

Оптика и кремниевые кристаллы

Кристовский Г.В.
2011

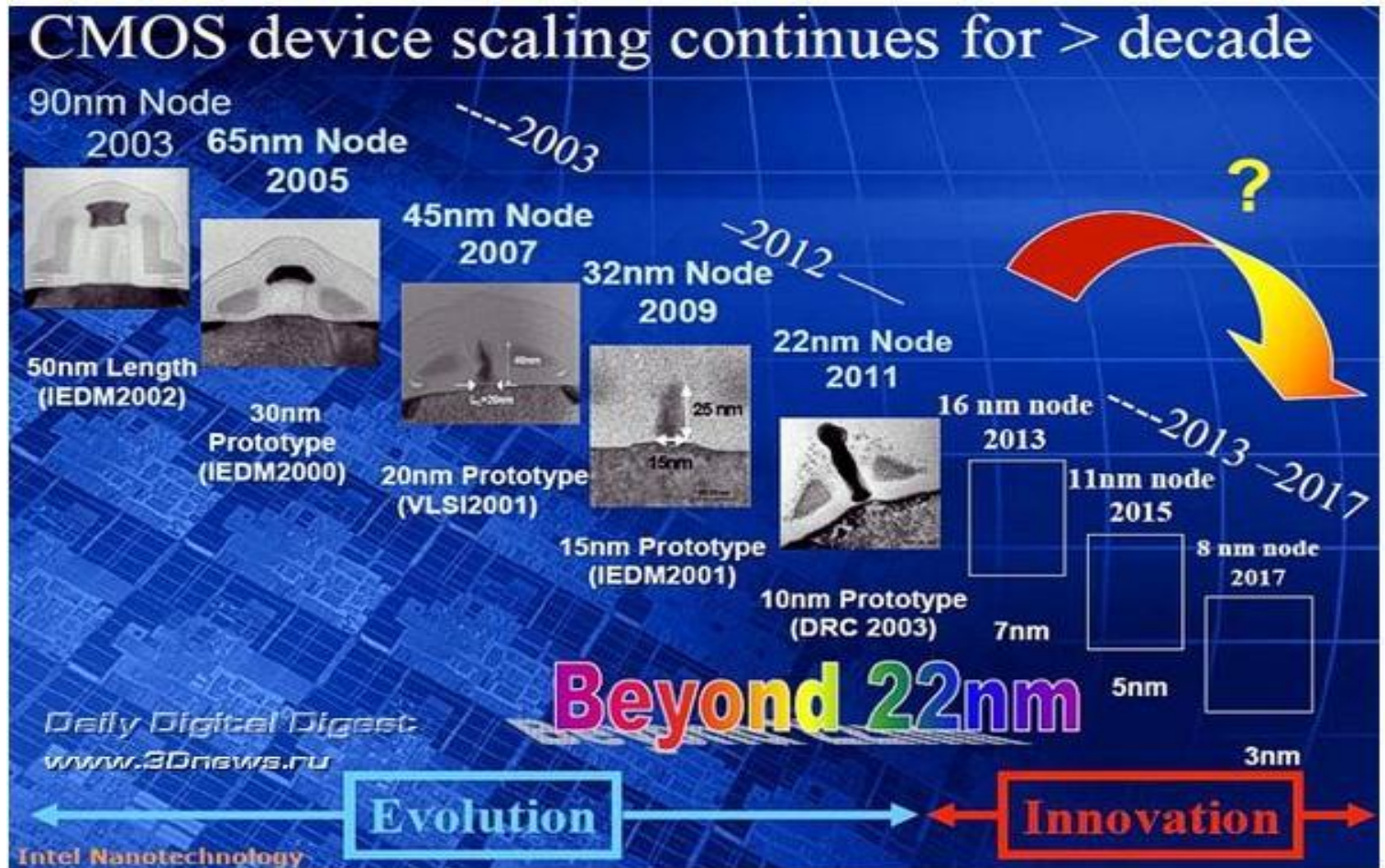


Возрастающий интерес к оптике обусловлен:

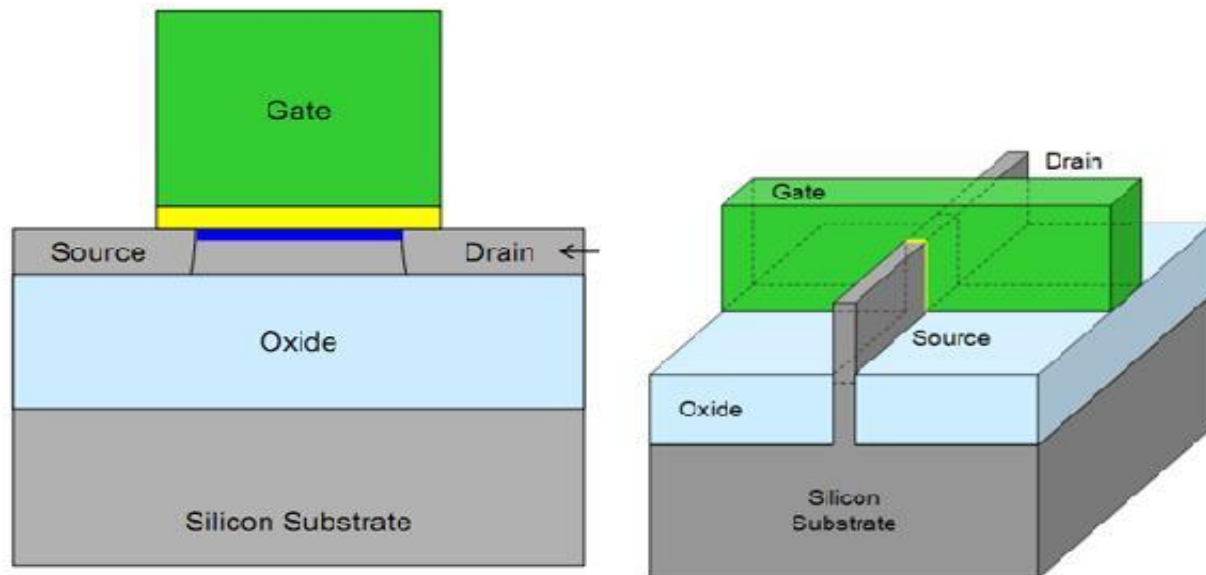
- Проблемами электрических связей
- Растущей степенью интеграции КМОП кристаллов
- Потенциальными возможностями реализации оптических связей
- Обозримым временным интервалом, в течении которого будет достигнут предел миниатюризации МОП транзисторов

Интел "Nanotechnologies"

22nm Q4 2011, 14nm 2013 (Otellini March 2011)

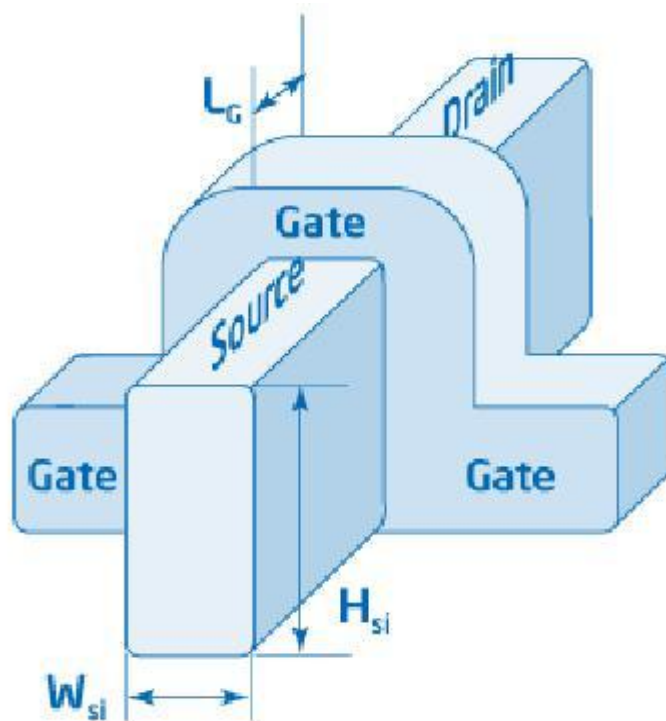


Модели планарного (слева) и трехмерного (справа) транзисторов



Трехмерный транзистор

- $I_d = \mu C_0 \cdot W / L_g \cdot (V_{gs} - V_t)^{\alpha}$ $W = W_{si} + 2H_{si}$





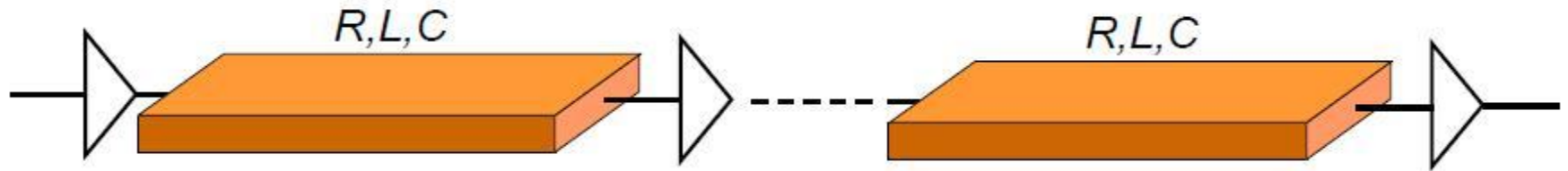
Характеристики 3-D транзистора

- The 22nm 3-D Tri-Gate transistors provide up to 37 percent performance increase at low voltage versus Intel's 32nm planar transistors.
- Alternatively, the new transistors consume less than half the power when at the same performance as 2-D planar transistors on 32nm chips.
- Intel will introduce a 3-D transistor design into high-volume manufacturing at the 22-nm node in an Intel chip codenamed "Ivy Bridge"(2011-2012)

Характеристики медных проводников (внутренние слои)

	90нм	65нм	40нм
Минимальная ширина (мкм)	0.14	0.1	0.063
Минимальный зазор (мкм)	0.14	0.1	0.063
Удельная емкость (пФ/мм)	0.15 – 0.25	0.15 – 0.25	0.15 – 0.20
Удельное Сопротивление (кОм/мм)	0.5	1.0	2.2

Электрические связи



$T = 1/2 r c L^2$ - линия без буферов

$T = N t + r c L^2 / 2 N + r L C i n$ – линия с буферами

степени свободы:

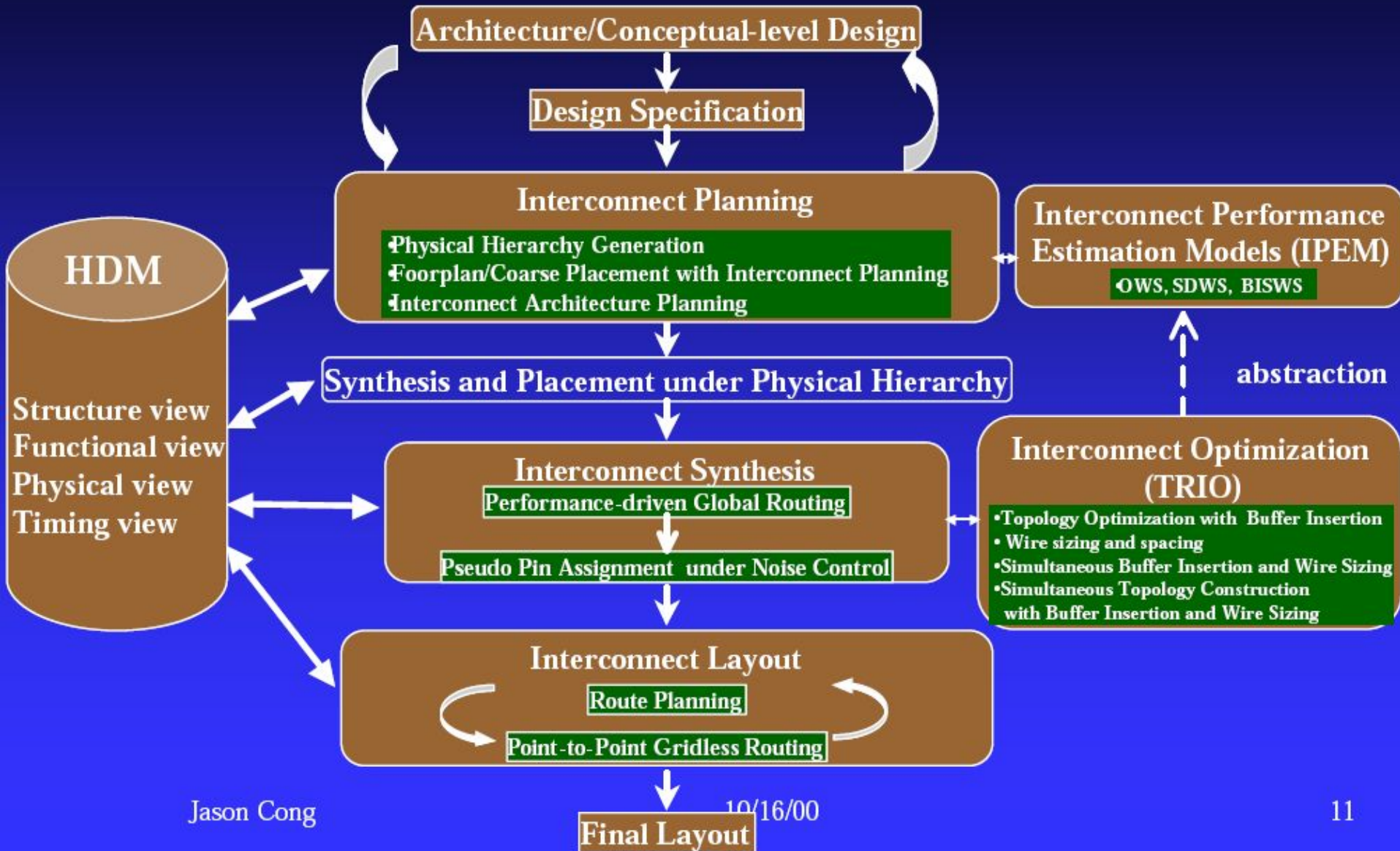
- количество и размеры буферов
- ширина проводников и зазор
- задержка 30-50 пс/мм



Проблемы электрических связей

- До 70% мощности тратится на связи
- Связей очень много, их количество постоянно увеличивается
- Большие блоки порождают длинные локальные связи
- Неоптимальное размещение блоков – длинные межблочные связи
- Задержки на связях неизвестны при размещении
- “Interconnect dominated design”

Interconnect-Centric IC Design Flow Under Development at UCLA

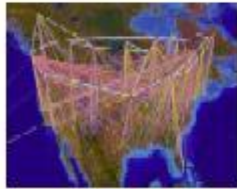


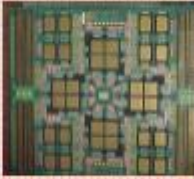





Основные преимущества оптических связей

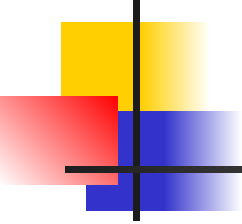
- Высокая пропускная способность
- Уменьшенная задержка – определяется групповой скоростью распространения света в материале волновода: $v=c/\sqrt{\epsilon}$
- Задержка распространения по кремневому волноводу – 100пс/см
- Экономия мощности - рассеиваемая мощность не зависит от длины связи
- Отсутствует взаимное влияние

Эволюция оптических связей

- B.J.Offrein etc, IBM, 2008

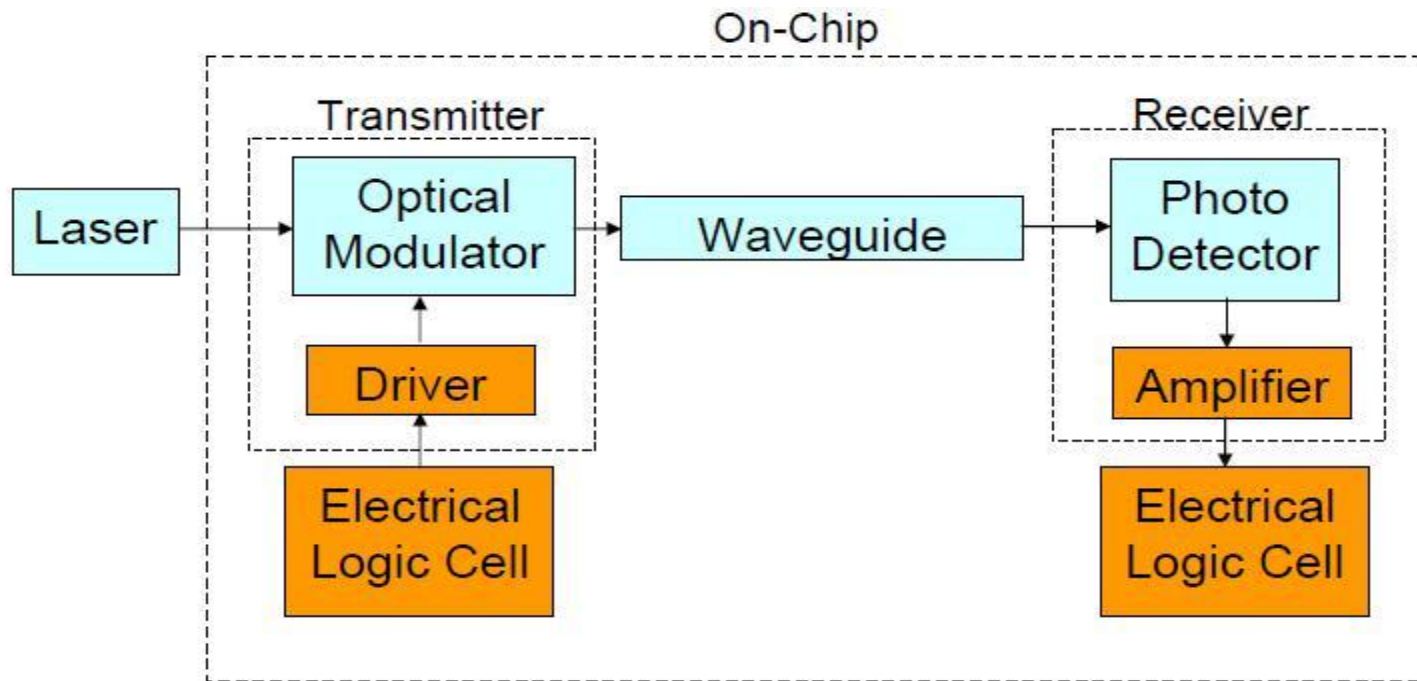
	Internet, Wide Area Network	Local Area Network	Rack-to-Rack	Card-to-Card	On-Card	On-MCM	On-Chip
							
Distance	multi-km	10 - 2000 m	30+ m	1 m	0.1 - 0.3 m	5 - 100 mm	0.1 - 10 mm
Number of lines	1	1 - 10	~100	~100-1000	~1000	~10'000	~100'000
Transfer to light	Since 80s, early 90s	Late 90s	Now	2010+	2010-2015	Probably beyond 2015	Later, in case it will

Фотоника

- 
-
- Фотоника покрывает широкий спектр оптических, электрооптических и оптоэлектронных устройств и их разнообразных применений.
 - Коренные области исследований фотоники включают волоконную и интегральную оптику, в том числе нелинейную оптику, физику и технологию полупроводников
 - Теоретической базой фотоники является оптика и

Реализация оптической связи на кристалле

- **Основная проблема – внешний лазер**
- Кремний прозрачен для инфракрасного излучения



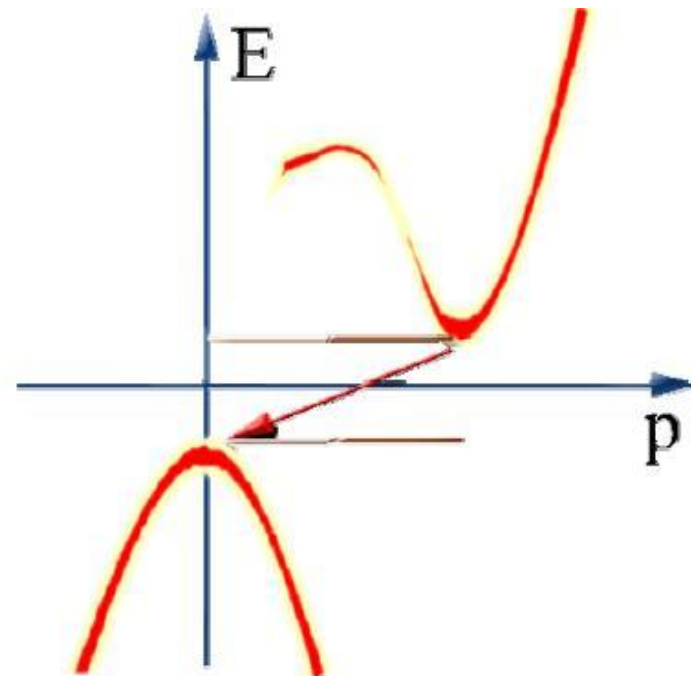
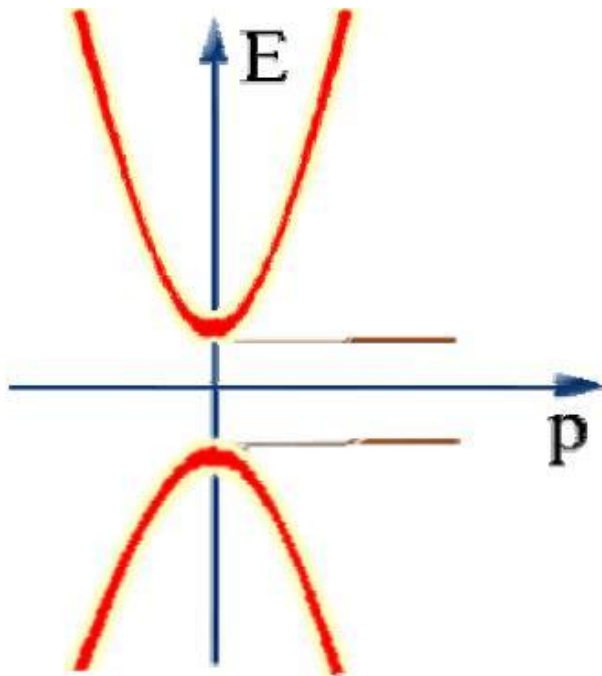


Полупроводниковые лазеры

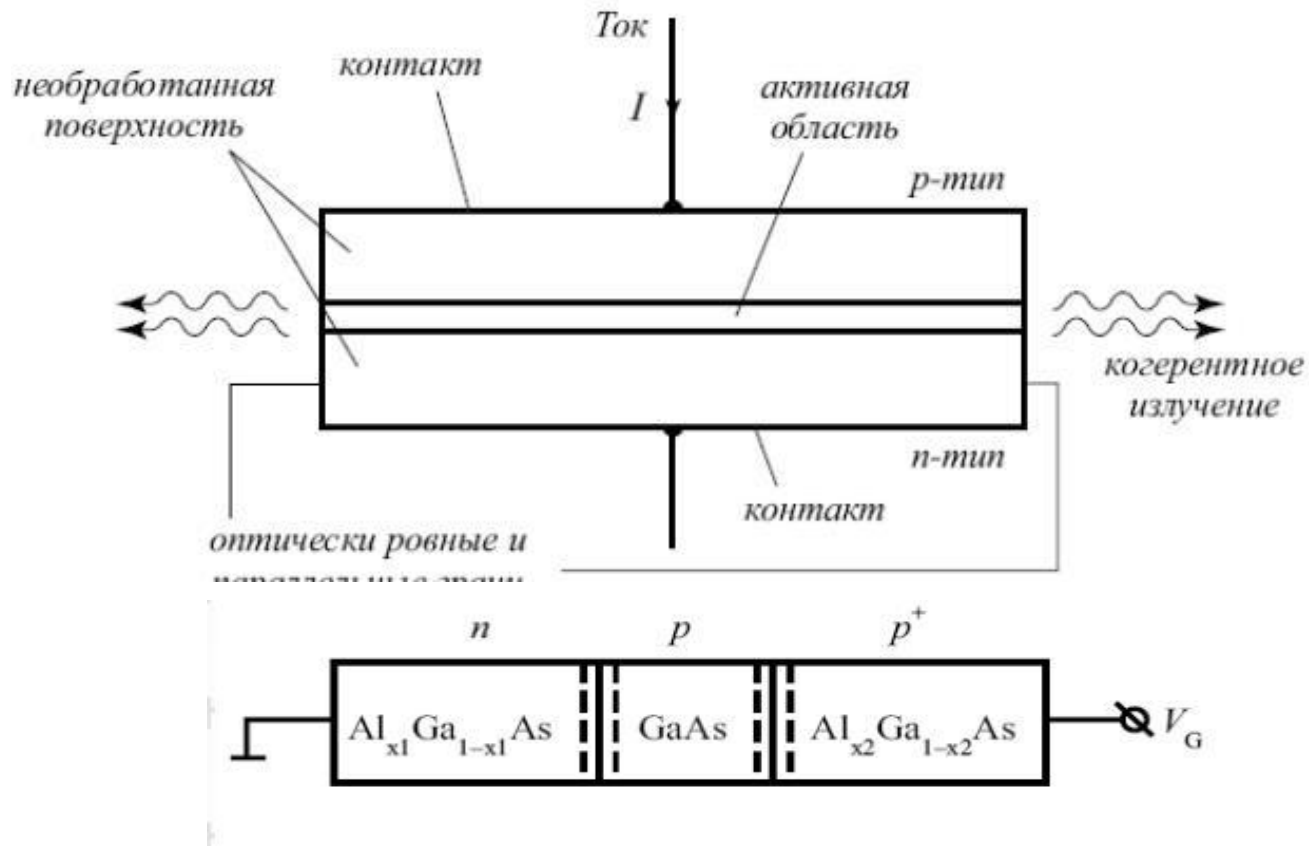
- Классический лазер излучает свет под воздействием электромагнитного излучения
- Эффект генерации света может быть описан, используя представления об энергетических уровнях электронов в атоме
- $h\nu = E_2 - E_1$
- В полупроводниковых инжекционных лазерах методом создания неравновесных носителей является инжекция через прямо-смещенный электронно-дырочный переход

Прямозонные и непрямозонные полупроводники

- Прямозонные – GaAs, GaP, InP
- Непрямозонные – Si, Ge



Полупроводниковые лазеры на гетеропереходах (излучающие диоды)



Гибридный лазер фирмы Intel (2010)

- Темно серый – кремниевая подложка
- Светло серый – кремниевый волновод
- Зеленый – скрытый слой окисла
- Оранжевый – излучающий лазерный диод на основе фосфида индия (слой клея 25 атомов)

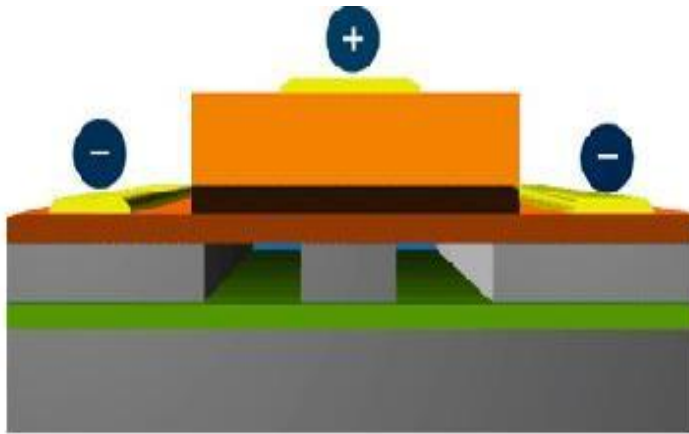
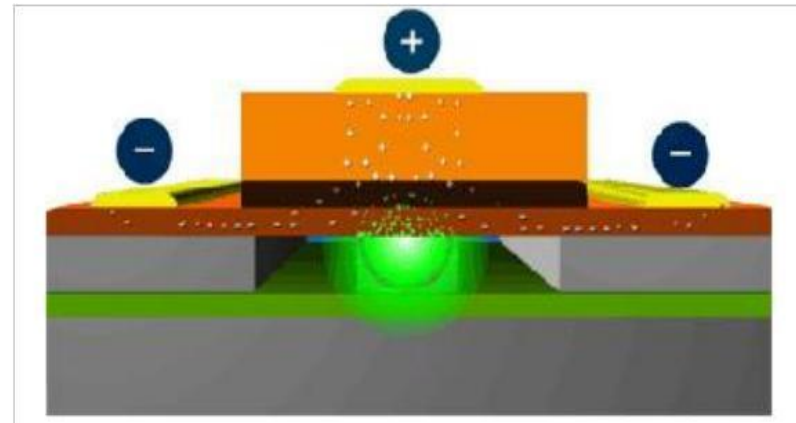
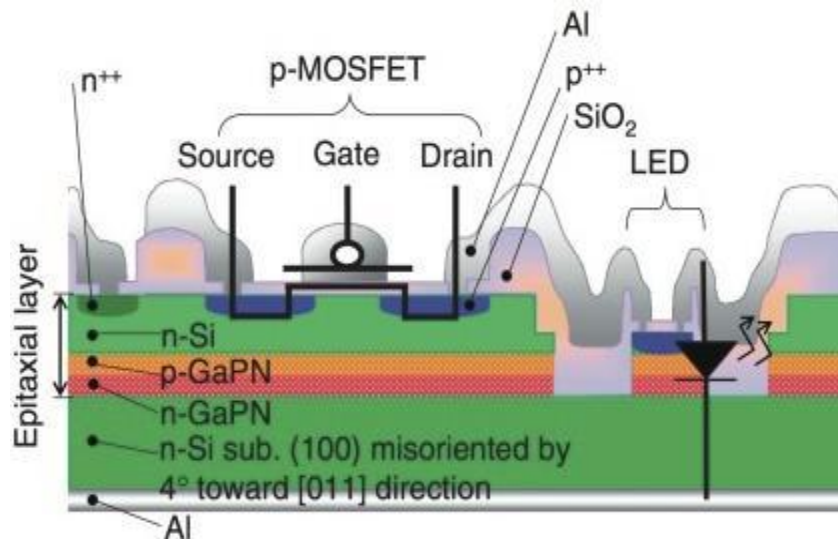


Рисунок 1. Схематическое изображение поперечного разреза гибридного кремниевого лазера.



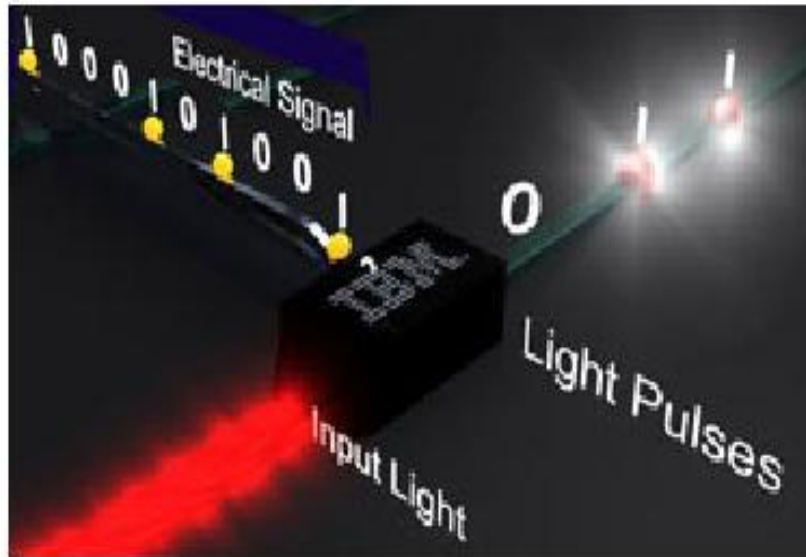
Японский лазер (Toyohashi University of Technology)

- гетерогенные структуры Si-GaPN-Si с согласующимися решетками



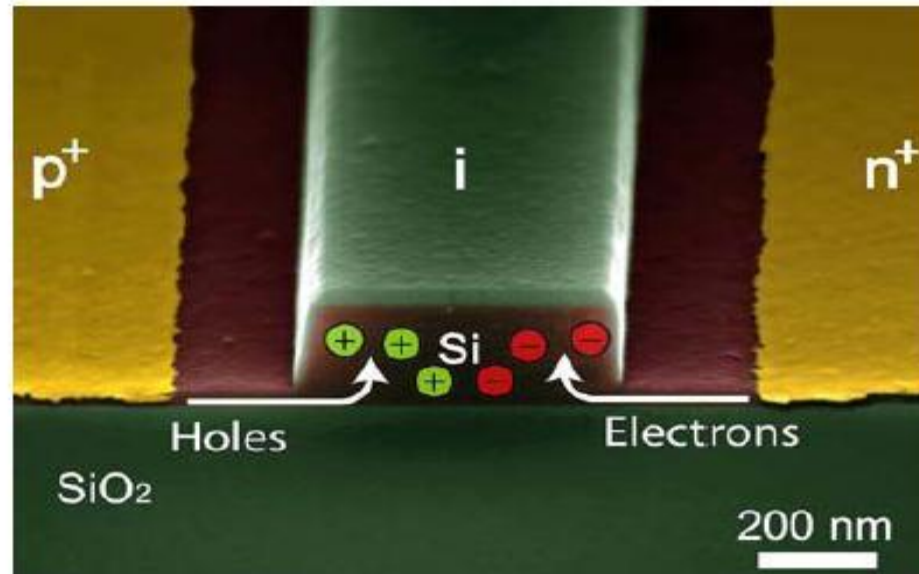
Кремниевый оптический модулятор фирмы IBM (2007)

- В зависимости от содержания входящего потока данных модулятор либо открывается, пропуская лазерный луч, либо закрывается.



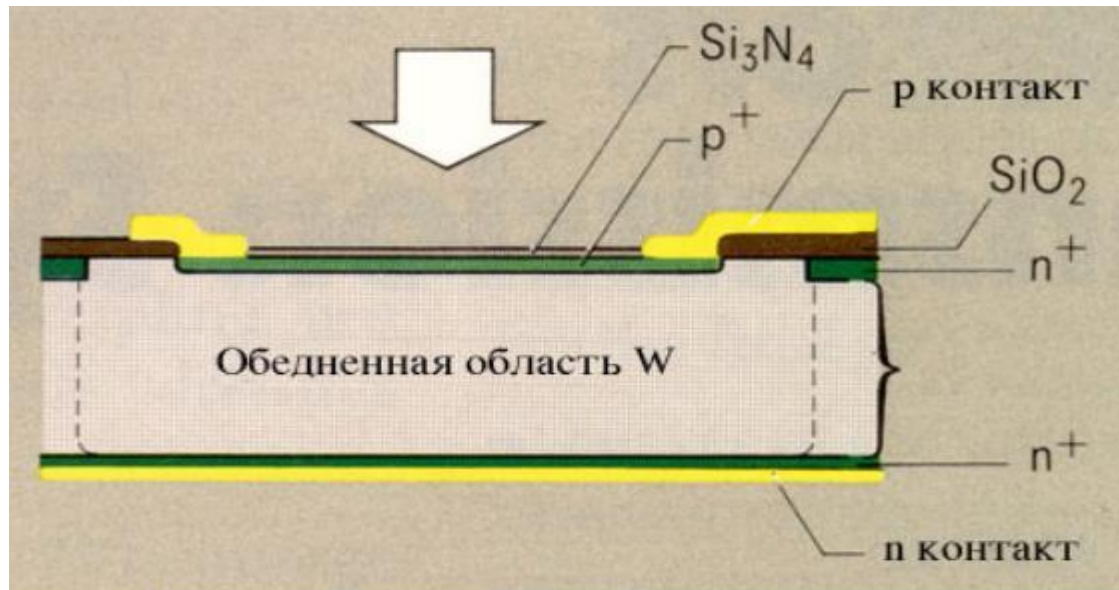
Структура кремниевого модулятора фирмы IBM

- Инжекция электронов и дырок в тело волновода меняет его оптические свойства



PIN диод в качестве детектора света

- Свободные носители, появившиеся за счет облучения, ускоряются электрическим полем
- Ток через диод пропорционален потоку фотонов
- Частота ограничена сотнями мегагерц



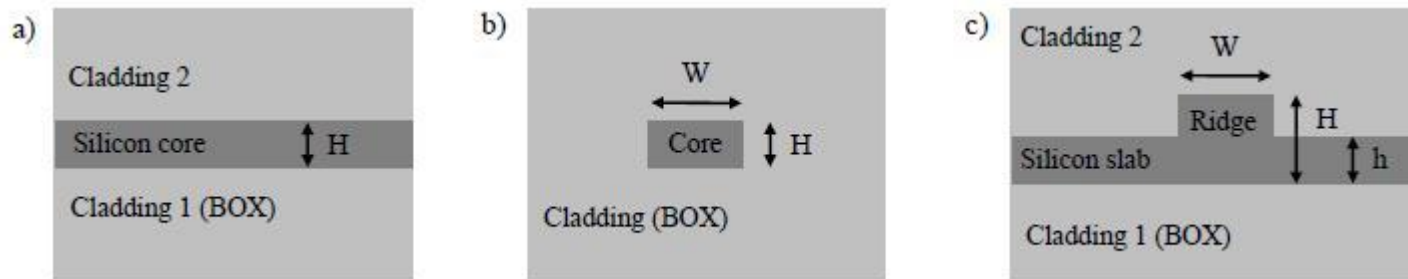
Конструкция pin-фотодиода



Нанопотонный лавинный диод

- Продемонстрированный IBM в 2010 году лавинный фотодиод является самым быстрым в своем роде устройством. Он способен получать информационные сигналы со скоростью 40 Гбит/с (40 млрд бит в секунду) и одновременно десятикратно их усиливать.
- Более того, устройство работает при напряжении питания всего 1,5 В, что существенно меньше, чем у подобных устройств, демонстрировавшихся ранее.

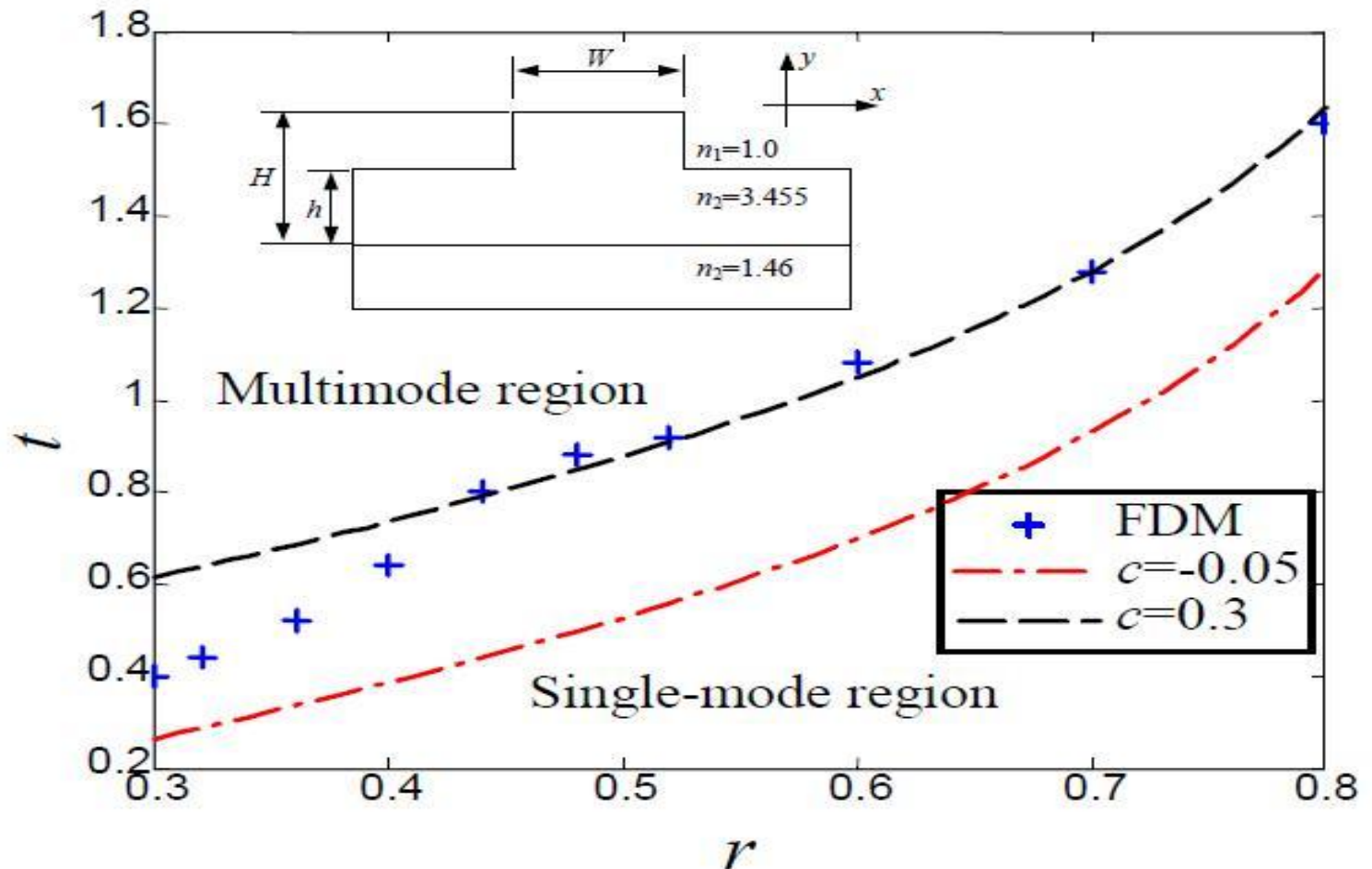
Крениевые волноводы



- Кремний прозрачен для инфракрасных лучей
- Cladding – свето отражающие обкладки
- W – ширина волновода
- H - толщина волновода

Single mode vs multi mode

$$R = h/H \quad t = W/H$$





Кремниевая нанофотоника

- В 2010 году фирма IBM ввела термин “CMOS Integrated Silicon Nanophotonics”
- Специалисты фирмы IBM заявили, что если внедрение этой технологии пройдет успешно то к 2020 году мы получим мощнейшие и относительно недорогие в обслуживании суперкомпьютеры, которые не будут превышать по размерам теперешние ноутбуки.



Основная идея нано-фотоники

- Ограничение размера кристалла существенно сказывается на его электрических, оптических и магнитных свойствах
- Электрические, оптические и магнитные свойства определяются не только собственно материалом но и его размерами и формой
- *Д. Хохлов «Устройства оптоэлектроники и наноэлектроники»*

Нанолазер

(университет Норфолка США 2009)

- Нанолазер представляет собой сферическую наночастицу золота, которая покрыта стеклоподобной оболочкой, заполненной красителем.
- Освещение таких наночастиц видимым светом приводит к возбуждению на поверхности золотых наночастиц так называемых поверхностных плазмонов - коллективных колебаний электронов, которые в дальнейшем могут затухнуть, передав энергию своих колебаний кристаллической решетке золота, **или резко изменить собственную энергию колебаний, что сопровождается испусканием фотонов света - лазерного излучения.**
- При размере в 44 нанометра каждый созданный учеными сферический источник лазерного излучения испускает свет с длиной волны 530 нанометров, что соответствует зеленому свету.

Использование оптических связей на кремниевом кристалле

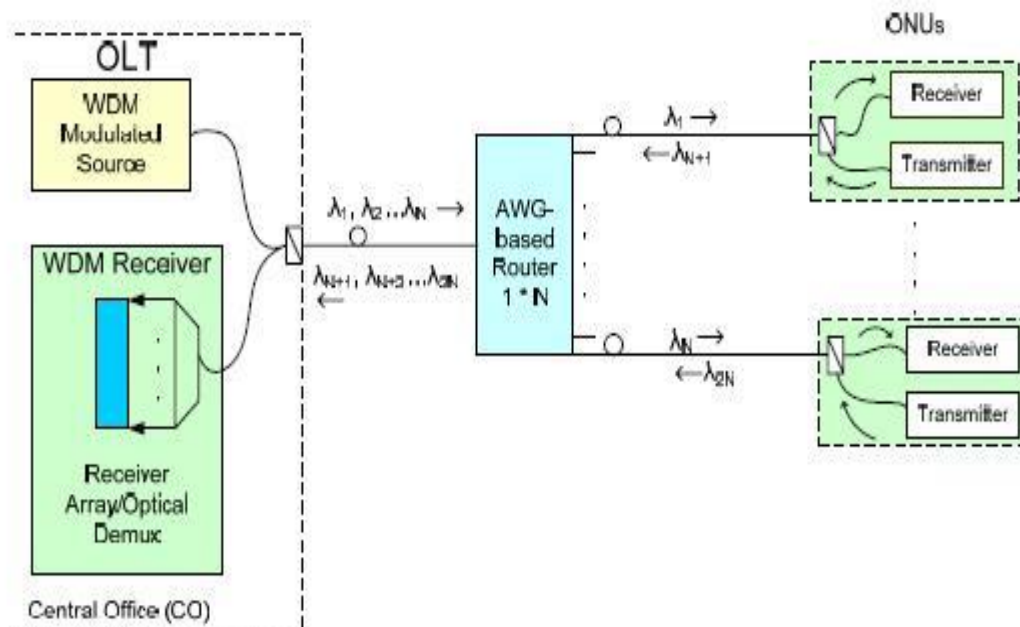
- Оптическая «сеть на кристалле», подобно разветвленной волоконно-оптической компьютерной сети, будет обеспечивать и информационный обмен между ядрами, и маршрутизацию сообщений, которые кодируются импульсами света.
- Специалисты фирмы IBM утверждают, что, используя свет вместо проводов, можно передавать почти в 100 раз больше информации между процессорными ядрами, расходуя при этом в 10 раз меньше мощности

Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON)

OLT – optical line terminal, ONUs – optical network units

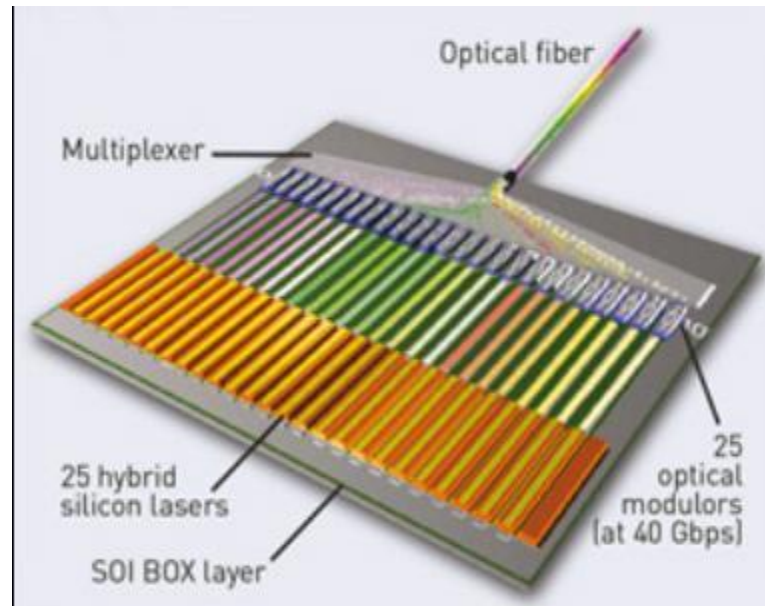
Coarse WDM -20 nm spacing – десятки каналов

Dense WDM – 3.2 nm spacing – сотни каналов



Терабитный приемо-передатчик фирмы Интел

- Концепция будущего встроенного терабитного оптического кремниевого передатчика



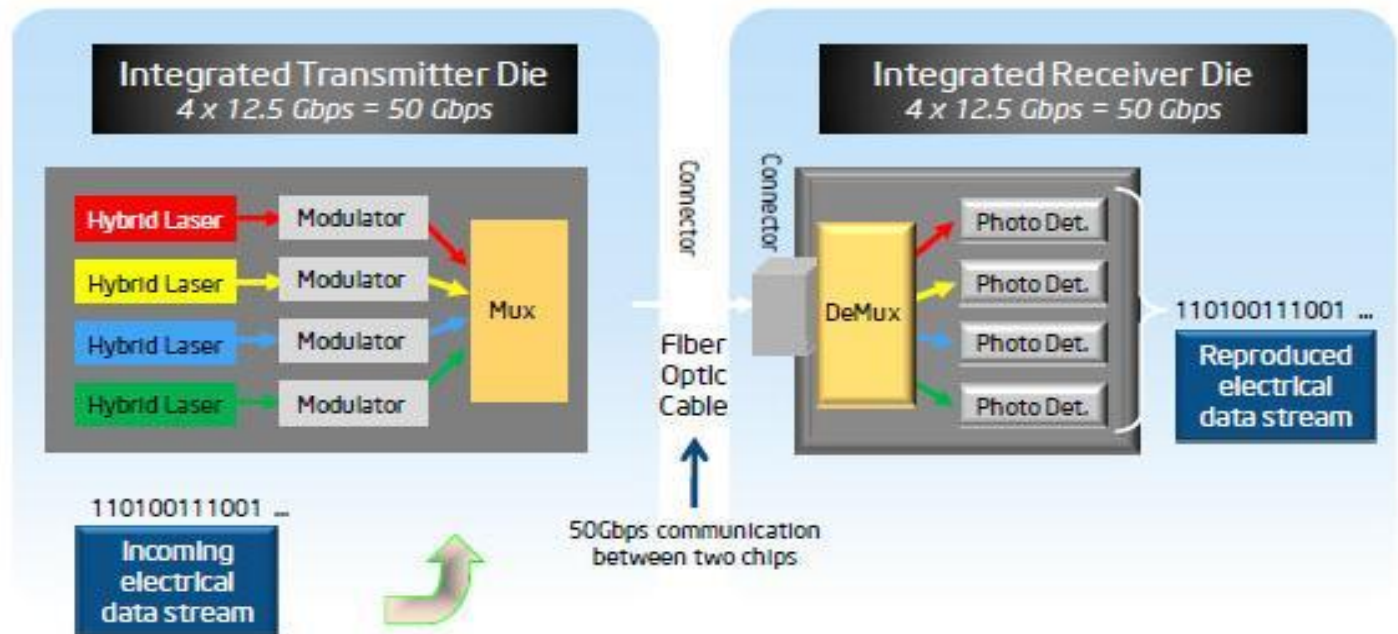
Зарубежные программы



- США – “ Ultra performance Nanophotonic Intrachip Communications”
- Япония – “ Optical Interconnect Project”
- Европа – “ Wavelength Division Multiplexed (WDM) Photonic Layer on CMOS”

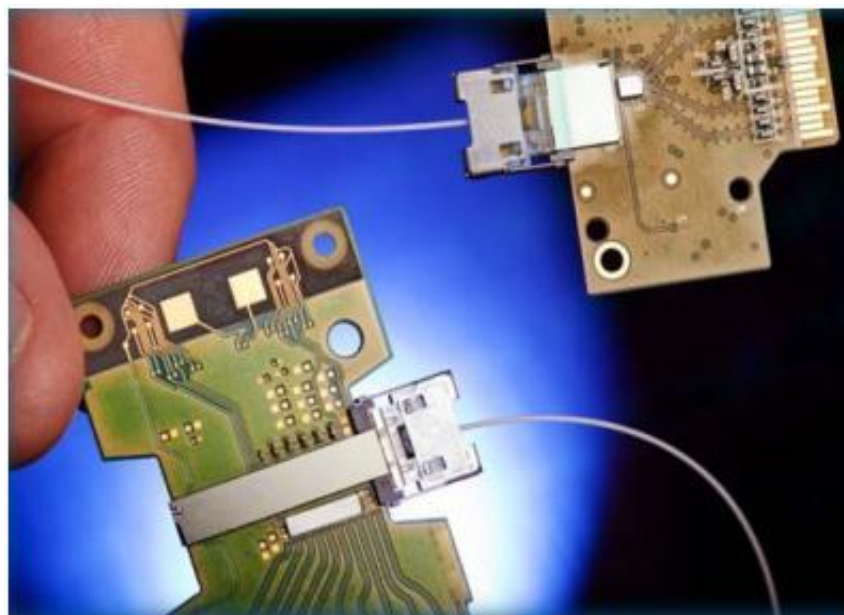
Intel Light Peak

- Прототип оптической связи между кристаллами был продемонстрирован в 2009г



Прототип оптической связи между кристаллами

- Пропускная способность – 50Гбит/сек



Luxtera launches silicon CMOS photonics based optical engine



- The engine supports four fully integrated 14Gbps opto-electronic transceiver ([transmitter+receiver](#)) channels on a single CMOS chip. Targeted at next-generation InfiniBand, Ethernet, SAS and Fibre Channel applications, it marks the next step in Luxtera's delivery of a fully integrated, low-cost transceiver chip-set family spanning 10Gbps to 1Tbps.
- The device uses mainstream CMOS fabrication processes to deliver on-chip waveguide level modulation and photo-detection, along with associated electronics, resulting in a fully integrated single-chip optical transceiver.
- Luxtera will start sampling its new optical engine in second-quarter 2011.

Презентация IBM на Semicon Токио-2011

- Прототип процессора с 6-ю оптическими линками
- На чипе расположено 6 передатчиков и приемников, каждый из которых обслуживает 8 каналов
- Встроенные модуляторы с полосой 20 Гб/сек
- $20 \text{ Гб/сек} \times 8 = 160 \text{ Гб/сек} \times 6 \sim 1\text{Тб} / \text{сек}$ – это пропускная способность внешних линков
- "In three to five years, silicon photonics will be the main enabler for exa-scale computation"



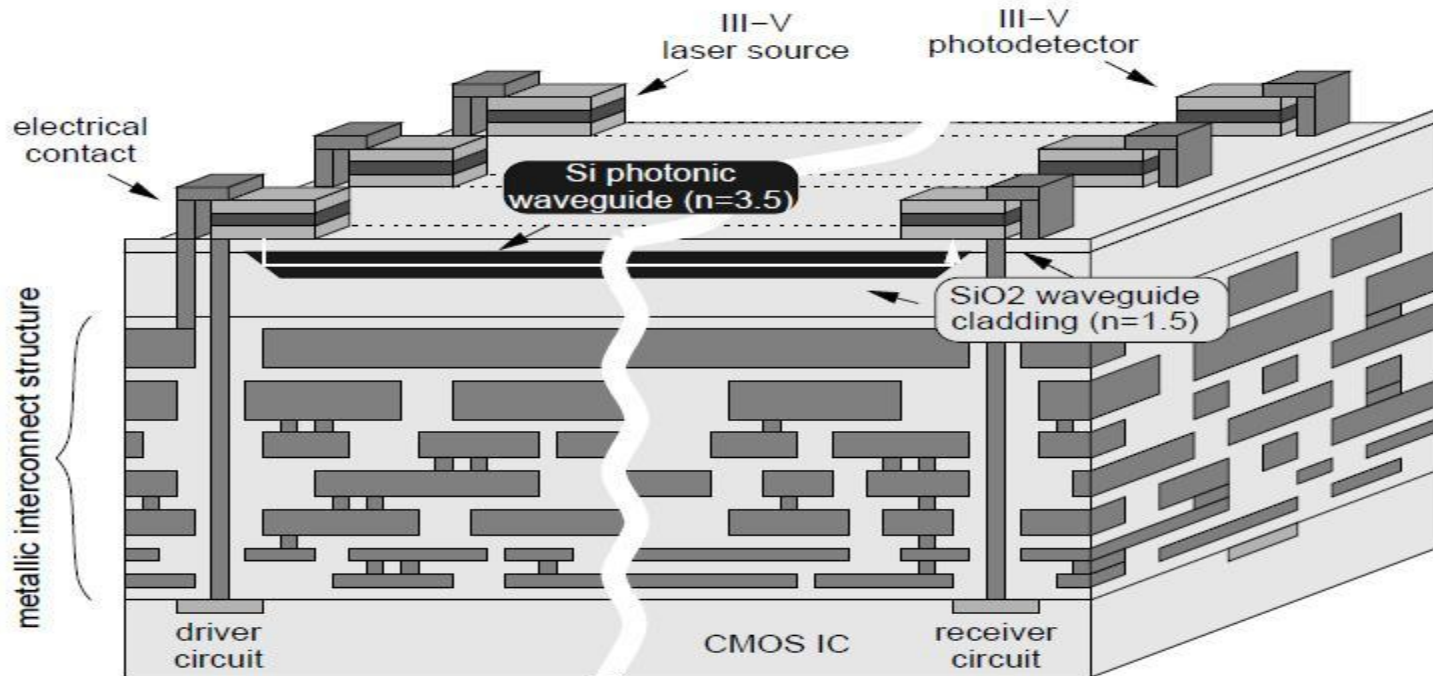
Предварительные итоги

- На сегодня продемонстрированы и исследованы работающие образцы всех компонент, необходимых для реализации оптических связей на кремниевых кристаллах
- Нанотехнологии позволяют создавать еще более миниатюрные и эффективные компоненты такие как лазеры на плазмонах, излучающие диоды на квантовых ямах и другие
- Появление кремниевых кристаллов с оптическими связями можно ожидать в интервале 2015 – 2020.

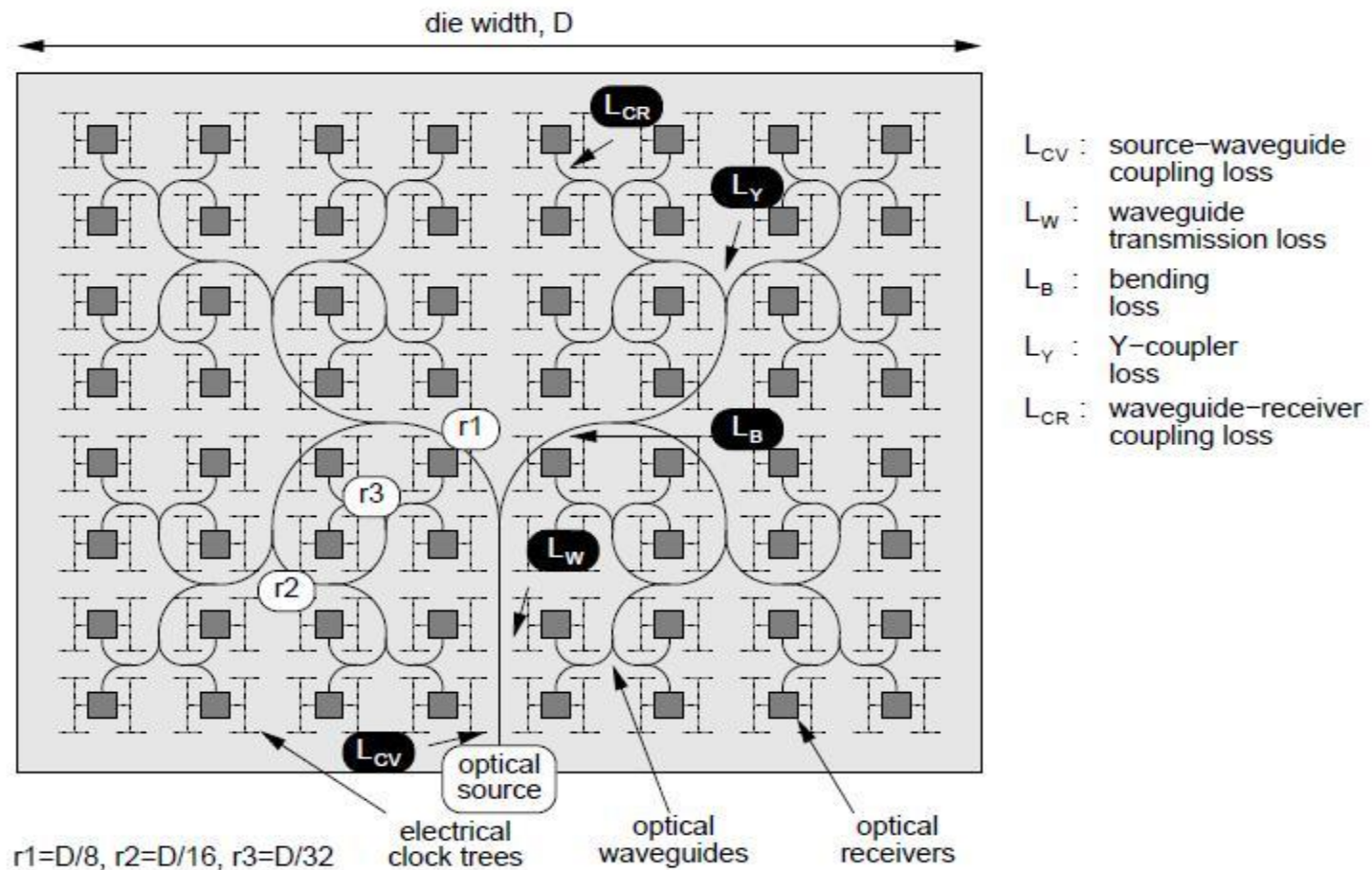
Возможная структура (2004)

Ослабление сигнала в волноводе на базе поликремния 4db

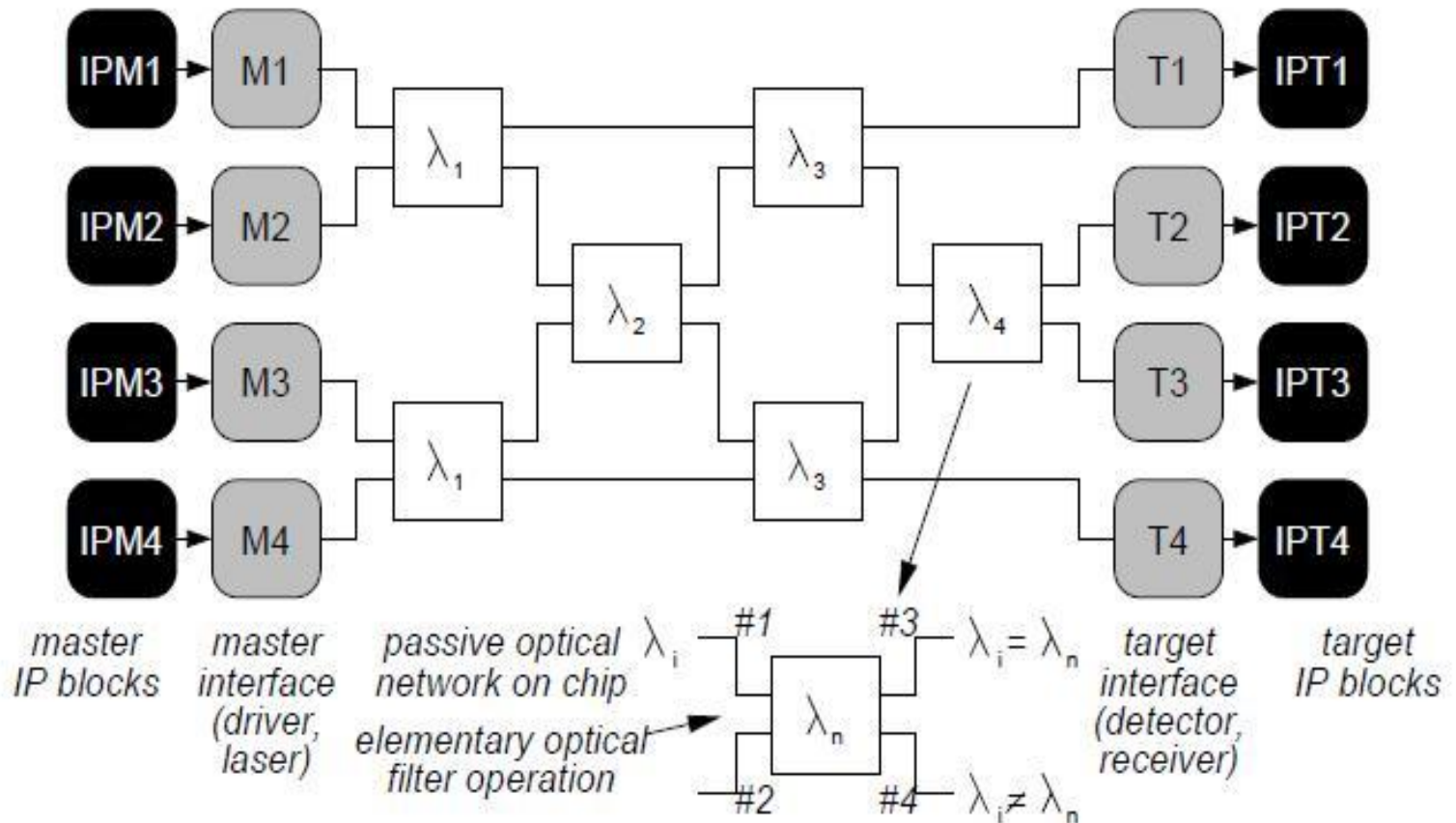
- Кремниевый волновод -1дб/см ($k=1.2$)
- Волновод из поли-кремния -4дб/см ($k=1.6$)



Пример оптической разводки синхросигналов

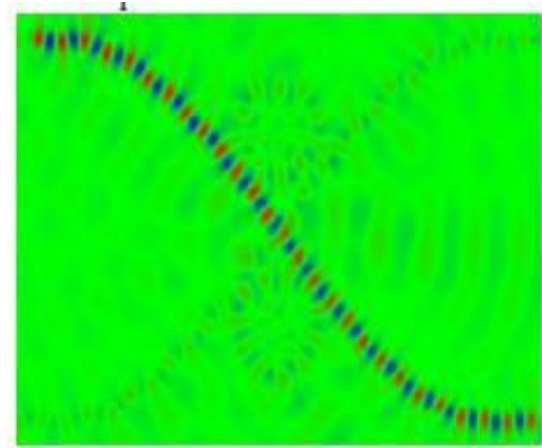
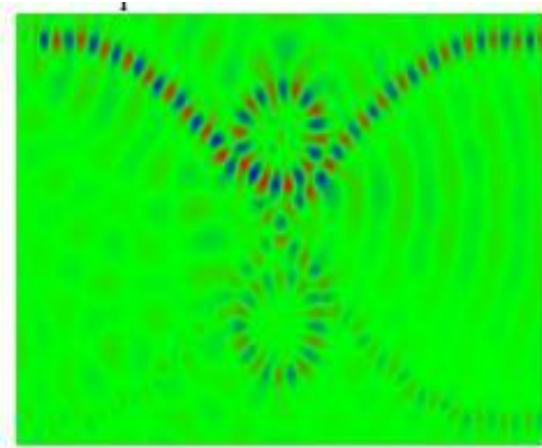


New type of SOC – optical network



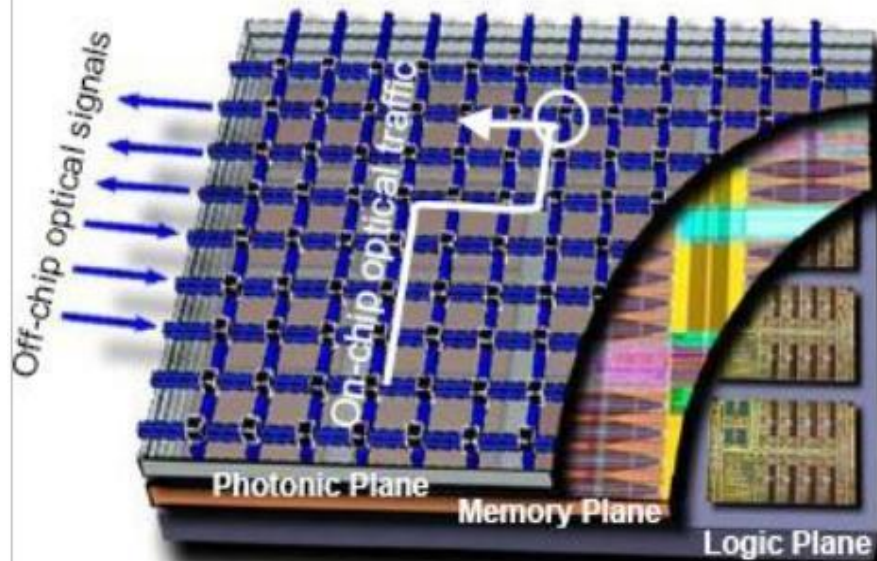
Принцип работы оптического переключателя

- Длина волны совпадает с резонансной частотой (левый рис.)
- Длина волны не совпадает с резонансной частотой (правый рис.)



Проект фирмы IBM (2008)

Vision for 22nm CMOS (circa 2018) - 10 TFLOPs on a 3D chip



36 "Cell" chip (~300 cores)

System level study:
IBM, Columbia, Cornell, UCSB

Co-PIs:
Jeff Kash (IBM)
Keren Bergman (Columbia)
Yurii Vlasov (IBM)

Logic plane	~300 cores
Memory plane	~30GB eDRAM
Photonic plane	On-Chip Optical Network >70Tbps optical on-chip >70Tbps optical off-chip

Photonic layer is not only connecting various cores, but also routes the traffic