

Физический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова

Современные компьютеры и интернет: могут ли они работать со "скоростью" света?

(12-14 лекций, зачет)

Лектор: Прудников Илья Рудольфович

Вводная часть

СРАВНИМ:

- **Скорость света в вакууме:**

$$C=300000 \text{ км/сек.}$$

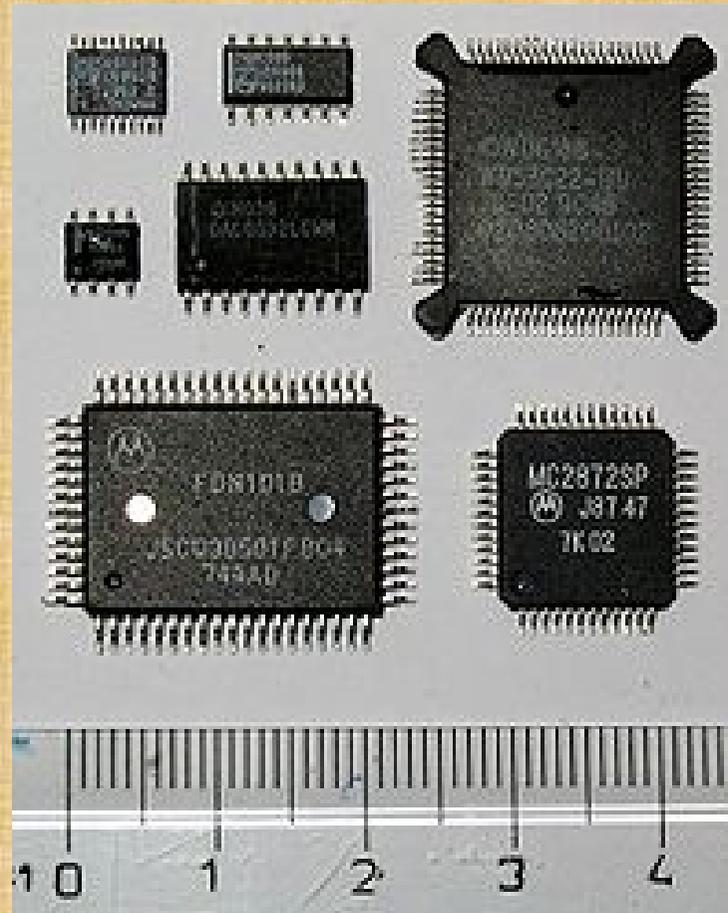
- **Средняя скорость упорядоченного дрейфа электронов, V , в металлах:**

$$V = \frac{I}{enS};$$

e – заряд электрона, $n=10^{28} - 10^{29} \text{ м}^{-3}$ - концентрация электронов в металле. Для $I=10 \text{ А}$ и $S=1 \text{ мм}^2$ получаем $V=0.6-6 \text{ мм/с}$

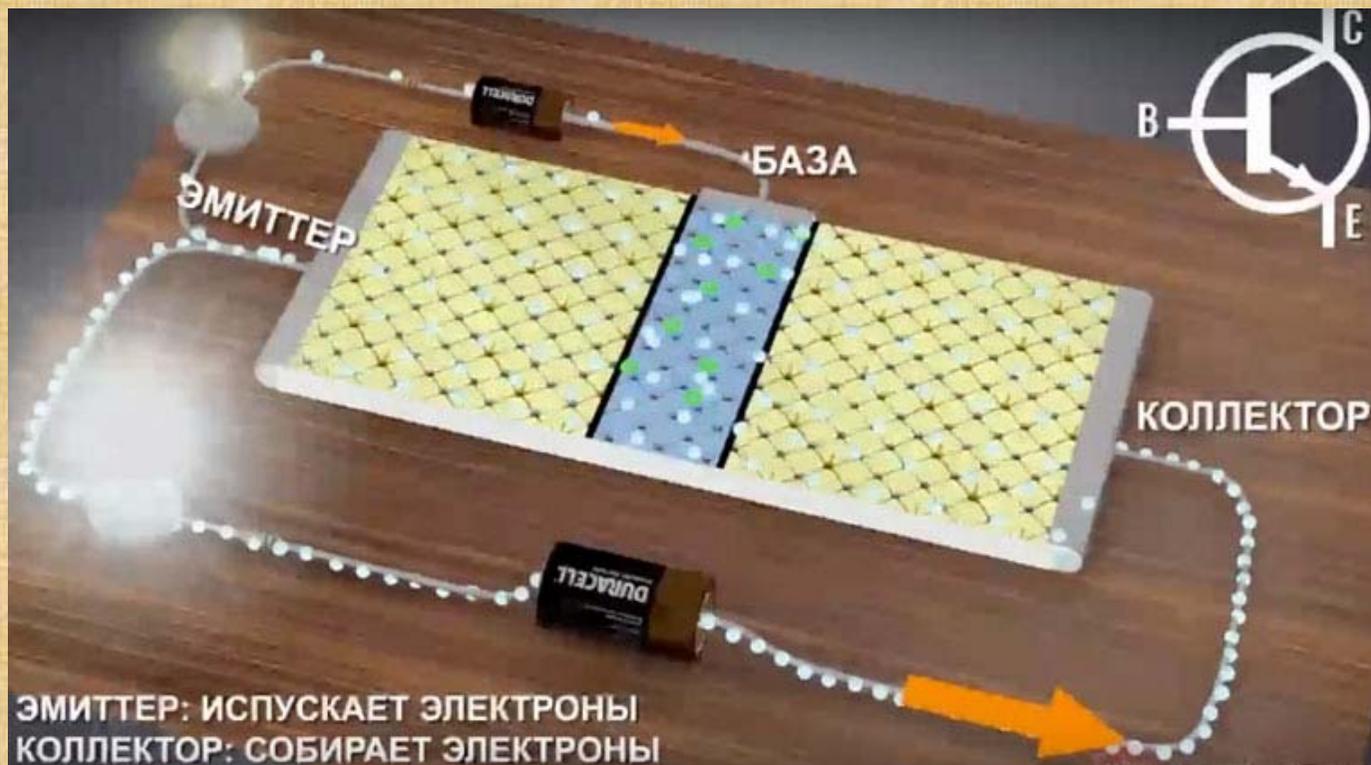
1. Что такое интегральная микросхема?

От чего зависит быстродействие компьютера ?



**Интегральные полупроводниковые микросхемы,
используемые для создания современных портативных и
быстродействующих компьютеров**

Транзистор – основной элемент современных полупроводниковых микросхем (чипов)



Схематическое изображение работы транзистора. Транзистор – это переключатель, который либо “не пропускает” электрический ток (закрытое состояние), либо “пропускает” электрический ток (открытое состояние).

Открытое состояние – логическая единица

Закрытое состояние – логический ноль

} 1 бит

3. Эволюция полупроводниковой интегральной схемы с точки зрения степени интеграции.

7. Достижения современных полупроводниковых компьютерных технологий (технологических процессов).

Характеристики современных полупроводниковых компьютерных технологий

● Технология 90 нм: *Повсеместная технология в развитых странах в 2006 году.*

● Технология 65 нм (INTEL 2004 г): *Китай, Израиль, Япония, Ю. Корея, Тайвань;*

● Технология 45 нм (INTEL 2007 г- 2008 г) Atom Processor 230, Z500
Китай, Израиль, Япония, Ю. Корея, Тайвань;

● Технология 32 нм (США, Intel, 2011 год) Atom Processor D2500

● Технология 32 нм (США, Intel, 2012 год) Atom Processor S1200 (S1220-1260)

● Технология 22 нм.

Intel, 2012 год (Q2'12), Core i7-3820(3720,3520)QM Processor;

Intel планирует начать массовый выпуск процессоров Atom (Atom C2000: C2350-C2750) в 2013 году. Новые процессоры Atom в три раза быстрее и при этом потребляют в пять раз меньше энергии, чем текущее поколение, использующее 32-нм техпроцесс.

● Технология 14 нм.

Intel планирует перейти на технологию 14 нм в 2014 году.

Характеристики современных полупроводниковых компьютерных технологий (продолжение)

□ 90 нм - 2002 год

□ 65 нм - 2004 год

□ 45 нм - 2006 год

□ 28 нм - 2010 год

□ 20 нм - 2012 год

□ 14 нм - 2014 год

□ 10 нм - 2017 год

□ 7 нм - 2018 год

□ 6 нм - 2019 год

□ 5 нм - 2020 год

AMD ускоритель вычислений Radeon Instinct на базе 7-нм версии Vega

7-нм настольные процессоры Ryzen 3000, 7-нм серверные процессоры EPC и 7-нм игровые продукты в семействе видеокарт Radeon RX 5700.

Taiwan Semiconductor Manufacturer Company

Замечание: 10 нм - это не размер всего транзистора, показатель ширины некоторой части (затвора). Транзистор, выполненный по проектным нормам 10 нм, имеет размер около 64 нм.

Сообщение от 12 сентября 2018 года

- Apple и Huawei объявили о создании первых 7-нм чипов (процессоров) для смартфонов
 - Apple: iPhone Xs и XsMax
- Huawei: Kirin 980 в Huawei Mate 20: 6.9×10^9 (6.9 миллиардов) транзисторов на интегральной схеме площадью 1 см^2
- Taiwan Semiconductor Manufacturer Company – производитель 7-нм чипов ;
- Самсунг – планирует начать производство чипов по 7 нм технологии к началу 2019 года.
- iPhone Xs: 6.9×10^9 (6.9 миллиардов) транзисторов на интегральной схеме площадью 0.83 см^2

Перспективы: в процессоре Apple A14 для айфонов 2020 года будет использован новый техпроцесс 5 нм сделанный с использованием экстремальной ультрафиолетовой литографии

КОЛИЧЕСТВО ТРАНЗИСТОРОВ В ПРОЦЕССОРАХ APPLE

НМ

мм²

Процессор	Техпроцесс	Площадь	Транзисторов
Apple A7	28	102	1 000 000 000
iPhone6 Apple A8	20	89,25	2 000 000 000
Apple A10	16	125	3 300 000 000
Apple A11	10	89,23	4 310 000 000
iPhone11 Apple A12	Apple A13	7	6 900 000 000
iPhoneX Apple A14	5	80	11 718 750 000

8.5 10⁹

Полезная площадь схемы

•Технология 7 нм , площадь схемы 83,27 мм², количество транзисторов – 6.9 млрд., полезная площадь ~17% от площади схемы

•Технология 10 нм , площадь схемы 89,25 мм², количество транзисторов – 4.3 млрд., полезная площадь ~20% от площади схемы

Тепловыделение процессора

Модель	Частота	TDP
Pentium	75 MHz	8.0 W
Pentium MMX	200 MHz	15.7 W
Pentium II 300 (0.35μ)	300 MHz	18.6 W
Pentium III 600 (0.25μ)	600 MHz	43 W
Pentium III 1000 (0.18μ)	1GHz	35.5W
Pentium III 1333 (0.13μ)	1.33GHz	34W
Pentium 4 1.5 (0.18μ)	1.5GHz	58W
Pentium 4 2.8 (0.13μ)	2.8GHz	68W
Pentium 4 HT 672 (90nm)	3.8GHz	115W
Pentium D 960 (65nm)	3.6GHz @ 2 cores	130 W
Core 2 Duo E6850 (65nm)	3GHz @ 2 cores	65W
Core 2 Quad Q6600 (65nm)	2.4GHz @ 4 cores	95W
Core 2 Quad Q9550S (45nm)	2.83GHz @ 4 cores	65W
Core i5-680 (32nm)	3.6GHz @ 2 cores	73W
Core i7-3930K (32nm)	3.6 GHz @ 6 cores	130 W
Core i7-3770K (22nm)	3.5GHz-3.9GHz @ 4 Cores	77W

8. Закон Мура.

Как долго можно уменьшать размеры транзисторов ?

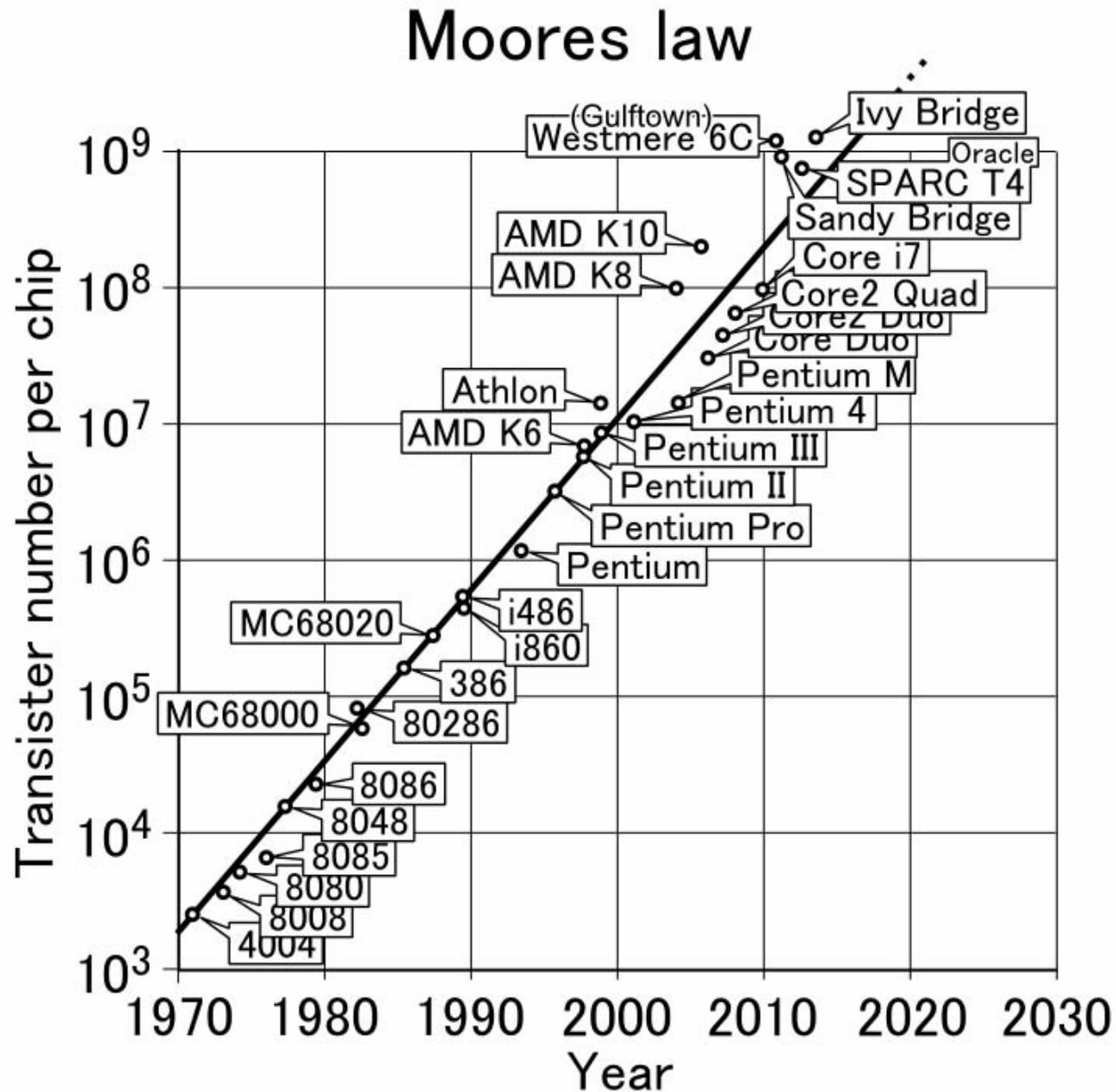


Закон Мура (эмпирический) – количество транзисторов, размещаемых на интегральной схеме удваивается приблизительно каждые 2 года (сформулирован в 1965 г.)

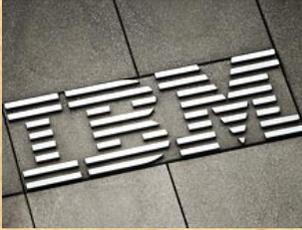
Гордон Эрл Мур

(Gordon Earle Moore), р. 1929

Графическая иллюстрация закона Мура



IBM сообщила о создании первых в мире чипов с 7-нм транзисторами



9 июля 2015 г. , **New York Times**

- Цепочка ДНК человека имеет диаметр 2,5 нм
- Диаметр эритроцита составляет 7500 нм
- Перейти на эту норму удалось благодаря применению в конструкции транзистора сплава кремния и германия вместо чистого кремния, который является традиционным материалом для изготовления микрочипов.
- Процессор обычных размеров может вместить свыше 20 млрд 7-нм транзисторов
- Процессор в смартфоне iPhone 6 (2014 год) имеет примерно 2 млрд транзисторов
- 18-ядерный серверный процессор Intel Xeon имеет около 5,5 млрд транзисторов
- Прорыв IBM в очередной раз подтвердил на практике так называемый Закон Мура, согласно которому количество транзисторов, размещаемых на кристалле интегральной схемы, удваивается каждые 2 года.

**9. Прекращение закона Мура: прогнозы
и последствия.**

**7. Достижения современных
полупроводниковых компьютерных
технологий
(технологических процессов).**

Закон Мура перестанет работать через 10 лет?

Роберт Колвелл, директор группы микросистем в Defense Advanced Research Projects Agency, рассказал о Законе Мура в ключевой речи на конференции Hot Chips (сентябрь 2013 г.)

Инженер, который однажды придумал конструкцию процессоров класса Pentium, предсказывает, что Закон Мура существует и выполняется из последних сил. Он заявил, что возможность упаковки вдвое большего числа транзисторов каждые два года на кристалле того же размера будет исчерпана к *2020 году с 7 нм технологией* производства или к *2022 году с 5 нм техпроцессом*.



Колвелл заявил, что прекращение Закона Мура будет иметь далеко идущие последствия для полупроводниковой промышленности, поскольку это будет означать конец экспоненциального роста вычислительной мощности.

Компания Intel 8 октября 2018 года представила процессоры Core 9-го поколения, предназначенные для массового сегмента рынка.

Три процессора: Core i5-9600K, Core i7-9700K и Core i9-9900K. Все три модели производятся по улучшенному 14-нм техпроцессу (14nm++).

Младший процессор линейки (Core i5-9600K) обладает шестью ядрами и шестью потоками. Базовая частота новинки составляют 3,7 ГГц. Режим Turbo обеспечивает всем шести ядрам частоту в 4,3 ГГц, четырем — 4,4 ГГц, двум — 4,5 ГГц, а одному — 4,6 ГГц.

Модель Core i7-9700K получила восемь ядер и восемь потоков. Базовая частота процессора составляет 3,6 ГГц, а в режиме Turbo она может достигать 4,9 ГГц для одного ядра, 4,8 ГГц для двух ядер, 4,7 ГГц – для четырех и шести ядер, и 4,6 ГГц для всех восьми ядер.

Что же касается флагманской модели нового семейства, то Intel Core i9-9900K включает восемь ядер и шестнадцать потоков. Базовая частота модели также составляет 3,6 ГГц. Частоты в Turbo-режиме для одного и двух ядер составляют 5,0 ГГц, для четырех – 4,8 ГГц, а для шести и восьми ядер – 4,7 ГГц. (Плотность транзисторов: $37.5 \times 10^6 / \text{mm}^2$)

Сравним: Процессоры Pentium 4

❖ Производились: 2000-2008 гг.

❖ Тактовая частота: 1,3- 3.8 ГГц

❖ Технология производства: 180-65 нм

❖ Количество транзисторов:

Пример: Pentium 4 по технологии 130 нм

Выпуск: 2002 год

Тактовая частота: 2.8 ГГц

Количество транзисторов: 55 миллионов на

площади 131 мм²

ПЕРСПЕКТИВЫ ОТ INTEL (СООБЩЕНИЕ ОТ 3 МАРТА 2020 Г.)

□ Intel: «Наш 10-нанометровый техпроцесс никогда не будет столь же продуктивным, как 22 нм или 14 нм»

□ Компания возлагает надежды на техпроцесс 7 нм

□ 10-нанометровые процессоры Intel для мобильного сегмента уже достаточно долго присутствуют на рынке.

□ Серверные 10-нанометровые решения появятся в этом году.

□ В этом году появятся мобильные CPU Tiger Lake, выполненные по техпроцессу 10+ нанометров.

Финансовый директор компании INTEL Джордж Дэвис (George Davis) выступил с весьма откровенным заявлением касательно перспектив 10-нанометровой продукции:

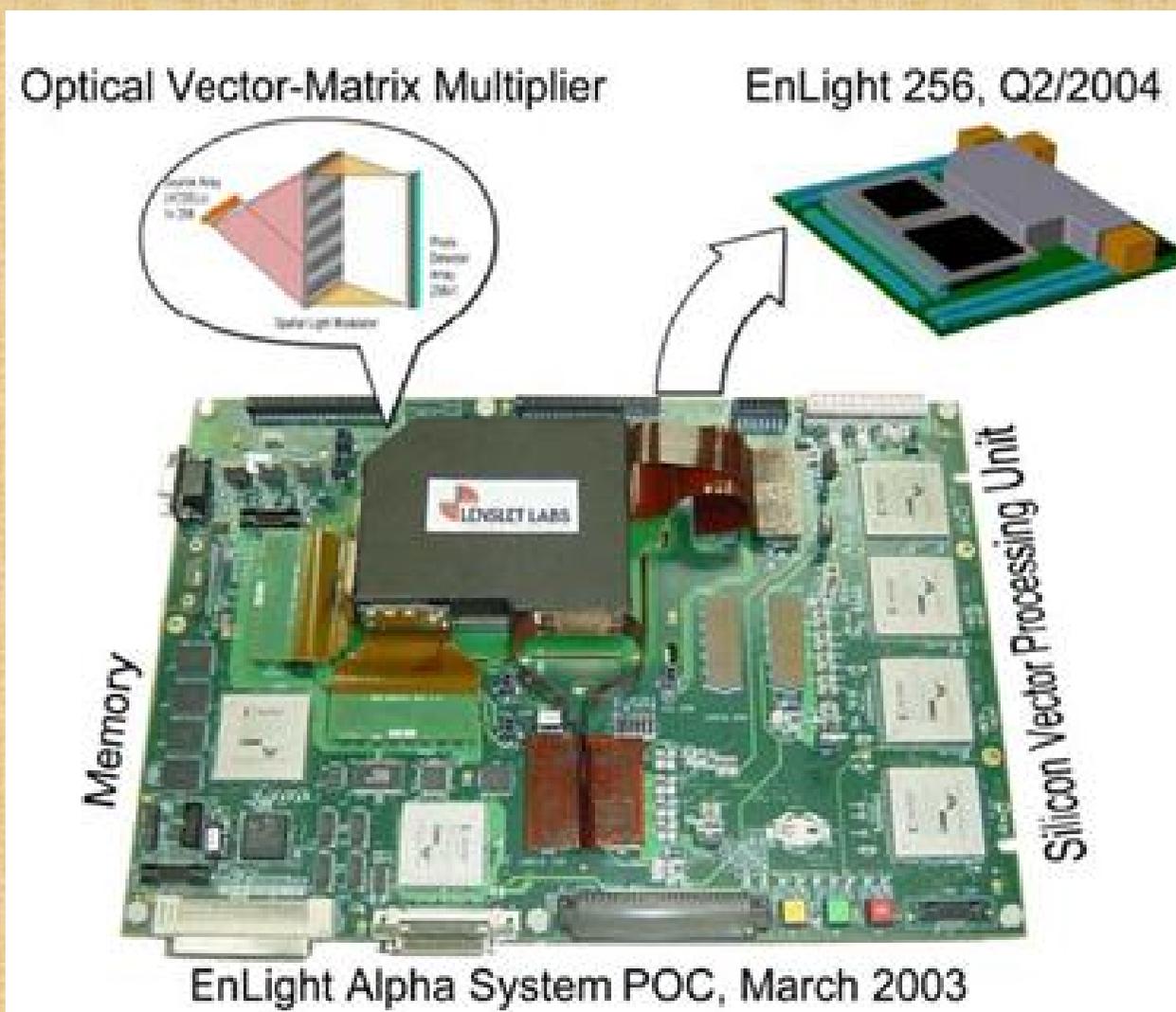
Мы определённо находимся в эре 10 нм, мы запустили процессоры Ice Lake, в этом году мы ждём выхода Tiger Lake и первых графических процессоров. Также мы видим повышение процента выхода годной продукции. Однако 10-нанометровый техпроцесс не будет лучшим среди когда-либо выпущенных Intel. Он останется менее продуктивным, чем техпроцессы 22 нм и 14 нм .

**10. В чем заключаются потенциальные
преимущества оптической
интегральной схемы
перед "традиционной"
полупроводниковой интегральной
схемой?**

Первый оптический коммерческий процессор EnLight 256

- **Создатель: фирма LensLet (Израиль);**
 - **Размер: 15x15 см; Высота 1.7 см (в перспективе);**
 - **Впервые представлен 2003 году на компьютерной выставке в Бостоне;**
 - **Тактовая частота 8000 ГГц (8×10^{12} Гц);**
 - **Энергопотребление: 40 Вт.**

Первый оптический коммерческий процессор EnLight 256



**7. Достижения современных
полупроводниковых компьютерных
технологий
(технологических процессов).**

•Завод Микрон г. Зеленоград:

90 нм технология – производство налажено;

65 нм технология – планируется выпуск.

•ЗАО «МЦСТ», г. Москва:

Микропроцессор Эльбрус - 4С;

технология 65 нм: готов к серийному выпуску
в 2014 году

•Планируется выпуск в 2015 году

многоядерных (8 ядер) процессоров Байкал по
технологии 28 нм и выпуск к концу 2016 года

процессоров Байкал (16 ядер) по технологии
16 нм (сообщение от 19 июня 2014 года)

Отечественный процессор Байкал М появится в продаже в 2019 году (сообщение от 18.09.2019 года)

Технология 28 нм; 8 ядер и 8 потоков; тактовая частота 1.5 ГГц;

Процессоры Эльбрус (сообщение от 28.08.2019 года)

- **Эльбрус 4С:** Технология 65 нм, число ядер 4, количество транзисторов 986 млн; тактовая частота 0.8 ГГц; год начала производства 2014.
- **Эльбрус 8С:** Технология 28 нм, число ядер 8, количество транзисторов 2730 млн; тактовая частота 1.3 ГГц; год начала производства 2016.

13 ноября 2018 г

- В России планируют создать первый крупный суперкомпьютер на отечественном процессоре, который может стать одним из наиболее мощных в стране.
- Разработка суперкомпьютера на базе процессора "Эльбрус" является частью "долгосрочного военно-промышленного проекта"
- Стоимость разработки компьютера предварительно оценивается в 1 млрд рублей.
- Представители компании МЦСТ, которая выпускает процессоры "Эльбрус", отказались от комментариев по поводу проекта, но подчеркнули, что процессоры "Эльбрус" достигли производительности, которая позволяет создавать на их базе суперкомпьютеры.
- В октябре 2018 года сообщалось о запуске в серийное производство самого высокопроизводительного российского сервера на базе восьми-ядерного процессора Эльбрус-8С.

**10. В чем заключаются потенциальные
преимущества оптической
интегральной схемы
перед "традиционной"
полупроводниковой интегральной
схемой?**

ПОДВЕДЕМ ИТОГИ

КОЛИЧЕСТВО ТРАНЗИСТОРОВ В ПРОЦЕССОРАХ APPLE

НМ мм²

Процессор	Техпроцесс	Площадь	Транзисторов
Apple A7	28	102	1 000 000 000
Apple A8	20	89,25	2 000 000 000
Apple A10	16	125	3 300 000 000
Apple A11	10	89,23	4 310 000 000
Apple A12	7	83,27	6 900 000 000
Apple A14	5	80	11 718 750 000

НЕВОЗМОЖНО ДО БЕСКОНЕЧНОСТИ УВЕЛИЧИВАТЬ
КОЛИЧЕСТВО ТРАНЗИСТОРОВ В ИНТЕГРАЛЬНОЙ
СХЕМЕ (В ПРОЦЕССОРЕ)

ПОДВЕДЕМ ИТОГИ

•Технология 7 нм , площадь схемы 83,27 мм², количество транзисторов – 6.9 млрд., полезная площадь ~17% от площади схемы

•Технология 10 нм , площадь схемы 89,25 мм², количество транзисторов – 4.3 млрд., полезная площадь ~20% от площади схемы

Еще один сдерживающий фактор: нельзя размещать транзисторы “очень близко” друг к другу

**“БОЛЬШОЕ” ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕ
ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ С УВЕЛИЧЕНИЕМ
УПАКОВКИ - ПРОБЛЕМА**

ПОДВЕДЕМ ИТОГИ

Модель	Частота	TDP
Pentium	75 MHz	8.0 W
Pentium MMX	200 MHz	15.7 W
Pentium II 300 (0.35μ)	300 MHz	18.6 W
Pentium III 600 (0.25μ)	600 MHz	43 W
Pentium III 1000 (0.18μ)	1GHz	35.5W
Pentium III 1333 (0.13μ)	1.33GHz	34W
Pentium 4 1.5 (0.18μ)	1.5GHz	58W
Pentium 4 2.8 (0.13μ)	2.8GHz	68W
Pentium 4 HT 672 (90nm)	3.8GHz	115W
Pentium D 960 (65nm)	3.6GHz @ 2 cores	130 W
Core 2 Duo E6850 (65nm)	3GHz @ 2 cores	65W
Core 2 Quad Q6600 (65nm)	2.4GHz @ 4 cores	95W
Core 2 Quad Q9550S (45nm)	2.83GHz @ 4 cores	65W
Core i5-680 (32nm)	3.6GHz @ 2 cores	73W
Core i7-3930K (32nm)	3.6 GHz @ 6 cores	130 W
Core i7-3770K (22nm)	3.5GHz-3.9GHz @ 4 Cores	77W

Тепловыделение процессора

Какие альтернативы для дальнейшего увеличения быстродействия компьютеров ?

- Многоядерные процессоры

2016 год, июнь: первый в мире 10 ядерный процессор для обычных пользователей для настольных компьютеров, производительность выше на 10 -20 % по сравнению с одноядерным IntelXeonPhi 68 ядер, 1.4 ГГц: серверный компьютер

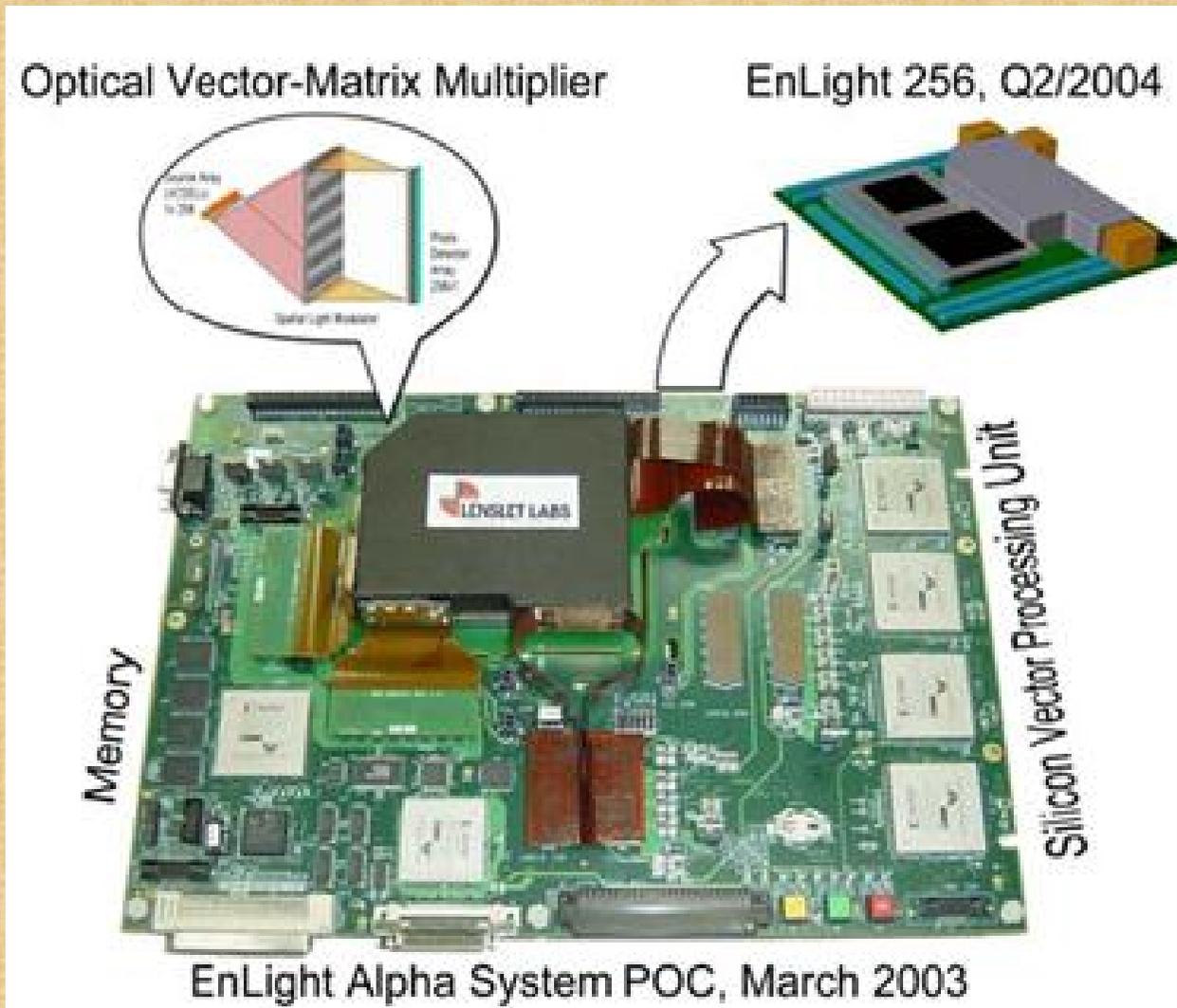
- Многослойные транзисторы

- Архитектура процессора

- Квантовый компьютер

Оптический компьютер !

Первый оптический коммерческий процессор EnLight 256



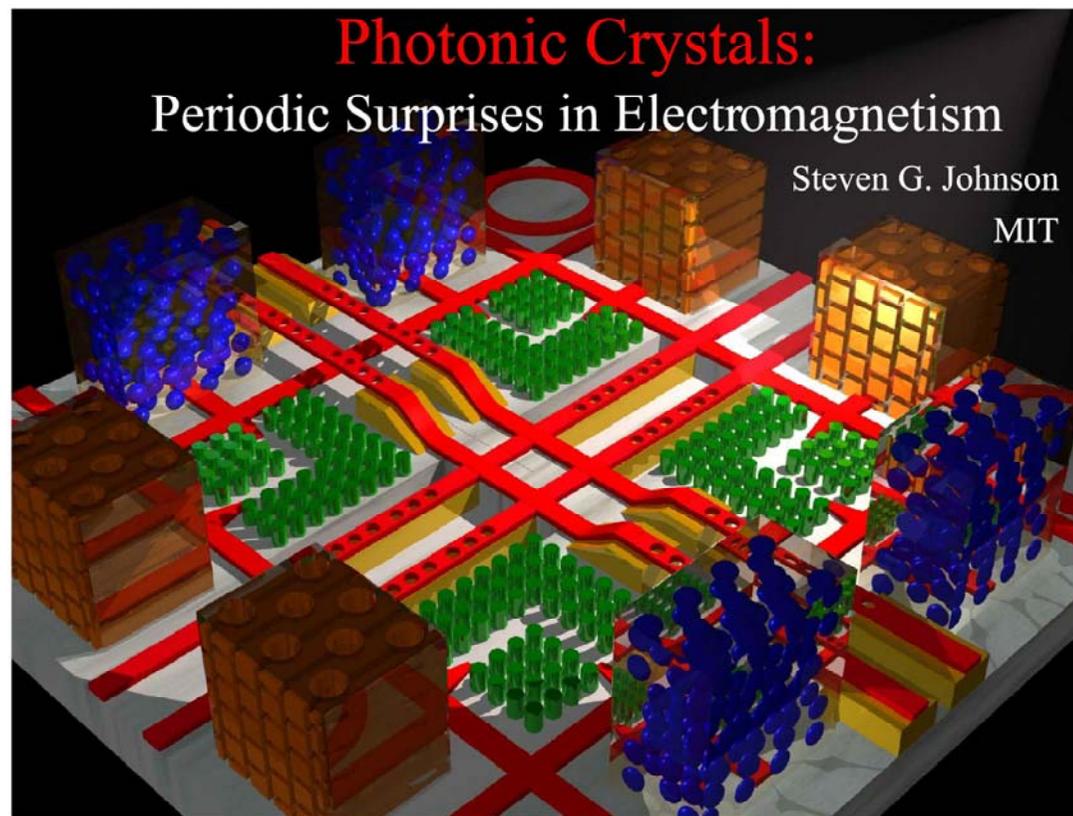


Рис.5. *Иллюстративное изображение интегральной оптической микросхемы. Оптические транзисторы, сделанные на основе трехмерных фотонных кристаллов соединены между собой при помощи оптических волноводов, выполненных на основе двумерных фотонных кристаллов. Сигнал между различными элементами схемы передается при помощи света. Автор рисунка - Dr Steven Johnson, Массачусетский Технологический Институт, США*

История развития электронной вычислительной техники.

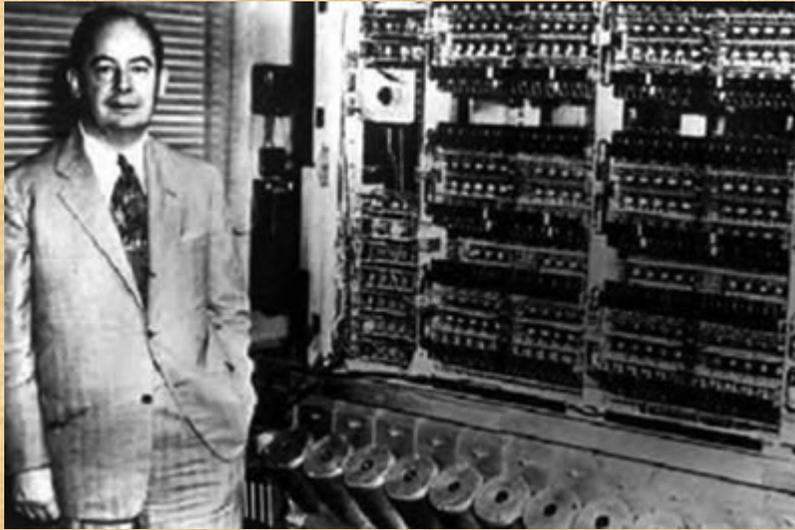


Рис.2. Знаменитый математик Джон фон Нейман, стоящий рядом с одной из первых ЭВМ (EDVAC) , созданной в 1951 году [2].

ПЕРВЫЕ УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ЭВМ

1) **ENIAC** (1946 г. , США, Дж. Моучли и Дж. Эккерт) и **EDVAC** (1951 г., США, разработан командой инженеров и учёных во главе Джоном Преспером Экертом и Джоном Уильямом Мокли при активной помощи математиков фон Неймана, Германа Голдстайна и Гарри Хаски.) :

ENIAC:

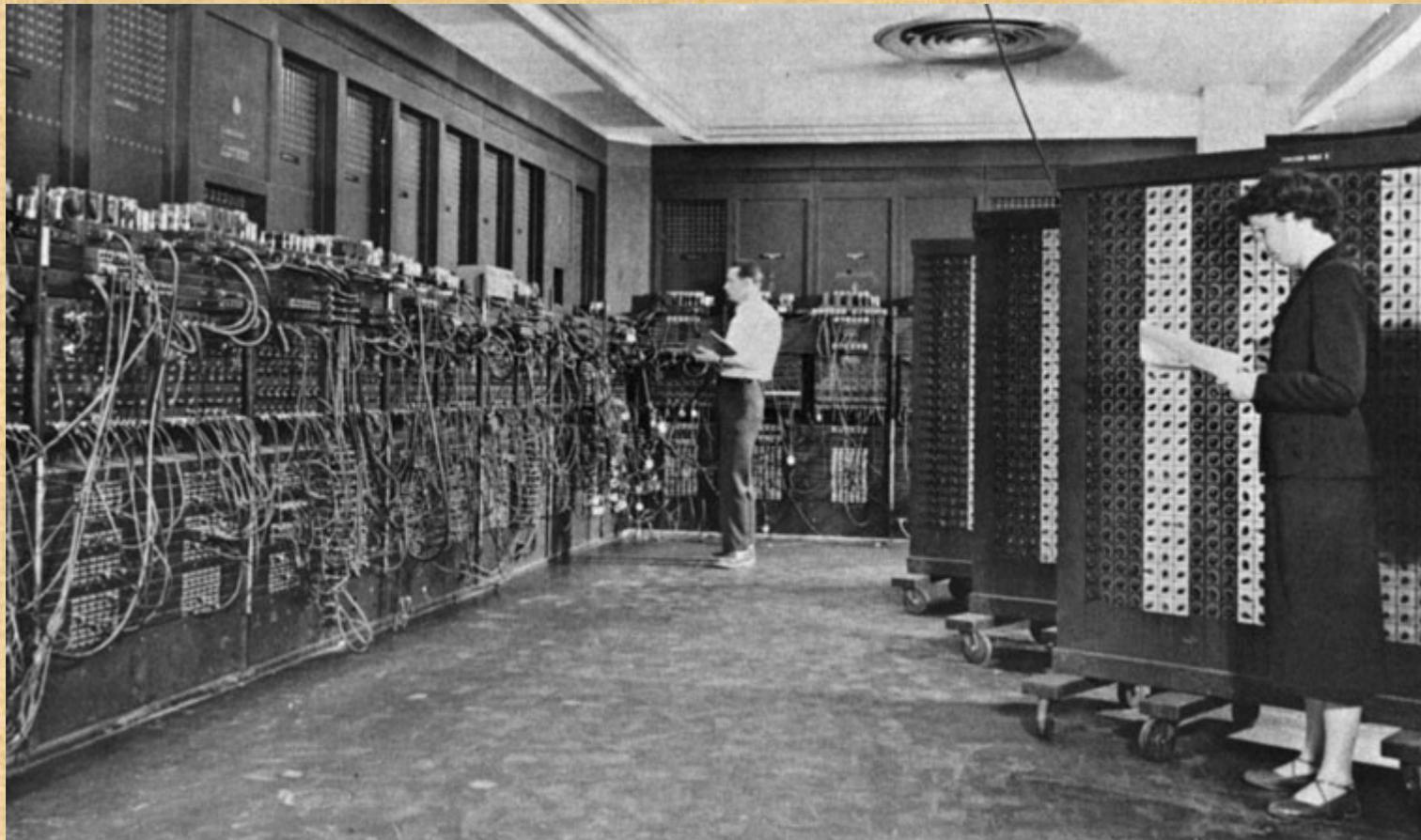
- содержала **18 тыс.** электронных вакуумных ламп;
- весила **30 тонн**;
- занимала площадь **200 м²**;

EDVAC (*Electronic Discrete Variable Automatic Computer*) - компьютер на двоичной основе



Компьютер состоял из 3563 электровакuumных ламп 19 различных типов, 8000 диодов, примерно 5500 конденсаторов, 12000 резисторов и потреблял 50 кВт энергии. Занимаемая площадь — 45,5 м², масса — 7850 кг. Полный состав обслуживающего персонала — 30 человек на каждую 8-часовую смену.

Фотография первой универсальной ЭВМ



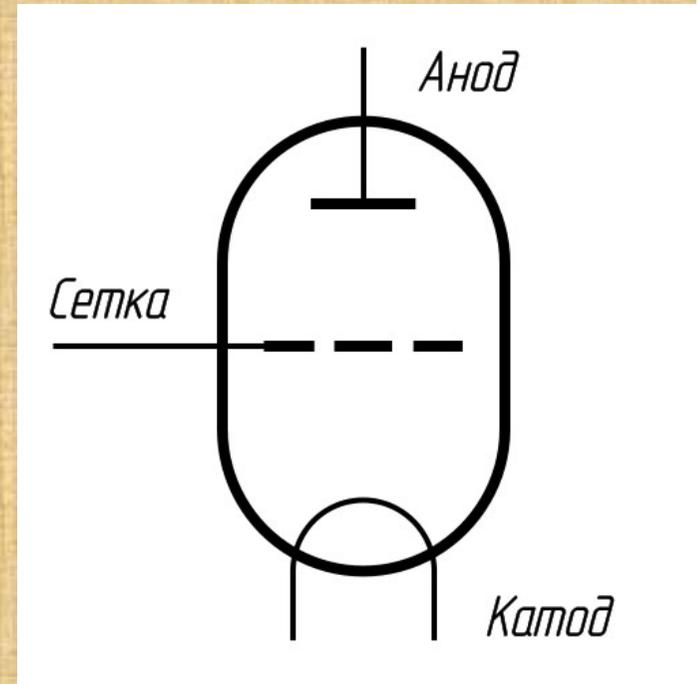
Какие задачи решались при помощи первых ЭВМ ?

- С февраля 1946 года ENIAC участвовал в решении задач секретного характера, связанных с созданием водородной бомбы, Первую задачу, которую существующие вычислительные машины решали за 40 часов, ENIAC вычислял за 20 секунд(!).
- На ЭНИАКе весной 1950 года был произведён первый успешный численный прогноз погоды
- Выход из строя одной лампы, одного конденсатора или резистора означал остановку работы всей машины, всего существовало 1,8 миллиарда различных вариантов отказа в каждую секунд
- Так инженеры добились того, чтобы ЭНИАК работал минимум 20 часов между поломками — не так много по нынешним меркам, но за каждые 20 часов работы ЭНИАК выполнял месячный объём работы механических вычислителей.

Электронная вакуумная лампа



Фотография

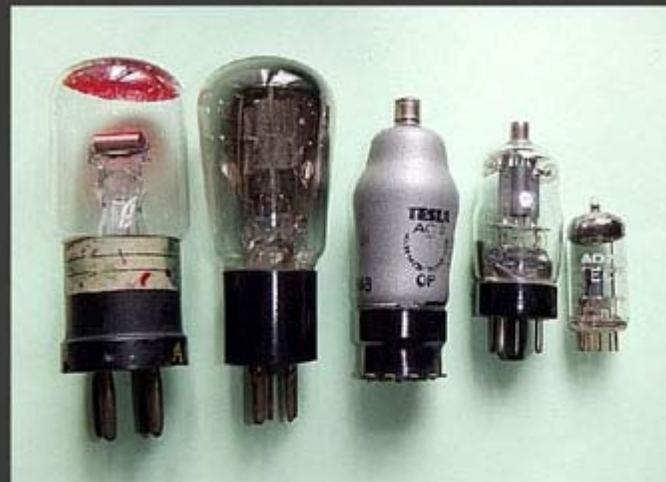


Схема

Электронные вакуумные лампы



Диоды



Триоды

Характеристики ЭВМ первого поколения

Поколения ЭВМ	I
Годы применения	1946-1958
Элементная база	Эл. лампа, реле
Количество ЭВМ в мире (шт.)	Десятки
Быстродействие (операций в секунду)	До 10^5
Объем оперативной памяти	До 64 Кб
Характерные типы ЭВМ, поколения	-
Типичные модели поколения	EDSAC, ENIAC, UNIVAC, БЭСМ
Носитель информации	Перфокарта, перфолента
Характерное программное обеспечение	Коды, автокоды, ассемблеры

Не имеет отношения к компьютерам, но...

- Некоторые современные (дорогие) акустические системы помимо интегральных схем («оцифрованного звука») используют усилители на лампах:



- 1. Что такое интегральная микросхема?**
- 2. Когда и кем была создана первая интегральная микросхема?**

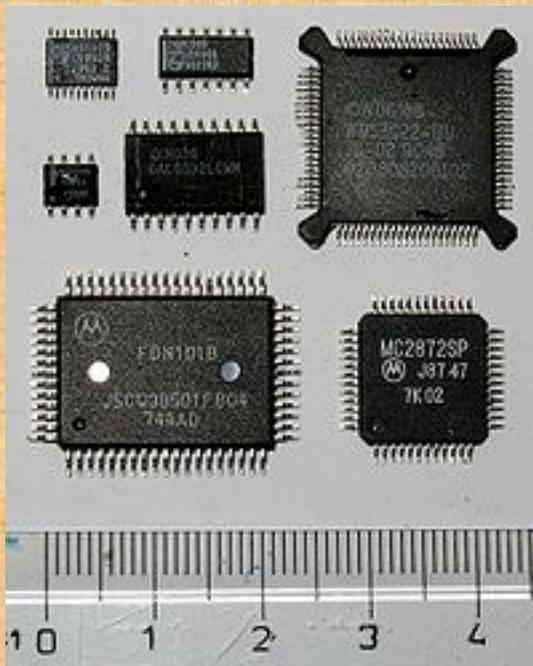
Изобретение Интегральных Микросхем

в 1958 году!

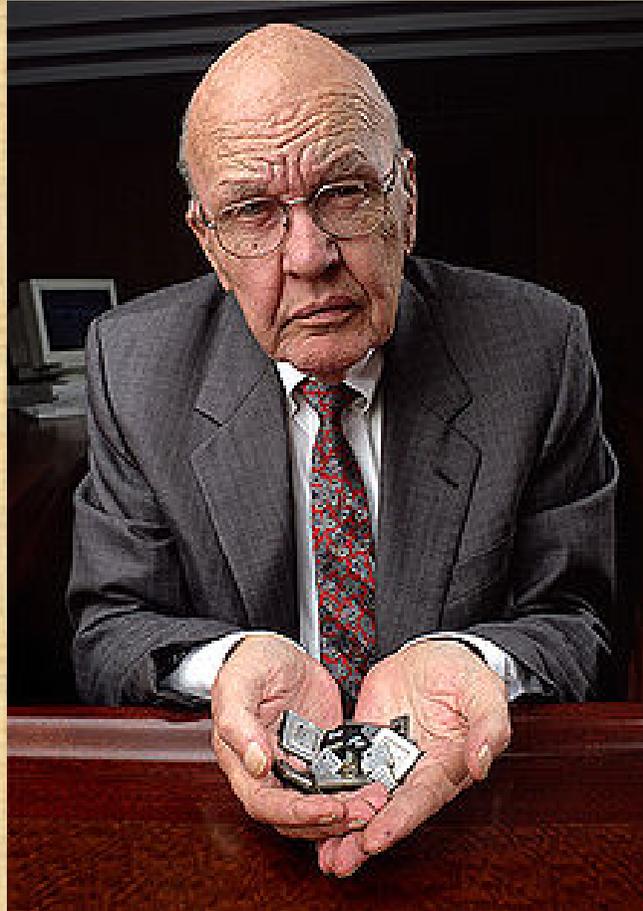
Джек Килби (Kilby, Jack Saint-Clair, 1923–2005) и Роберт Нойс (Robert Noyce, 1927–90) – независимо друг от друга (оба в США)

Идея интегральной микросхемы

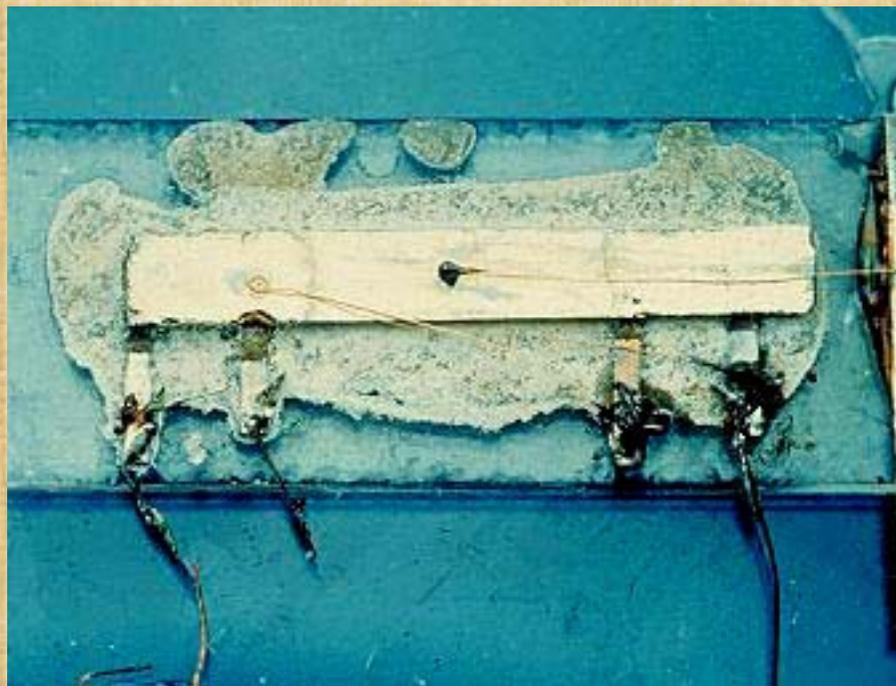
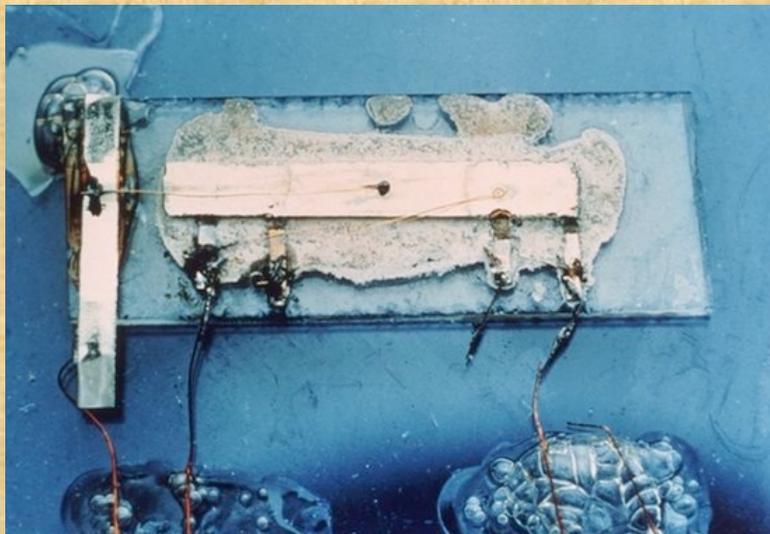
состоит в том, что различные элементы схемы, такие как транзисторы, диоды, резисторы и другие размещаются не на отдельных платах, а совмещаются (создаются) в одном отдельном полупроводниковом монокристалле. Как правило, это кристаллы германия или кремния.



← Рис.3. Интегральные полупроводниковые микросхемы, используемые для создания современных портативных и быстродействующих компьютеров.



КИЛБИ, ДЖЕК СЕН-КЛЕР (Kilby, Jack Saint-Clair) (1923–2005), американский инженер. В 2000 году Джек Килби был удостоен Нобелевской премии по физике совместно с Ж.И.Алферовым (Россия) и Г.Крёмером (США) – «за достижения в электронике» (Алферов и Крёмер – за разработку гетероструктур и полупроводниковых приборов на их основе, а Килби – за изобретение и воплощение в 1958 году интегральной схемы).



Первая интегральная схема Килби (1958 г.): германиевая полоска 7/16 на 1/16 дюйма (т.е. примерно 11 на 1,5 мм). Она содержала один-единственный транзистор, несколько резисторов и конденсатор.

В 1965 в интегральной микросхеме фирмы Fairchild (предшественник Intel) – 64 транзистора;

Процессоры PENTIUM 4 содержат несколько сотен миллионов транзисторов.

Процессор в смартфоне iPhone 6 (2014 г.) имеет примерно 2 млрд транзисторов

18-ядерный серверный процессор Intel Xeon имеет около 5,5 млрд транзисторов

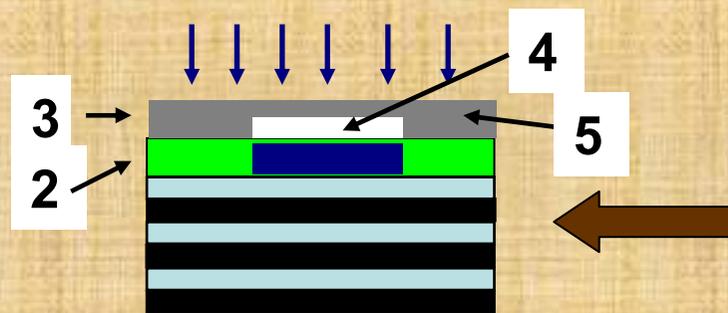
**5.Примеры современных технологий для
создания полупроводниковых
интегральных
схем.**

**6. Возможности современных
полупроводниковых технологий,
используемых для
изготовления полупроводниковых
интегральных схем.**

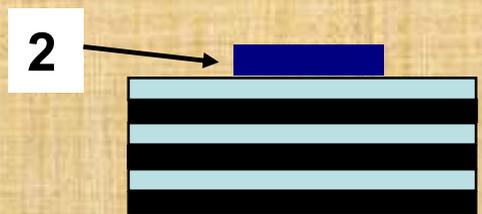
МЕТОД ЛИТОГРАФИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ



i) На поверхность материала 1 (полупроводник, диэлектрик, металл или сверхпроводник) наносится тонкий слой фоторезиста (полимера) 2.

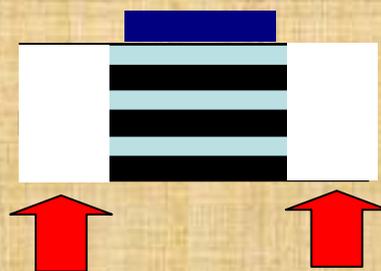


ii) Для создания рельефа фоторезист (который устойчив к агрессивным химическим, электрохимическим и другим воздействиям и предназначен для создания защитного рельефа требуемой конфигурации) освещают через фотошаблон – пластину или пленку 3, на поверхности которой предварительно создан контрастный рисунок, состоящий из прозрачных 4 и непрозрачных 5 участков.



iii) В результате действия света (↓↓↓↓) и последующего проявления в слое фоторезиста на поверхности материала 1 формируется микрорельеф (на рисунке показан негативный микро-рельеф маска).

Травление незащищенных фоторезистом участков



Методы литографии для создания интегральных микросхем

Оптическая литография. Используется УФ излучение. Наиболее дешевая и распространенная современная технология.

Разрешающая способность $\delta x \approx 2\lambda$ (контактная печать).

Сейчас – используется глубокое ультрафиолетовое излучение с длиной волны 248 нм. Минимальная ширина проводников 0,1 мкм, В перспективе – возможно использование длины волны 13 нм (Extreme Ultra Violet). Печать линий гораздо меньшей ширины - до 0,03 мкм.

Электронная литография. Используется электронный пучок, длина волны 1 - 0,001 нм. Сложное оборудование.

Рентгеновская литография. Используется рентгеновское излучение, длина волны 0.1 -1 нм . Сложное оборудование.

Ионная литография; длина волны 0,05 - 0,1 нм.

**Фотонные кристаллы:
успехи и достижения
современных
нанотехнологий**

Вводная часть

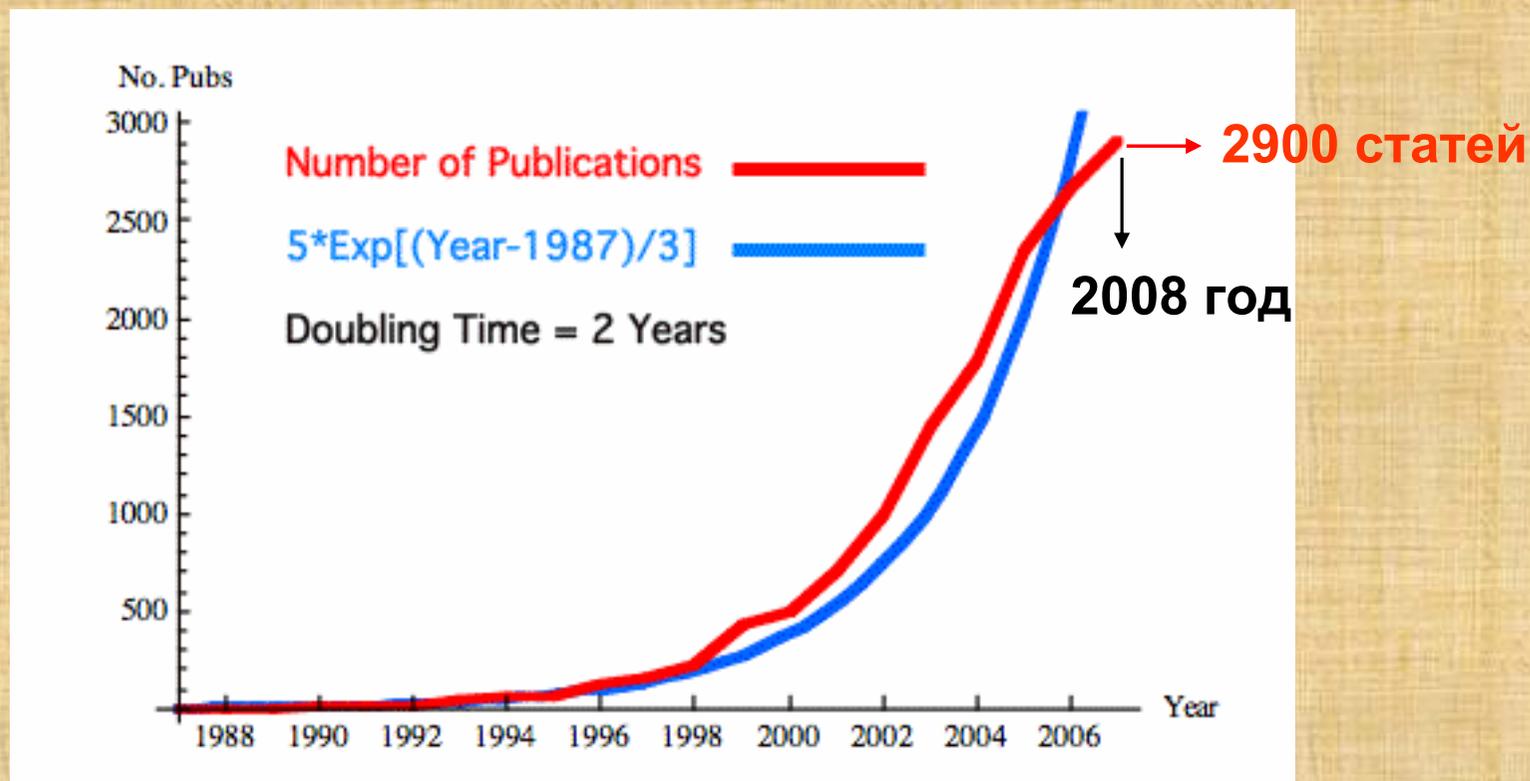


Рис.1. Рост числа публикаций, посвященных исследованию фотонных кристаллов, со временем. Данные собраны Dr. [Jonathan P. Dowling](http://phys.lsu.edu/~jdowling/pbgbib.html) и представлены на сайте физического факультета университета штата Луизиана (США)
(URL: <http://phys.lsu.edu/~jdowling/pbgbib.html>).

- 11. Что такое фотонные кристаллы?**
- 12. Примеры фотонных кристаллов.**
- 13. Что такое фотонная запрещенная зона?**
- 14. Почему при отражении света от фотонного кристалла наблюдается эффект фотонной запрещенной зоны?**

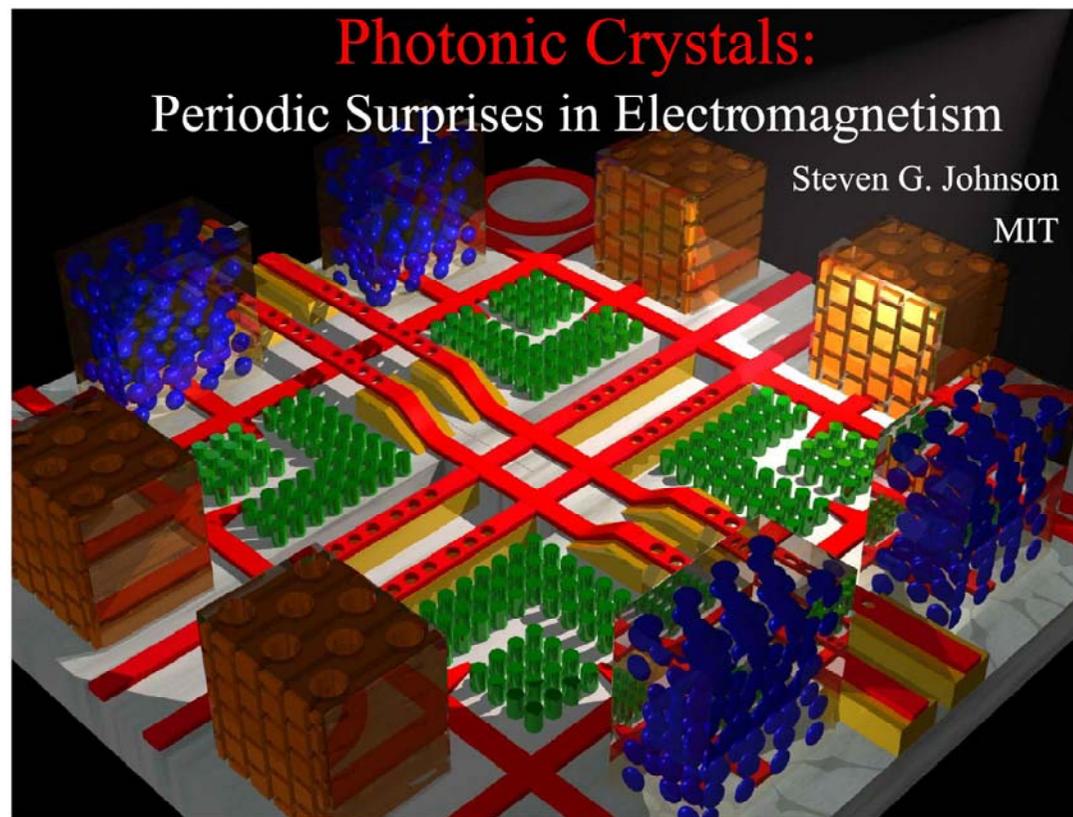


Рис.5. Иллюстративное изображение интегральной оптической микросхемы. Оптические транзисторы, сделанные на основе трехмерных фотонных кристаллов соединены между собой при помощи оптических волноводов, выполненных на основе двумерных фотонных кристаллов. Сигнал между различными элементами схемы передается при помощи света. Автор рисунка - Dr Steven Johnson, Массачусетский Технологический Институт, США

Определение 1:

Фотонные кристаллы — это искусственные, созданные при помощи современных (нано)технологий объекты, характеризующиеся периодическим пространственным изменением (вариацией) диэлектрической проницаемости (показателя преломления).

Период вариации сравним с длиной волны видимого света $400 \text{ нм} \leq \lambda \leq 760 \text{ нм}$ или ближнего инфракрасного диапазона $1 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 1.5 \text{ мкм}$.

Следствием этой периодичности (трансляционной симметрии) является возникновение угловой или спектральной области полного отражения, в пределах которой свет эффективно отражается от фотонного кристалла (коэффициент отражения может достигать почти 100%).

Определение 2:

Эта область получила название **фотонной запрещенной зоны** (*photonic band gap*).

РАЗЛИЧАЮТ ОДНОМЕРНЫЕ (1D), ДВУМЕРНЫЕ (2D) И ТРЕХМЕРНЫЕ (3D) ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ

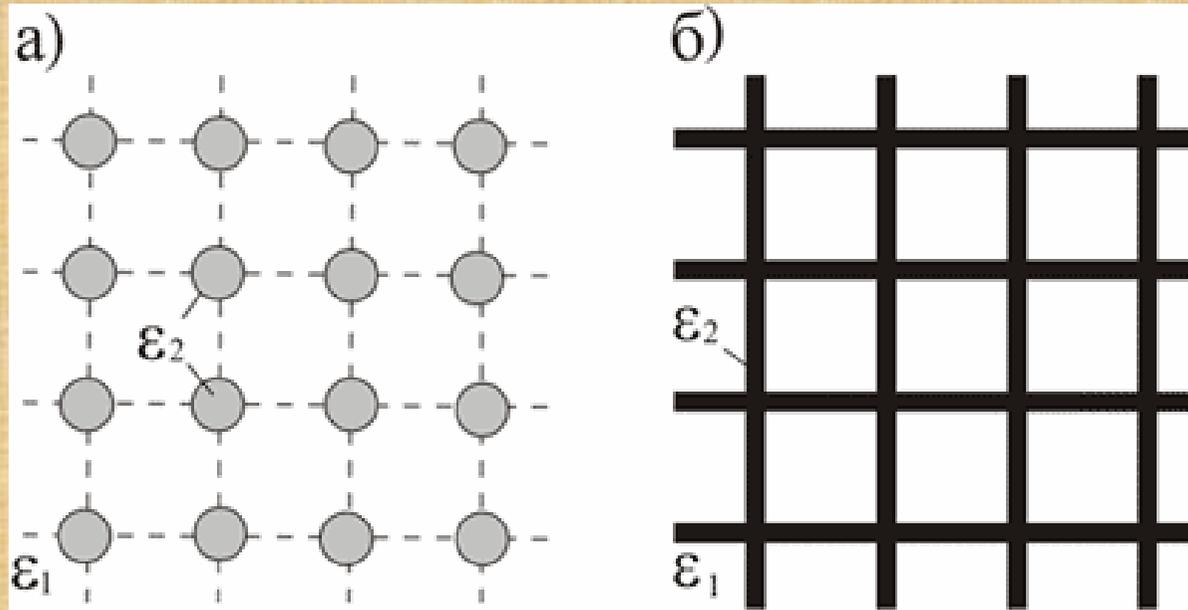
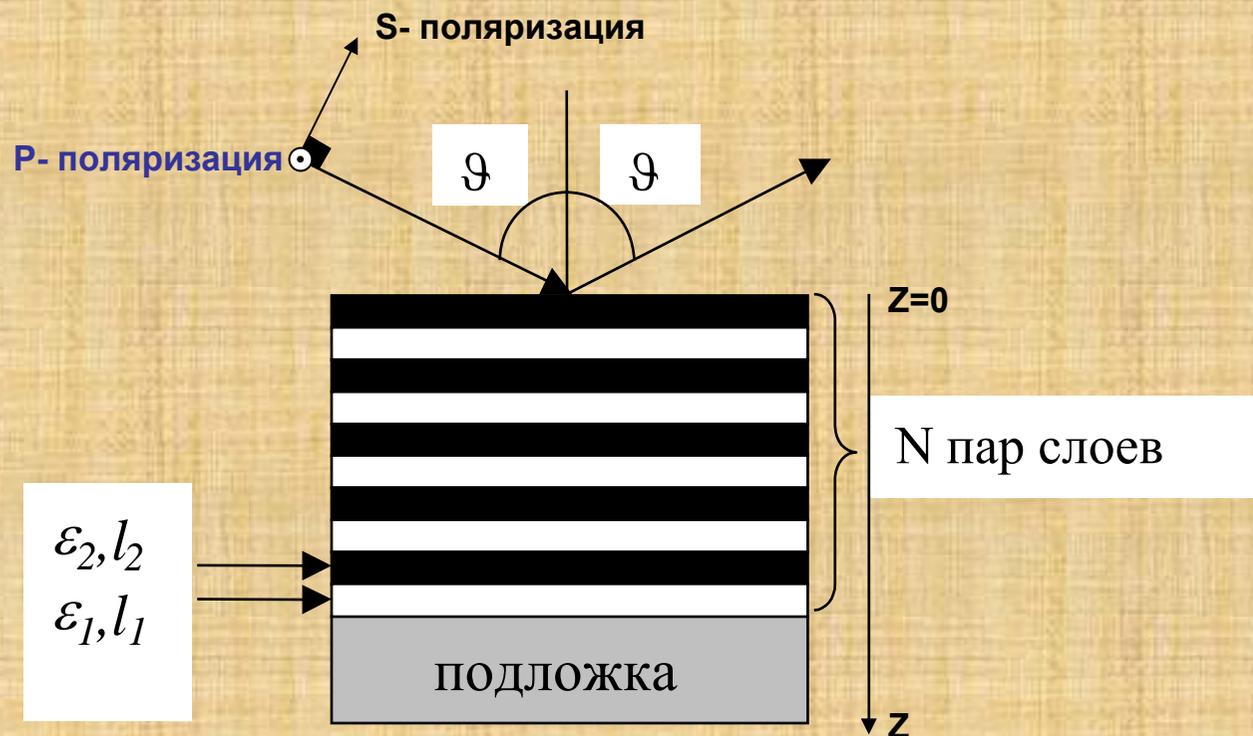


Рис.6. Условные изображения моделей двух типов трехмерных фотонных кристаллов, созданных из материалов с диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 .



Схематическое изображение ОДНОМЕРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА - периодической многослойной структуры, содержащей N пар слоев. Каждая пара состоит из слоев с толщинами l_1 и l_2 , период $T = l_1 + l_2$. Диэлектрические постоянные материалов - ϵ_1 и ϵ_2 , показатели преломления - $n_{1,2} = \sqrt{\epsilon_{1,2}}$.

Примеры: $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2$; $\text{TiO}_2 / \text{SiO}_2$; $\text{GaAs} / \text{AlAs}$; $\text{SiO}_2 / \text{GaAs}$; $\text{ZnS} / \text{SrF}_2$.

Отражение света от фотонного кристалла

Условие брэгговского отражения порядка m для **одномерного** фотонного кристалла имеет вид :

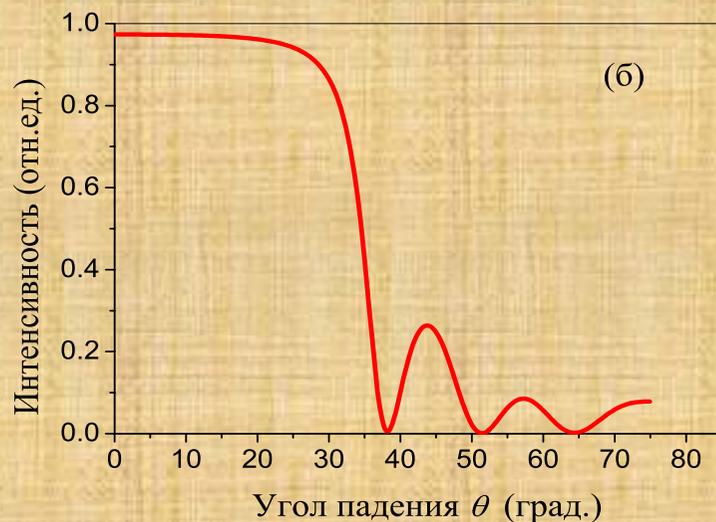
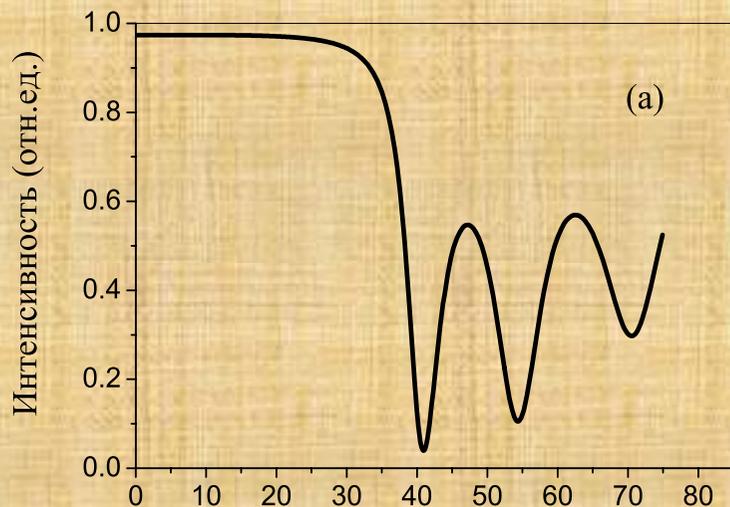
$$2k_1l_1 + 2k_2l_2 = 2\pi m, \quad m = 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

m - НОМЕР ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ;

$k_{1,2} = k_0 \sqrt{(n_{1,2})^2 - \sin^2 \vartheta}$ - проекции волнового вектора в среде 1 и 2
вдоль нормали к входной поверхности
структуры ;

$k_0 = 2\pi / \lambda$; λ - длина волны падающего на кристалл света.

Условие (1) означает, что набег фазы при отражении волны от одного периода фотонного кристалла кратен 2π . Поэтому выполнение этого условия приводит к появлению интерференционного брэгговского, или дифракционного, максимума.



Если толщины слоев удовлетворяют условию

$$l_{1,2} = 3\lambda / (4n_{1,2})$$

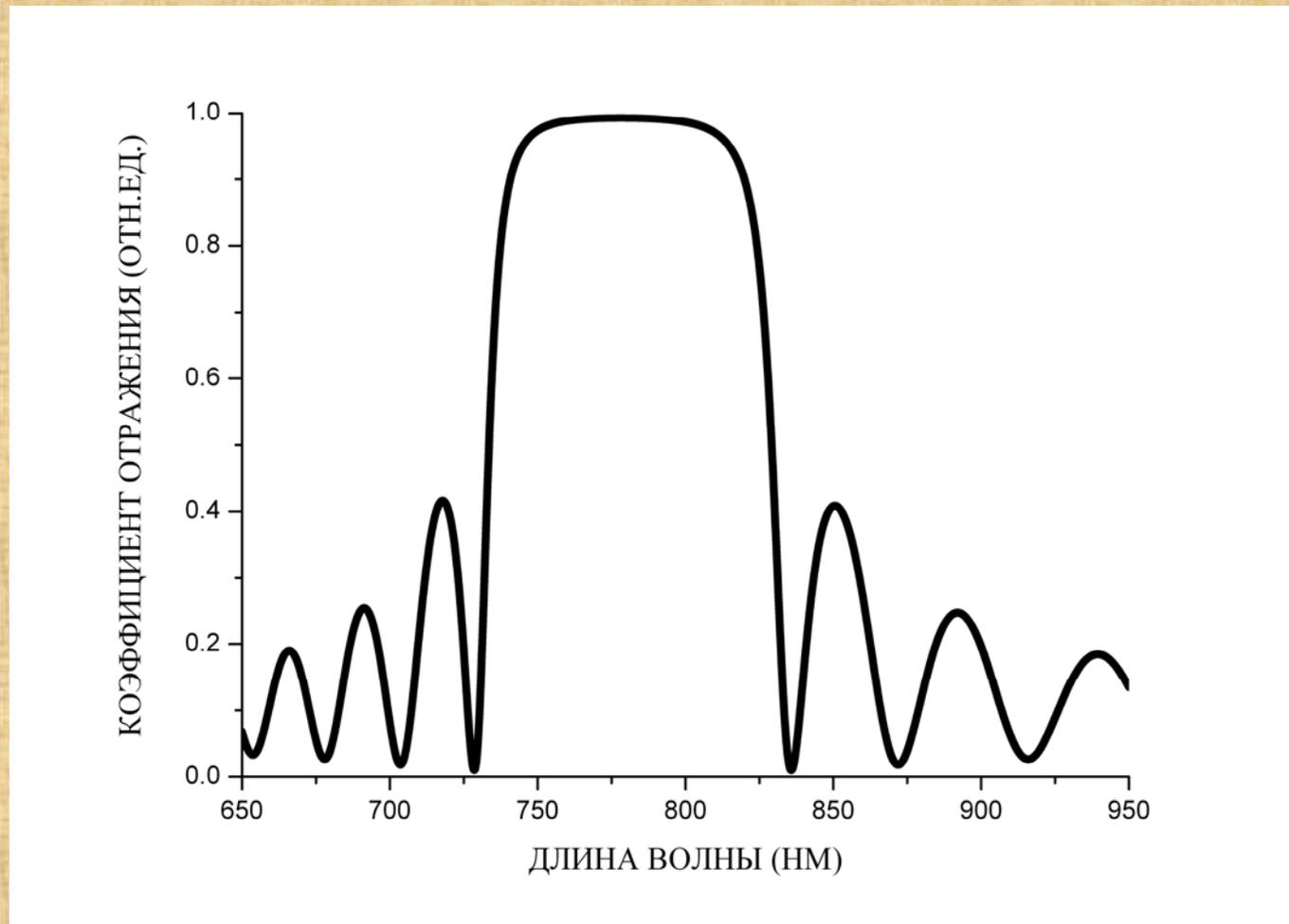
($n_{1,2}$ - показатели преломления слоев), то нетрудно убедиться, что при нормальном падении ($\vartheta=0$) условие

$$2k_1l_1 + 2k_2l_2 = 2\pi m, \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

будет выполнено для брэгговского максимума с номером $m=3$. Для длины волны $\lambda=780$ нм (красный свет) показатели преломления $n_1=2.29$ (ZnS), $n_2=1.52$ (SrF₂) и значения толщин слоев - $l_1 \approx 255$ нм, $l_2 \approx 385$ нм. Период фотонного кристалла $T=640$ нм, а его толщина $L=7 \times 640$ нм = 4480 нм ≈ 4.5 мкм.

Рис.8. Рассчитанные кривые угловой зависимости интенсивности света ($\lambda=780$ нм), отраженного от фотонного кристалла ZnS/SrF₂. (Поляризация падающей волны - S (а) и P (б).)

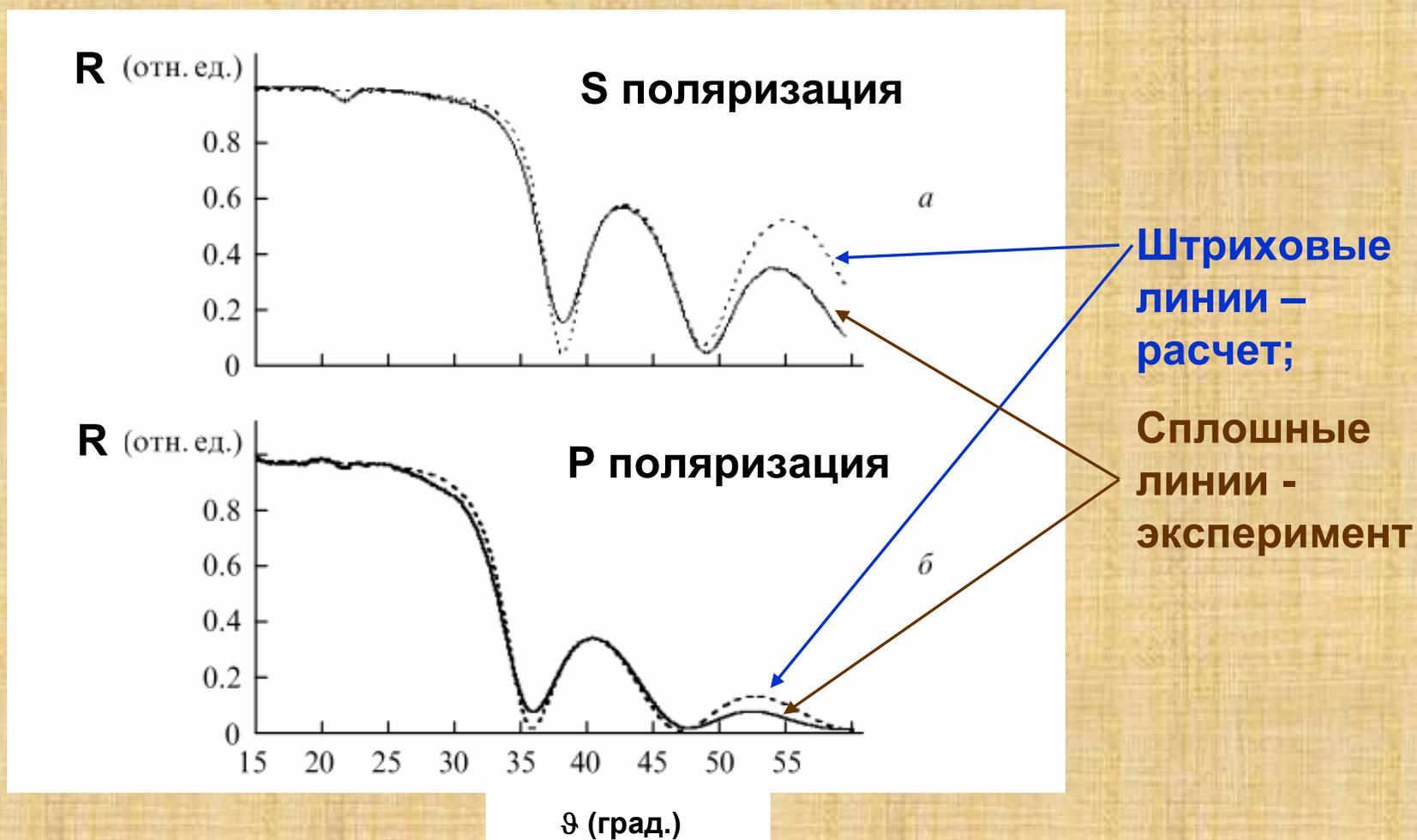
- ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТРАЖЕННОГО ОТ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА СВЕТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ПАДАЮЩЕЙ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ.
- УГОЛ ПАДЕНИЯ ВОЛНЫ НА КРИСТАЛЛ ФИКСИРОВАННЫЙ И РАВЕН 0 ГРАДУСОВ - ПАДЕНИЕ ПО НОРМАЛИ К ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛА



1D фотонный кристалл на основе ZnS/SrF_2

Сравнение расчета и эксперимента

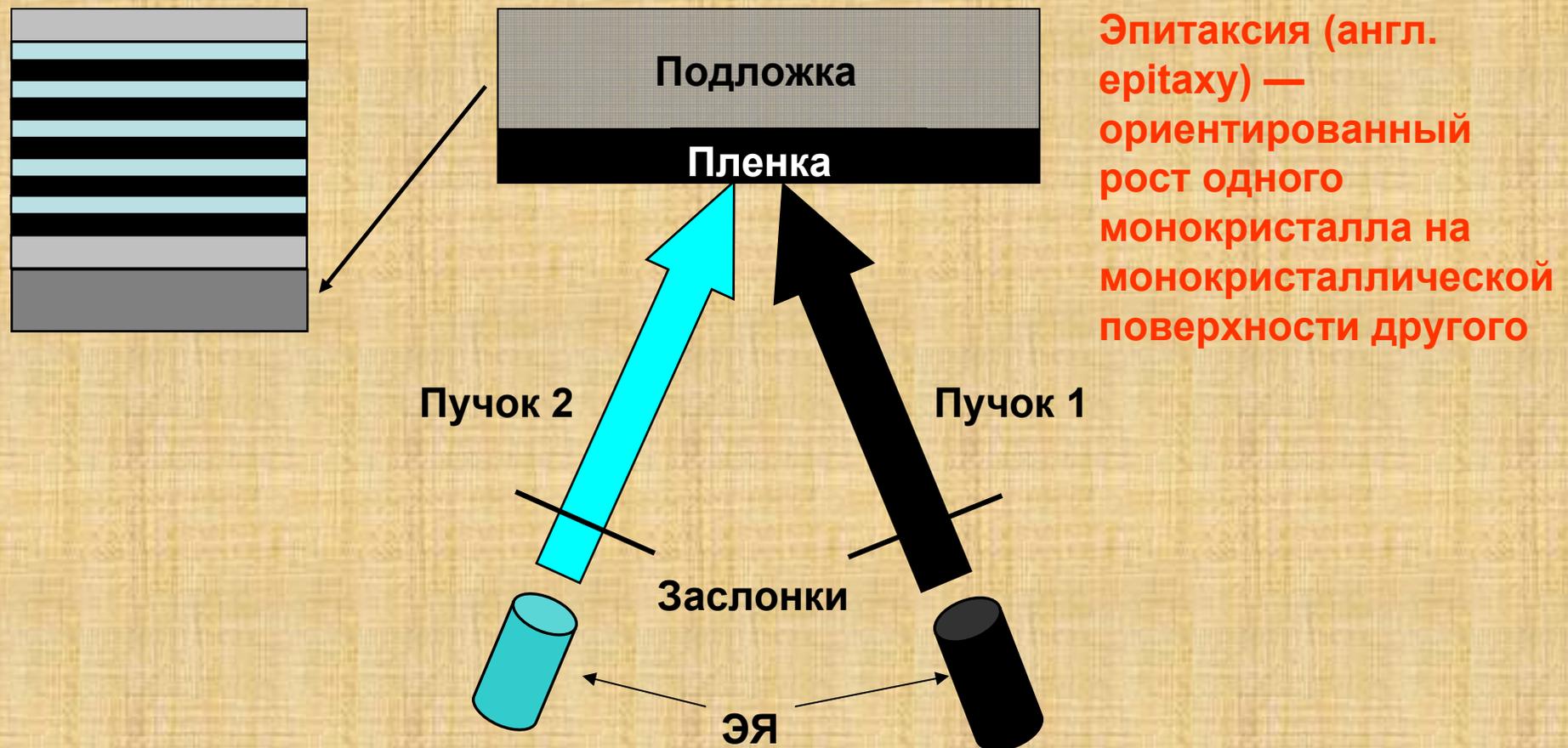
1D фотонный кристалл на основе ZnS/SrF_2



- 12. Примеры фотонных кристаллов.**
- 16. Примеры нанотехнологий, которые используются для создания фотонных кристаллов.**

ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

МЕТОД МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ



Схематическое изображение установки для напыления многослойных пленок методом молекулярно-лучевой эпитаксии. ЭЯ- эффузионные ячейки, в которых находится вещество, предназначенное к испарению; З - заслонки, при помощи которых можно быстро менять поток вещества и создавать резкие межслойные границы в многослойных пленках. Атомные или молекулярные пучки смешиваются и конденсируются на подложке.

РАЗНОВИДНОСТИ МЕТОДА ЭПИТАКСИИ

- *Газофазное эпитаксиальное наращивание на подложке монокристаллических слоев полупроводниковых веществ осуществляется из металлоорганических соединений в реакторе при пониженном давлении.*

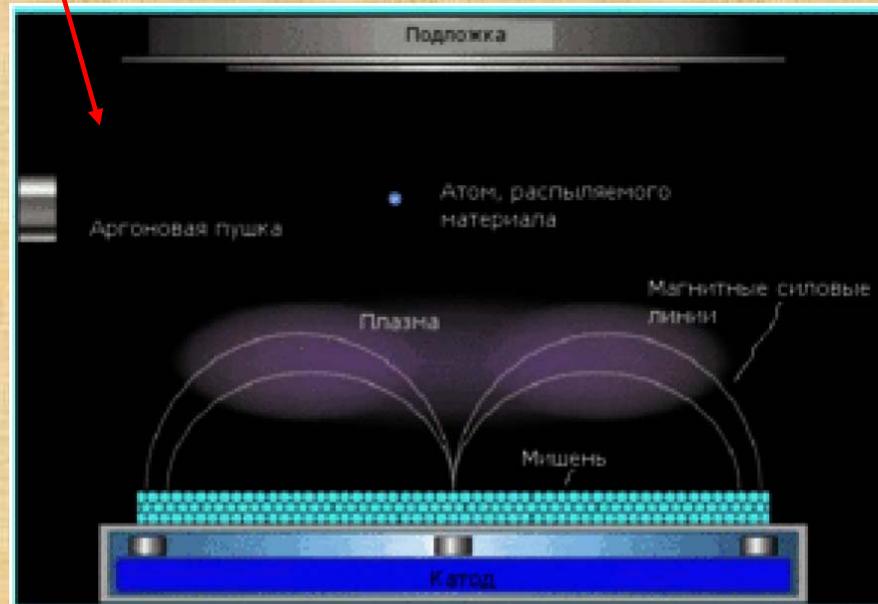
Газовая смесь ($\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$, $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$, $\text{Ga}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$, AsH_3) при высокой температуре пиролизически разлагается вблизи поверхности роста

- *Жидкофазная эпитаксия (сейчас используется редко): смесь из полупроводникового материала, легирующей примеси и металла-растворителя (Ga, Sn, Pb). Расплав наносится на поверхность подложки. После выдержки при максимальной температуре около 1000°C система медленно охлаждается и избыток полупроводника осаждается на подложку.*

ДРУГИЕ МЕТОДЫ НАПЫЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР

- Конденсация на подложке паров материала, полученных нагревом, испарением или распылением мишени.

- В зависимости от способа воздействия на мишень различают катодное и магнетронное распыление, индукционное, лазерное и электронно-лучевое испарение.



- Основные параметры — температура подложки (температура конденсации), скорость конденсации, степень разрежения и способ испарения (распыления).

ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

1D ФОТОННЫЙ КРИСТАЛЛ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

(ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ, РАЗМЕРЫ/ДИАМЕТРЫ ПОР МОГУТ БЫТЬ <2 НМ)

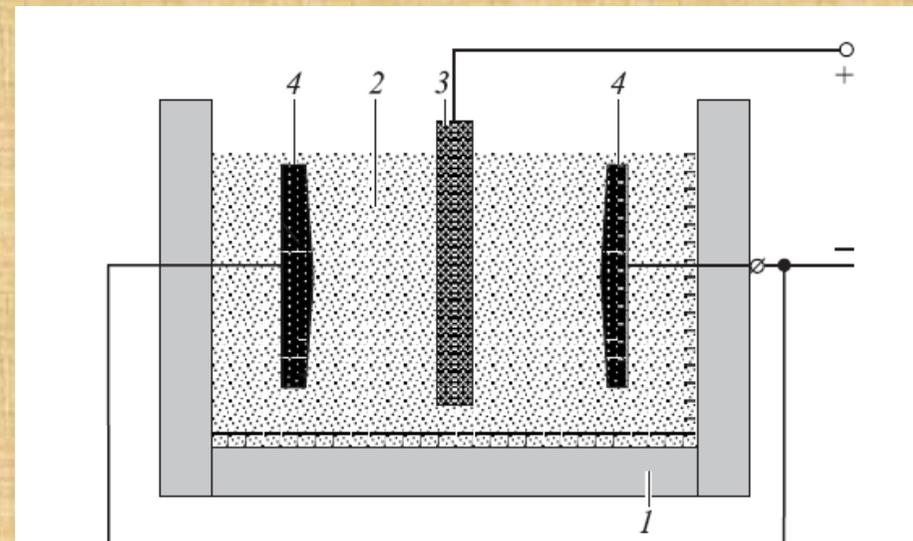
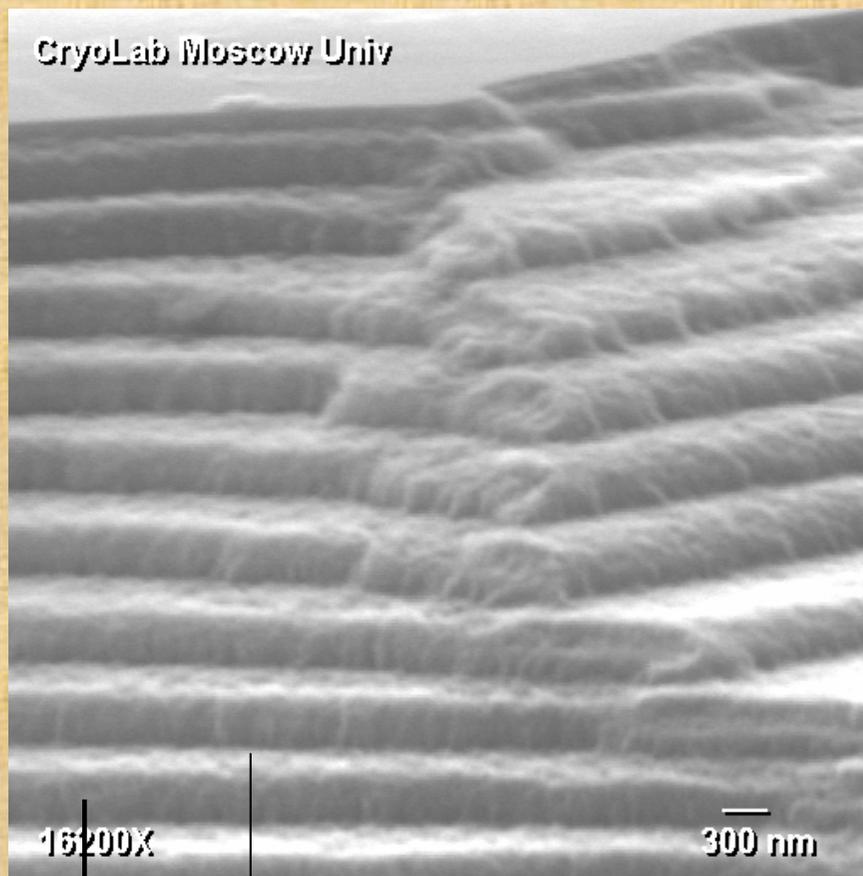


Рис. 1. Схема электрохимической ячейки для двухстороннего травления кремния: 1 — фторопластовый стакан, 2 — раствор HF-содержащего электролита, 3 — кремниевая пластина, 4 — платиновые электроды.

ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

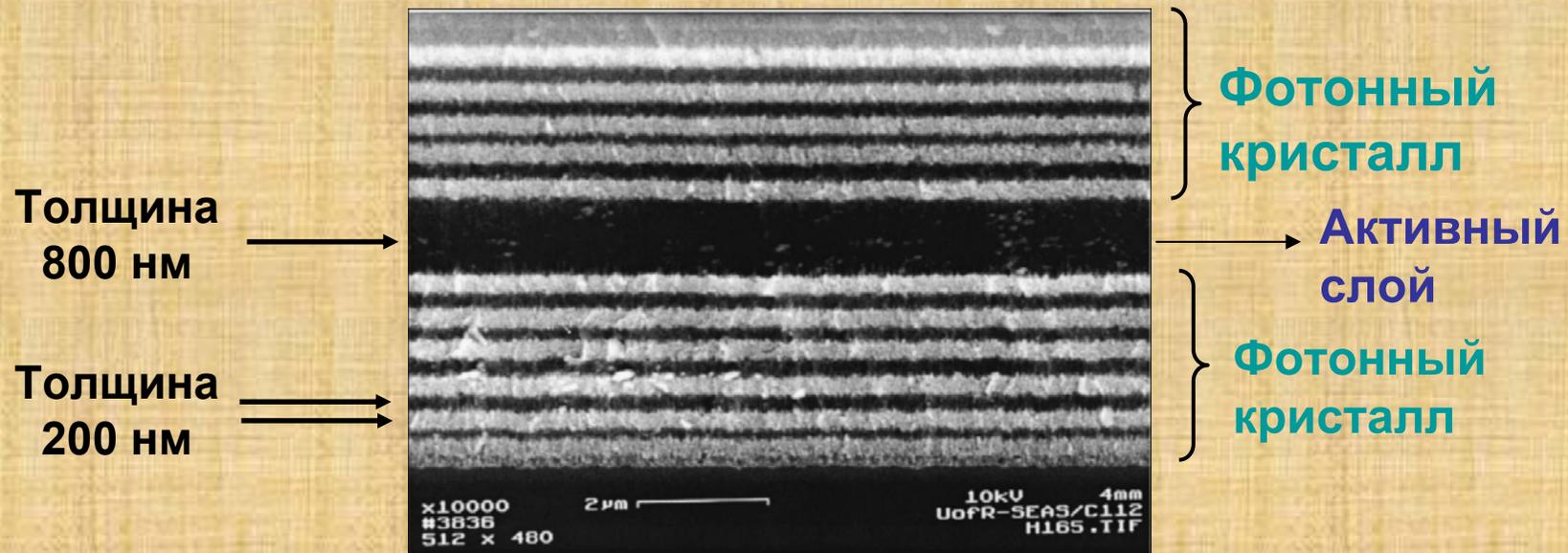
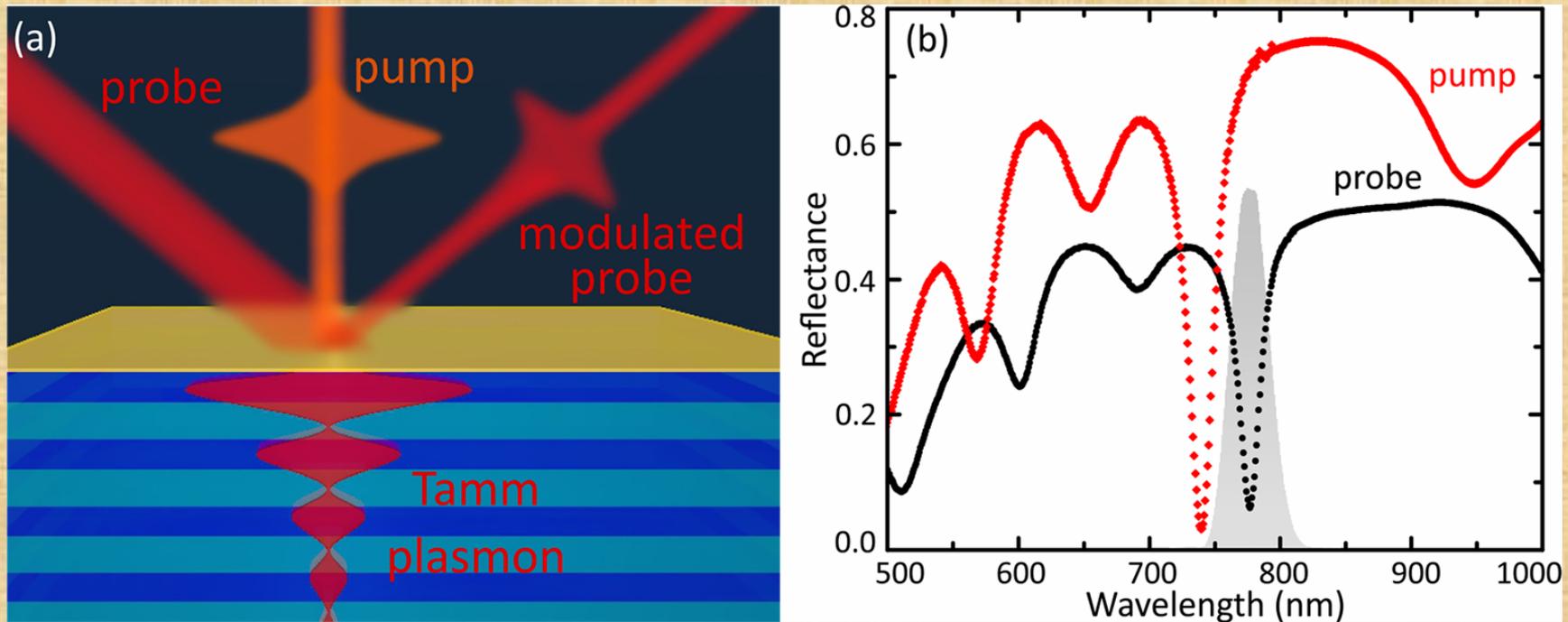


Рис.10. Электронномикроскопическое изображение микрорезонатора, созданного на основе одномерного фотонного кристалла, изготовленного из пористого кремния [14]. Изображение получено при помощи сканирующей электронной микроскопии. Микрорезонатор представляет собой активный слой (АС) пористого кремния (пористость 68%), помещенный между двумя фотонными кристаллами (ФК). Каждый фотонный кристалл состоит из шести пар слоев и слои имеют разную степень пористости 42% и 63% (на снимке это чередующиеся светлые и темные полосы). (опубликовано в APL, 2000 г.)

15. Как можно использовать фотонные кристаллы для управления оптическими сигналами?

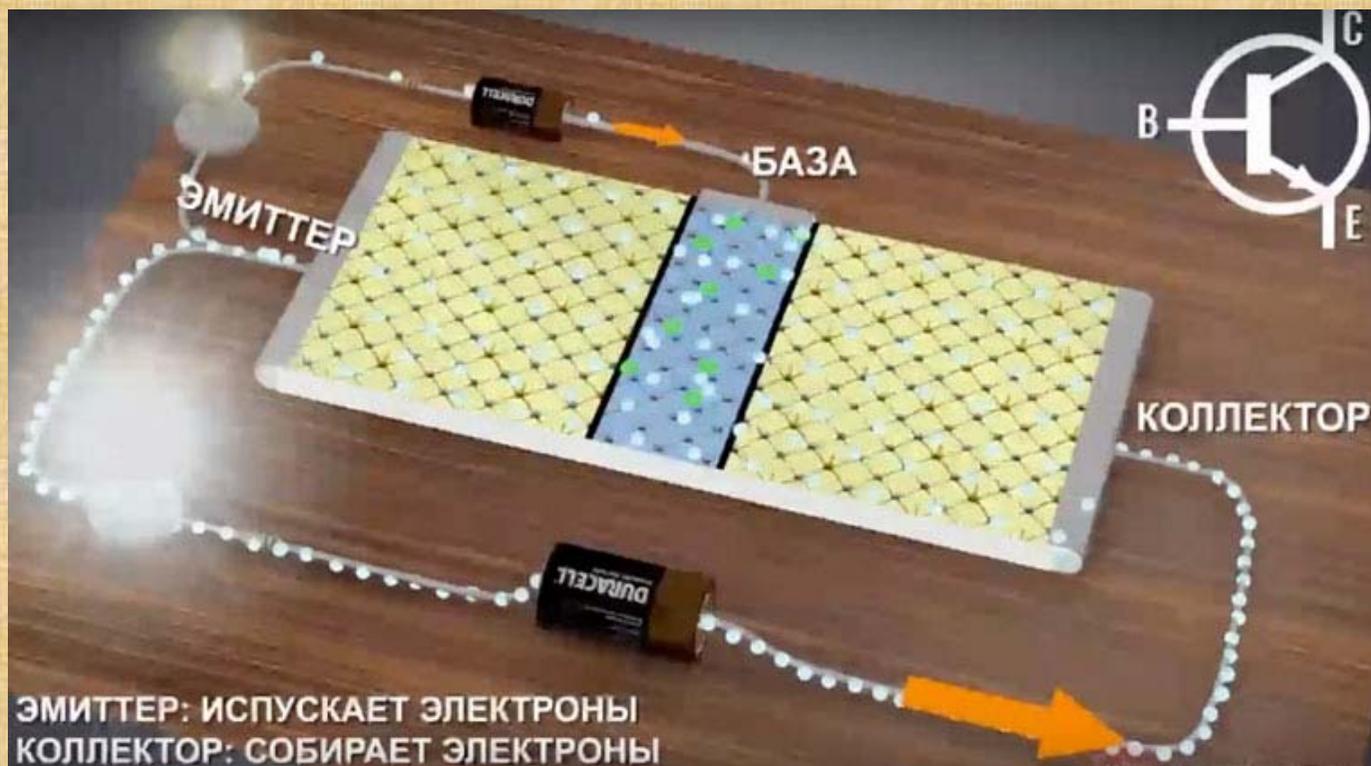
ОПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР И ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ НА ОСНОВЕ 1D ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА



1D фотонный кристалл: (подложка-кварцевое стекло)/ $[ZrO_2(110$
 $нм)/SiO_2(145 нм)] \times 6/ SiO_2(220 нм)/Au (30 нм)$

Время переключения ~ 150 fs

Транзистор – основной элемент современных полупроводниковых микросхем (чипов)



Схематическое изображение работы транзистора. Транзистор – это переключатель, который либо “не пропускает” электрический ток (закрытое состояние), либо “пропускает” электрический ток (открытое состояние).

Открытое состояние – логическая единица

Закрытое состояние – логический ноль

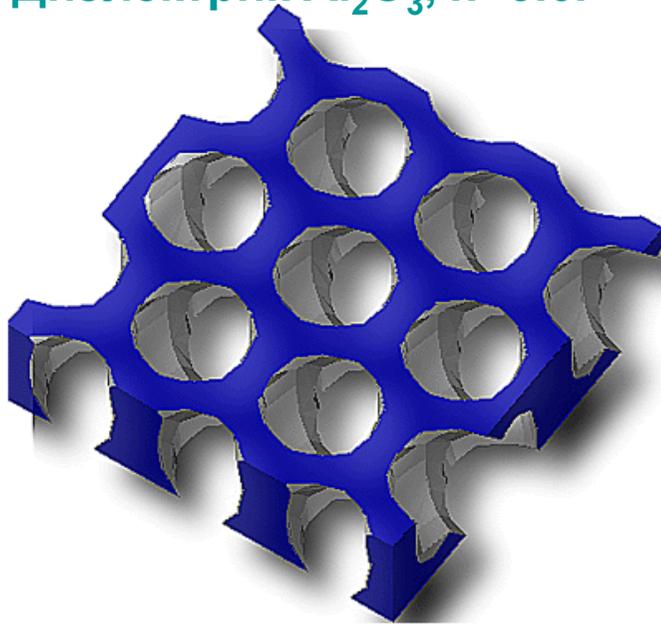
} 1 бит

12. Примеры фотонных кристаллов.

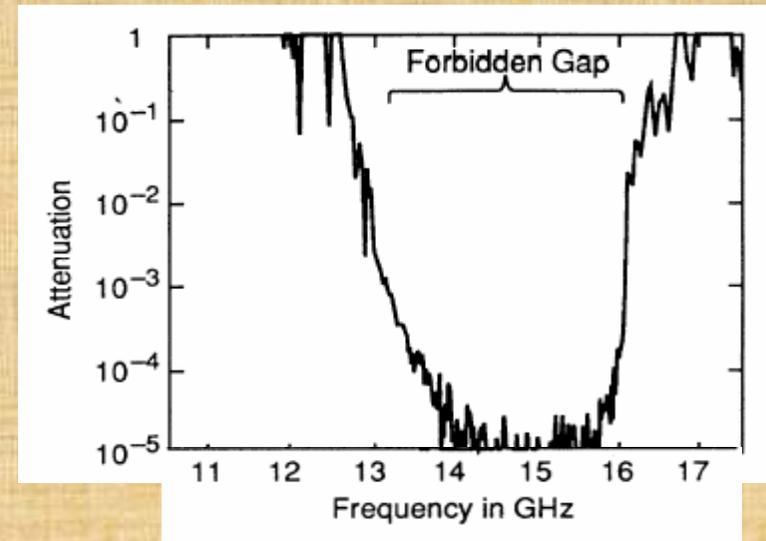
**16. Примеры нанотехнологий, которые
используются для создания
фотонных кристаллов.**

Технологии изготовления трехмерных фотонных кристаллов

Диэлектрик Al_2O_3 , $n=3.6$.



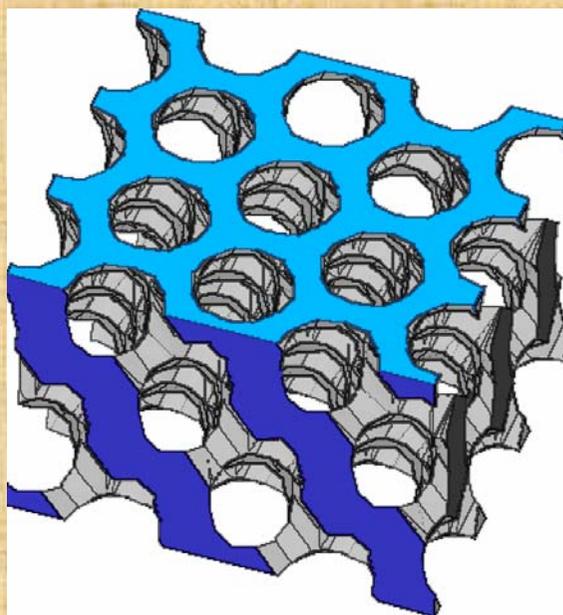
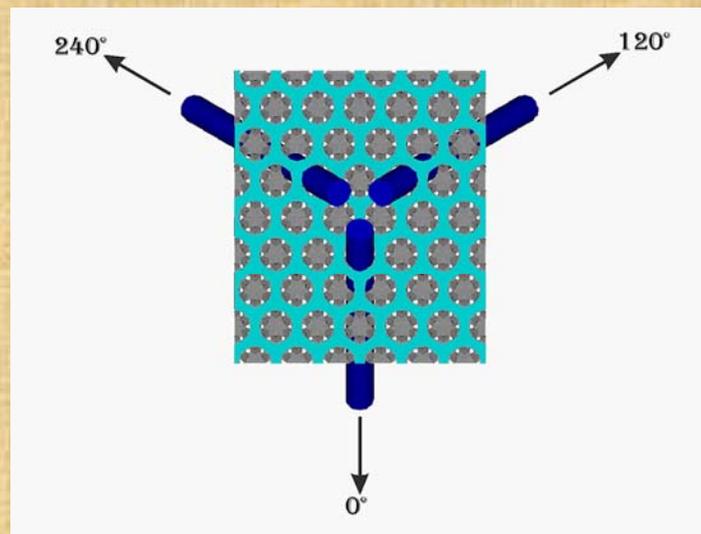
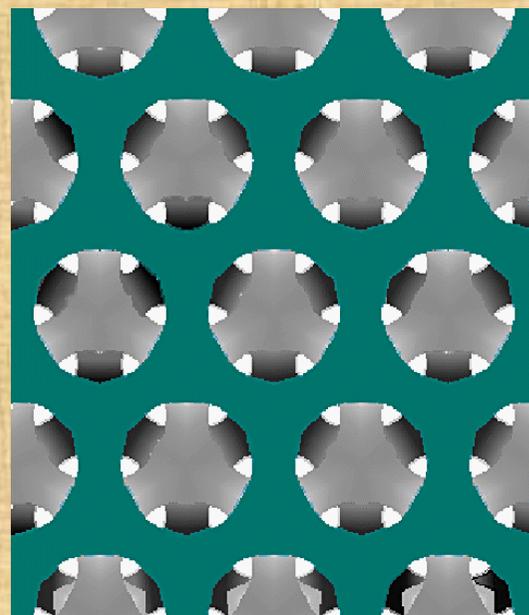
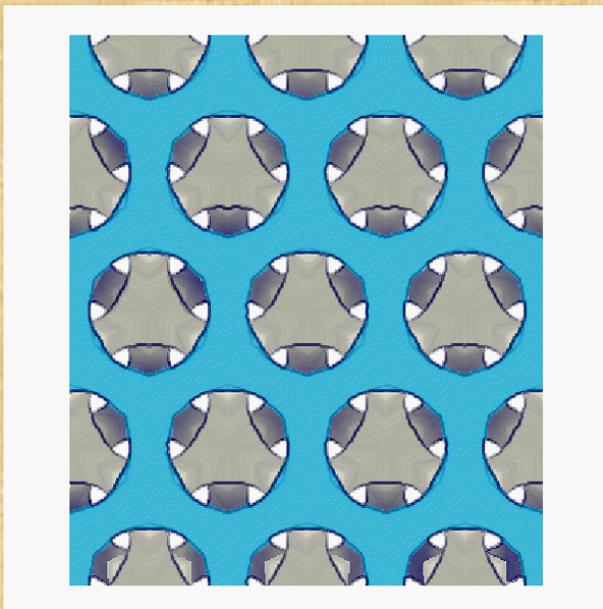
(a)



(б)

Рис.11. (а) Иллюстративное изображение трехмерного фотонного кристалла – яблоновита (Eli Yablonovitch, 1991,1987). Кристалл характеризуется ГЦК решеткой из "воздушных атомов"-сфер и характеризуется запрещенной зоной в СВЧ диапазоне. Диаметр отверстий (сфер) составляет 5.16 мм, период кристаллической решетки 11 мм. Размер кристалла –несколько сантиметров. Изображение находится на сайте: <http://www.ee.ucla.edu/labs/photon/> (б) Экспериментальная функция пропускания трехмерного фотонного кристалла (яблоновита), измеренная в пределах запрещенной зоны между 13 и 16 ГГц (между 2.3 и 1.9 см) [15].

ВИД СВЕРХУ



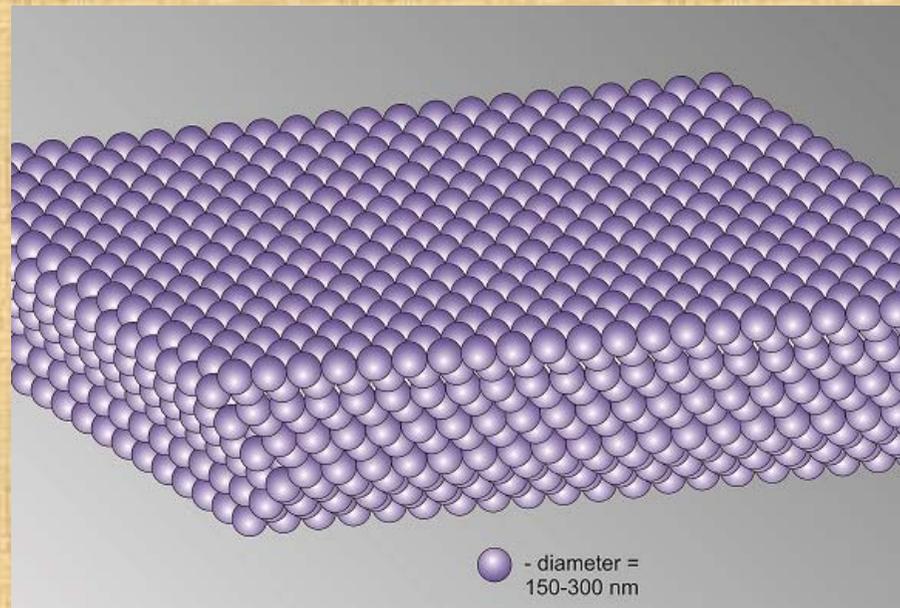
ПРИРОДНЫЙ МИНЕРАЛ ОПАЛ

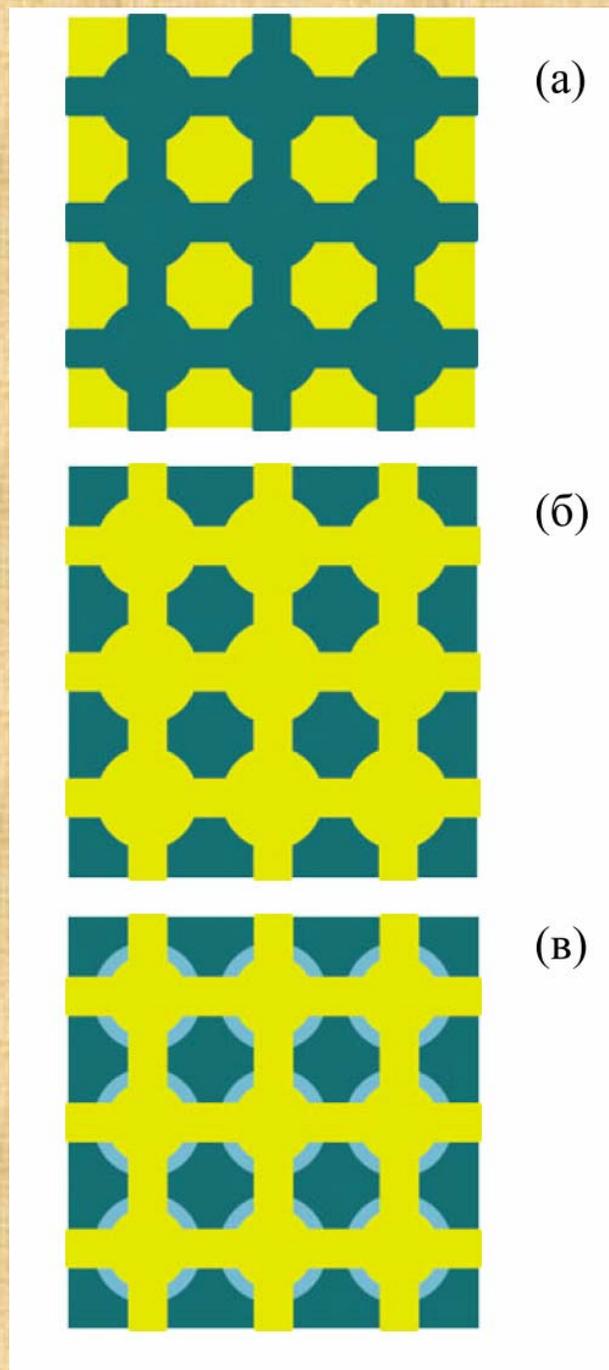
Опал построен из полимеризованных нитей аморфного кремнезёма с фрагментами более правильной структуры кварца. Формула: $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (гидрат диоксида кремния)

Нити свёрнуты или собраны в глобулы - в шаровидные образования выдержанного размера диаметром порядка 1000 Ангстрем.

Глобулы в свою очередь регулярным образом уложены в упаковку. В промежутках между глобулами размещается вода, которая их дополнительно связывает.

Получающаяся регулярная структура по масштабу периодичности отвечает длинам волн видимого света и способна вызывать интерференционные явления.



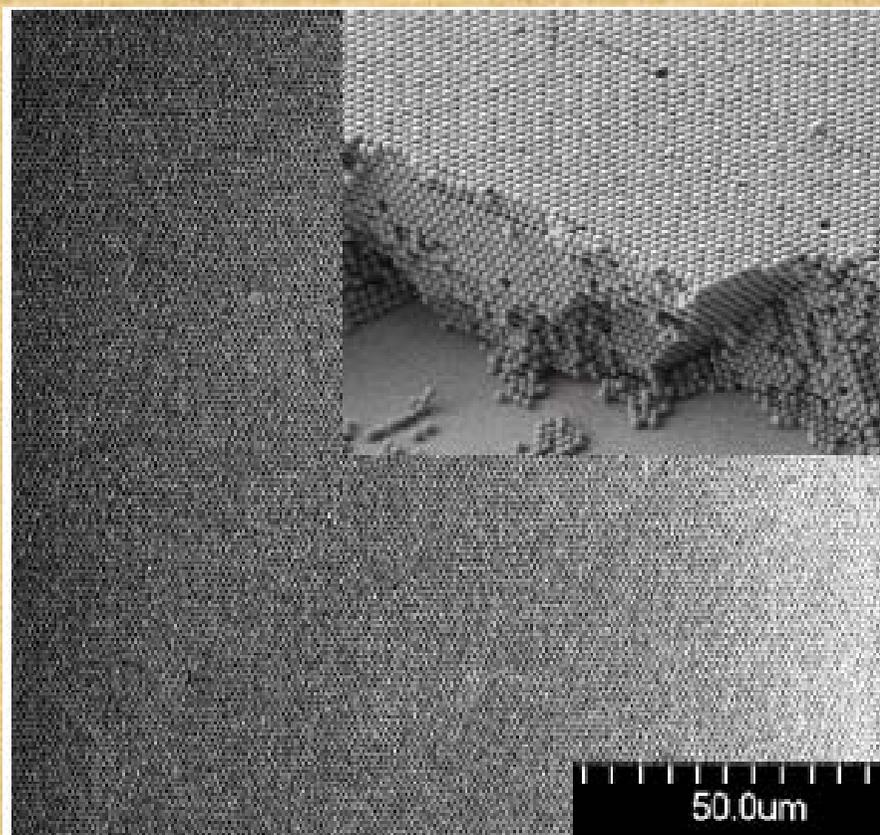


Схематическое изображение фотонного кристалла на основе синтетического опала:

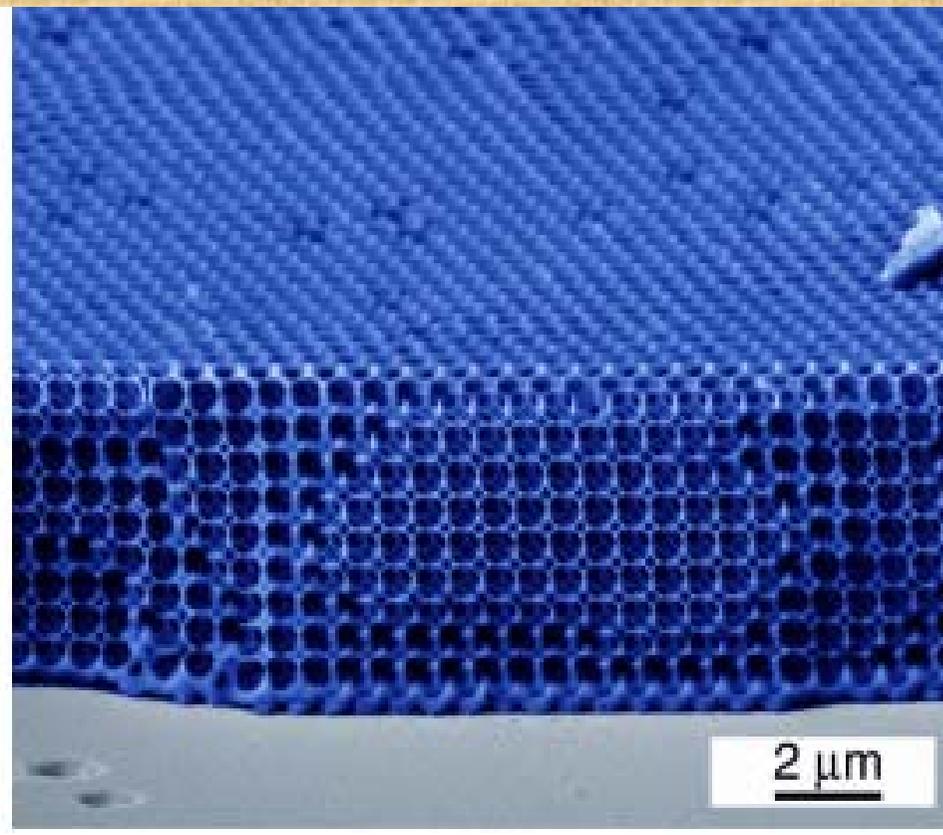
в узлах ГЦК
решетки находятся шары аморфного
 SiO_2 (диаметр: 100-1000 нм) (а);

инвертированный
опал с твердым кремниевым
каркасом и шаровыми пустотами (б);

инвертированный опал у
которого внутренняя поверхность
пустот покрыта материалом с
другим показателем преломления (в).

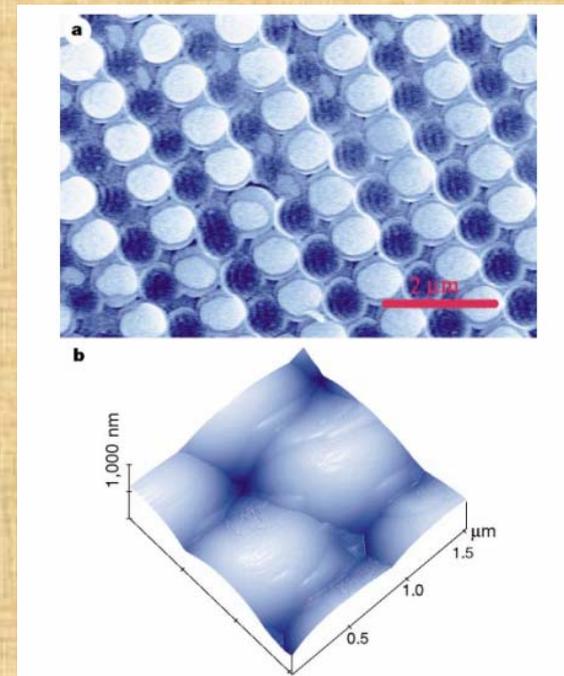


(a)



(б)

Рис.12. Изображения фотонных кристаллов на основе синтетического опала. (а) В узлах решетки находятся шары аморфного кремния SiO_2 ; (б) Инвертированный опал с твердым кремниевым каркасом и шаровыми пустотами. Изображения представлены на сайте <http://ab-initio.mit.edu/photons/tutorial/>.



↑
 Инвертированный
 опал с кремнием
 (показан синим
 цветом)

Рис.13. Экспериментальные спектры отражения и пропускания света (нормальное падение) для инвертированного опала с кремнием. Максимум на длине волны 1.46 мкм (красная стрелка) представляет полную фотонную запрещенную зону [7] (Опубликовано в Nature, (2000))

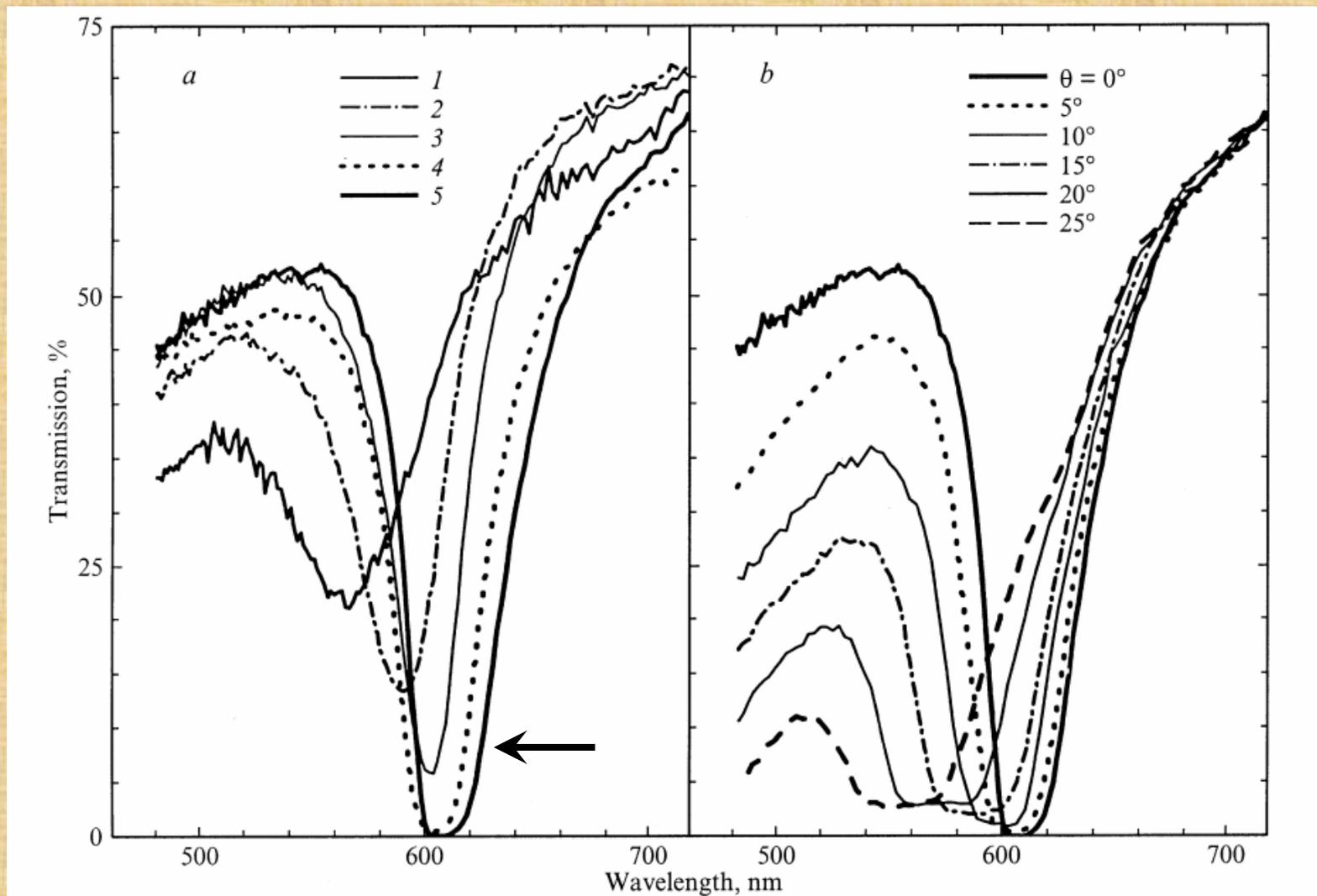


Рис.14. (а) Экспериментальные спектры пропускания пластин синтетических опалов (толщина ~ 0.5 мм, диаметр сфер аморфного SiO_2 лежит в пределах 240-300 нм) при нормальном падении света; (б) Спектры пропускания одной пластины (показана стрелкой) при разных углах падения (опубликовано в ФТТ, 2002, ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

РАЗЛИЧАЮТ ОДНОМЕРНЫЕ (1D), ДВУМЕРНЫЕ (2D) И ТРЕХМЕРНЫЕ (3D) ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ

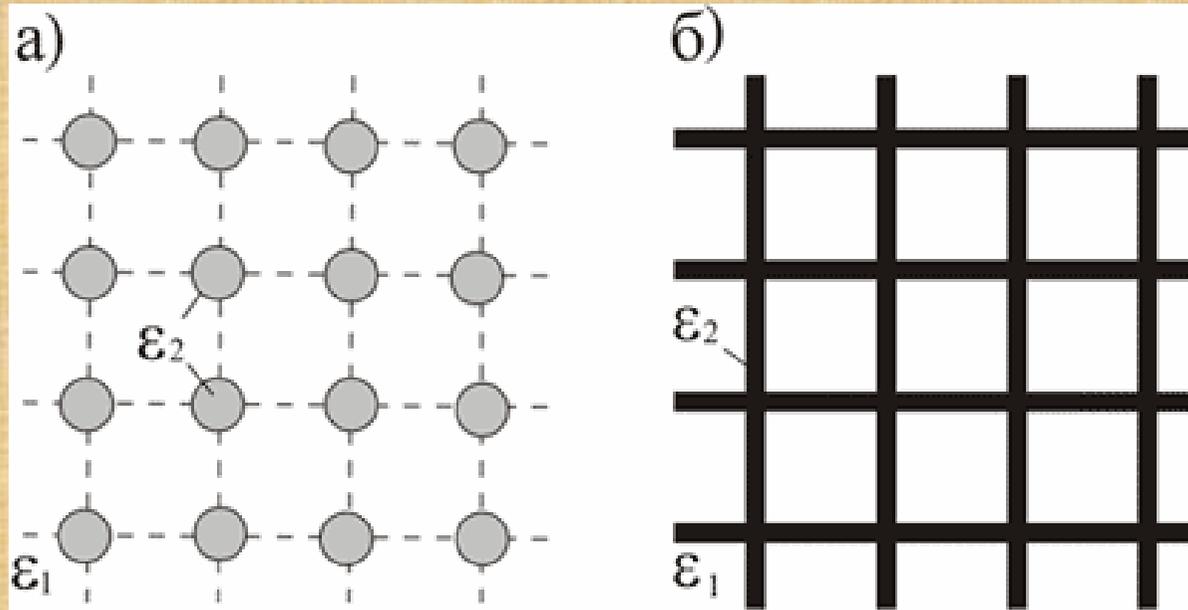


Рис.6. Условные изображения моделей двух типов трехмерных фотонных кристаллов, созданных из материалов с диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 .

The Woodpile Crystal

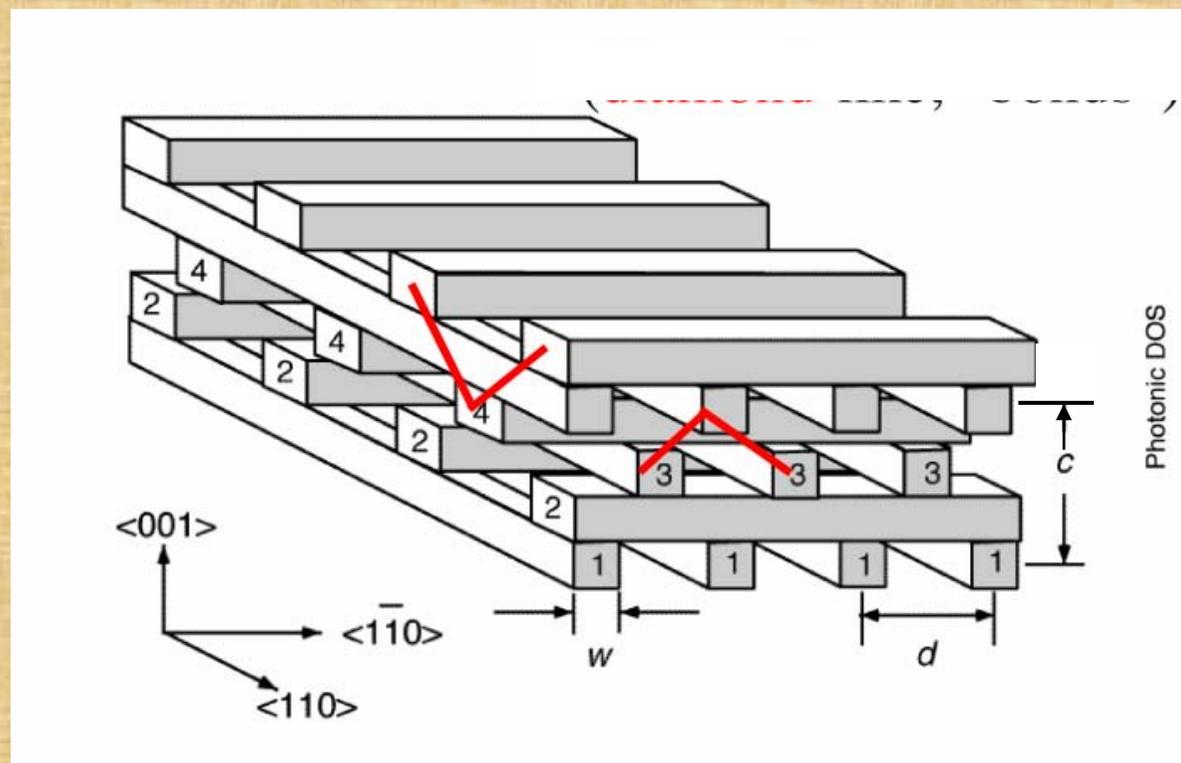
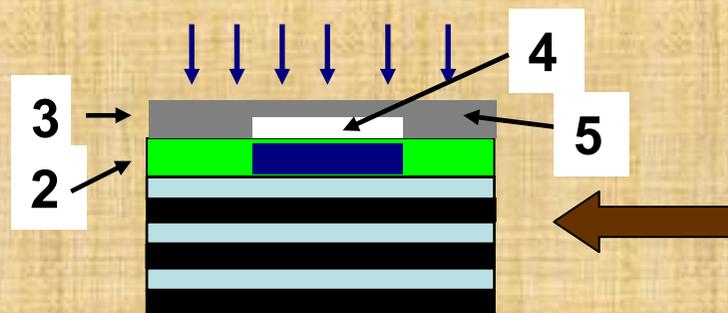


Схема строения фотонного кристалла типа «поленница»

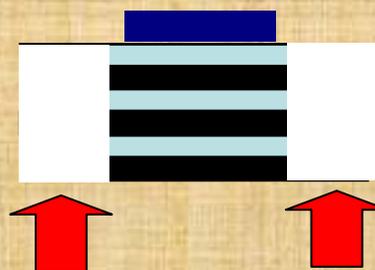
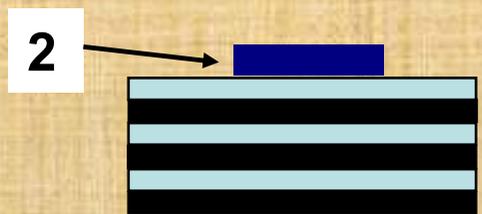
МЕТОД ЛИТОГРАФИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ



i) На поверхность материала 1 (полупроводник, диэлектрик, металл или сверхпроводник) наносится тонкий слой фоторезиста (полимера) 2.



ii) Для создания рельефа фоторезист (который устойчив к агрессивным химическим, электрохимическим и другим воздействиям и предназначен для создания защитного рельефа требуемой конфигурации) освещают через фотошаблон – пластину или пленку 3, на поверхности которой предварительно создан контрастный рисунок, состоящий из прозрачных 4 и непрозрачных 5 участков.



Травление незащищенных фоторезистом участков

iii) В результате действия света (↓↓↓↓) и последующего проявления в слое фоторезиста на поверхности материала 1 формируется микрорельеф (на рисунке показан негативный микро-рельеф маска).

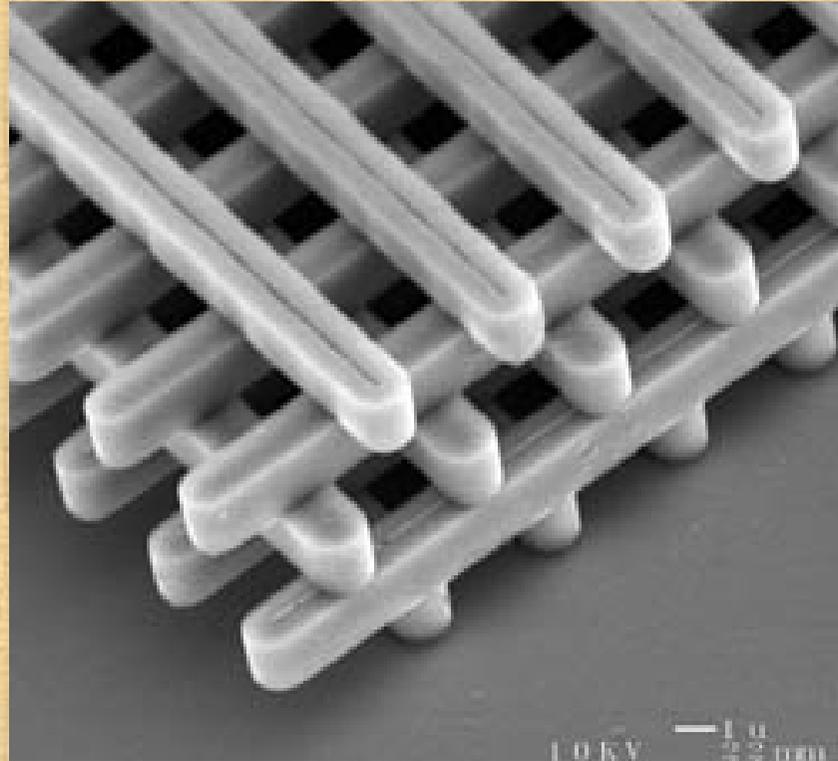
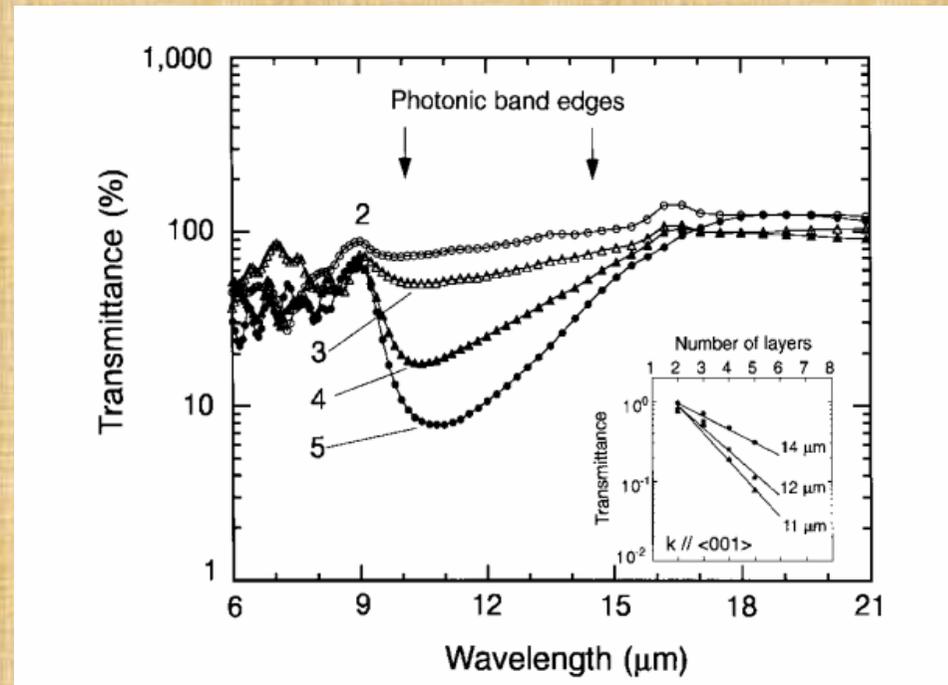
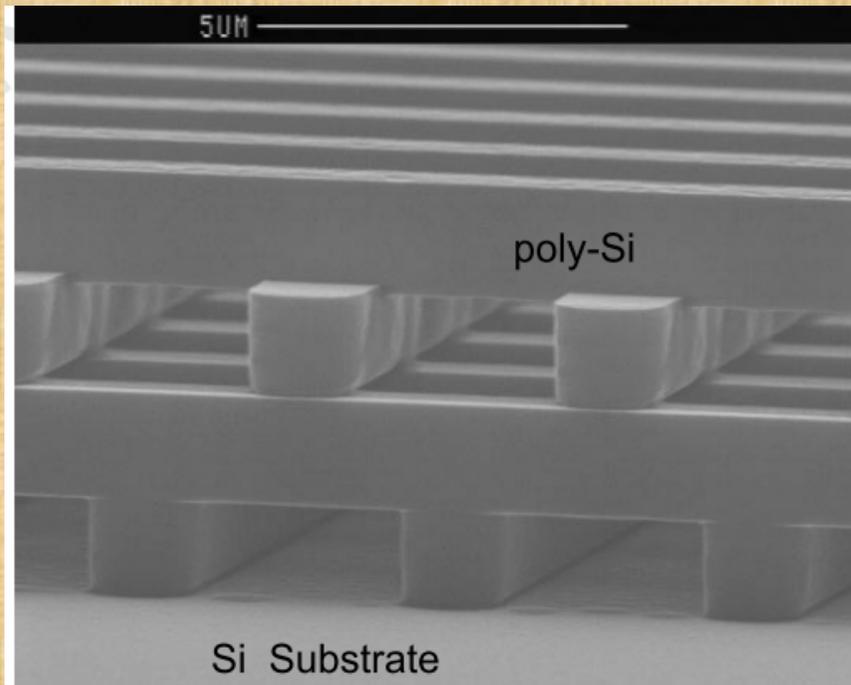


Рис.14. Фотонный кристалл "дровяная поленница", созданный методом оптической литографии в Sandia National Laboratories [20,21]. (1998-2000 годы)

Фотонный кристалл поленица



Расстояние между стержнями $d=4.2$ мкм;

Толщина стержней $w=1.2$ мкм;

Толщина слоя равна 1.6 мкм.

Функция пропускания фотонного кристалла в зависимости от числа слоев. Свет падает вдоль направления $\langle 001 \rangle$. (вставка: коэффициент пропускания для 3-х разных длин волн)

Функция пропускания фотонного кристалла поленица при различных углах падения света

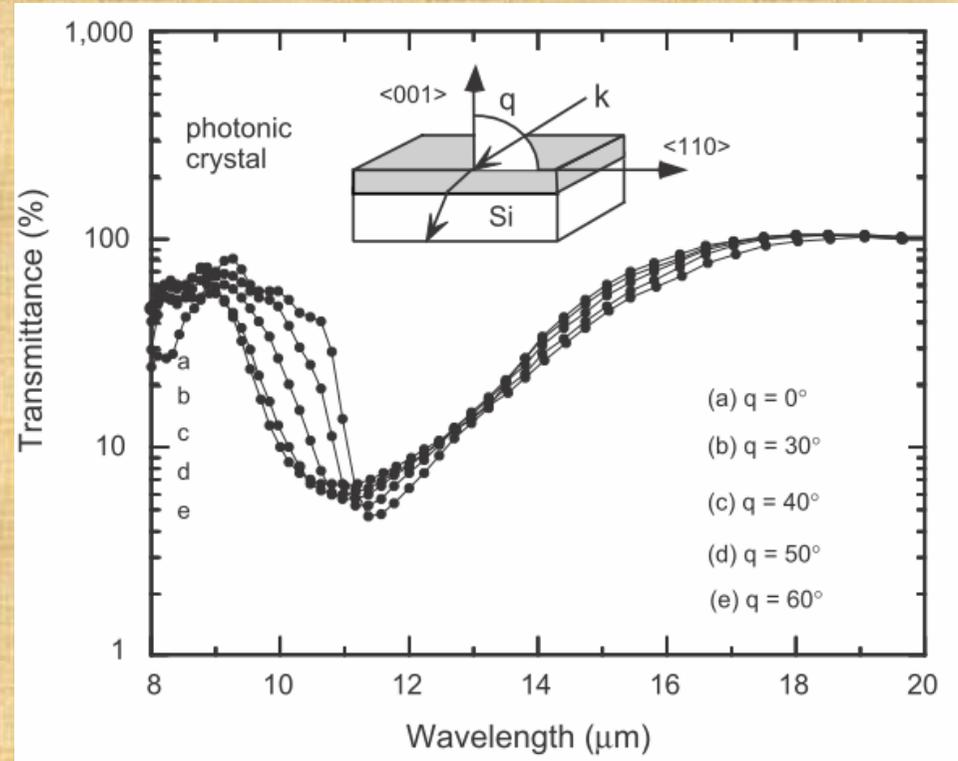
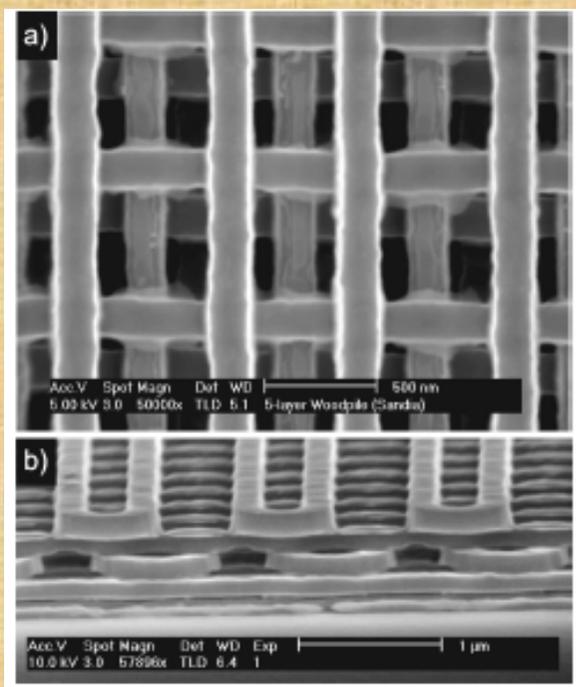
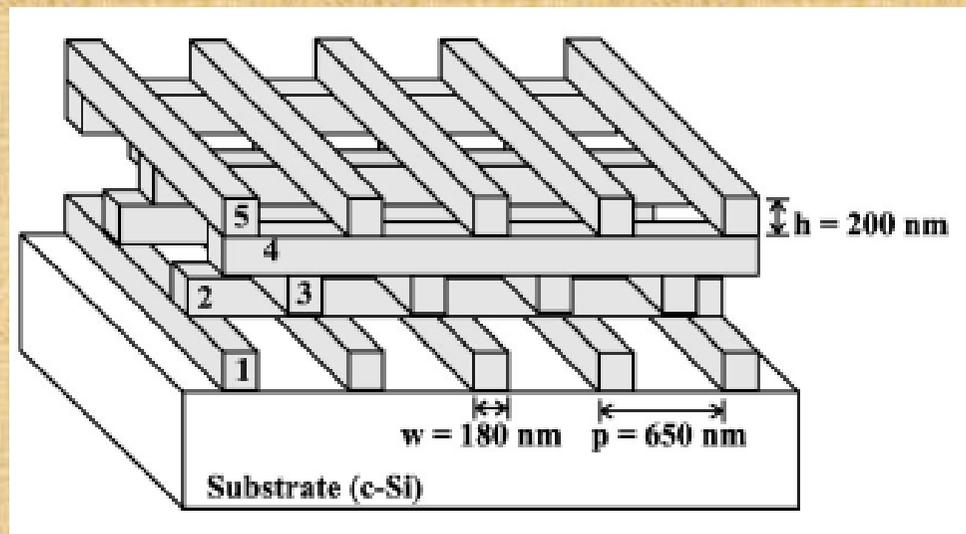


Рисунок иллюстрирует существование полной фотонной запрещенной зоны у кристалла типа поленица.

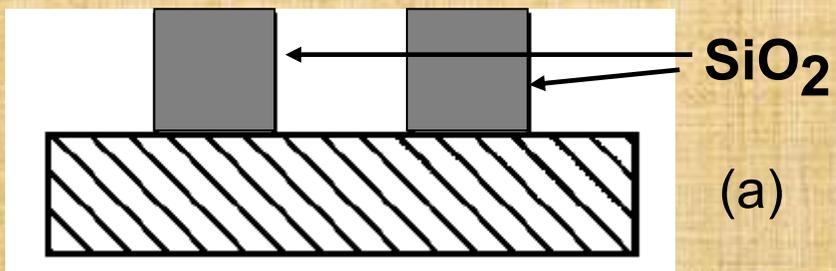


(a)

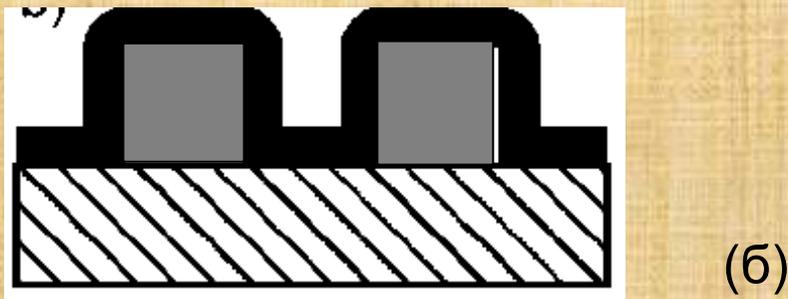


(б)

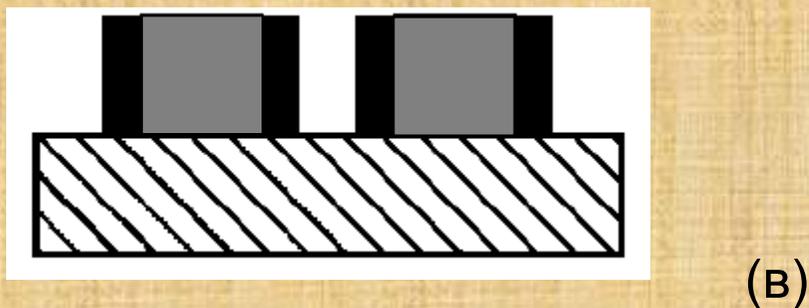
Рис.15. (а) Фотонный кристалл "поленница", созданный при помощи технологий микроэлектроники [22]. Изображение, показанное на рисунке, получено при помощи сканирующей электронной микроскопии. Кристалл состоит из пяти слоев стержней. (б) Схематический рисунок фотонного кристалла, состоящего из пяти слоев стержней.



(a) На пластине из поликристаллического кремния (заштрихована) создается рельеф, состоящий из блоков SiO_2 .

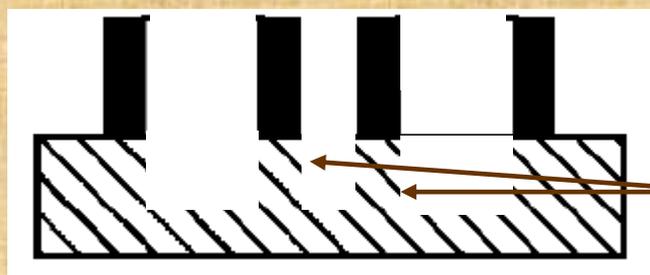


(б) Блоки покрываются пленкой из поликристаллического кремния.

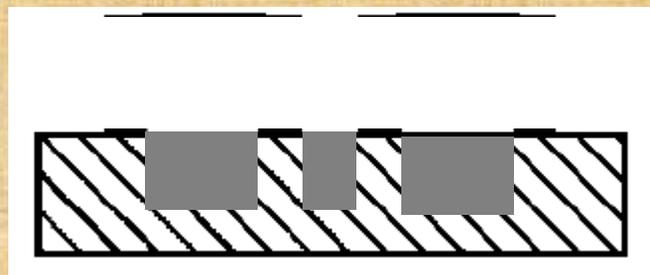


(в) После ионного травления пленка остается только на боковых стенках блоков SiO_2 . Структура, показанная на рис.16в, служит маской для создания одного слоя кремниевых стержней.

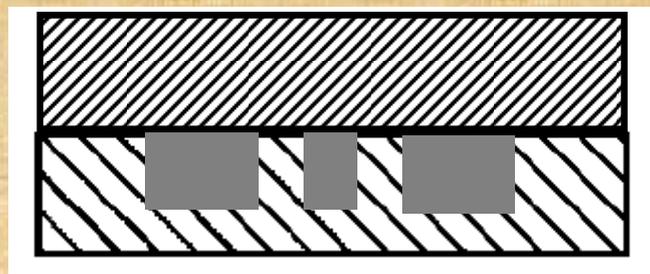
Рис.16. Схематическое изображение основных технологических этапов изготовления фотонного кристалла, показанного на рис.15а [22].



(г) Блоки SiO_2 удаляются. Через маску осуществляется травление пластины. Таким способом формируется один слой кремниевых стержней с толщиной 180 нм и расстоянием между стержнями - 650 нм.

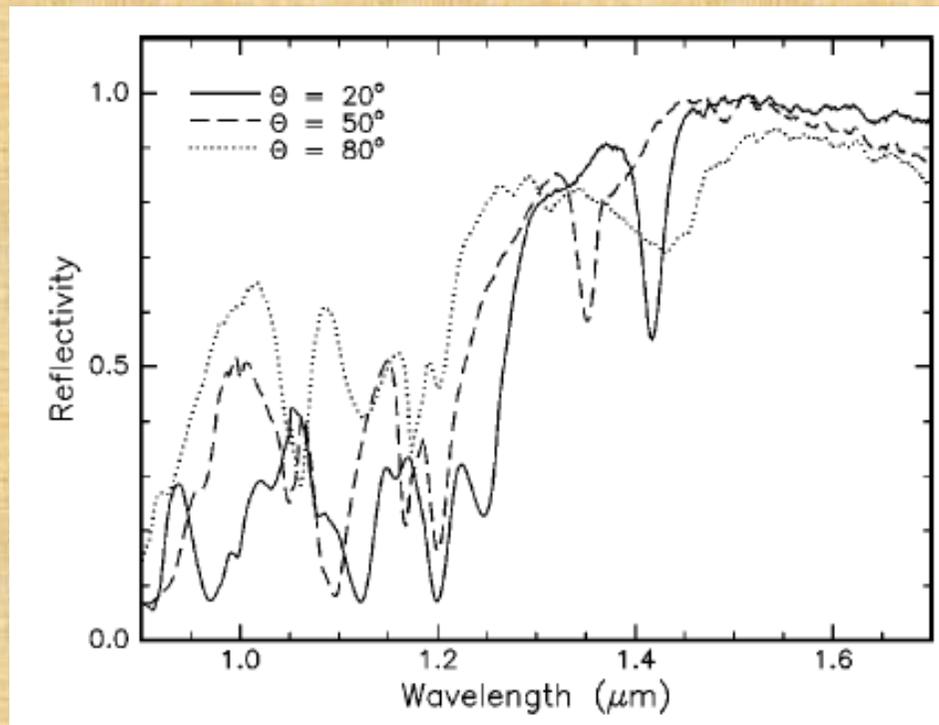


(д) После травления пространство между стержнями заполняется оксидом кремния и поверхность полируется.

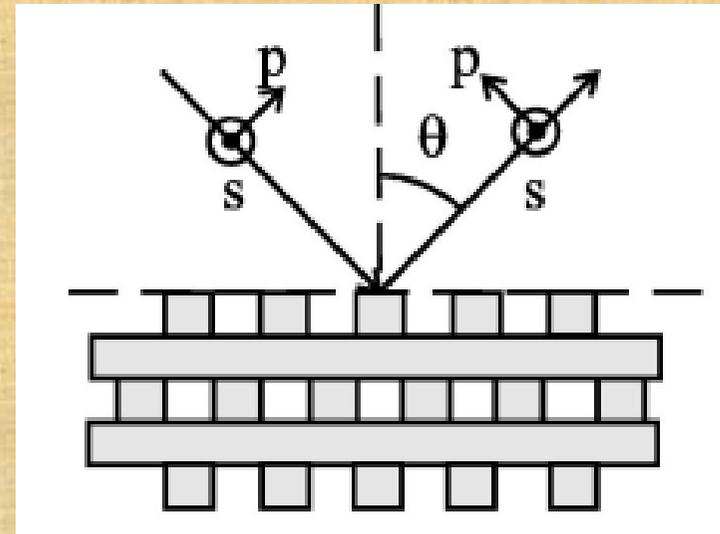


(е) Затем на отполированную поверхность наносится пленка из поликристаллического кремния и технологический процесс повторяется.

Рис.16. Схематическое изображение основных технологических этапов изготовления фотонного кристалла, показанного на рис.15а [22].



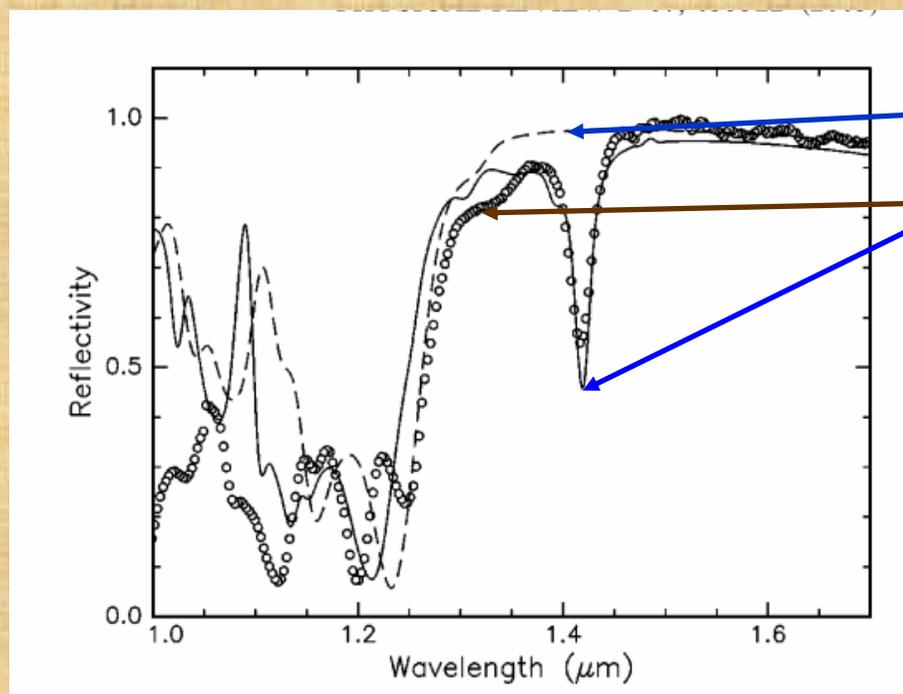
(a)



(б)

Рис.17. (а) Измеренный коэффициент отражения фотонного кристалла, показанного на рис.15а [22]. По оси ординат отложен коэффициент отражения э.м. поля по интенсивности, по оси абсцисс - длина волны в микрометрах. При длинах волн $\lambda \geq 1.4$ мкм кристалл характеризуется запрещенной фотонной зоной: коэффициент отражения равен единице. Кривые измерены для различных углов падения электромагнитной волны: $\vartheta = 20^\circ, 50^\circ, 80^\circ$ (б) Геометрия эксперимента: P-поляризованный пучок падает на кристалл, при этом стержни первого ряда расположены перпендикулярно плоскости падения первичной волны.

Сравнение расчета и эксперимента

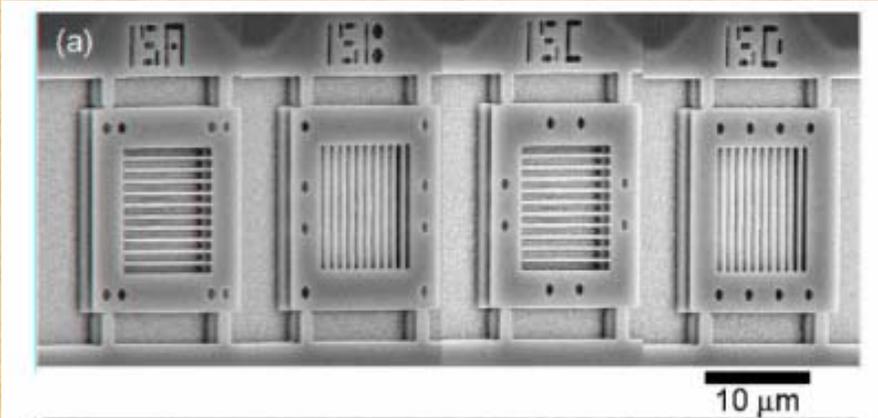


Линии – расчет;

Кружки - эксперимент

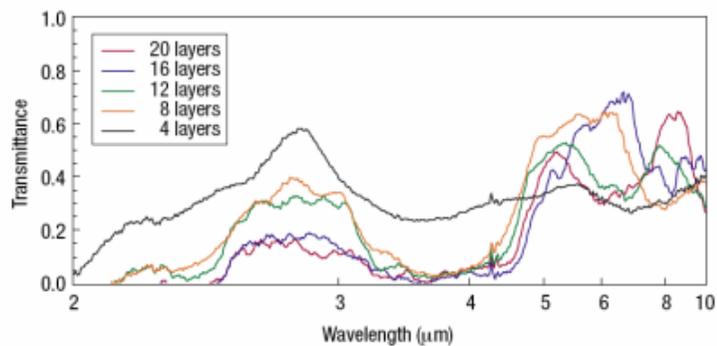
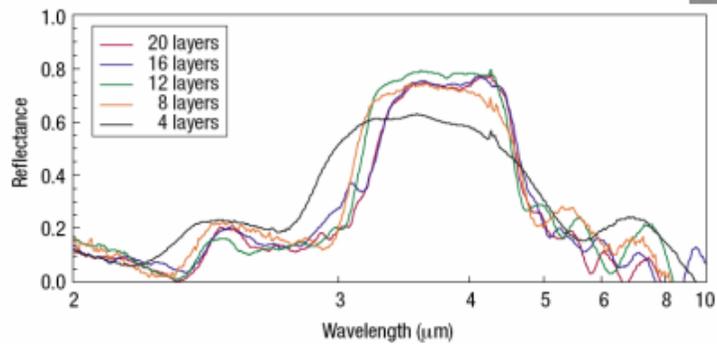
По оси ординат отложен коэффициент отражения э.м. поля по интенсивности, по оси абсцисс - длина волны в микрометрах.

Фотонный кристалл поленица состоит из **5** слоев стержней. Р-поляризованный пучок падает под углом 20 градусов на поверхность кристалла, при этом стержни первого ряда расположены перпендикулярно плоскости падения первичной волны.

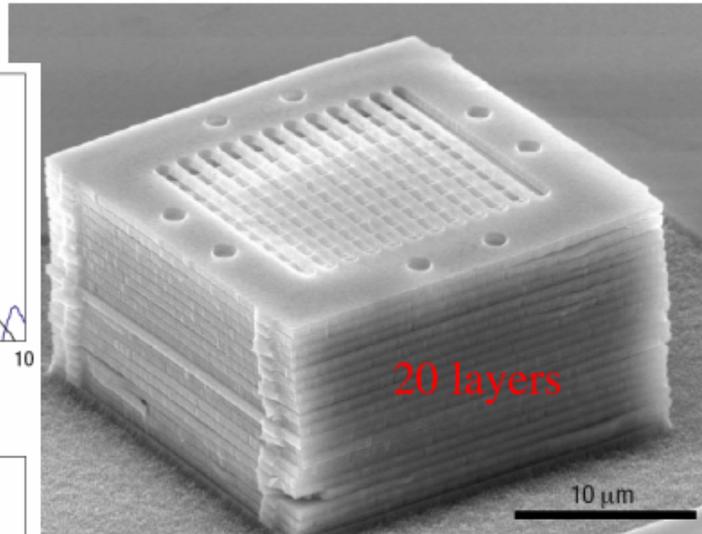


Технология создания фотонного кристалла woodpile

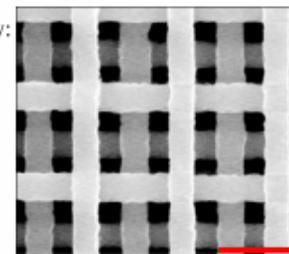
[K. Aoki *et al.*, *Nature Materials* 2 (2), 117 (2003)]



(gap effects are limited by finite lateral size)



50nm accuracy:



1 μm

17. Зачем нужны волноводы на основе фотонных кристаллов?

Оптические волноводы на основе фотонных кристаллов

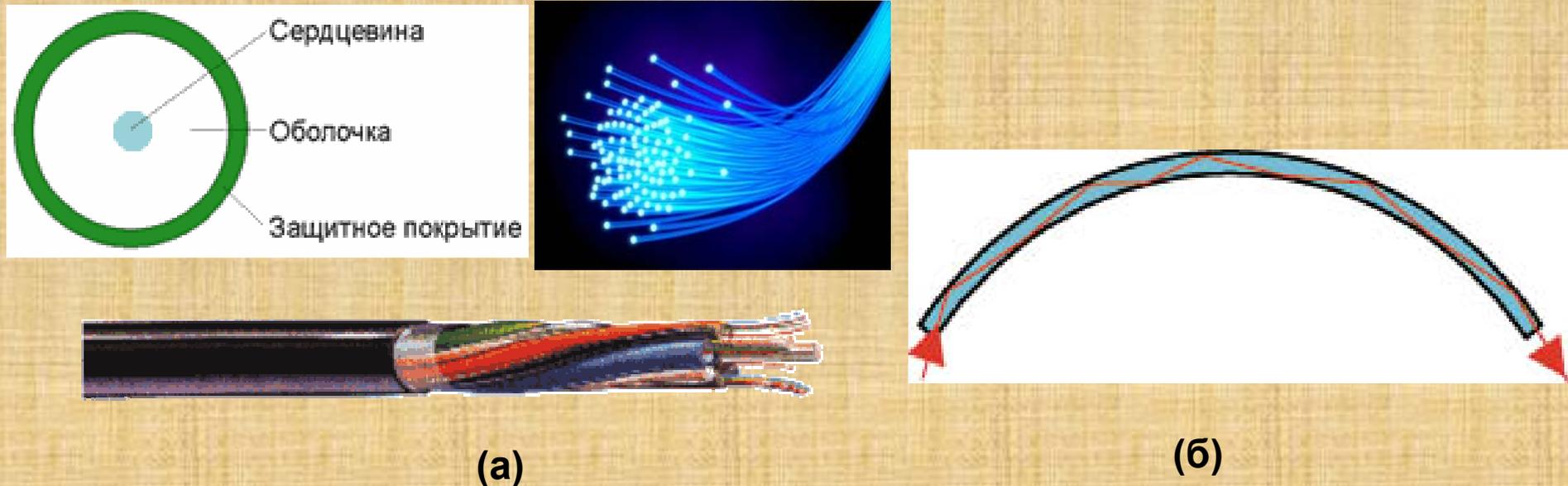


Рис.18. (а) Поперечное сечение традиционного оптического волновода (световода) и фотография оптоволоконного кабеля. Свет распространяется по сердцевине волновода в результате полного внутреннего отражения от стенок оболочки. (б) Схематическое изображение изогнутого оптического волновода. Стрелками показана траектория светового луча внутри волновода. Угол падения волны на стенки волновода должен быть больше критического угла полного внутреннего отражения, иначе световой луч выйдет за пределы волновода.

Современная волоконная оптика

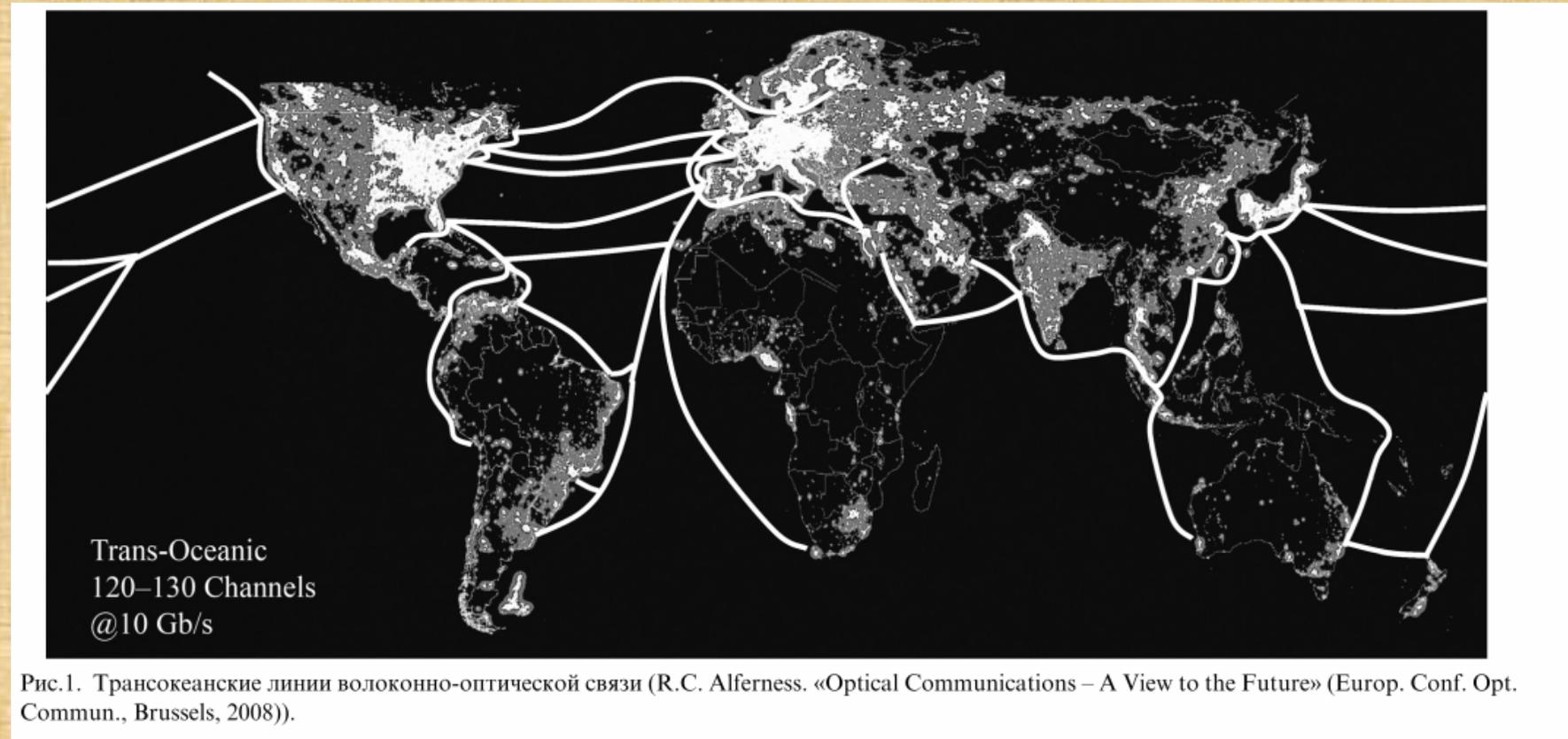
Прозрачные волокна и волноводы передают сигнал на большие расстояния на высокой скорости и с высоким качеством - без шумовых помех, без искажений и с малым затуханием. Например, современные оптические кабели из одномодовых волокон способны

- передавать информацию со скоростью превышающей **10 Гбит/с**, (а в экспериментальных системах достигнута скорость передачи **25 Тбит/с**)

- затухание интенсивности сигнала может составлять **5%** и менее на одном километре волокна на длине волны **1.55 мкм**.

- Уже в **1990 году** начали действовать трансокеанские оптоволоконные кабели, которые связывают Северную Америку с Европой и Азией.

ТРАНСОКЕАНСКИЕ ЛИНИИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ (2010 ГОД)



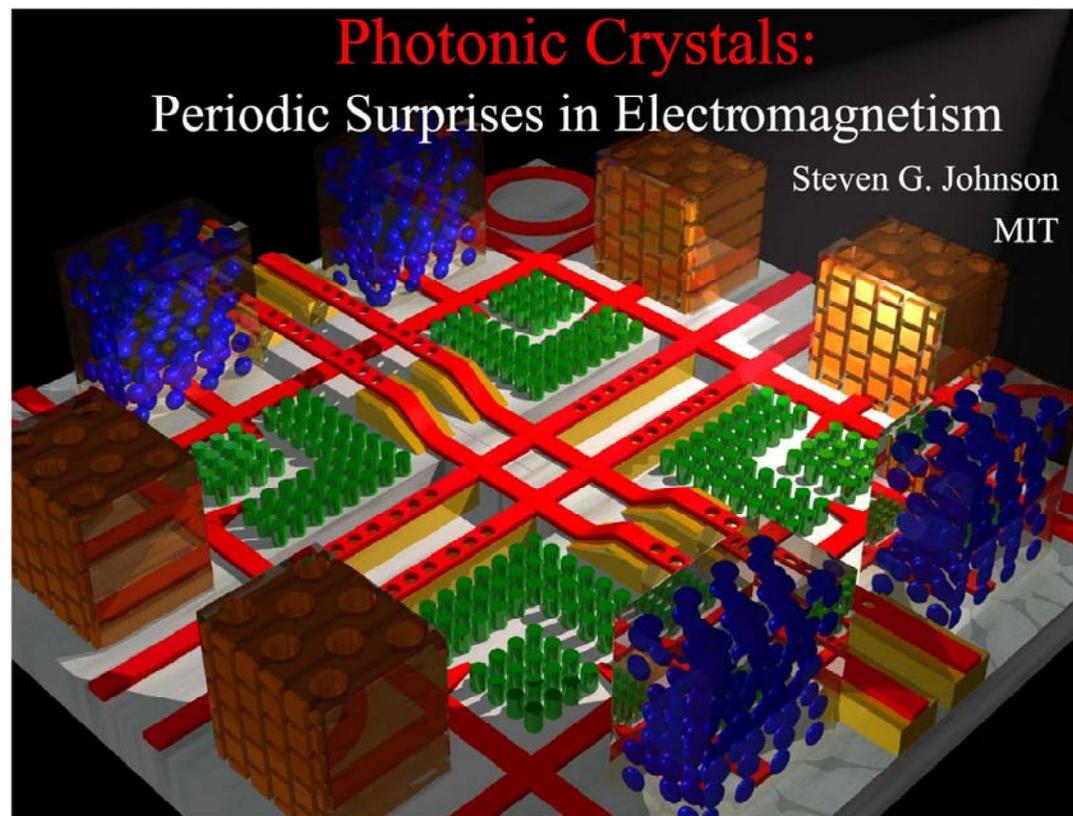


Рис.5. *Иллюстративное изображение интегральной оптической микросхемы. Оптические транзисторы, сделанные на основе трехмерных фотонных кристаллов соединены между собой при помощи оптических волноводов, выполненных на основе двумерных фотонных кристаллов. Сигнал между различными элементами схемы передается при помощи света. Автор рисунка - Dr Steven Johnson, Массачусетский Технологический Институт, США*

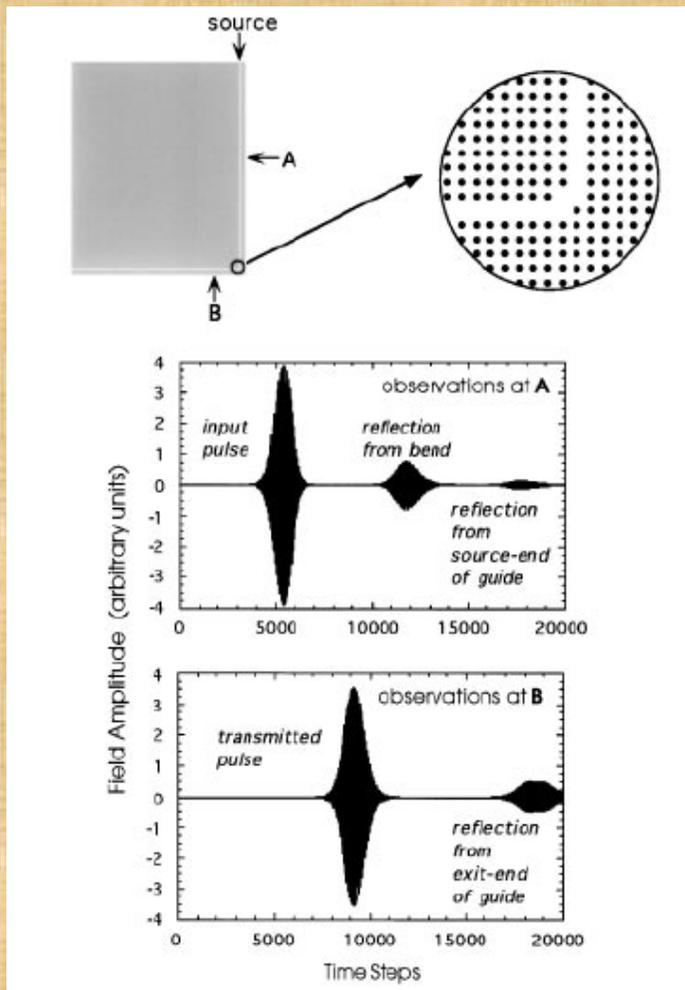
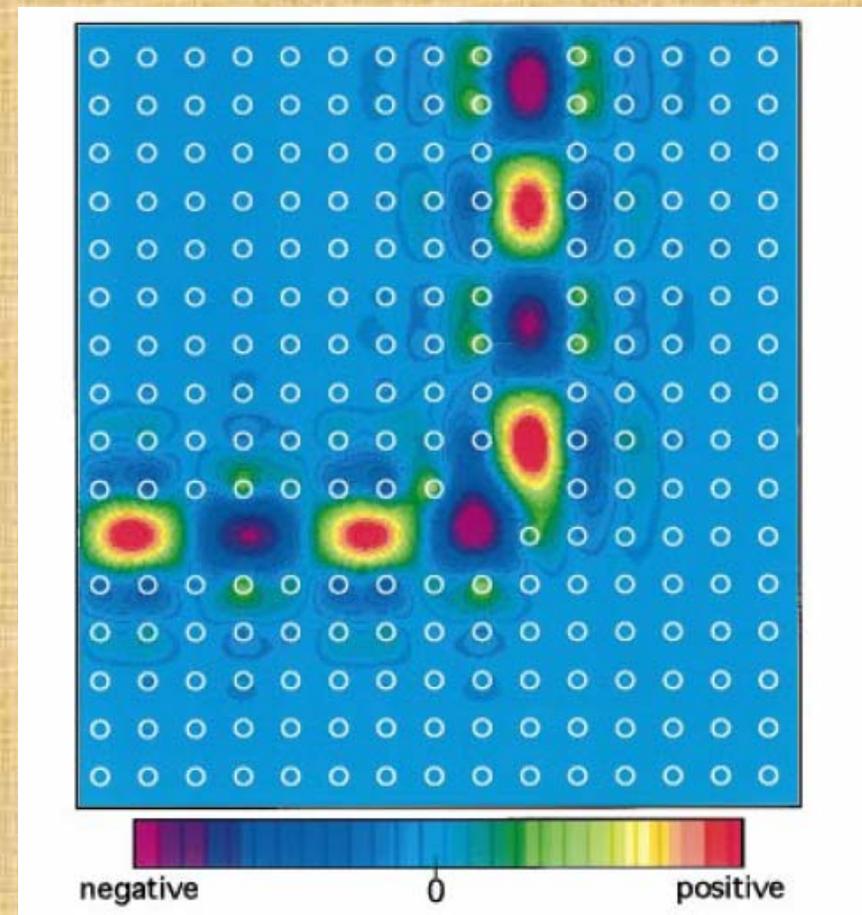


Рис.19. Распространение импульса э.м. поля в волноводе на основе двумерного фотонного кристалла [23]. Фотонный кристалл представляет собой диэлектрические стержни, расположенные в узлах двумерной периодической решетки. Размер кристалла: 100x120 периодов. Изогнутый волновод создается при помощи удаления из кристалла одного ряда стержней (см. увеличенное изображение на которое указывает стрелка). Source - источник э.м. волн, A и B - точки наблюдения. В точке A регистрируется (i) проходящий импульс, (ii) импульс отраженный от изгиба волновода и (iii) импульс, отраженный от той части кристалла, где находится источник (дважды отраженный импульс). В точке B фиксируется (i) прошедший (повернутый при помощи волновода) импульс, и (ii) импульс, отраженный от того конца фотонного кристалла, где находится выход из волновода.

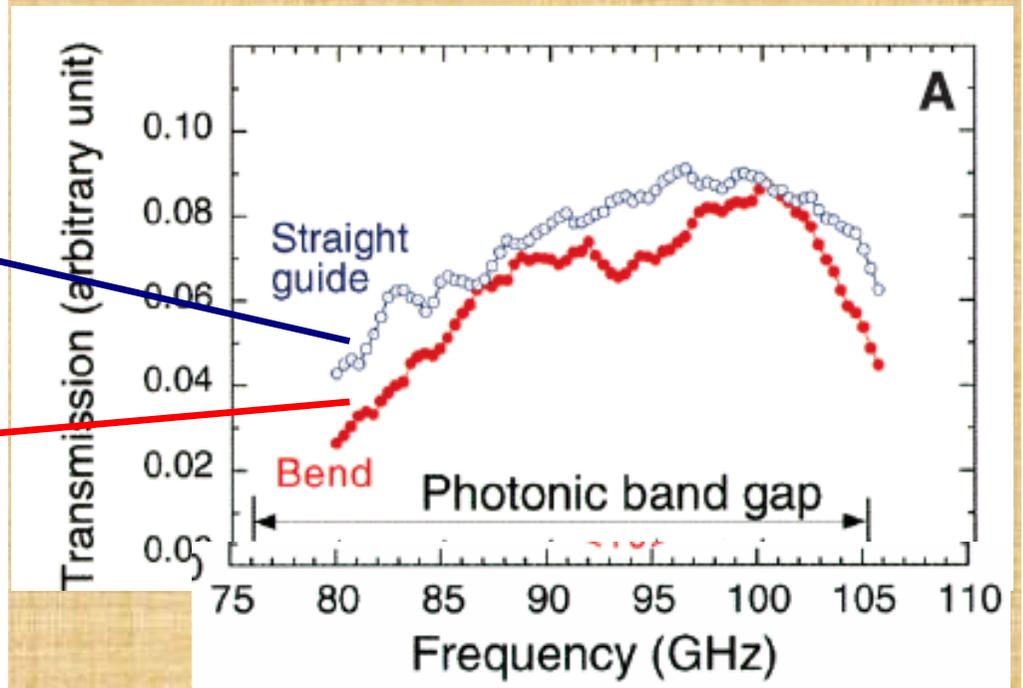
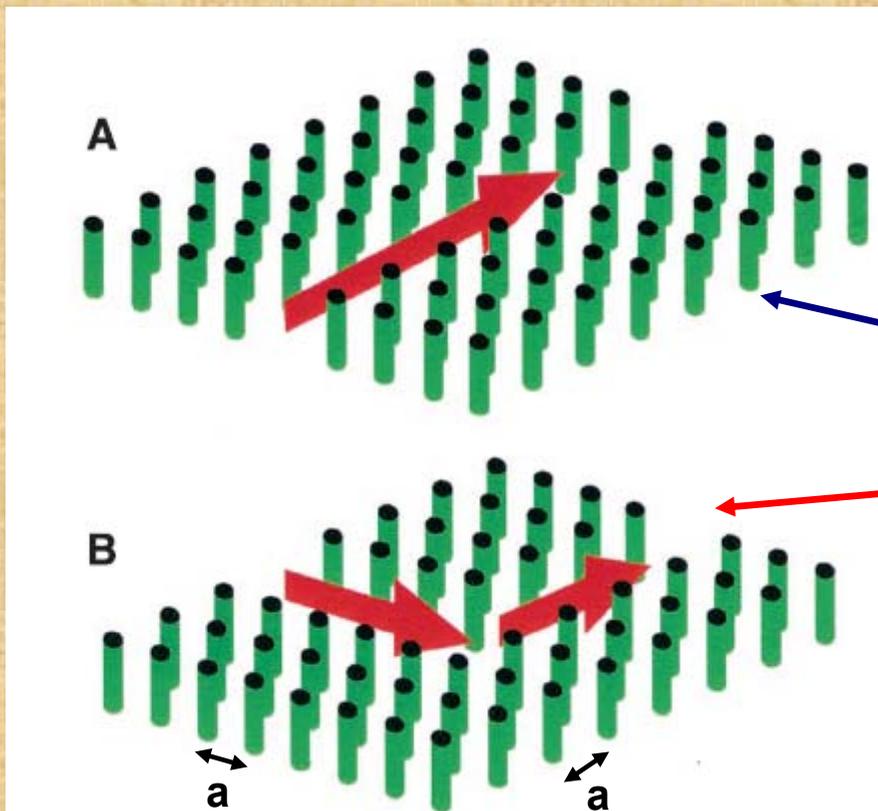
Показатель преломления стержней $n=3.4$ – GaAs на длине волны 1.55 мкм.

Радиус стержней $r=0.18a$, где a – расстояние между стержнями.

Если $a=1.58$ мкм, то середина фотонной запрещенной зоны находится на длине волны 1.55 мкм



Распространение импульса Э.М. поля в волноводе на основе двумерного фотонного кристалла [23].



Волновод из алюминиевых стержней:

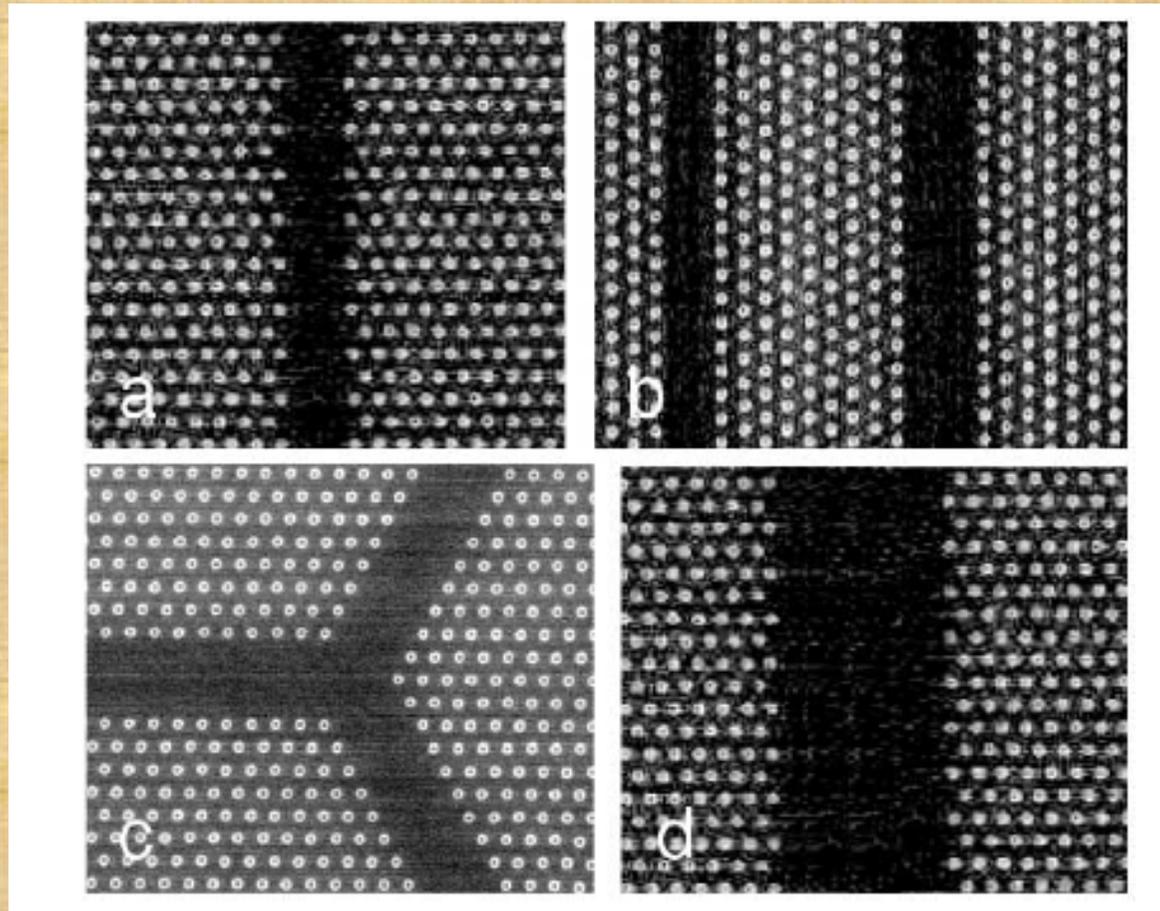
радиус стержней $=a/5$,

a – постоянная решетки $=1.27$ мм,

$\epsilon=8.9$,

Экспериментальные спектры пропускания обычного и изогнутого волноводов в пределах запрещенной зоны: 76 – 105 ГГц, или 2.8- 3.9 мм.

(Science, 1998)



Экспериментальные волноводы на основе двумерных фотонных кристаллов;

Периодическая решетка (период **400 нм**) из частиц золота. Высота частицы **45 нм**, ширина – **200 нм**.

Рабочий диапазон длин волн: **780- 820 нм**.

Изображение получено при помощи сканирующей фотонной микроскопии. (PRL, 2001)

18. Оптическое волокно на основе фотонного кристалла.

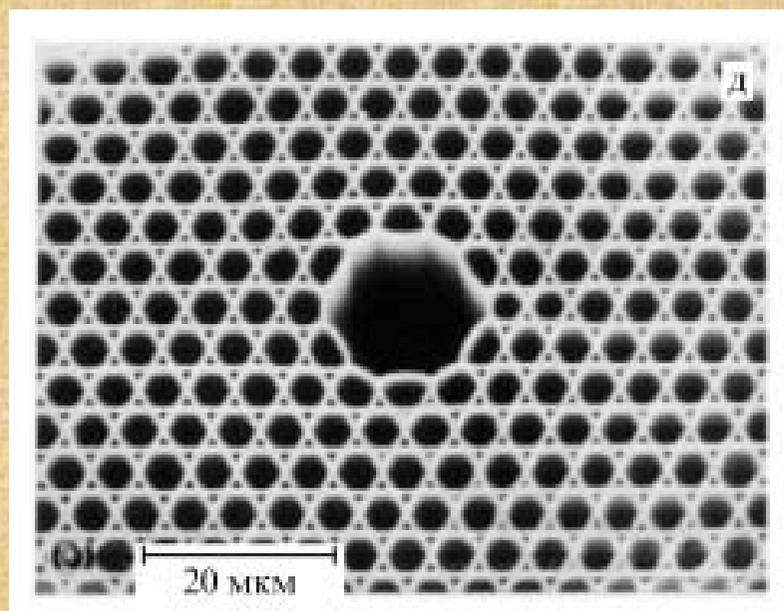
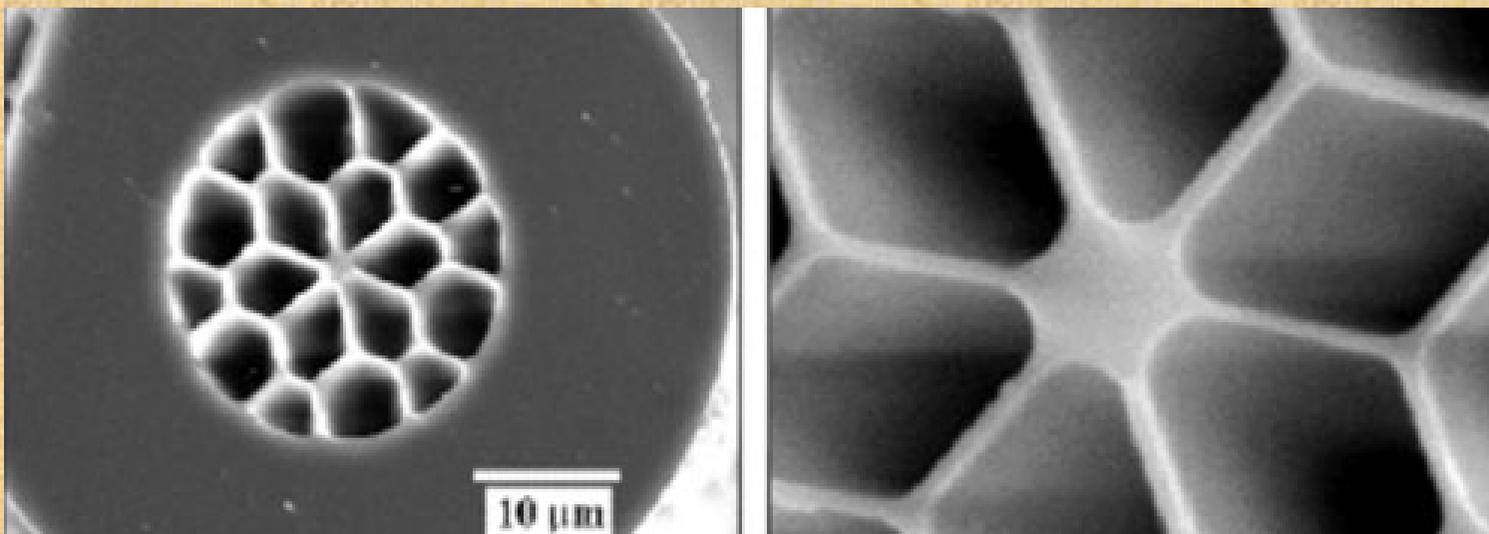
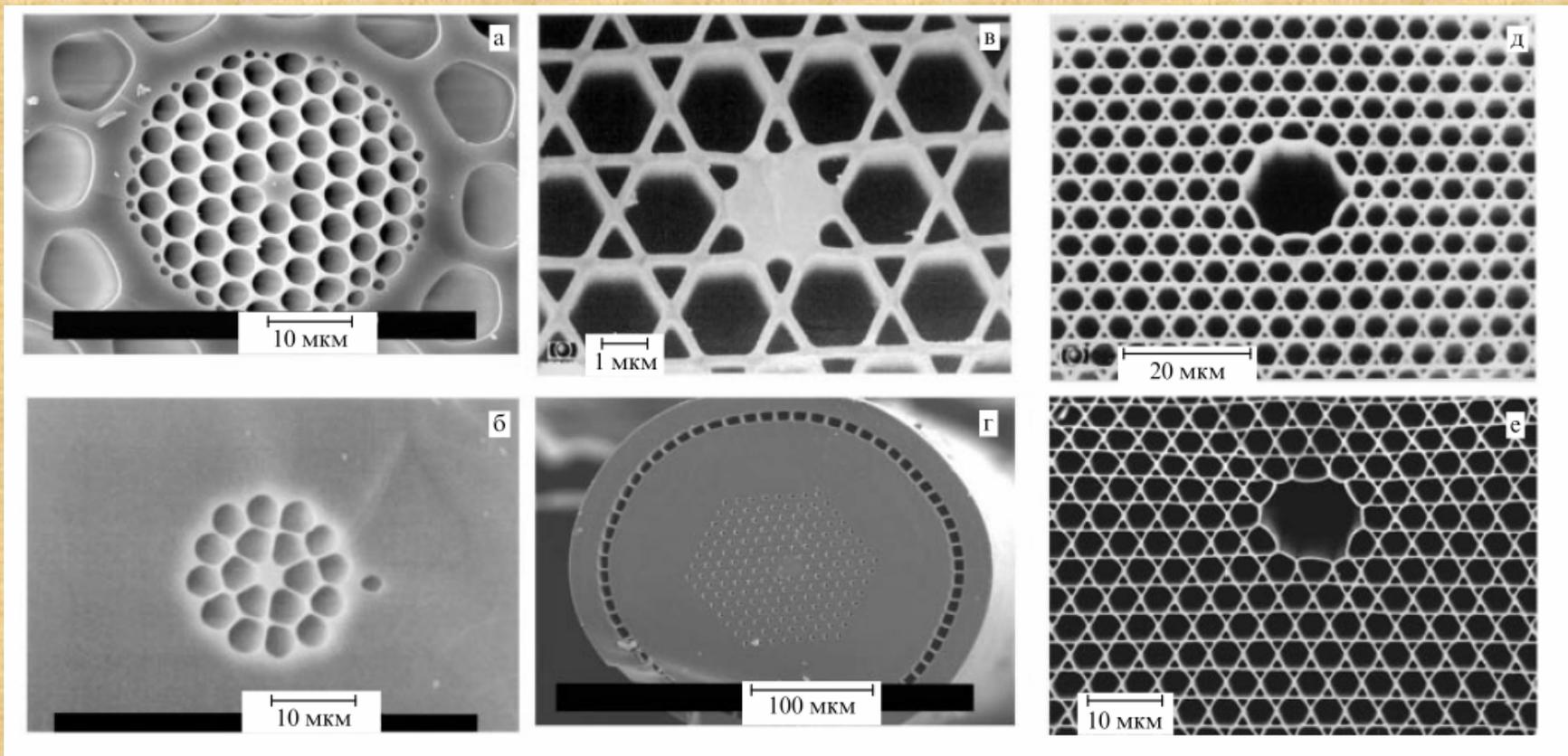


Рис.20. Кварцевое оптическое волокно, созданное на основе двумерного фотонного кристалла фирмой Blaze Photonics Ltd.



Изображения поперечных сечений различных волноводов с микроструктурированной оболочкой

4. Ограничения на скорость передачи сигнала между различными элементами современной интегральной схемы.

Предел скорости передачи сигнала между элементами чипа

Пример:

● Технология 90 нм: медные проводники, соединяющие транзисторы микросхемы между собой, имеют толщину около 150 нм и расстояние между ними равно 200 нм; (Повсеместная технология в развитых странах начиная с 2006 года).

● Технология 65 нм: толщина соединительных проводников составляет 170 нм, а расстояние между ними сокращено лишь до 210 нм. (INTEL 2004 г): *Китай, Израиль, Япония, Ю. Корея, Тайвань (2004-2006)*;

Предел скорости передачи сигнала между
элементами чипа при помощи медных
проводников, эта скорость ограничена величиной
порядка 15-20 Гбит/с при частоте 14-15 ГГц.

**Еще один сдерживающий фактор:
нельзя размещать транзисторы “очень
близко” друг к другу**

•Технология 7 нм , площадь схемы 83,27 мм², количество транзисторов – 6.9 млрд., полезная площадь ~17% от площади схемы

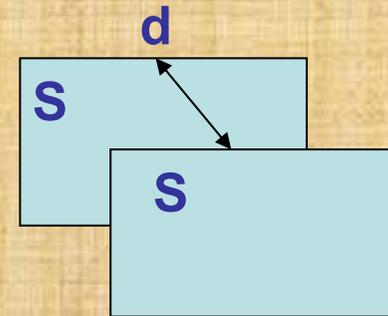
•Технология 10 нм , площадь схемы 89,25 мм², количество транзисторов – 4.3 млрд., полезная площадь ~20% от площади схемы

Емкость плоского конденсатора (вакуум):

$$C = S / 4\pi d;$$

S – площадь пластин;

d – расстояние между пластинами;



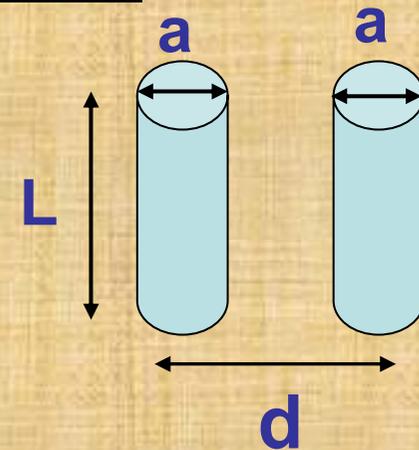
Емкость двух цилиндрических проводников (вакуум):

$$C = L / 2 \ln(d/a);$$

d – расстояние между проводниками;

L – длина проводников;

a – диаметр проводников;



Сопротивление проводника:

$$R = \rho L / S;$$

ρ – удельное сопротивление;

L – длина проводника;

$S \sim a^2$ – площадь поперечного сечения;

RC – имеет размерность времени !

19. Принцип работы кремниевого оптического модулятора для передачи данных между ядрами процессора.

20. Скорость передачи данных при помощи кремниевого оптического модулятора.

21. Перспективы кремниевой нанооптики и нанофотоники для создания многоядерных портативных суперкомпьютеров.

Для кардинального увеличения скорости передачи сигнала между элементами схемы было предложено использовать свет, поскольку оптические кабели способны пропускать объемы информации в сотни раз большие, нежели пропускают их медные аналоги

Для реализации этой идеи необходимо создание ТРЕХ оптических устройств:

- (I) **Источник света - кремниевый или германиевый лазер;**
Исследователи из корпорации INTEL в 2008 создали кремниевый лазер на основе кремниевого волновода, который служит для усиления потока фотонов. Лазер можно изготовить на основе стандартной технологии, используемой для производства кремниевых микросхем.

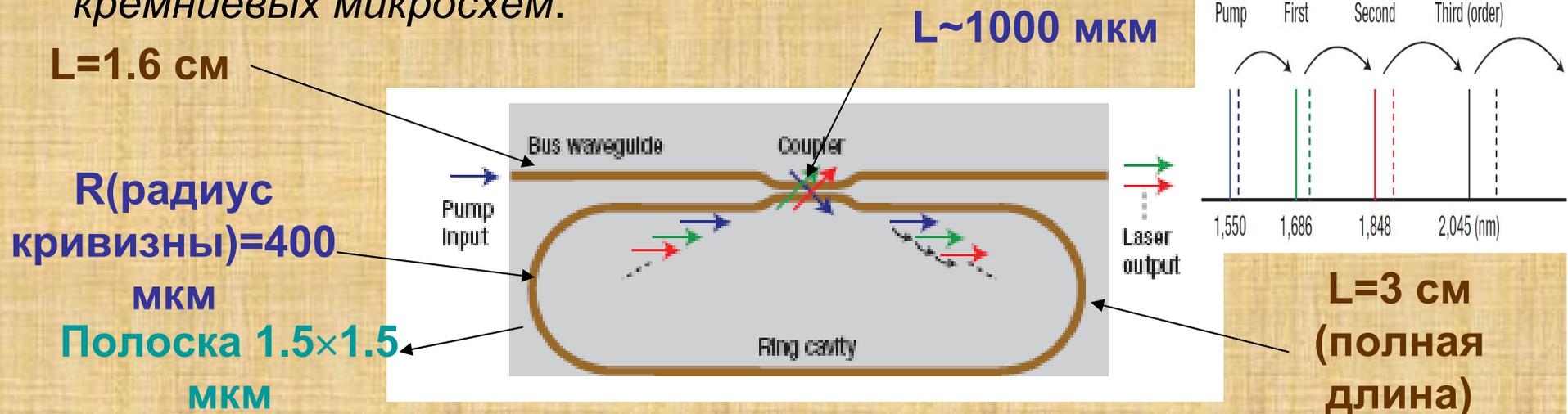
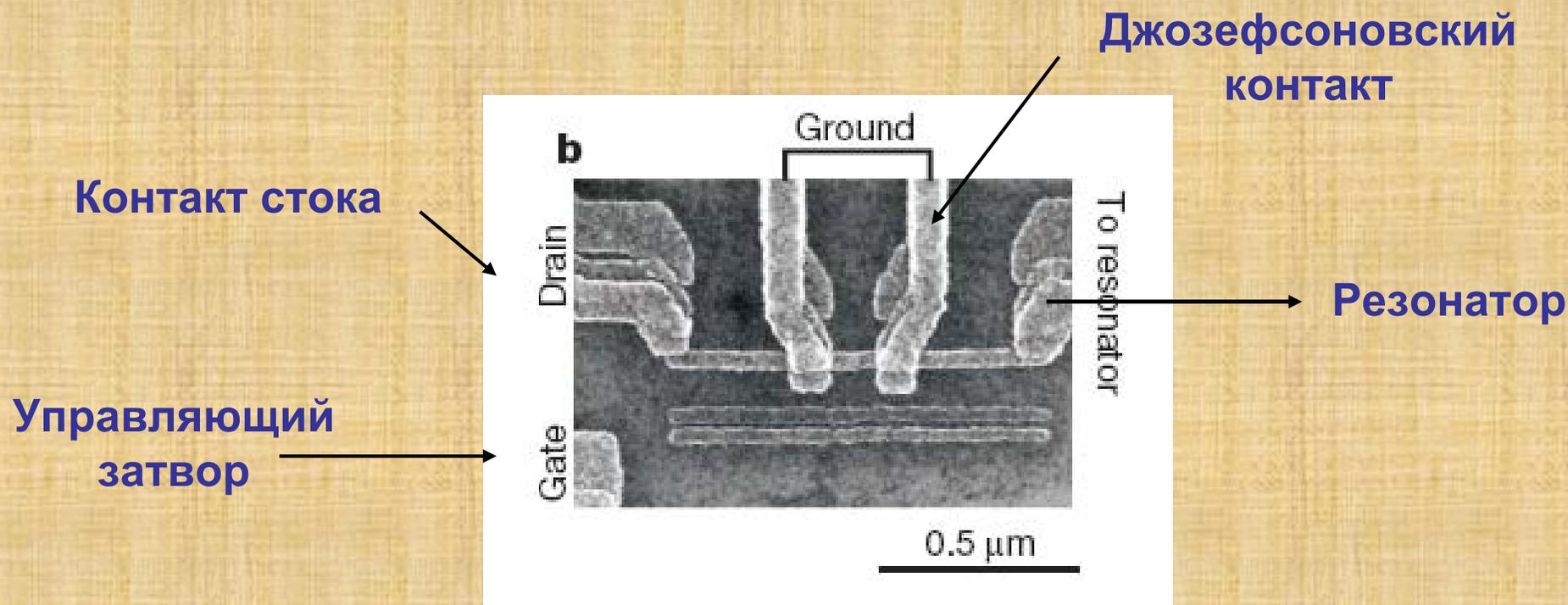


Схема кремниевого лазера на основе эффекта Рамана.

В 2007 году создан лазер на одном (но искусственном) атоме !



Лазер на одном искусственном атоме – кубите.
Изображение в сканирующем электронном
микроскопе.

Для реализации этой идеи необходимо создание трех оптических устройств:

- **(II) Маршрутизаторы**, которые разделяют или объединяют световые сигналы. В 2008 году сотрудники корпорации IBM опубликовали статью о создании кремниевого оптического переключателя (коммутатора), позволяющего перенаправлять и переключать пучки фотонов. Оптические коммутаторы необходимы для управления световыми пучками, приходящими от различных элементов интегральной схемы или от различных процессоров (ядер) в суперкомпьютере.

Параметры переключателя:

- **Ультра-компактный, 40×12 мкм² ;**
- **Время переключения между каналами < 2 нс;**
- **Количество каналов: до 9;**
- **Скорость передачи данных по каналу: до 40 Gbit/s**

Для реализации этой идеи необходимо создание трех оптических устройств:

- **(III) Оптический модулятор**, который преобразует данные, поступающие из процессора в виде электрического сигнала, в световой сигнал; оптический демодулятор, который производит обратное преобразование светового пучка в электрический сигнал, который обрабатывается процессором.
- **В 2007 году исследователи из IBM создали оптический модулятор с характерными размерами (длиной) в пределах 100-200 мкм.**
- **Модулятор включает в себя кремниевый нановолновод, который имеет поперечные размеры 220 нм по высоте и 550 нм по ширине.**
- **Исследователи из IBM показали, что при помощи такого модулятора можно передавать данные со скоростью 10 Гбит/с.**

Использование технологий нанофотоники для создания многоядерных портативных суперкомпьютеров

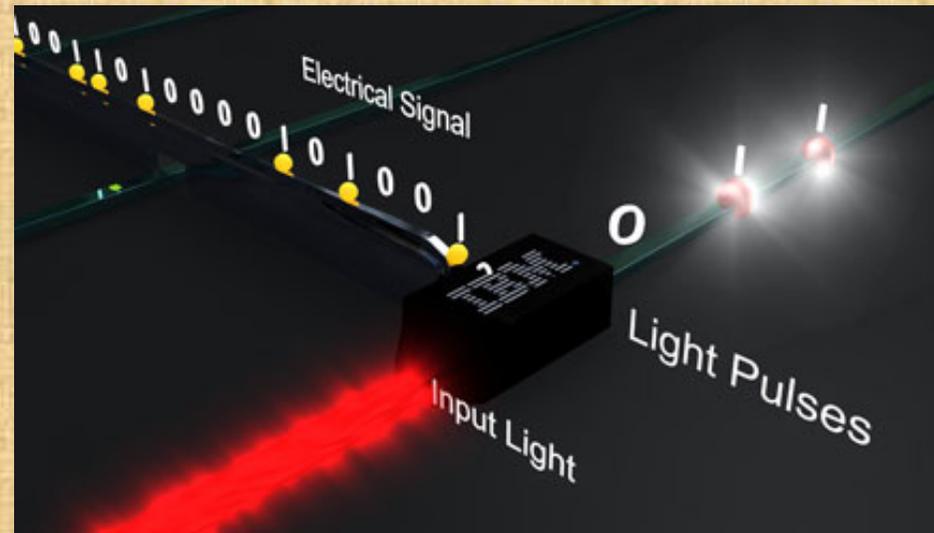


Рис.21. Иллюстративное изображение оптического модулятора. Электрический сигнал, поступающий от процессора и содержащий информацию, закодированную в виде последовательности нулей и единиц, при помощи оптического модулятора преобразуется в последовательность световых импульсов. Прохождение света через модулятор отвечает логической единице, отсутствие света отвечает логическому нулю.

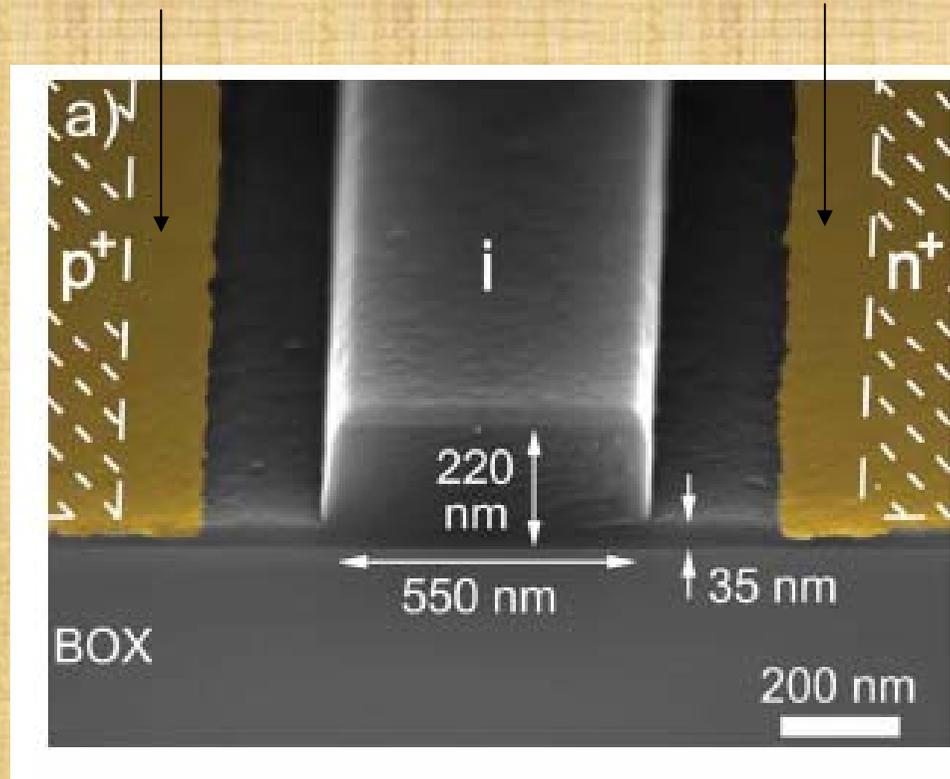


Рис.22. Изображение кремниевого оптического модулятора фирмы IBM, которое получено при помощи сканирующего электронного микроскопа. Вертикальными черными стрелками обозначен управляющий затвор (катод и анод), при помощи которого модулируется световой луч, проходящий через кремниевый нанофотонный волновод. Этот затвор представляет из себя полупроводниковый p-i-n диод. Кремниевый нановолновод - это прямоугольная полоска с размерами 220 нм (высота) и 550 нм (ширина) [27]. (2007 г.)

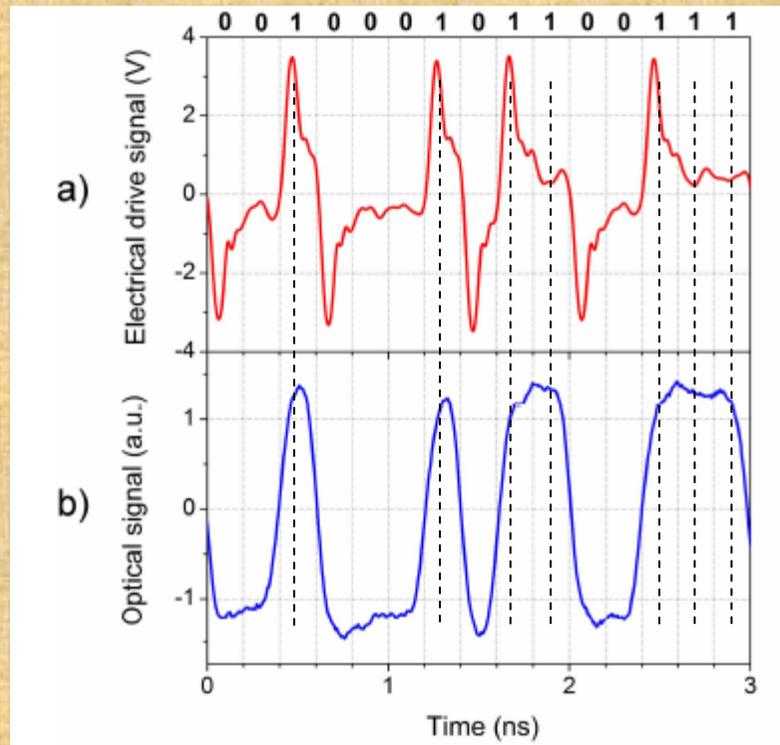


Рис.23. Экспериментальные кривые зависимостей управляющего электрического сигнала (а) и модулированного оптического сигнала от времени (б). Электрическом сигнал несет информацию, которая закодирована в виде последовательности нулей и единиц. Электрический сигнал преобразуется в оптический сигнал, который несет ту же самую информацию [27].

Исследователи из IBM показали, что при помощи такого модулятора можно передавать данные со скоростью 10 Гбит/с.

Уилл Грин, исследователь из корпорации IBM: «Кремниевая нанооптика произведет примерно такой же эффект на микроуровне, какой обычная оптика — на макроуровне, где дистанция измеряется метрами и километрами. Каждое ядро будет снабжено своим оптическим модулятором, который будет существенно меньше его по своим размерам, и этот модулятор будет передавать данные по кремниевым световодам другим ядрам. Таким образом мы сможем обеспечить взаимодействие между тысячами ядер в одном чипе, и мощность современных суперкомпьютеров станет доступной обычному пользователю лет через десять-двенадцать»

Инженер-исследователь из корпорации Intel Кевин Кан: «Необходимо привести скорость передачи данных между компонентами вычислительной платформы в соответствие с быстродействием процессоров. Мы видим кремниевую фотонику в качестве решения этой проблемы, и потому проводим в жизнь исследовательскую программу, которая позволяет нам занимать передовые позиции в этой области. Создание коммерческой версии подобного решения несет огромные преимущества для пользователей. Оптические системы связи позволят устранить узкое место, связанное с разницей в пропускной способности памяти и скоростью процессора, и повысить общую производительность вычислительной платформы»

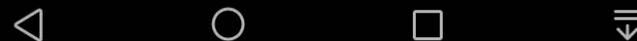
Группа исследователей, работающих в корпорации NEC: «Современное состояние кремниевой нанооптики дает основание считать, что в скором времени появятся промышленные образцы больших интегральных схем, построенных на фотонных принципах. По сравнению с электронными они будут отличаться меньшими размерами и энергопотреблением».

500 самых мощных суперкомпьютеров/вычислительных кластеров в мире (2019 год)

MegaFon

95% 20:44

Rank	Site	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
1	DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	Summit - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband IBM	2,414,592	148,600.0	200,794.9	10,096
2	DOE/NNSA/LLNL United States	Sierra - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband IBM / NVIDIA / Mellanox	1,572,480	94,640.0	125,712.0	7,438



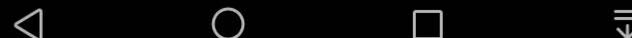
500 самых мощных суперкомпьютеров/вычислительных кластеров в мире

MegaFon

95% 20:45

3	National Supercomputing Center in Wuxi China	Sunway TaihuLight - Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway NRCPC	10,649,600	93,014.6	125,435.9	15,371
4	National Super Computer Center in Guangzhou China	Tianhe-2A - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692v2 12C 2.2GHz, TH Express-2, Matrix-2000 NUDT	4,981,760	61,444.5	100,678.7	18,482
5	Texas Advanced Computing Center/Univ. of Texas United States	Frontera - Dell C6420, Xeon Platinum 8280 28C 2.7GHz, Mellanox InfiniBand HDR Dell EMC	448,448	23,516.4	38,745.9	

6 Swiss National Supercomputing Center - **Bluewin** - Cray XC50 207,072 21,220.0 27,151.2 2,221

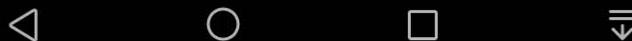


500 самых мощных суперкомпьютеров/вычислительных кластеров в мире

MegaFon

96% 20:46

92	Universitaet Aachen/RWTH - IT Center Germany	CLAIX (2018) - INTEL-HNS2600BPB, Xeon Platinum 8160 24C 2.1GHz, Intel Omni-Path NEC	61,200	2,483.6	4,112.6	692
93	Moscow State University - Research Computing Center Russia	Lomonosov 2 - T-Platform A-Class Cluster, Xeon E5-2697v3 14C 2.6GHz, Intel Xeon Gold 6126, Infiniband FDR, Nvidia K40m/P-100 T-Platforms	64,384	2,478.0	4,946.8	
94	Service Provider T China	B1 - Lenovo HR650x, Xeon Gold 6133 20C 2.5GHz, 25G Ethernet Lenovo	60,000	2,462.4	4,800.0	



**10. В чем заключаются потенциальные
преимущества оптической
интегральной схемы
перед "традиционной"
полупроводниковой интегральной
схемой?**

HP готовит чип из 256 микропроцессоров, связанных лазерными лучами

[6 марта 2012]

[<http://www.wired.com/wiredenterprise/2012/03/hp-corona/>]

Что планировалось:

- К **2017 году** компания **Hewlett-Packard** планирует выпустить микрочип, который будет создан по революционной технологии. Уникальность устройства заключается в том, что микропроцессоры, входящие в состав чипа, **будут связаны между собой лазерными лучами.**
- Производительность чипа, который получил рабочее название **Corona**, будет составлять **10 трлн операций** с плавающей точкой в секунду. Таким образом, пять подобных чипов, связанных между собой, смогут обеспечить производительность, сравнимую с самыми мощными современными суперкомпьютерами. Устройство будет состоять из **256 процессоров.**
- Суперкомпьютер Summit (США, 2019 г.) — производительность 148600 терафлопс, или **148600 триллионов операций в секунду** (Триллион=единица с 12 нулями= 10^{12})

HP готовит чип из 256 микропроцессоров, связанных лазерными лучами

- Скорость обмена данными с памятью составит **10 Тбайт/с**, а между собой процессоры смогут передавать и вовсе астрономические по сегодняшним меркам **20 Тбайт** в секунду. Основное возможное применение подобных чипов – создание суперкомпьютеров, которые смогут выполнять более **1 квинтиллиона (10^{18})** операций с плавающей точкой в секунду – примерно в **100** раз более производительных, чем самые мощные современные устройства. Ключевой особенностью данной технологии является значительно меньшее энергопотребление, чем у традиционных чипов.
- Corona является не единственной разработкой, целью которой является создание сверхбыстрых чипов. В качестве примеров можно привести Runnemedo от **Intel**, Angstrom **Массачусетского технологического института**, Echelon от **NVIDIA** и X-calibur лаборатории **Sandia**.



“**Micro-ring photonic device**”
используемый в проекте
Corona. Изображение
получено при помощи
электронного микроскопа.



**Микрочип с
пучками света.**

Что получилось в 2017 году:

- ❑ Создан «чисто» оптический процессор, на чипе которого присутствуют 1052 оптических компонента, способные быстро и эффективно проводить вычисления
- ❑ На Чипе созданы 4 вычислительных узла, оперирующие с инфракрасным светом
- ❑ Итог: подобные процессоры пока не являются элементами полноценного оптического компьютера, но могут служить для ускорения обработки большого массива данных, например алгоритмов компьютерной графики