Au contact layer.

# Simulation of Photonic Waveguides in Ferroelectric Thin Films

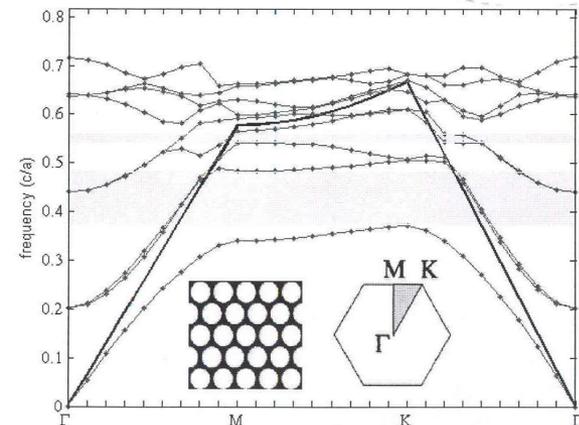
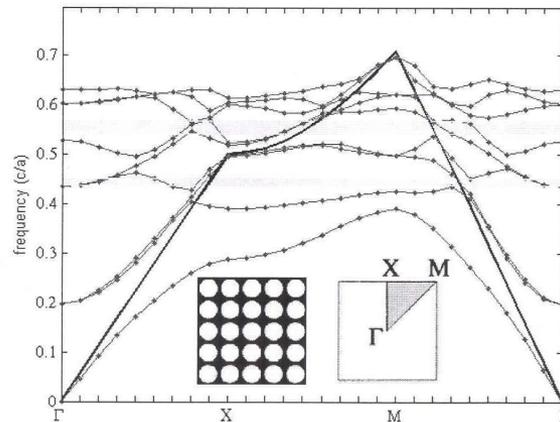
Ørnulf Nordseth<sup>1</sup>, Ralph W. Bernstein<sup>3</sup>, Jostein Grepstad<sup>1</sup>, and Thomas Tybell<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronics and Telecommunications, NTNU, 7491 Trondheim, Norway

<sup>2</sup>NTNU Nanolab, Realfagbygget, NTNU, 7491 Trondheim, Norway

<sup>3</sup>SINTEF IKT, 0371 Oslo, Norway

- PLZT slab of holes suspended in air
  - Dielectric contrast of 6:1 (PLZT:air)
  - Plot of guided even modes
    - Square and triangular hole configuration
    - **Largest band gap for the triangular lattice structure**



# Simulation of Photonic Waveguides in Ferroelectric Thin Films

Ørnulf Nordseth<sup>1</sup>, Ralph W. Bernstein<sup>3</sup>, Jostein Grepstad<sup>1</sup>, and Thomas Tybell<sup>1,2</sup>

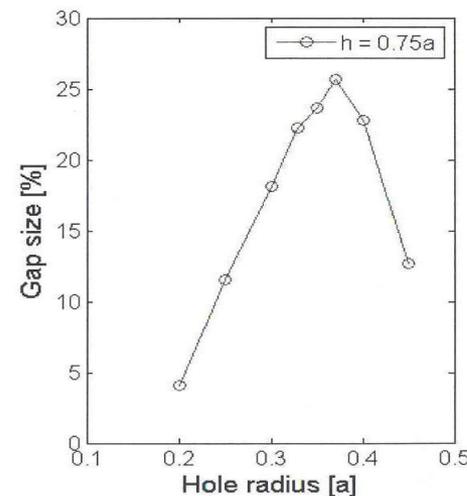
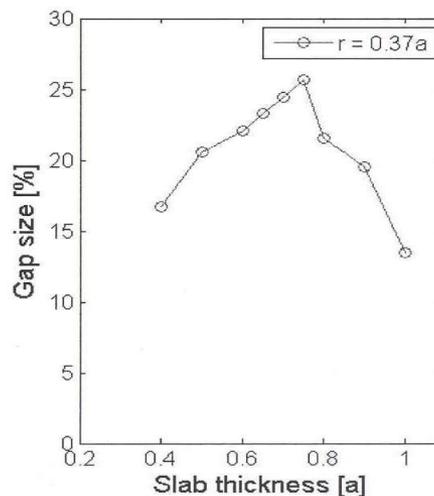
<sup>1</sup>Department of Electronics and Telecommunications, NTNU, 7491 Trondheim, Norway

<sup>2</sup>NTNU Nanolab, Realfagbygget, NTNU, 7491 Trondheim, Norway

<sup>3</sup>SINTEF IKT, 0371 Oslo, Norway

## Optimizing the PLZT slab of triangular hole structure

- Optimal thickness:  $0.75a$
- Optimal hole radius:  $0.37a$
- Band gap: 25.7 % ( $\Delta f/f_c$ )
- Mid-gap frequency :  $f_c = 0.42c/a$
- Lattice constant:  $a = 0.42\lambda$  ( $a = 650 \text{ nm}$  for  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ )



# Tunable photonic crystal circuits: concepts and designs based on single-pore infiltration

Sergei F. Mingaleev

*Institut für Theorie der Kondensierten Materie, Universität Karlsruhe, 76128 Karlsruhe, Germany, and  
Bogolyubov Institute for Theoretical Physics, 03143 Kiev, Ukraine*

Matthias Schillinger and Daniel Hermann

*Institut für Theorie der Kondensierten Materie, Universität Karlsruhe, 76128 Karlsruhe, Germany*

Kurt Busch

*Department of Physics and College of Optics and Photonics: Center for Research and Education in Optics and Lasers and Florida Photonics Center of Excellence, University of Central Florida, Orlando, Florida 32816, and  
Institut für Theorie der Kondensierten Materie, Universität Karlsruhe, 76128 Karlsruhe, Germany*

We demonstrate that the infiltration of individual pores of certain two-dimensional photonic crystals with liquid crystals and (or) polymers provides an efficient platform for the realization of integrated photonic crystal circuitry. As an illustration of this principle, we present designs for monomode photonic crystal waveguides and certain functional elements, such as waveguide bends, beam splitters, and waveguide intersections. These devices exhibit very low reflection over broad frequency ranges. In addition, we discuss the inherent tunability of these devices that originates in the tunability of the infiltrated material. © 2004 Optical Society of America

Let us consider a 2D PC consisting of a square lattice of cylindrical air pores (radius  $r = 0.475a$ ; lattice constant  $a$ ) in a silicon matrix with refractive index  $n = 3.46$  (macroporous silicon<sup>13</sup>). For  $E$ -polarized light this structure exhibits two complete PBGs with the larger, fundamental bandgap, extending from  $a/\lambda = 0.238$  to  $a/\lambda = 0.291$  (20% of the midgap frequency). Infilling a material with refractive index  $n_{\text{def}} = 1.55$  into a single pore gives rise to a non-degenerate monopolelike cavity mode as depicted in Fig. 1. In Fig. 2(a) we display the dispersion relation for the propagating guided modes of a straight PC waveguide created by infilling a material with refractive index  $n_{\text{def}} = 1.55$  into a single row of pores.

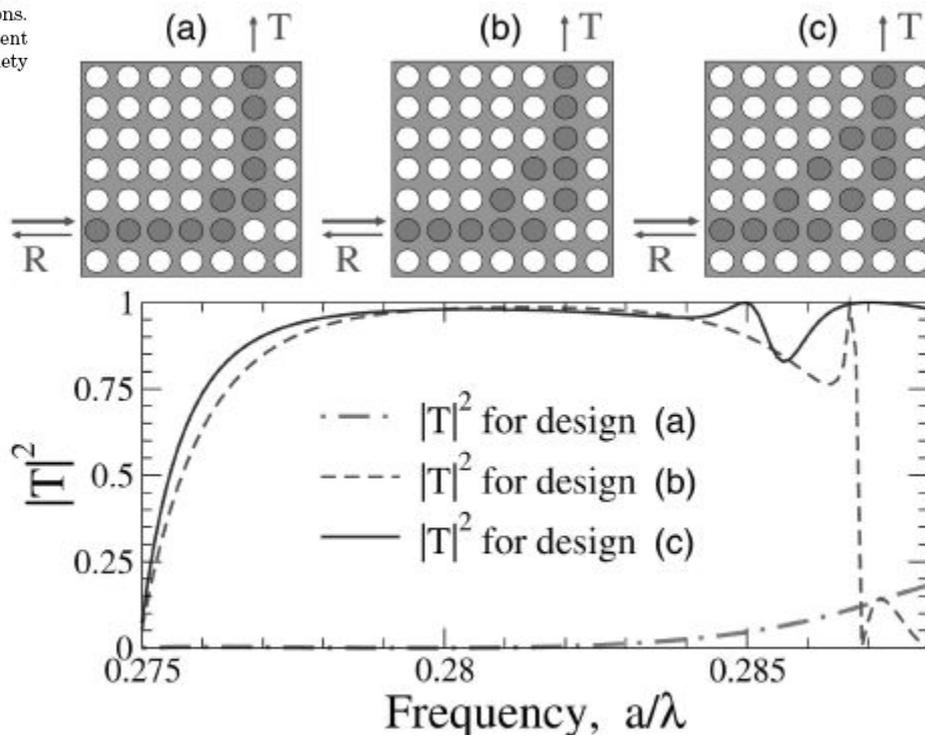


Fig. 3. Transmission spectra for three different designs of waveguide bends as illustrated in the upper drawings.

# Beam steering in planar photonic crystal based on its anomalous dispersive properties

WU Li-jun<sup>1,2</sup>, MAZILU M.<sup>1</sup>, GALLET J.F.<sup>1</sup>, KRAUSS T.F.<sup>1</sup>

<sup>(1)</sup>The Ultrafast Photonics Collaboration, School of Physics & Astronomy, University of St. Andrews, St. Andrews, Fife KY16 9SS, Scotland, UK

<sup>(2)</sup>Department of Physics, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China

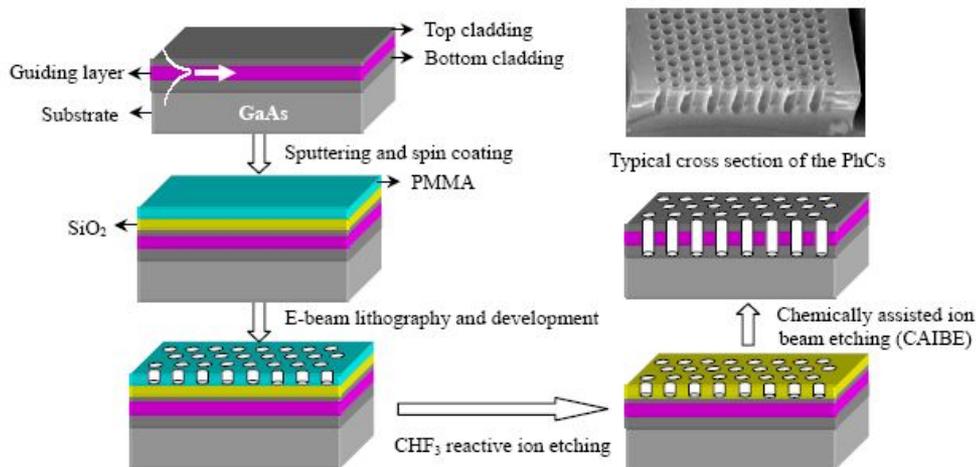


Fig.1 Sample fabrication procedure

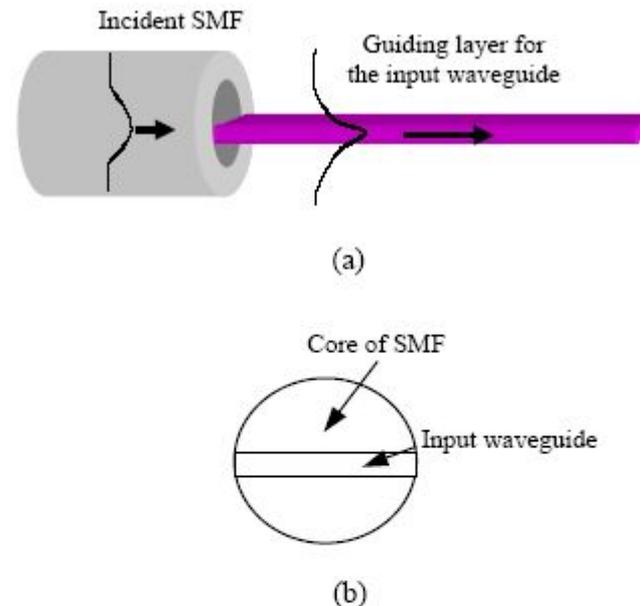


Fig.3 Illustration of the incompatibility between the normal SMF and the input waveguide of the device. Normally, the thickness of the guiding layer of the waveguide is from 250 nm to 400 nm. Applying a normal SMF with 7  $\mu\text{m}$  as core diameter, there is a significant vertical incompatibility, resulting in high insertion loss. Therefore, a cylindrically lensed fibre to squeeze the mode into the propagating plane is necessary to couple more light into the input waveguide. (a) Side view; (b) End view

Zhaolin Lu

University of Delaware . Center for Composite Materials . Department of Electrical and Computer Engineering

## ABSTRACT AND MOTIVATION

### ABSTRACT

We present a silicon prism coupler for coupling from a single mode fiber into a 200-nm-thick SOI waveguide. The silicon prism is fabricated on a (100) silicon wafer using photolithography and wet etching. Tapered waveguides or J-couplers are employed as lateral mode converters. An experimental setup with a rotational stage and a pneumatic plunger has been built for controlling the incident angle and strip thickness, which are key factors determining the coupling efficiency. When optimal coupling is achieved on the setup, the fiber-prism-waveguide coupler can be packaged using epoxy bonding. Thus, a fiber-prism-waveguide coupler or connector is constructed. Finite-difference time-domain and plane-wave spectrum electromagnetic calculations predict a coupling efficiency of 70%-1.1dB insertion loss) for a uniform strip silicon-to-silicon prism coupler. The coupling efficiency is experimentally achieved to be 49%-3.1dB insertion loss) excluding the reflections from the input surface and output facet.

### MOTIVATION

SOI is one of the most promising integrated optics technologies because the device fabrication allows the use of conventional microelectronics patterning techniques and the high index contrast offers strong light confinement in small dimensions, which enables miniaturization of fractional integrated optical devices. For parameter SOI integrated optics, one of the key issues is the fiber-chip coupling. Currently, although there are several proposals for achieving the coupling, most of them are either low efficient, or difficult to fabricate. For example, end-fire coupling has been shown to have a very low efficiency because the thickness of the slab is often on the order of 100's nm. Grating coupling is a very promising method, but it is not well-suited for optical integrated circuits (OIC) due to difficulty in mode matching, sensitivity to wavelengths, complexity of design and fabrication. For these reasons, in our work we have proposed and developed silicon prism coupling for SOI waveguides.

## SCHEMATIC AND 2-D FDTD-SIMULATION

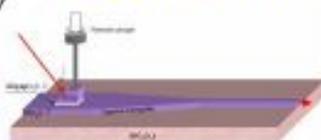


Fig. 1a. Schematic for a prism coupler.



Fig. 1b. PWS result for optimal parameters.

Plane wave spectral(PWS) method determines the optimal parameters.

FDTD method validates the design.

An efficiency of 77.1% is obtained in our simulation excluding the reflection on the prism.

This result can be applied to larger prisms when shifting the incident point.

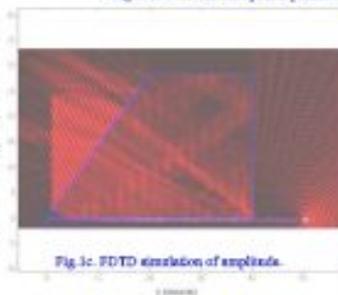


Fig. 1c. FDTD simulation of amplitude.

## SILICON PRISM DESIGN AND FABRICATION

Not easy to mount it on the pneumatic plunger.



Fig. 2a. Conventional design.



Fig. 2c. Prism fabrication.



Fig. 2b. Design to ease wet etching.



Fig. 2d. SEM pictures of the prisms.

## EXPERIMENTAL SETUP



Fig. 3. Experimental setup for measuring the prism coupler.

The prism is mounted on a 3-dimensional stage.

The sample (waveguide) is taped to a pneumatic plunger head.

A rotational stage to adjust the incident angle.

An InVigo Merlin digital infrared camera is used to evaluate the coupling efficiency.

## COUPLING RESULTS

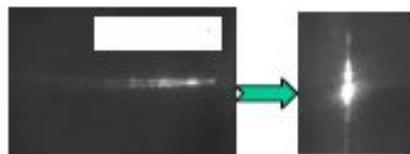


Fig. 4a. Side view

Fig. 4b. Front view

Light is coupled into a 5 μm-wide waveguide through a lateral tapered "funnel".

Three diff bandwidth is about 80nm.

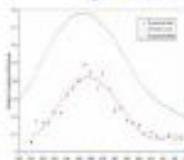


Fig. 4c. Spectral response.

## PRISM COUPLING INTO PHOTONIC CRYSTALS

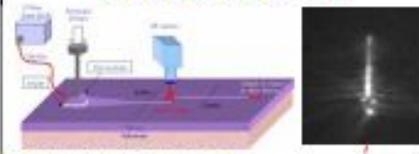


Fig. 5a. Setup for coupling into PhCs

A prism is coupling light into a tapered waveguide, which acts as a lateral mode converter, and then J-coupler is focusing light at a PhC structure.



Fig. 5b. Light is coupling into a PhC

## FIBER-PRISM-WAVEGUIDE COUPLER PACKAGING



Fig. 6a. Epoxy bonding machine.

Instead of collimated beams, direct F-P-W coupling is proved to be efficient.

When optimal coupling is achieved, the coupler can be packaged using epoxy bonding.



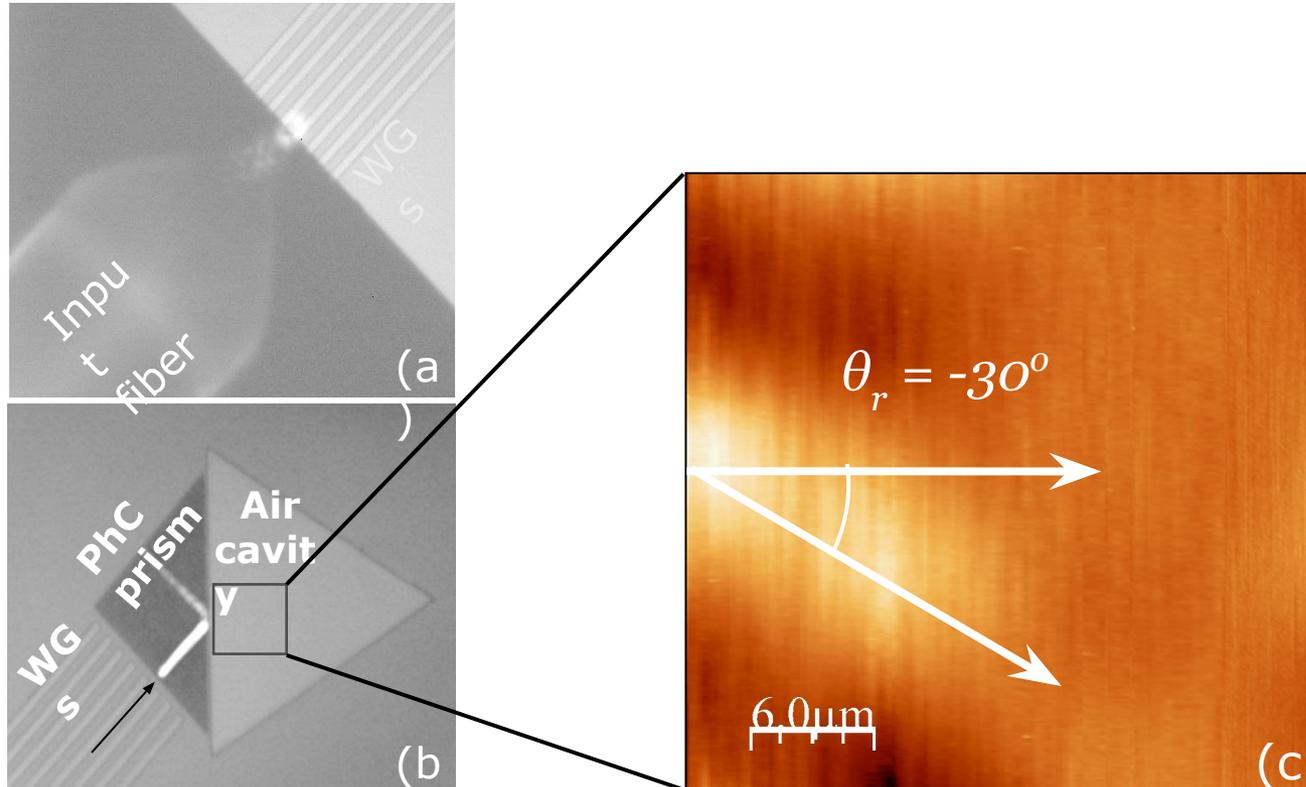
Fig. 6c. F-P-W coupler is constructed.



Fig. 6b. Schematic for the packaging.

# Nanofabricated negative-index optical elements from InP/InGaAsP and SOI heterostructures

Ravinder Banyal, B. D. F. Casse , W. T. Lu, S. Selvarasah , Y.J. Huang<sup>1</sup>, C. H. Perry, M. Dokmeci and S. Sridhar, MRS 2007.



- (a) *Input light coupling into the waveguide*
- (b) *Light propagation inside the PhC prism - IR image*
- (c) *NSOM image of the negatively refracted beam*

# Total internal reflection photonic crystal prism

Ethan Schonbrun<sup>1</sup>, Maxim Abashin<sup>2</sup>, John Blair<sup>3</sup>, Qi Wu<sup>1</sup>, Wounjhang Park<sup>1</sup>,  
Yeshaiahu Fainman<sup>2</sup>, and Christopher J. Summers<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical and Computer Engineering, University of Colorado, Boulder, Colorado, 80309

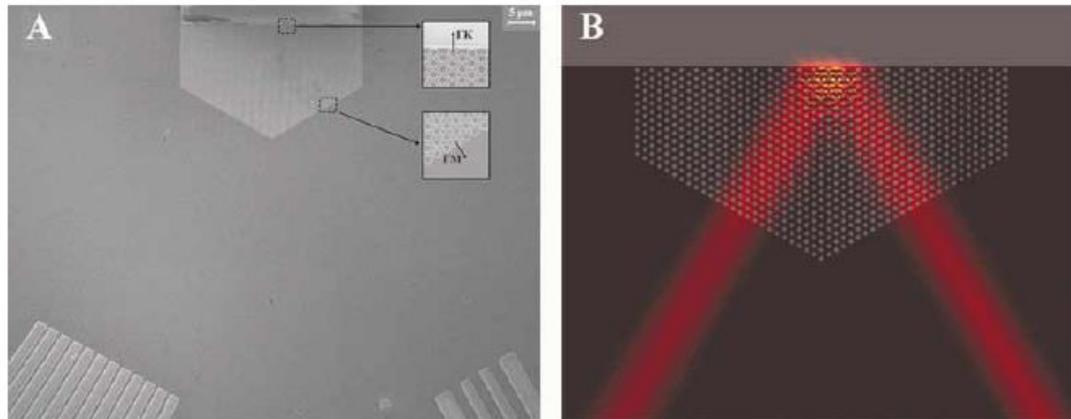


Fig. 2. A) Scanning electron micrograph (SEM) of the fabricated device. The insets show the crystal terminations for the prism input and reflection interfaces. The front half of the prism is surrounded by silicon slab, and behind the prism is an etched out air trench. B) Numerical simulation of the time averaged square of the  $E_z$  (out-of-plane) field. The wave is incident from the bottom right and exits the bottom left. The numerically simulated device is three times smaller than the fabricated device, so diffraction is negligible.

Although the reflection in Fig. 1(B) is more surprising in nature, we chose to fabricate a device based on Fig. 1(A) because it allows access to the reflected beam. The PC region was symmetrically reflected along the short leg of the right triangle to form a  $120^\circ\text{-}30^\circ\text{-}30^\circ$  prism where light enters and exits a  $\Gamma\text{M-to-silicon}$  interface and is reflected from a  $\Gamma\text{K-to-air}$  interface, as shown in Fig. 2(A). Small regions around each  $30^\circ$  vertex have been removed because they do not substantially effect light propagation. Three input waveguides each of which is  $3\ \mu\text{m}$  wide and separated from each other by  $5\ \mu\text{m}$ , terminate  $68\ \mu\text{m}$  from the PC prism, as shown in the lower right of Fig. 2(A). Light couples into a PC mode in the second photonic band where the EFS is flat along the  $\Gamma\text{M}$  direction. The beam then propagates with minimal diffraction for  $22\ \mu\text{m}$  in the PC, reflects off the  $\Gamma\text{K}$  interface and propagates through another  $22\ \mu\text{m}$  inside the prism before coupling back out to the silicon slab. The output beam is sampled by a photonic wire array of  $1\ \mu\text{m}$  wide wires with center-to-center spacing of  $3\ \mu\text{m}$ .

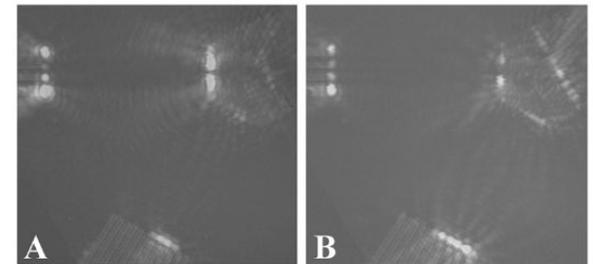


Fig. 4. Far-field scattering images of the PC prism. The center input waveguide is illuminated. The scattering images are superimposed on an SEM image to show the device geometry. In each photograph, the input waveguide is at the upper-left, the TIR prism is in the upper-right and the output waveguide array is along the bottom. A) shows 1542 nm TM polarized illumination, which creates a highly confined output spot that primarily illuminates two output waveguides. B) shows 1559 nm TM polarized illumination, which has high efficiency and small out-of-plane scattering at each device interface. Scattering from the output waveguide

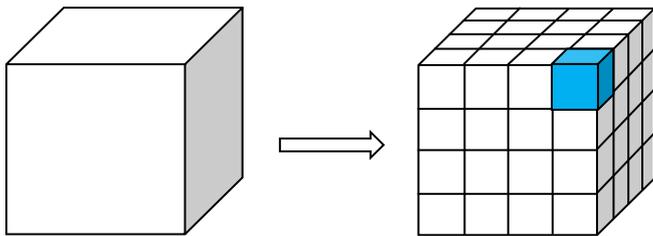
# Моделирование. Метод конечных разностей во временной области

$$\oint_{\partial A} \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \int_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A}, \quad \oint_{\partial A} \vec{H} \cdot d\vec{s} = \int_A \left( \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \right) \cdot d\vec{A},$$

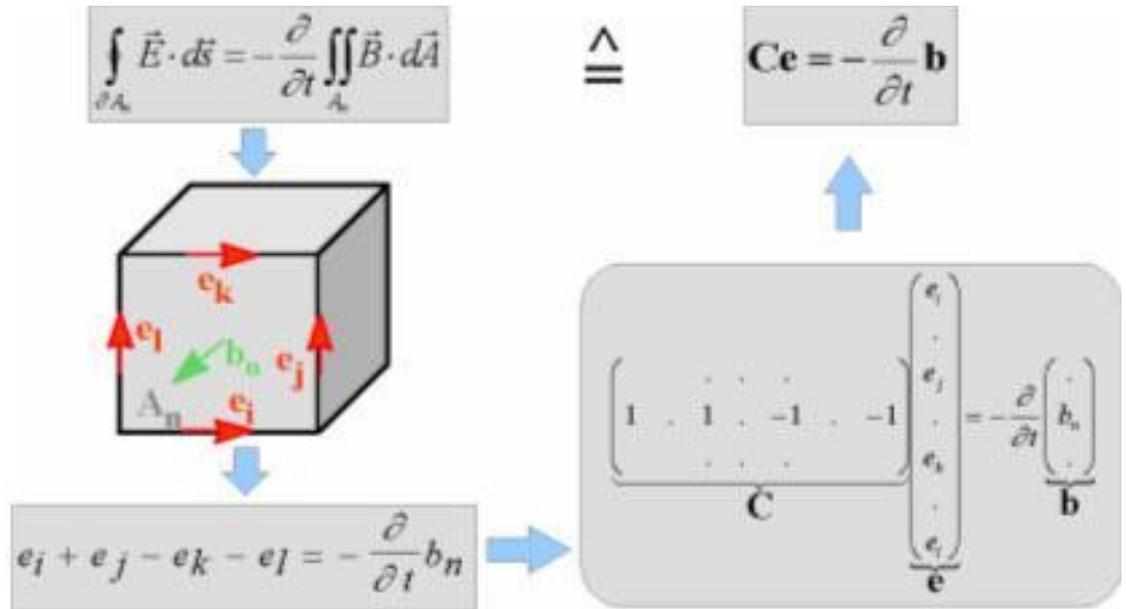
$$\oint_{\partial V} \vec{D} \cdot d\vec{A} = \int_V \rho dV, \quad \oint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0.$$

$$\vec{C}e = - \frac{d}{dt} \mathbf{b}, \quad \tilde{C}h = \frac{d}{dt} \mathbf{d} + \mathbf{j},$$

$$\tilde{S}d = \mathbf{q}, \quad S\mathbf{b} = 0.$$

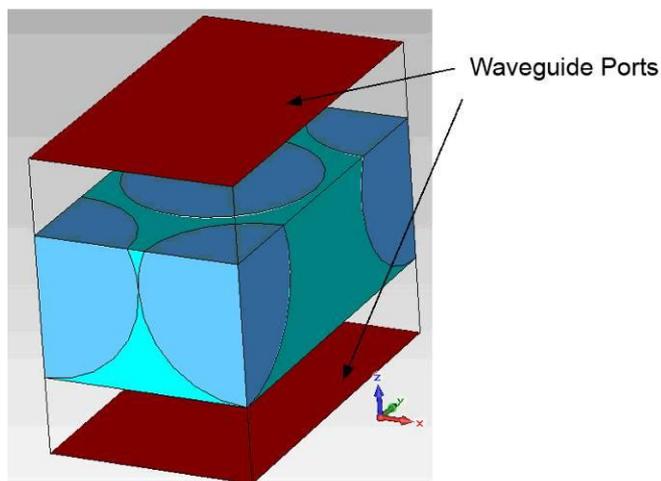


Конечная расчетная область разбивается на мелкие ячейки  
 -> уравнение Максвелла применяем к одной ячейке -> объединяя на все ячейки, получаем матричный вид

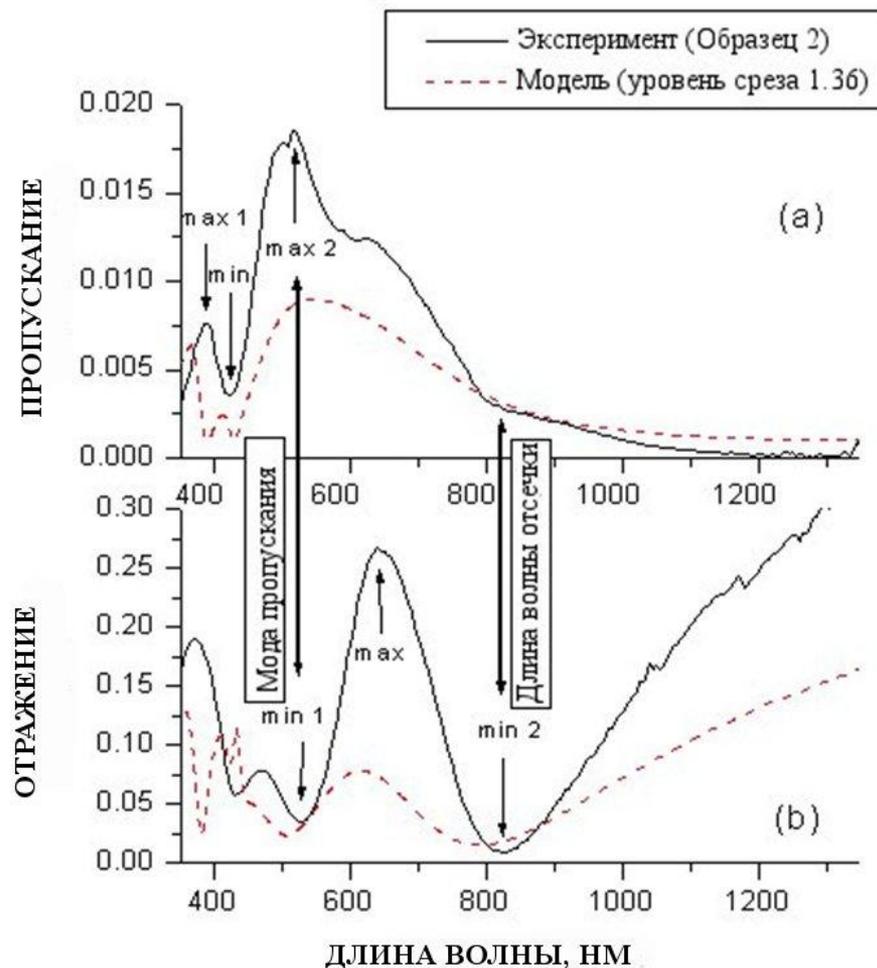


# Моделирование Металлический инвертированный слой

Модель МИО в CST  
Microwave Studio

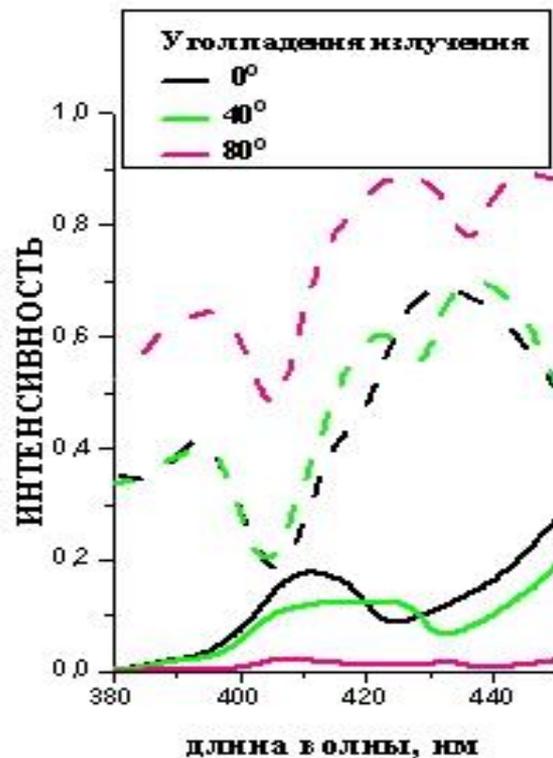
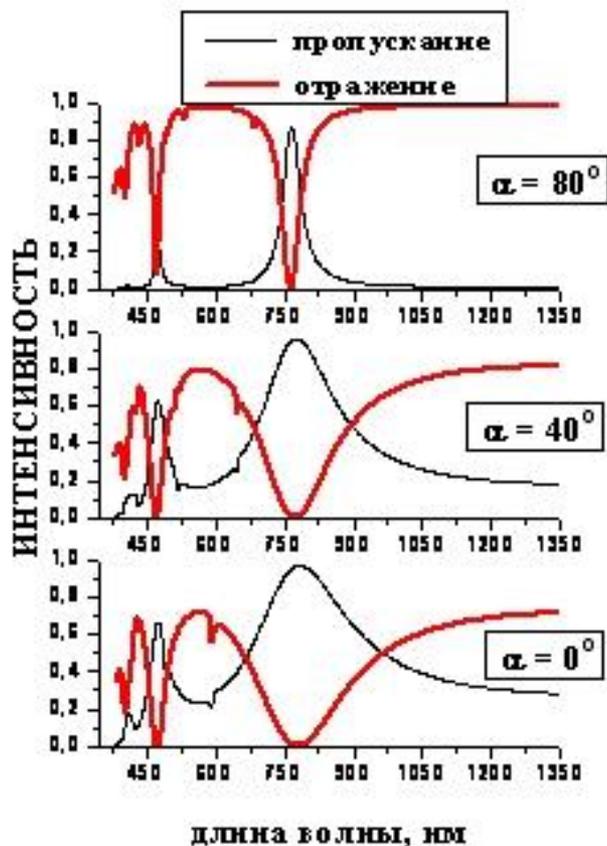


Функциональный материал: Ni;  
период структуры: 530 нм;  
диаметр сфер: 530 нм;  
упаковка: ГЦК

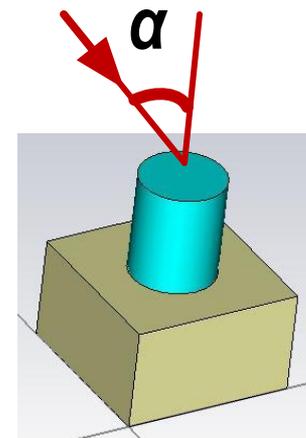


# Фотонный кристалл на основе ZnO

Рассчитанные спектры пропускания и отражения ФК на основе ZnO при различных углах падения излучения



Спектры вблизи зоны экситонной люминесценции

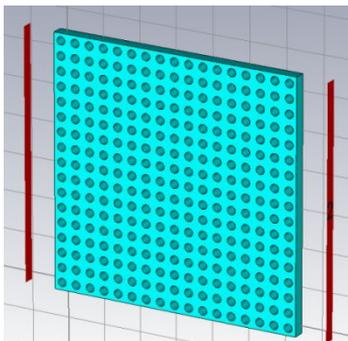


Подложка: Si;  
Толщина подложки: 100нм;  
Высота цилиндра: 100нм;  
Радиус цилиндра: 40 нм.

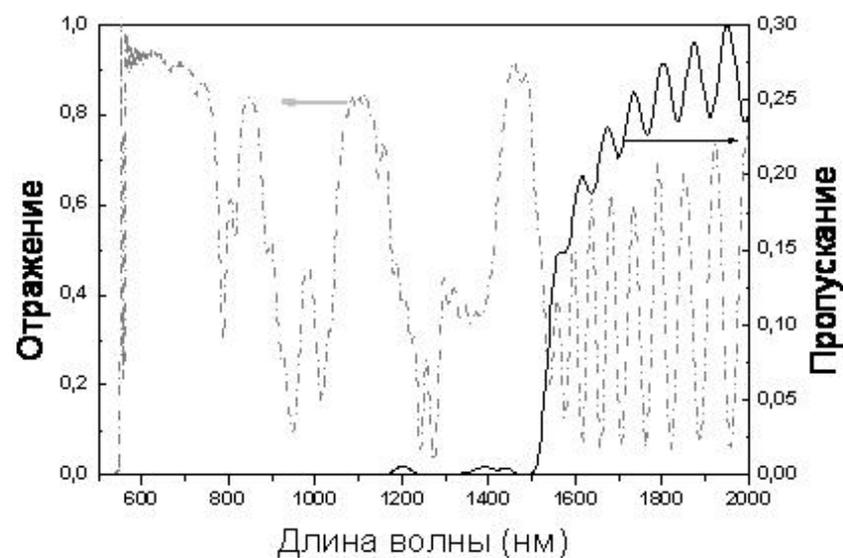
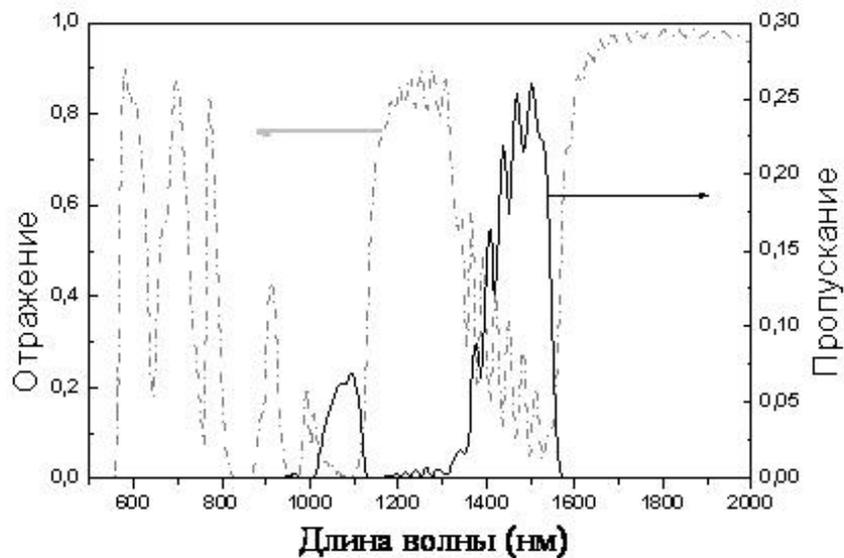
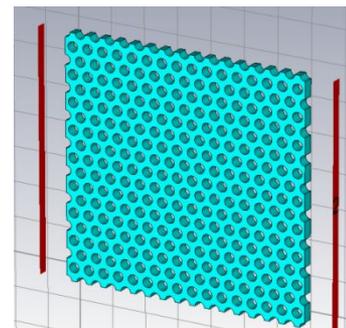
# Фотонная запрещенная зона ФК на основе GaAs

Спектры отражения и пропускания ФК на основе GaAs с а) квадратной и б) гексагональной упорядоченностью

*a)*

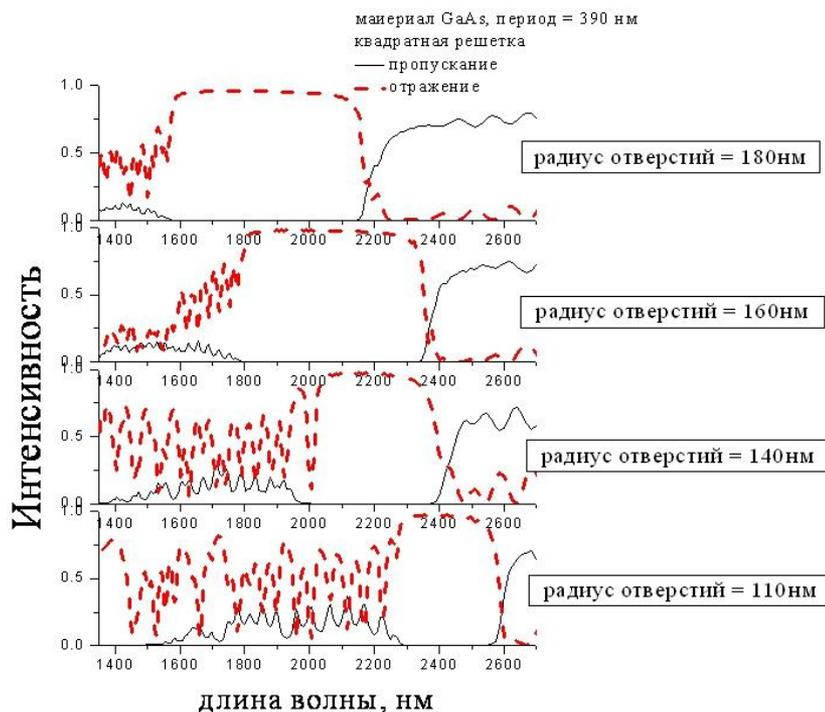


*b)*

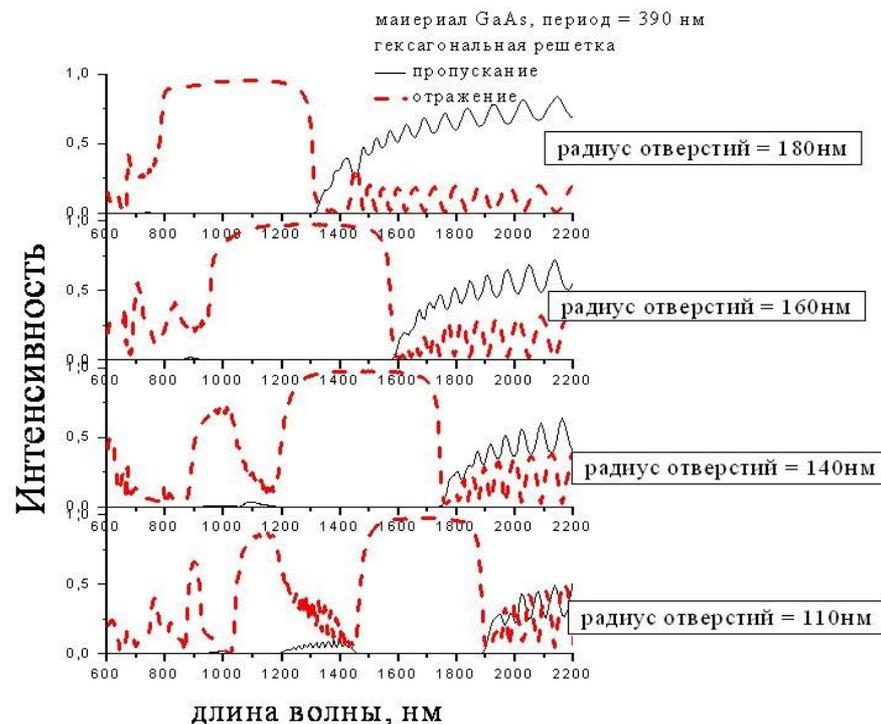


# Спектры GaAs при изменении радиуса отверстий

## Квадратная решетка



## Гексагональная решетка



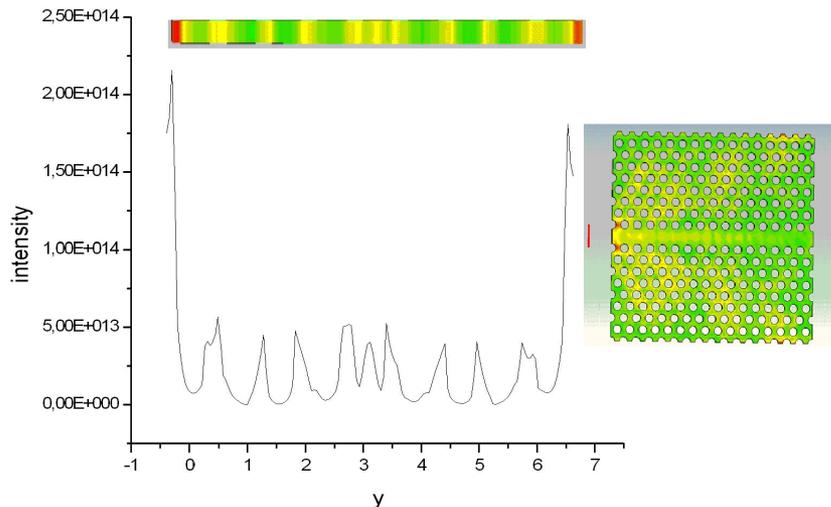
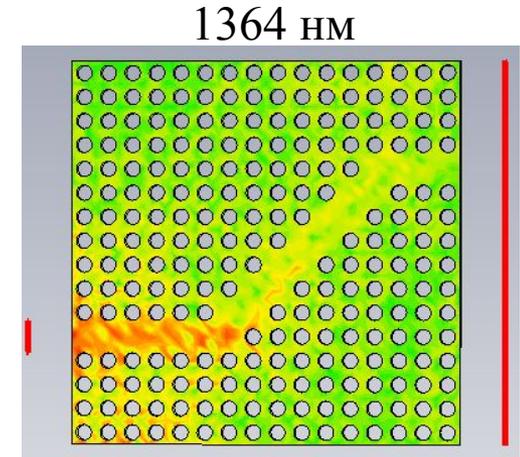
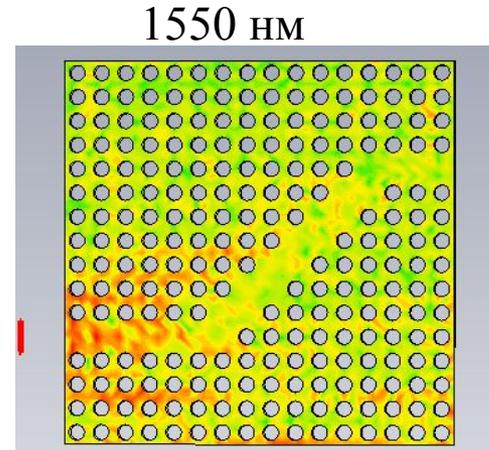
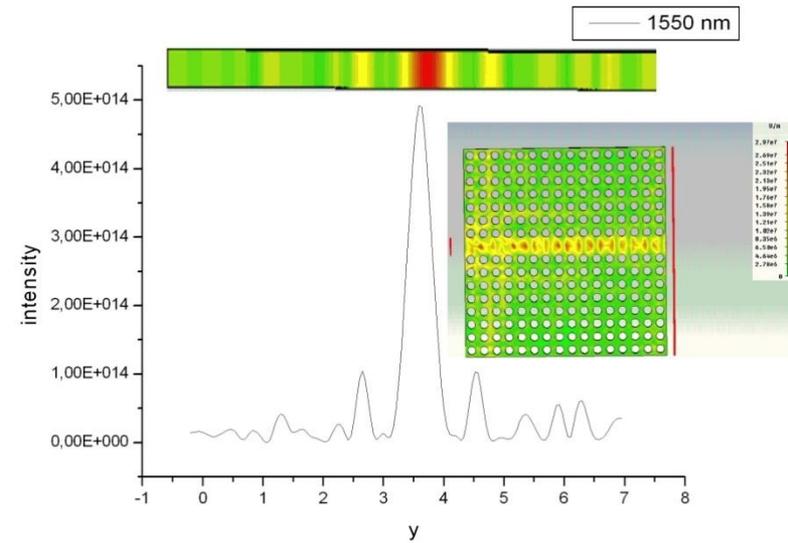
Период структуры: 390 нм

При увеличении радиуса отверстий положение ЗФЗ для обоих типов упорядоченности смещается в область более коротких длин волн.

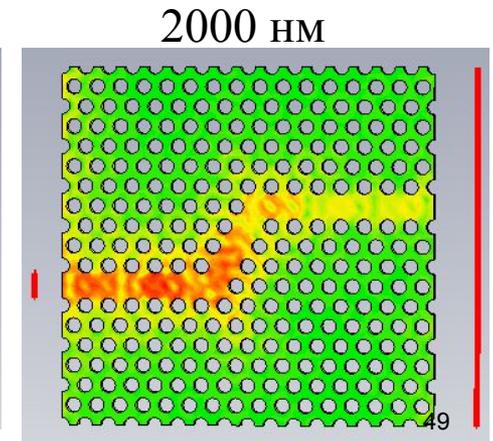
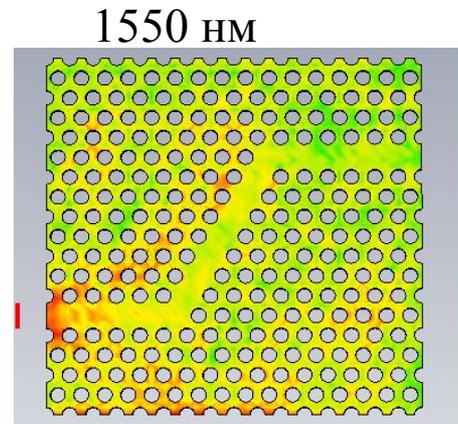
# Волноводы на основе GaAs

$$0,28 \leq a/\lambda \leq 0,3$$

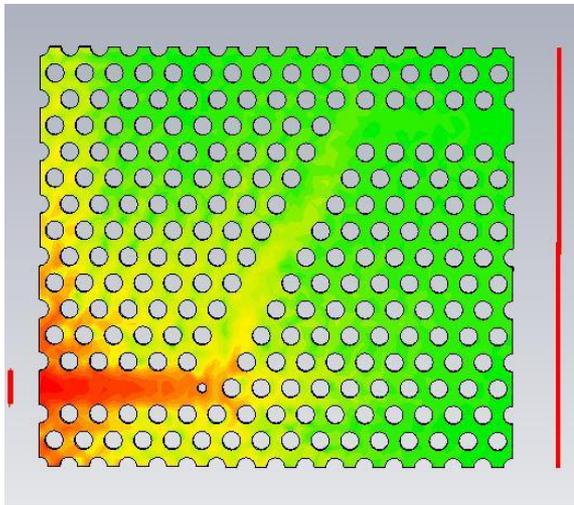
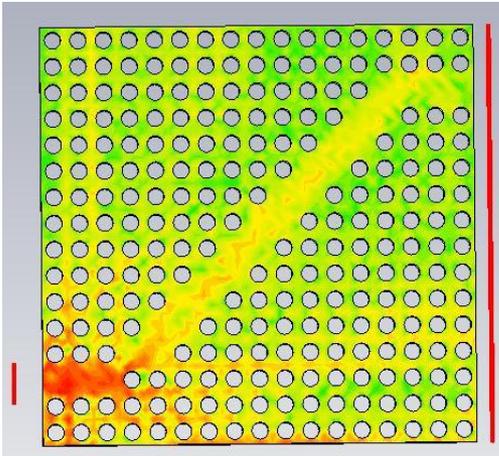
$$0,5a \leq d \leq 0,95a$$



Период: 450 нм; диаметр отверстий: 290 нм.



# Волноводы на основе GaAs



Чтобы направить излучение в волновод, на изгибе делают дефект (например, отверстие меньшего радиуса, чем элементы структуры). Благодаря наличию дефекта, свет меняет направление распространения. К выходу из волновода доходит примерно 1% падающего света.

Параметры структуры:  
период: *390 нм*;  
диаметр отверстий: *240 нм*;  
длина волны: *1500 нм*.