Высокоскоростные волоконно-оптические интерфейсы для микроэлектроники на базе интегрально-фотонных чиплетов: состояние дел в отрасли и перспективы развития

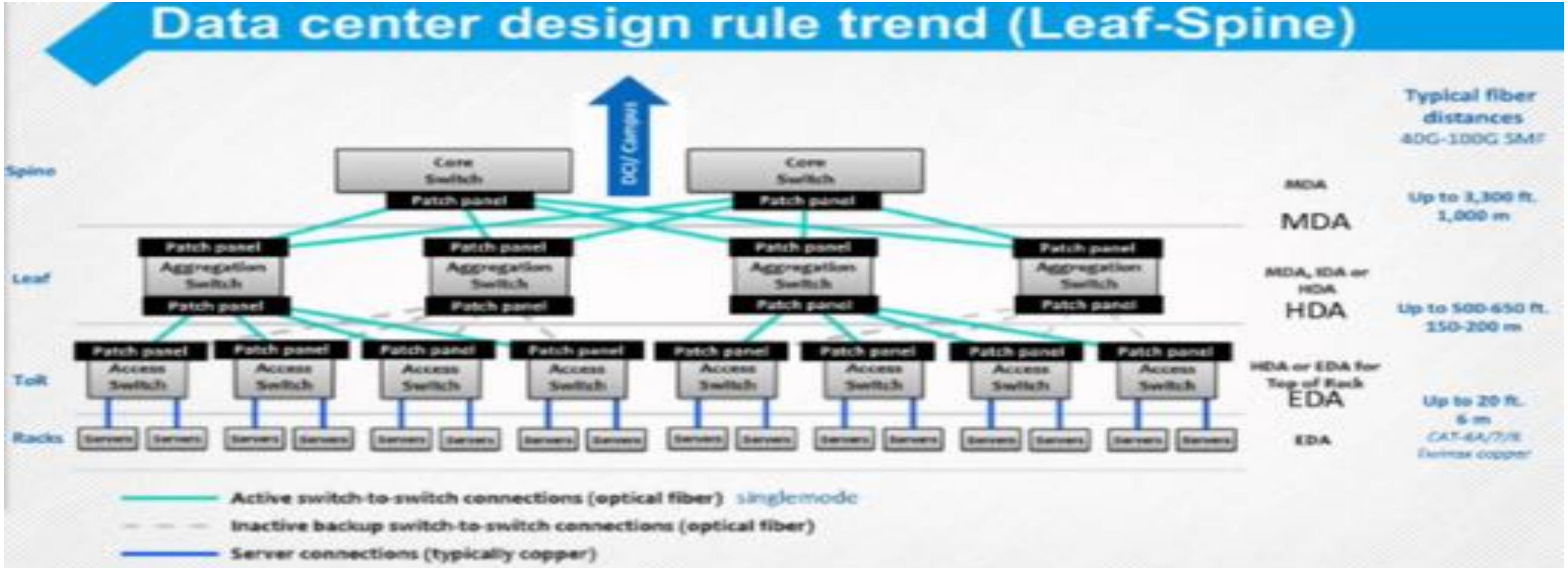
Елизаров Сергей Георгиевич
научный руководитель дизайн-центра микроэлектроники «Мальт систем»
генеральный директор ООО «ЦИФ МГУ имени М.В.Ломоносова»

Микроэлектроника-2022, Роза Хутор
Секция №12 Технологии оптоэлектроники и фотоники
5 октября 2022 года

Уточним тему...

Высокоскоростные волоконно-оптические интерфейсы для микроэлектроники, зачем и для чего это нужно?

- для микроэлектроники: соединяем узлы (nodes) или чипы (CPU/GPU/NPU...),
- передача данных на скорости ОЗУ (200+ Гбит/с) с латентностью 10+ тактов,
- расстояния 1 м - 10 км., связь внутри большого ЦОД и между соседними ЦОД.
- среда передачи данных - одномодовое волокно, длина волны 1300 - 1550 нм.



2-10 км

300-1000 м

100-300 м

1-5 м

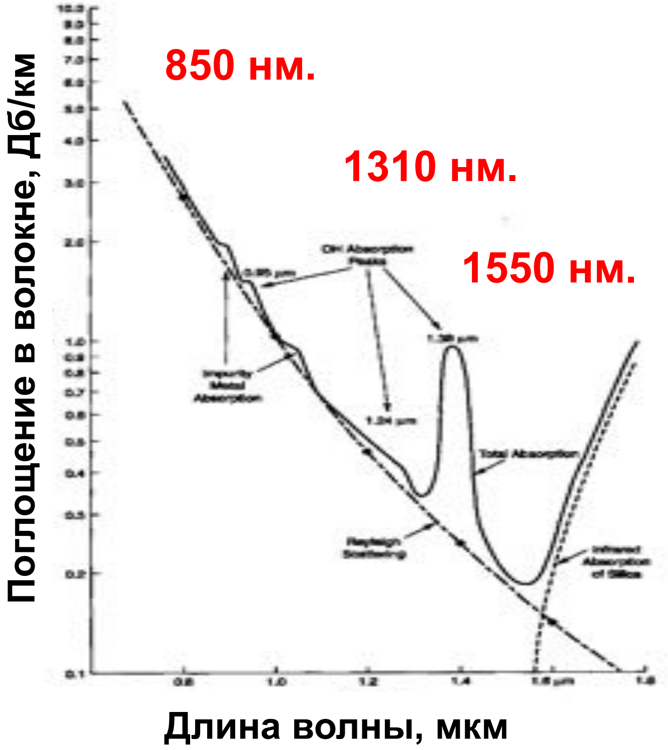
Почему оптическое волокно?

MALT system

Волоконная оптика - это настоящее магистрального телекома и будущее телекома в ЦОД

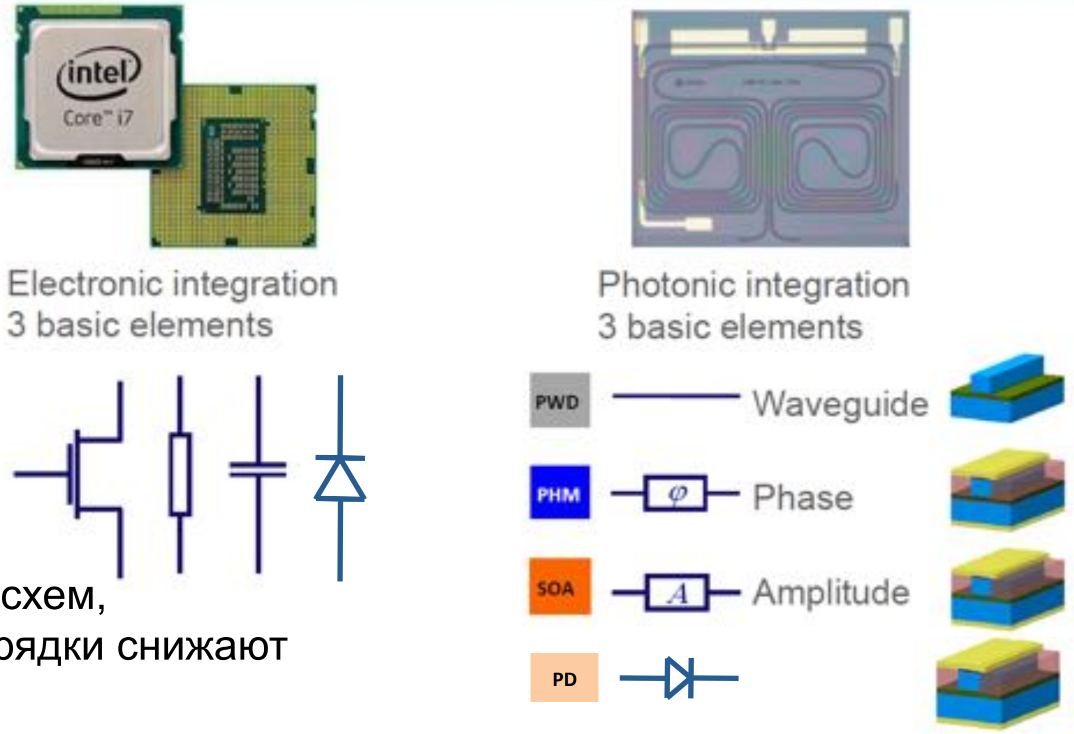
В коммерческих магистральных dwdm-сетях системах связи (более 10 км, в международной классификации "Metro") уже сегодня достигнуты скорости до **40 Тбит/с** на волокно, в топовых экспериментальных системах еще выше, до **10 000 Тбит/с** при передаче на десятки км!

В это же время, в 2020 году, на конференции Beyond 112G, США был заявлен последний "медный" стандарт передачи - **112 Гбит/с** на дифф. пару, на расстояние до **100 см.** Быстрее уже не будет. Поэтому в будущем у оптического волокна в ЦОД просто не будет конкурентов.



Почему интегральная фотоника?

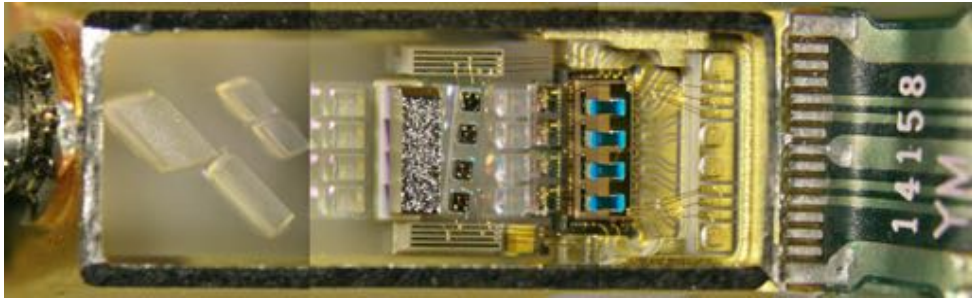
Интегральная технология всегда означает высокую интеграцию и низкую стоимость сложного изделия



Сегодня в телекоммуникационной оптике происходит революционный переход от дискретных к интегральным компонентам. Фотонные интегральные схемы (ФИС) являются оптическим аналогом электрических интегральных схем, и, соответственно, потенциально на порядки снижают себестоимость и габариты изделия.

Почему интегральная фотоника?

Интегральная фотоника - то самое недостающее звено, которое сделает "быстрое волокно" доступным для ЦОД



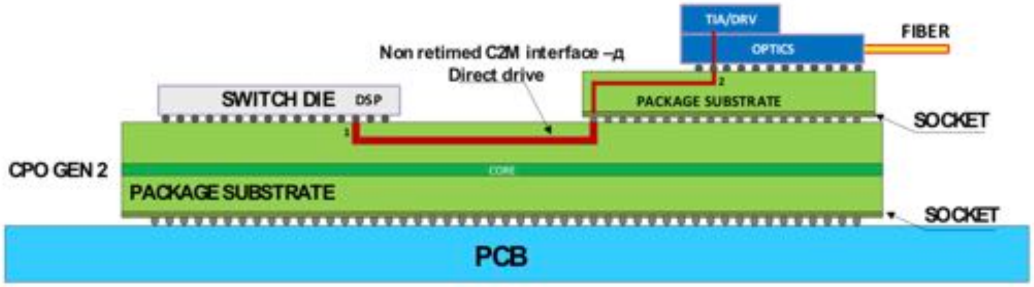
Классический CWDM4 100G передатчик. Видны дискретные оптические компоненты: призмы для сведения волн, фокусирующие линзы, дискретные лазеры, опорные фотоприемники.

Интегрально-фотонный CWDM4 100G блок от компании Intel, все оптические компоненты интегрированы в одной фотонной-интегральной схеме.

Почему чиплеты?

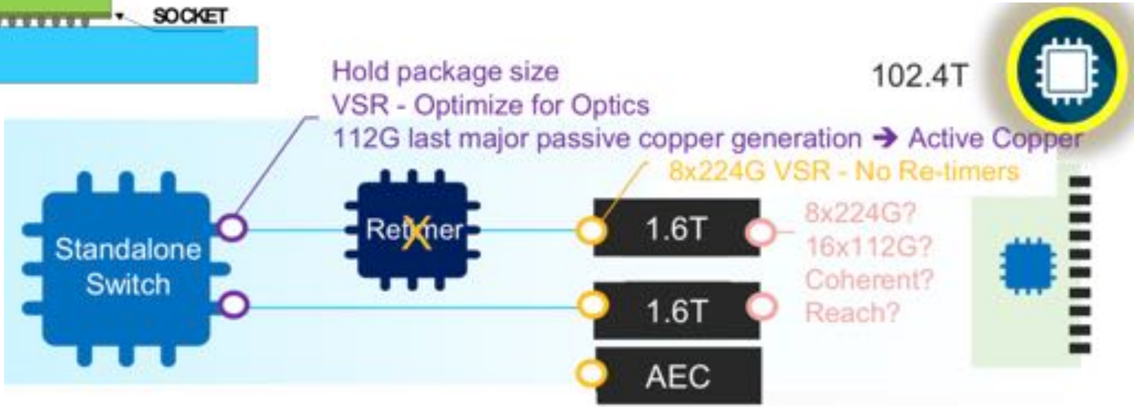
Да потому, что это единственная возможная "близкая по меди" компоновка

Что будет дальше уже известно: к 2025-тому году волокно "войдет" в наиболее производительные микропроцессоры и коммутаторы в ЦОД, а далее станет неотъемлемым атрибутом вычислительной техники ЦОД.



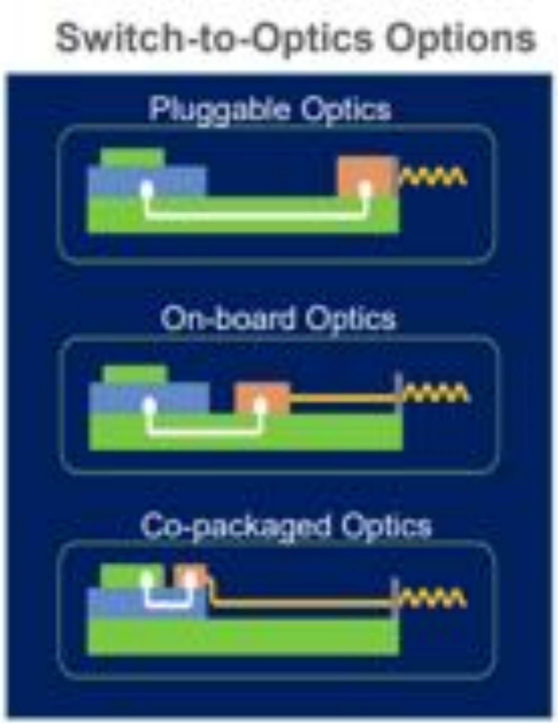
100 Tbit/s коммутатор, прямой ввод волокна на кристалл, DWDM, 200G на λ. **Facebook** Beyond 112G, 2020,

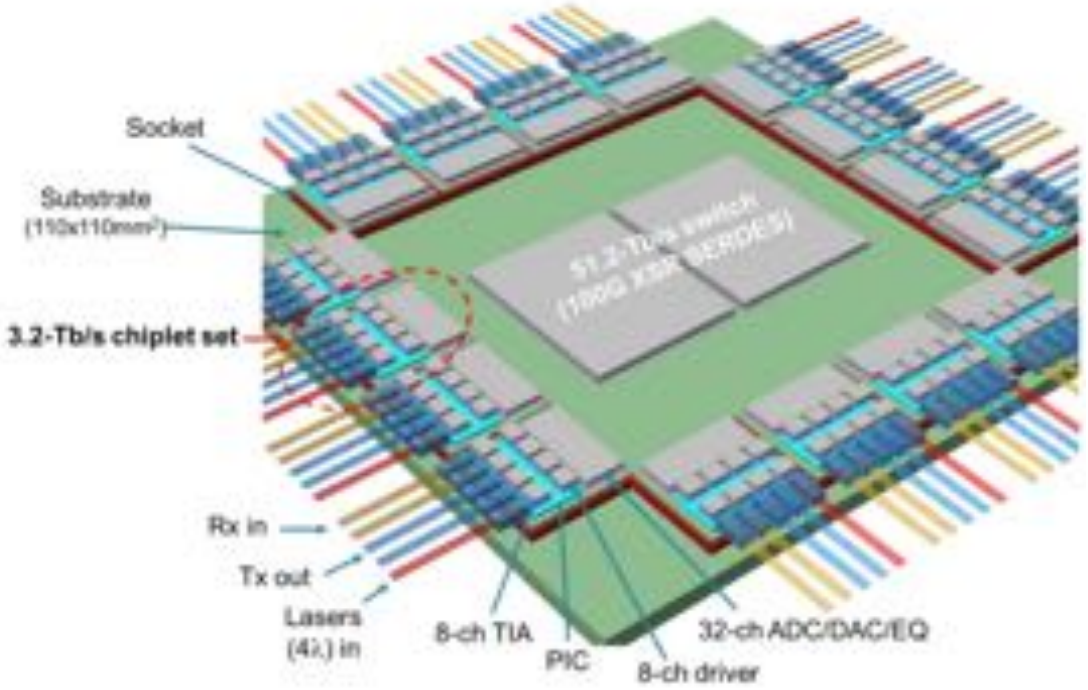
52 Tbit/s коммутатор, уход от ретаймеров, применение оптоволокна. **Cisco** Beyond 112G, 2020.



Будет на рынке завтра

Вовсю тестируется с лабораториях, хотя пока вы не увидите этого на рынке

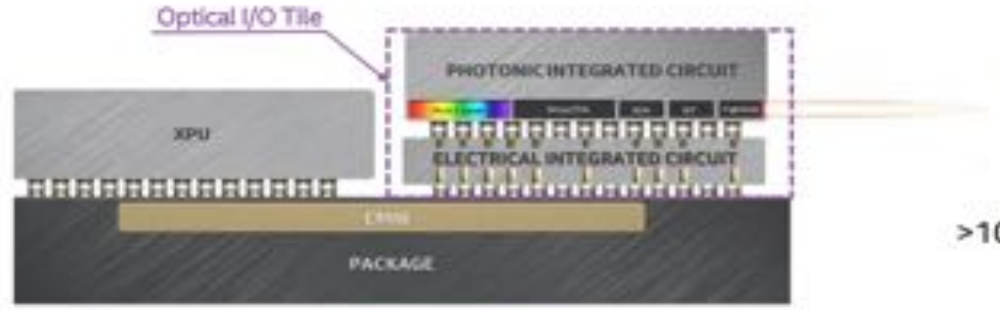


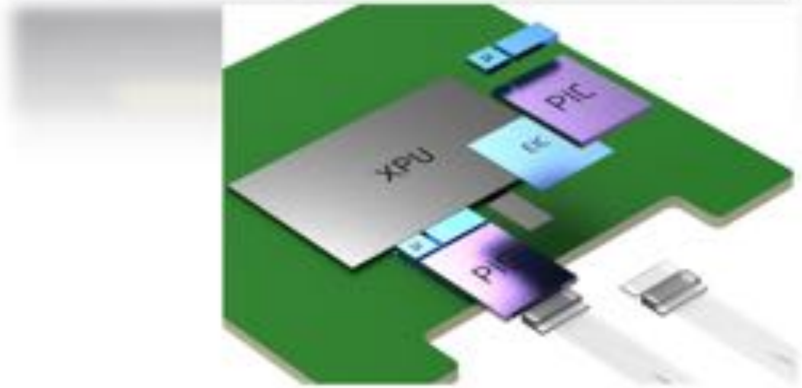


Acacia (Cisco, USA). 50 Tbps Switch
Coherent Optical Solutions for Data Center Interconnections OptiNet 2019.

Будет на рынке завтра

Вовсю тестируется с лабораториях, хотя пока вы не увидите этого на рынке





Ultra-high bandwidth
~1Tbps per fiber

Reach
>100m, orders of magnitude better than electrical I/O

Shoreline Density
>4x improvement over PCIe6

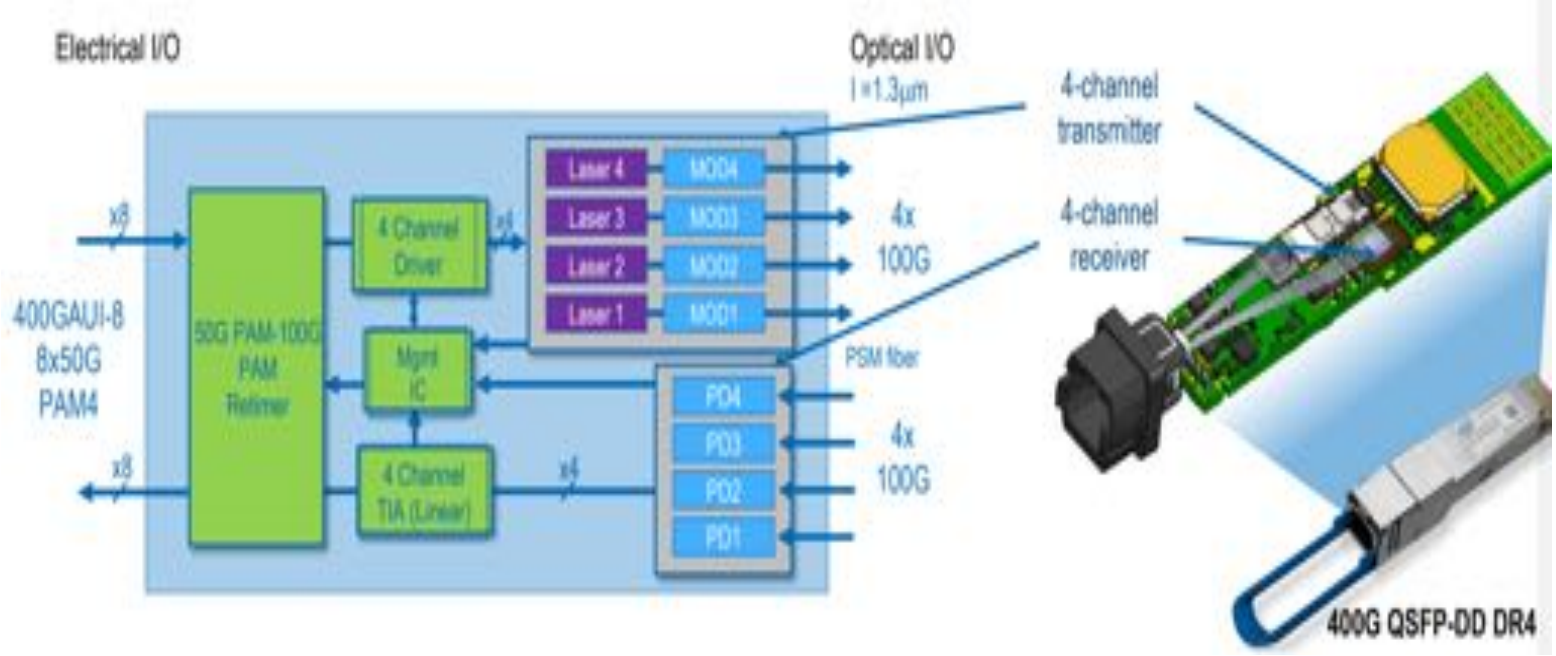
Energy Efficiency
Trending to 3pJ/b (65% of PCIe6)

Latency
<10ns + TOF, comparable to electrical I/O

Intel (USA), High Volume Silicon Photonics for Optical I/O and other Next Generation Applications, Robert Blum, 2021

Доступные трансиверы на чиплетах

Сегодня чиплеты это рабочие, эффективные по стоимости и энергетике топовые коммерческие решения "с полки"

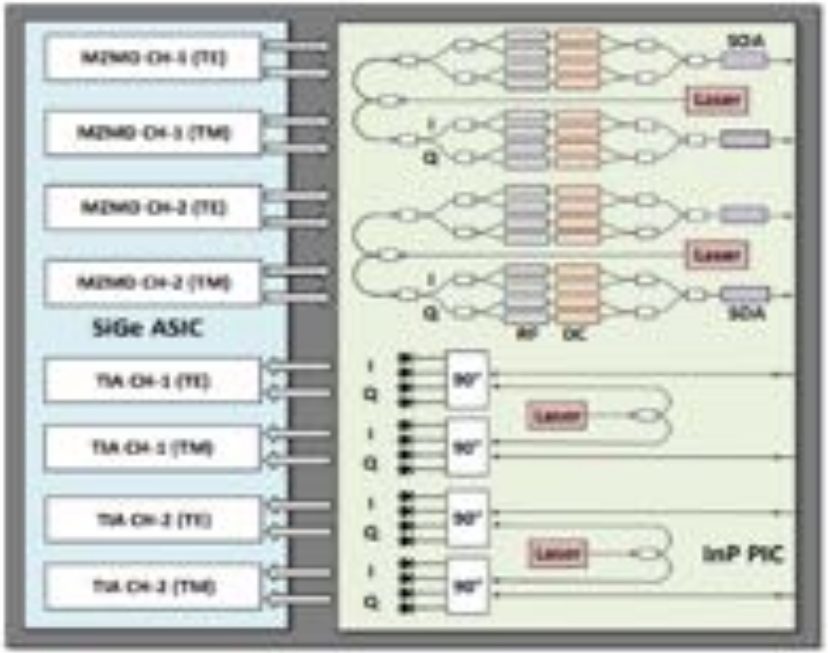


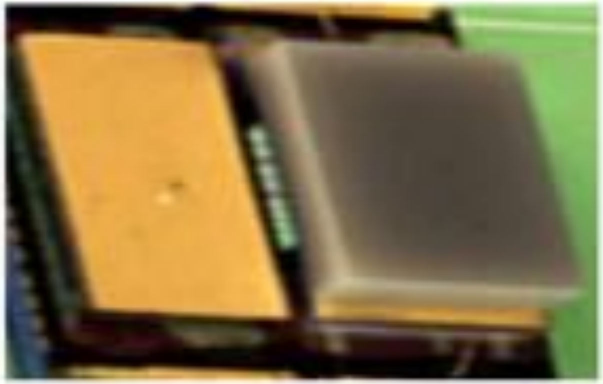
Intel (USA) 400G, 12 Вт, 500 м / 2 км, 1310 нм, поставки с 2019 года

High Volume Silicon Photonics for Optical I/O and other Next Generation Applications, Robert Blum

Доступные трансиверы на чиплетах

Сегодня чиплеты это рабочие, эффективные по стоимости и энергетике топовые коммерческие решения "с полки"

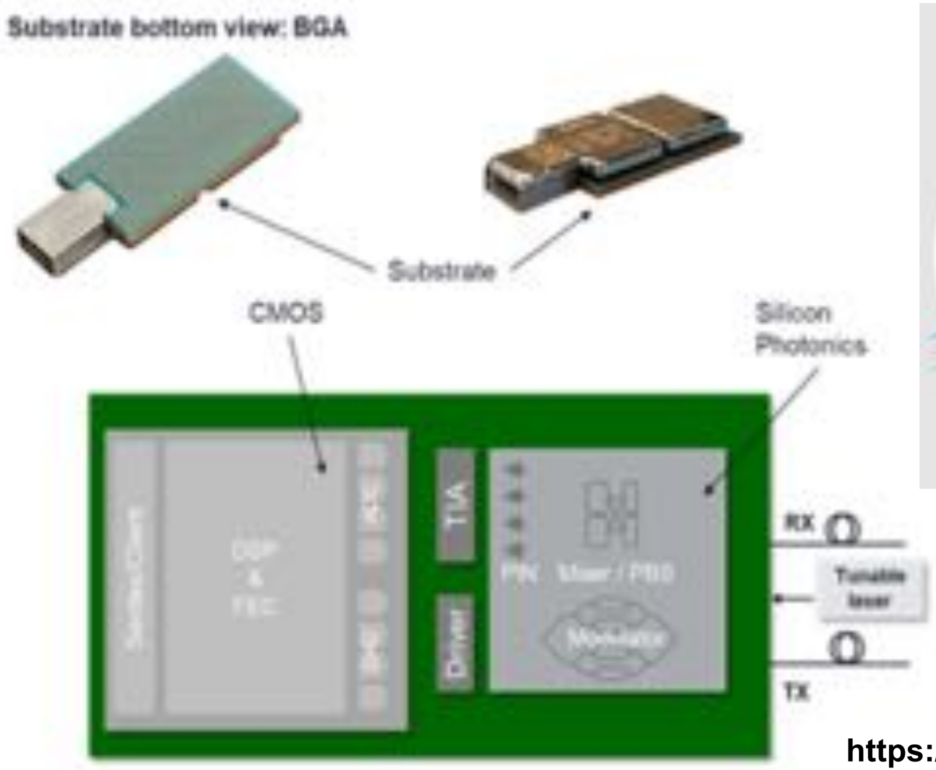


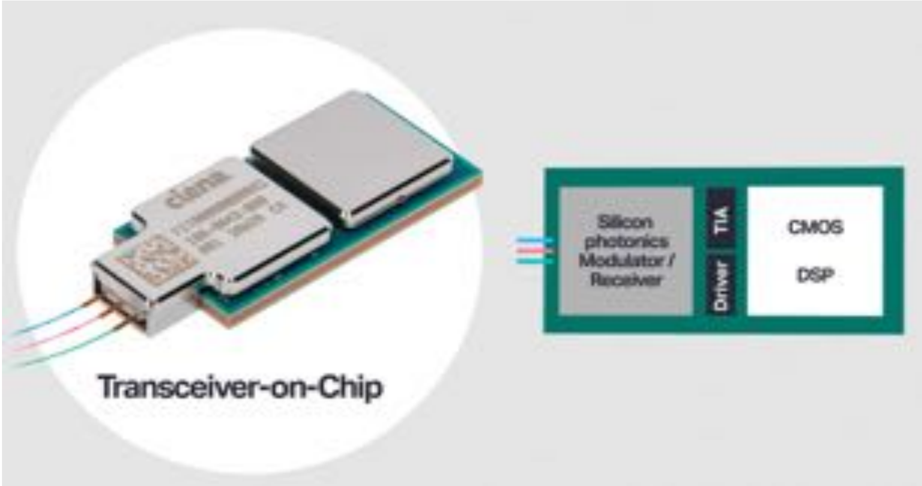


Infinera (USA) ICE6, 2x800G, 1000 км, 1550 нм., поставки с 2020 года
Demonstration of a 2×800 Gb/s/wave Coherent Optical Engine Based on an InP Monolithic PIC, 2022

Доступные трансиверы на чиплетах

Сегодня чиплеты это рабочие, эффективные по стоимости и энергетике топовые коммерческие решения "с полки"

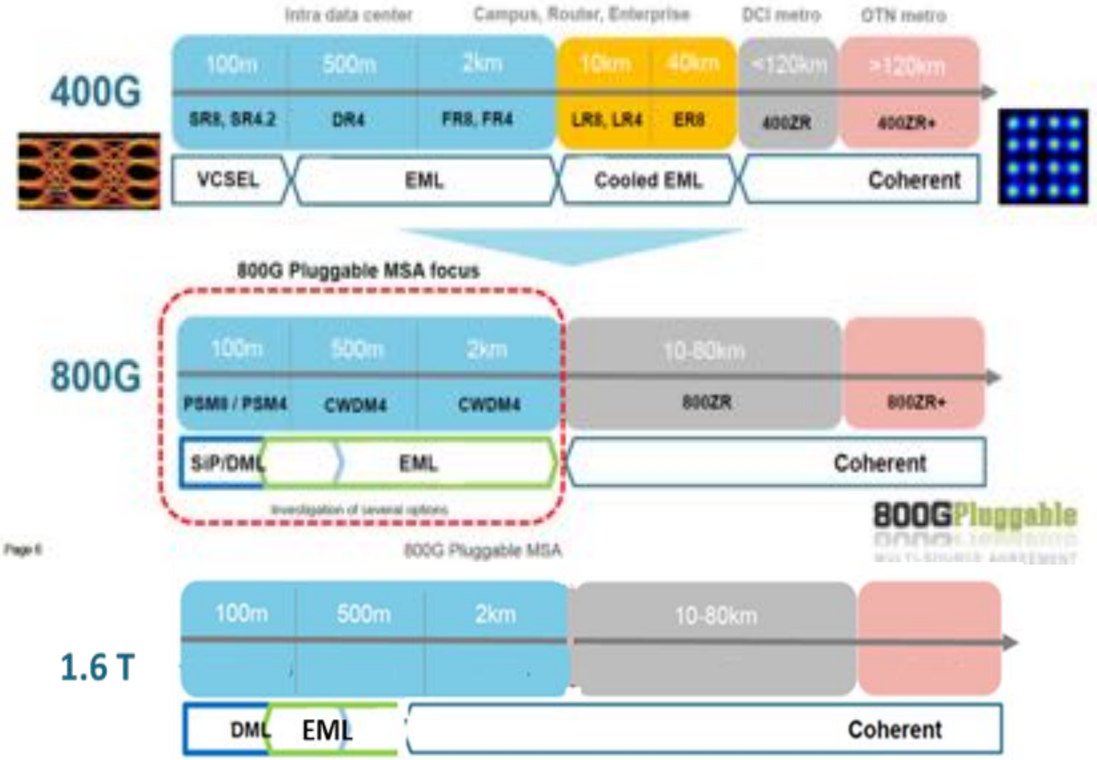


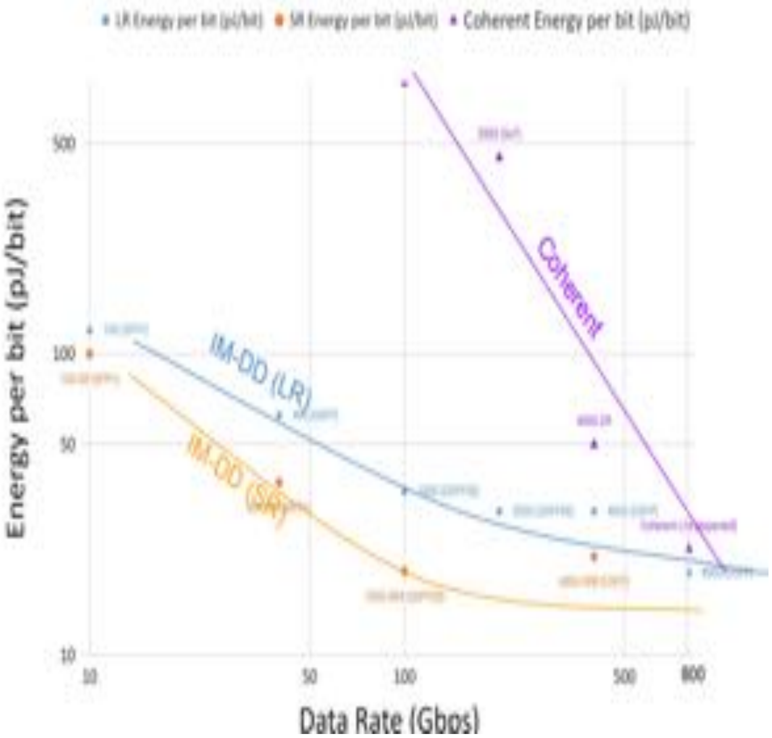


Ciena (USA) WaveLogic5 Extreeme, 400/800G
140 км, 14 Вт, 1550 нм., поставки с 2019 года
https://www.ciena.com/products/wavelogic/wavelogic-5/extreme

Способы повышения скорости

Рост полосы модуляции, усложнение форматов модуляции, применение FEC, применение WDM, применение когерентных решений

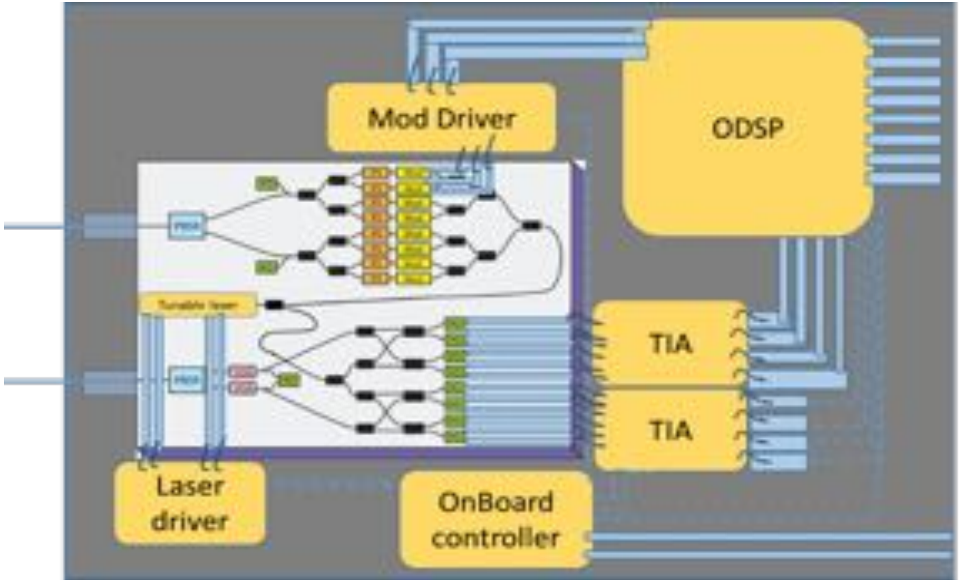




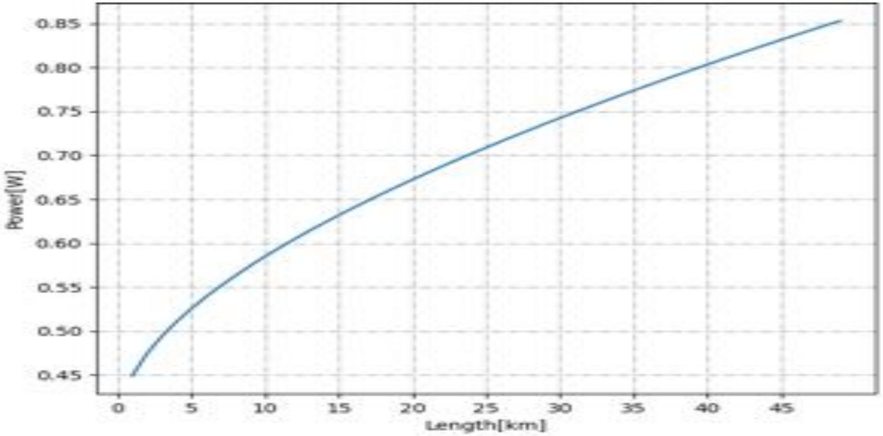
200G+ ФИС чиплет

Кремний + ФИС + TIA/DRV на единой подложке

Основной прогресс сегодня происходит именно в фотонно-интегральной части!

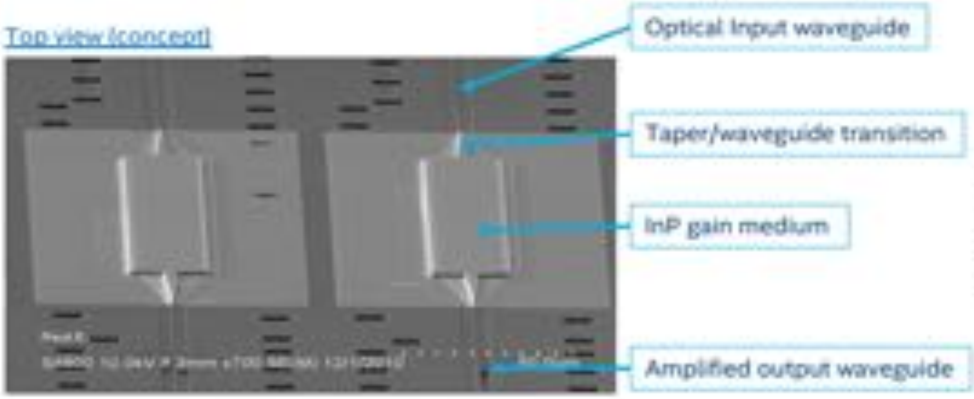


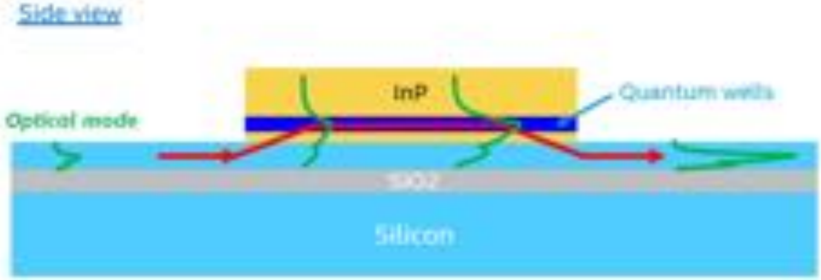
Оценка потребления алгоритмической части DSP (30GBaud, 22 нм) для DCI сегмента, Nokia, 2019

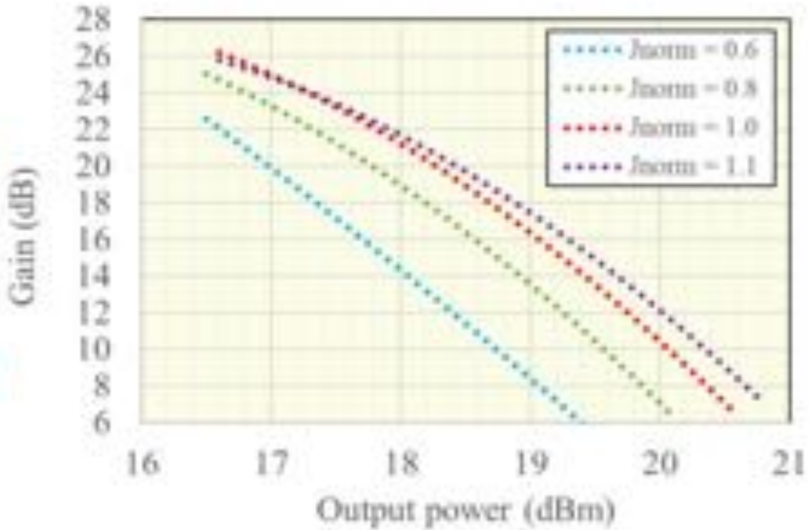


Новые ФИС технологии

Интеграция кремниевой фотоники и InP на единой подложке





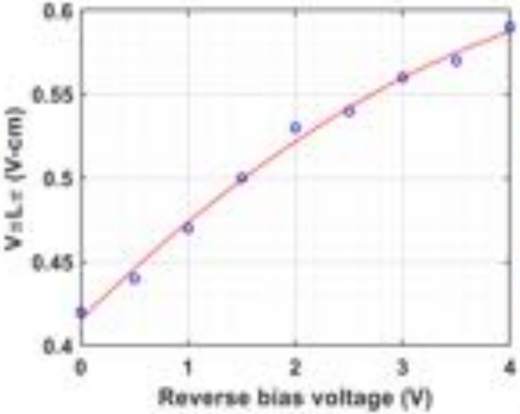


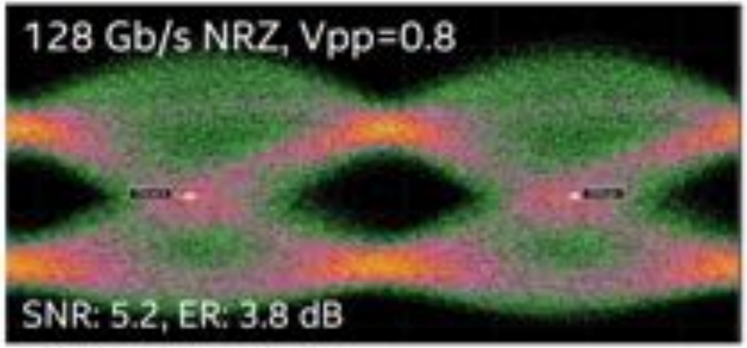
- 100mW (20dBm) output power from semiconductor optical amplifiers (SOAs)
- On-chip SOAs are unique differentiation for Intel hybrid integration platform

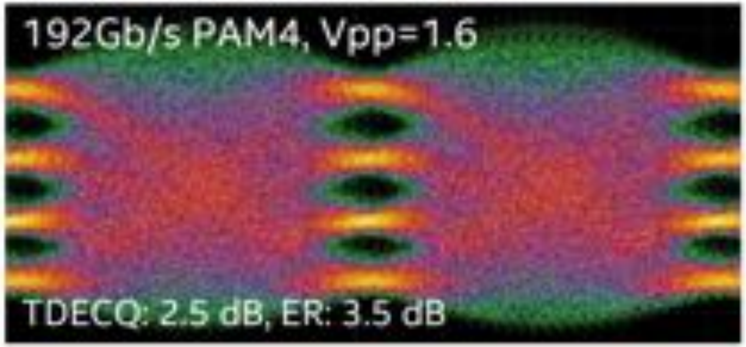
J. K. Doylend, S. Gupta, "An overview of silicon photonics for LIDAR," Proc. SPIE 11285, Silicon Photonics XV, (SPIE OPTO/Photonics West 2020)

Новые ФИС компоненты

Кольцевые микрорезонаторы





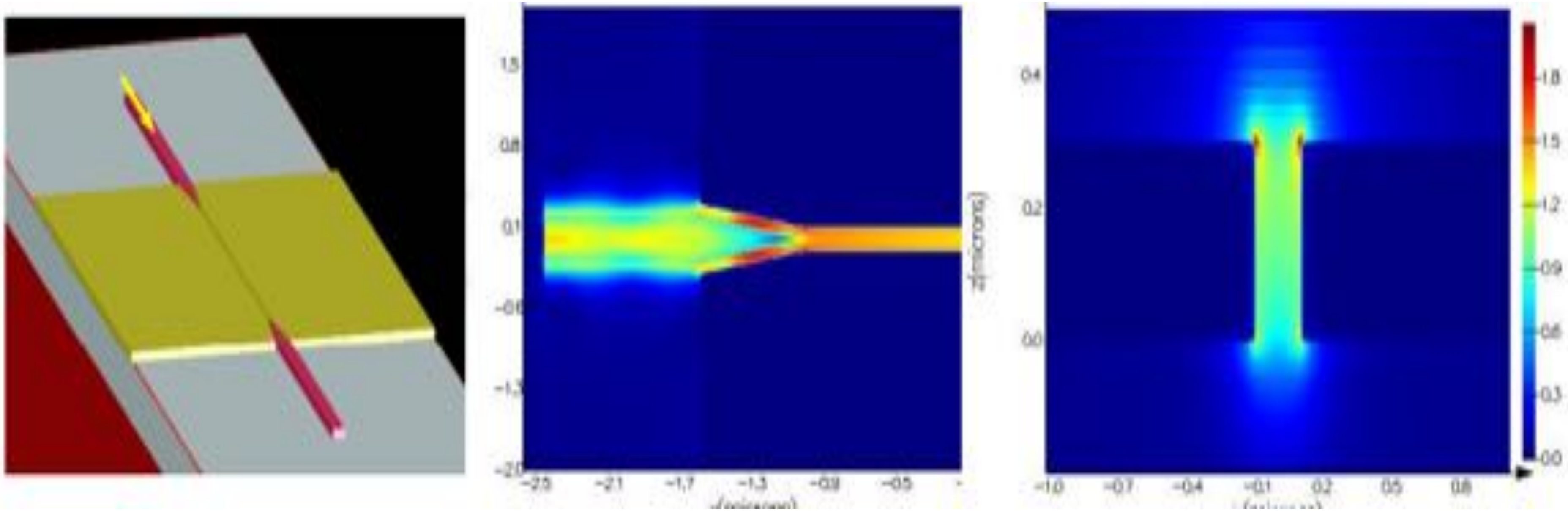


- ✓ **128Gb/s NRZ** is the highest data rate ever demonstrated in the industry using a ring modulator
- ✓ 8x128Gb/s = **1024Gb/s**

Meer Sakib et al., "260 Gb/s/λ PDM Link with Silicon Photonic Dual-Polarization Transmitter and Polarization Demultiplexer", Tu4D.1, ECOC 2021

Новые ФИС компоненты

Плазмонные модуляторы

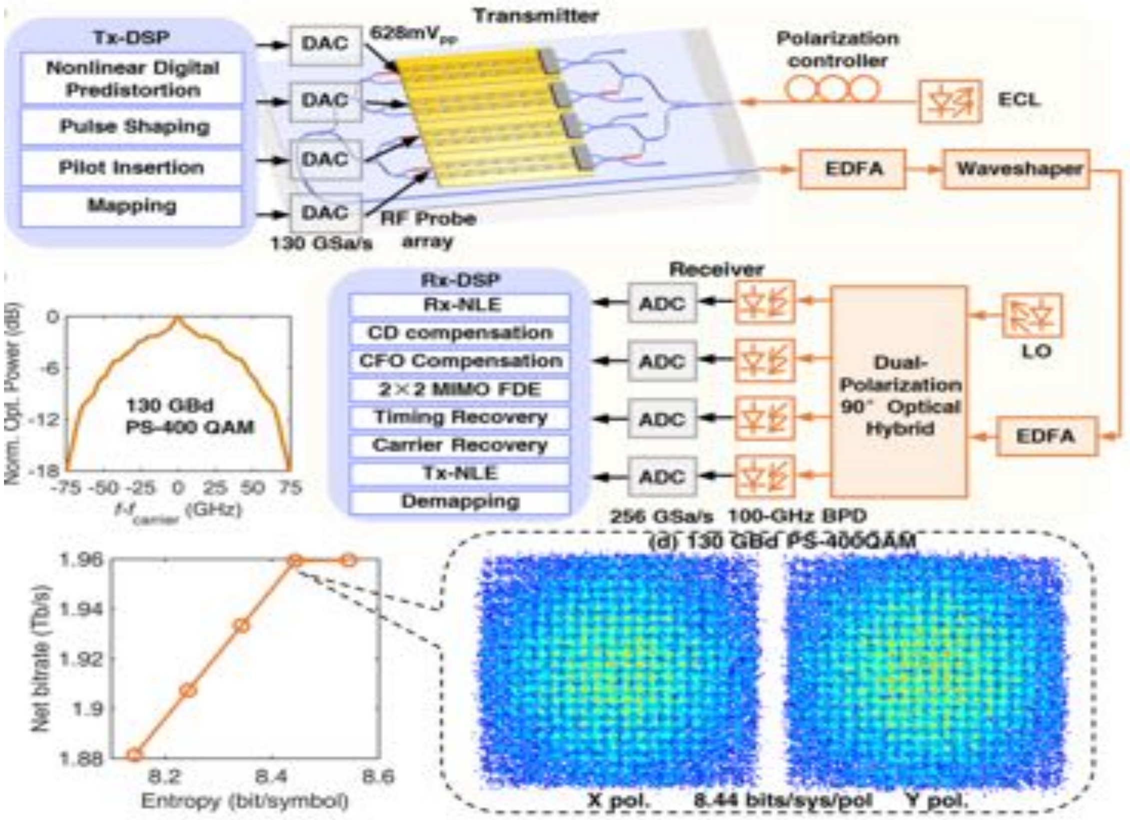


<1В Vpp, 100+ GHz, 1 мм, 1+ Tb/s/λ

Новые ФИС технологии

Тонкопленочный ниобат лития

MALT system

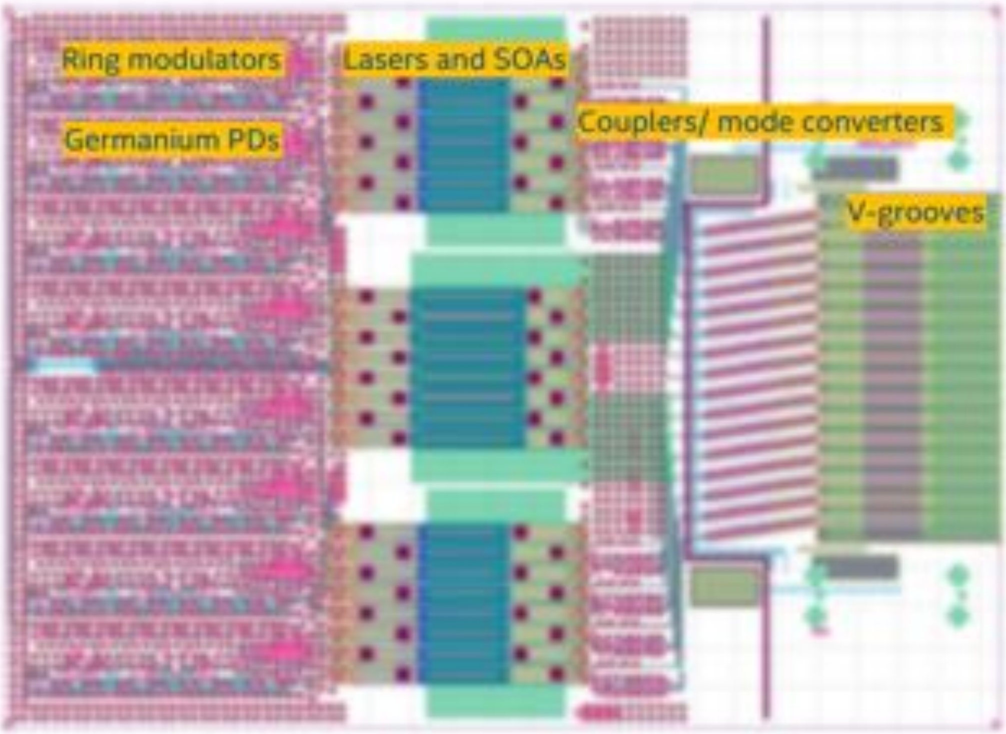


1B Vpp
110 GHz
23,5 мм
1.96 Tb/s/λ

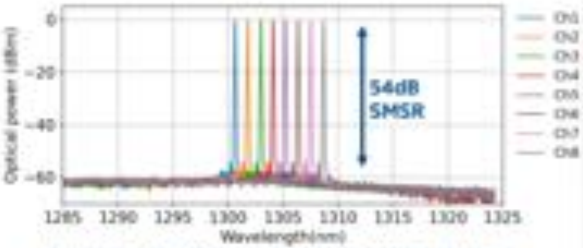
Huawei, 2022, Dual-polarization thin-film lithium niobate in-phase quadrature modulators for terabit-per-second transmission

Перспективы

8 Тбит/с на 8-ми длинах волн в одном волокне



- 8 Tb/s total bi-directional bandwidth
  - 8λ x 64 Gbps NRZ per fiber
  - 8 fibers for transmit; 8 for receive
  - On-die lasers and amplifiers
  - High speed ring modulators
  - High speed Ge photodetectors
  - Polarization diverse design
  - Low-NA couplers & V-grooves for fiber coupling
- High volume platform for optical I/O
  - Compact size through ring resonators and 8-channel multiplexing
  - 8ch on-chip DFB array with 200GHz channel spacing



D. Huang et al., "8-channel hybrid III-V/silicon DFB laser array with highly uniform 200 GHz spacing and power", ISLC 2021

Intel (USA), High Volume Silicon Photonics for Optical I/O and other Next Generation Applications, Robert Blum, 2021

А что можем мы?

В интегральной фотонике российские дизайн-центры еще могут "догнать", поезд еще не уехал!

Важно, что несмотря на успехи ФИС в мире, сегодня технология находится **в стадии становления**, первые коммерческие трансиверы на ФИС со скоростью более 100 Гбит/с выпущены лишь несколько лет назад.

В отличие от интегральной микроэлектроники, где "все известно" и правит бал "грубая сила новых тех. процессов нескольких фабрик-лидеров", в интегральной фотонике сегодня **более 15-ти независимых фабрик**, для создания устройств нужны "умные головы" и смекалка, т.к. все представленные на сегодня фотонные САПР и PDK (комплектов разработчика) мягко говоря "сырые".

Здесь, опираясь на нашу отличную научную школу в области схемотехники, фотоники и лазерной физики российские дизайн-центры могут за 1-3 года стать **конкурентными на мировом рынке**.

А что можем мы?

Локализация в РФ конкурентного производства интегральной фотоники возможна!

Характерные размеры элементов в ФИС составляют от единиц до сотен мкм, поэтому тут (с определенными оговорками) не требуются нанометроные тех. процессы.

Обычно для ФИС используется доработанное и расширенное по функциональности оборудование микроэлектронных фабрик 20-10 летней давности. Соответственно стоимость современной ФИС фабрики находится в пределах 200-400 млн. USD, что очень дешево по современным микроэлектронным меркам.

При наличии заинтересованности со стороны государства, создание в РФ собственной интегрально-фотонной фабрики мирового уровня является задачей вполне реалистичной, при наличии, конечно, массовых изделий для выпуска на такой фабрике. Тут дело за дизайн-центрами, изделия **мы разработаем**!

Высокоскоростные волоконно-оптические интерфейсы для микроэлектроники на базе интегрально-фотонных чиплетов: состояние дел в отрасли и перспективы развития

Спасибо за внимание!

Елизаров Сергей Георгиевич
научный руководитель дизайн-центра микроэлектроники «Мальт систем»
генеральный директор ООО «ЦИФ МГУ имени М.В.Ломоносова»

email: esg@maltsystem.com
тел.: +7(499)343-5624