



Vertically Integrated Systems



Современные вертикально–излучающие лазеры для сверхбыстрой передачи данных

Виталий Щукин

VI Systems GmbH, Berlin, Germany

Семинар Лаборатории Неравновесных Процессов в Полупроводниках
ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН
10 июня 2019 г.

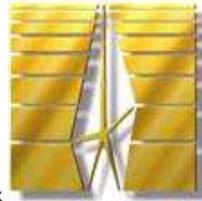


Vertically Integrated Systems

Сотрудничество



Vertically Integrated Systems



В.А.Щукин, Н.Н.Леденцов



Vertically Integrated Systems

**V.Kalosha, N.Ledentsov Jr., M.Agustin,
J.-R.Kropp**

VI Systems GmbH



М.В.Максимов, Ф.И.Зубов, А.Е.Жуков

Академический Университет



**Ю.М.Шерняков, А.С.Паюсов,
Н.Ю.Гордеев, М.М.Кулагина**

ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН



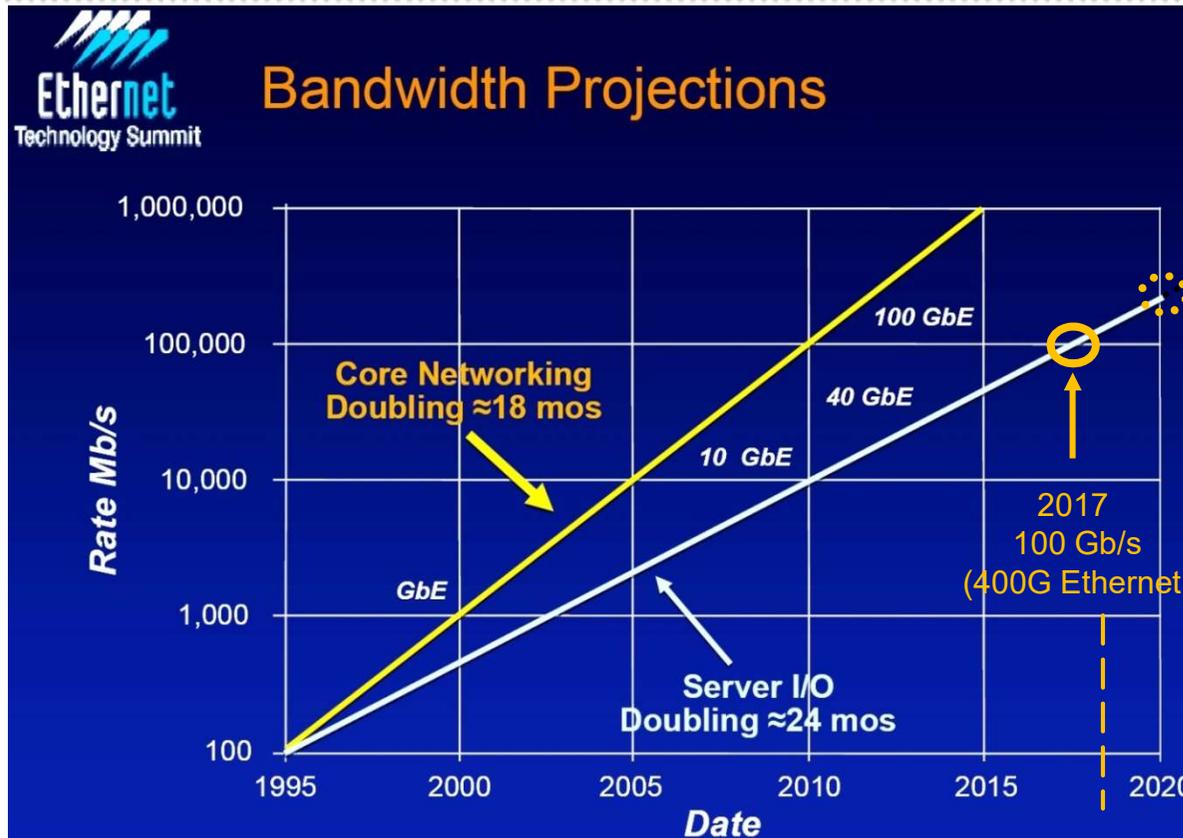
ITMO UNIVERSITY

А.Ю.Егоров

Университет ИТМО

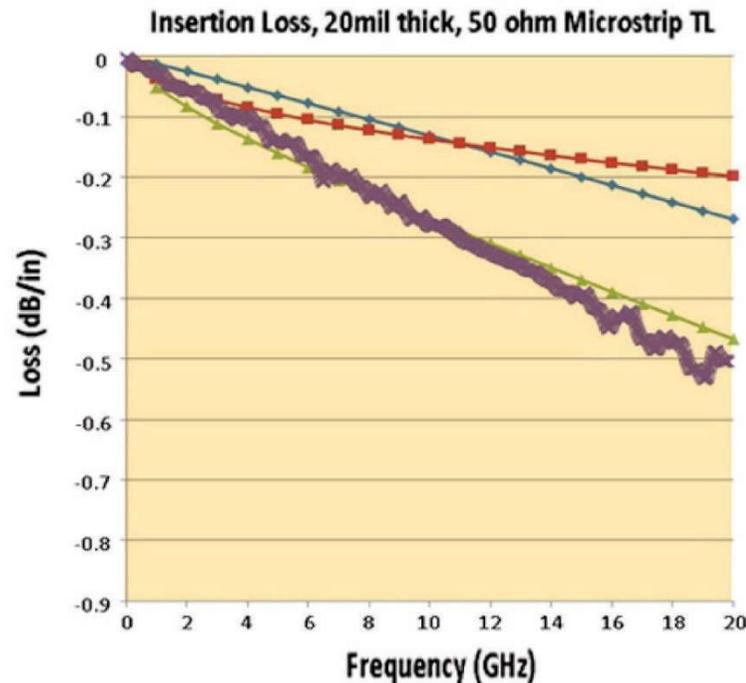
- **Введение**
- **Антиволноводный вертикально–излучающий лазер (ВИЛ)**
- **Одномодовый ВИЛ**
 - **Конструирование утекания мод с помощью оксидных слоёв**
 - **Одномодовый ВИЛ с тонкими апертурами в узлах продольного поля**
 - **Результаты применения одномодовых ВИЛ для передачи данных**
- **Поверхностная оптическая мода и лазер ближнего поля**
- **Выводы**

Кремниевое скалирование ведёт за собой уплотнение передачи информации



Source: IEEE tutorial

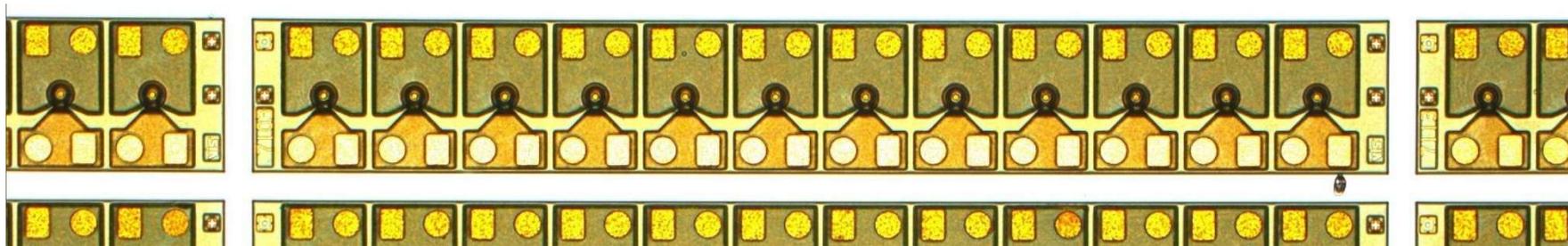
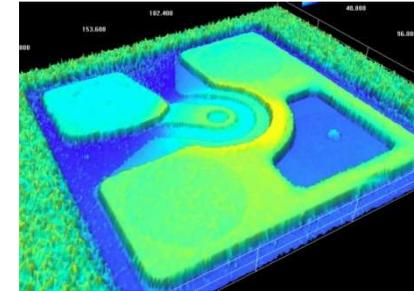
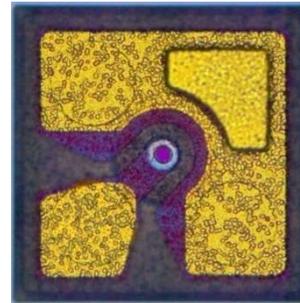
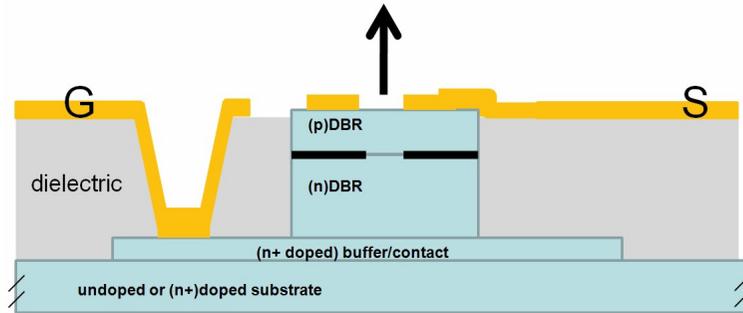
- Скалирование (TSMC: 5нм в 2019) ведёт за собой увеличение полосы пропускания в межсоединениях в датацентрах
- 2017: 106 Гб/с 400G Ethernet (pulse amplitude modulation, PAM4)
- 2020: ~ 200 Гб/с на канал
- 2025: 1 Тб/с на канал



- Потери в медных межсоединениях быстро растут с частотой
 - скин-эффект в металле
 - потери в диэлектрике
 - потери на шероховатостях
- 20 GHz: $-0.5 \text{ dB/inch} = -20 \text{ dB/m}$
- Затухание \sim в 100 раз на 1 м
- Оптические межсоединения необходимы

Courtesy by J. Coonrod, PCB Magazine, February 2012

Почему именно 850 нм–ВИЛ (вертикально–излучающие лазеры)?



- Используется для работы с установленной базой многомодового оптического волокна в датацентрах, оптимизированной для спектрального диапазона 840–860 нм
- Низкая стоимость и энергопотребление (:10 по сравнению с 1300 нм)
- Стандартная политика IEEE (“distinct identity”). Если для какого–то задания есть решение, то другое решение не внедряется

Тенденции в датацентрах



- Расстояния до 1 км и выше
- Как обеспечить приемлемую цену и энергосбережение?
- **850 нм одномодовый ВИЛ** позволяет передавать на >2.2км по многомодовому волокну OM4 на 54Гб/с (Stepniak et al, OFC 2016)
- **Единое решение от см на плате до нескольких км**
- **160 Гб/с на канал** (161 Гб/с @10м; 152 Гб/с @300м; OFC 2017)



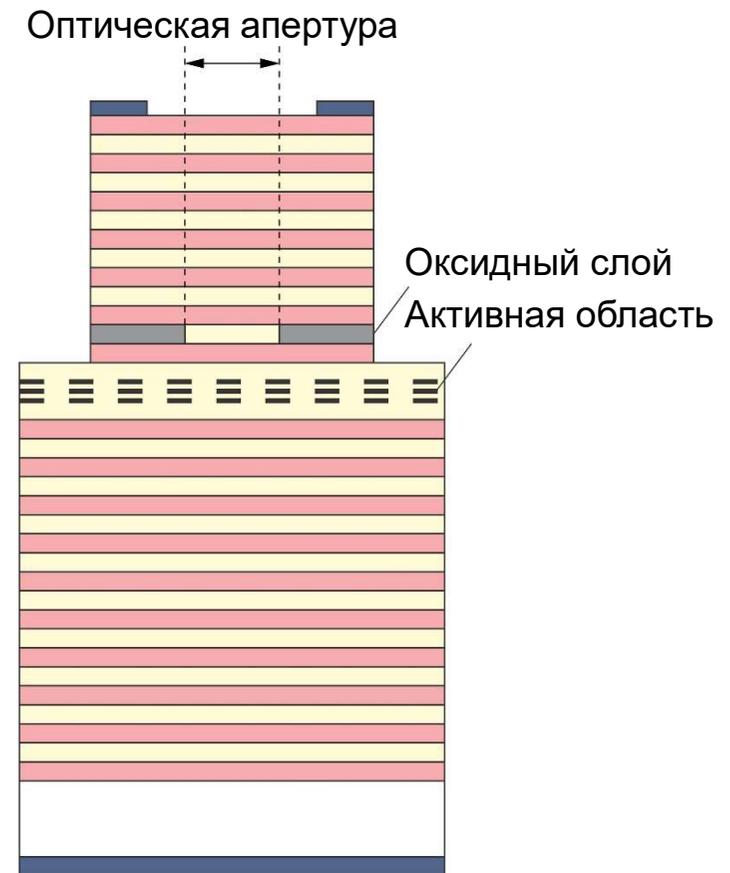
Концепции одномодовых ВИЛ ещё необходимо довести до пром. производства: быстродействие, мощность, надёжность

Цели:

- Высокая скорость
- Температурная устойчивость
- Узкий спектр излучения
- Надёжность

Противоречивые требования к дизайну:

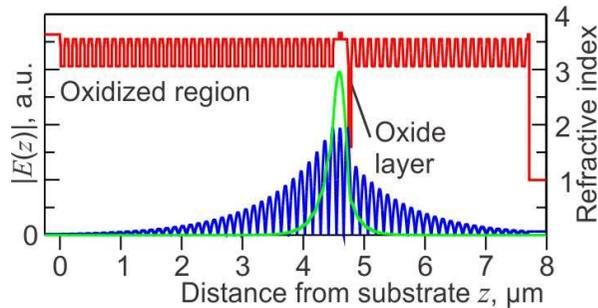
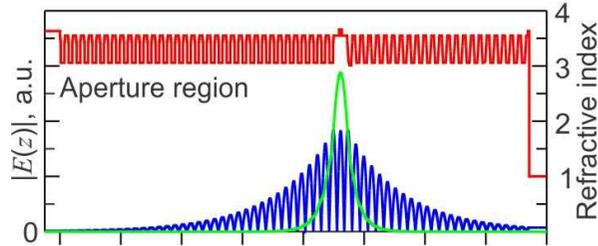
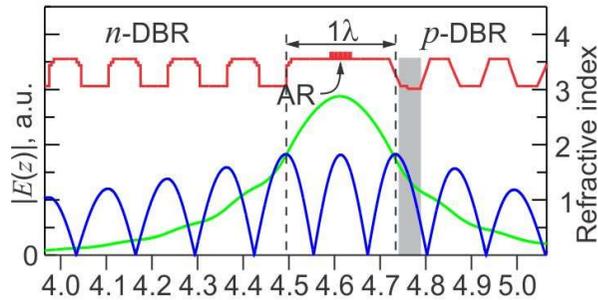
- Узкая апертура: **низкая мощность**,
большое сопротивление, **низкий выход**
годных, одномодовый
- Широкая апертура: **высокая мощность**,
надёжность, **50 Ом**, **многомодовый**



- Введение
- **Антиволноводный вертикально–излучающий лазер (ВИЛ)**
- **Одномодовый ВИЛ**
 - Конструирование утекания мод с помощью оксидных слоёв
 - Одномодовый ВИЛ с тонкими апертурами в узлах продольного поля
 - Результаты применения одномодовых ВИЛ для передачи данных
- Поверхностная оптическая мода и лазер ближнего поля
- Выводы

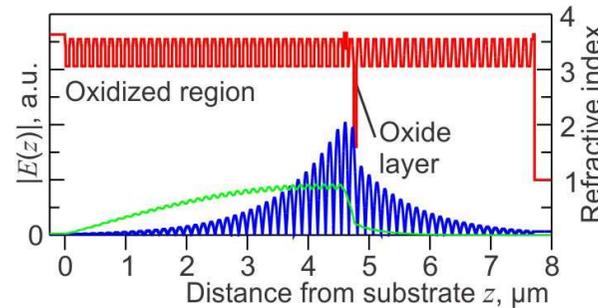
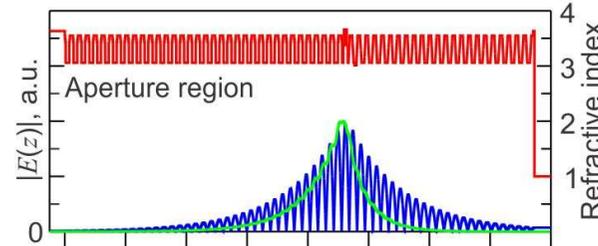
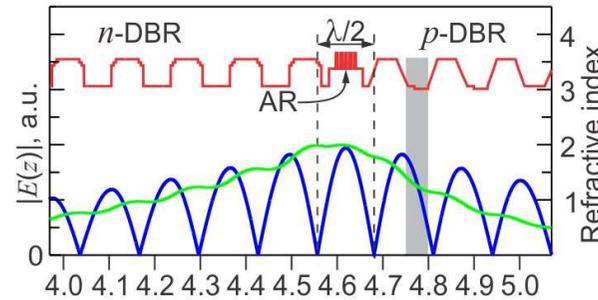
АНТИВОЛНОВОДНЫЙ И ВОЛНОВОДНЫЙ ВИЛ

Waveguiding VCSEL



- Паразитное излучение в плоскости
- Фотовозбуждение неравновесных носителей под слоем оксида и на границе мезы
- Дополнительный источник деградации
- Нет надёжных ВИЛ >10 Гбит/с

Antiwaveguiding VCSEL



- Максимально тонкая полость
- Максимальный фактор оптического ограничения
- Нет паразитного излучения в плоскости
- Один из источников деградации подавлен
- Надёжные ВИЛ >50 Гбит/с

N. Ledentsov, V. Shchukin
US Patent 7,339,965,
of March 4, 2008

- Введение
- Антиволноводный вертикально–излучающий лазер (ВИЛ)
- **Одномодовый ВИЛ**
 - Конструирование утекания мод с помощью оксидных слоёв
 - Одномодовый ВИЛ с тонкими апертурами в узлах продольного поля
 - Результаты применения одномодовых ВИЛ для передачи данных
- Поверхностная оптическая мода и лазер ближнего поля
- Выводы

- С увеличением скорости передачи данных максимальная длина безошибочной передачи оказывается ограничена хроматической дисперсией волокна
- 25 Гб/с: максимальная длина ~70 м в многомодовом волокне OM3
- Требуются одномодовые ВИЛ
- Задача: одномодовый ВИЛ с широкой апертурой:
высокая мощность, низкое последовательное сопротивление,
совместимость с управляющей электроникой



Vertically Integrated Systems

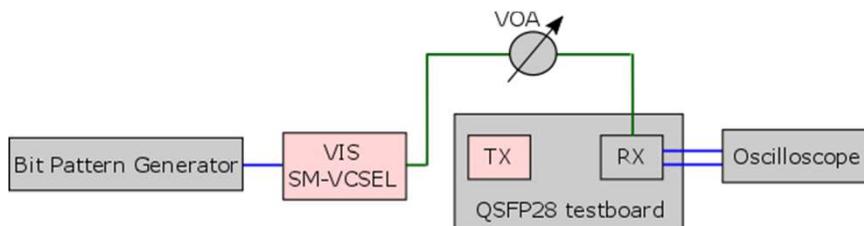
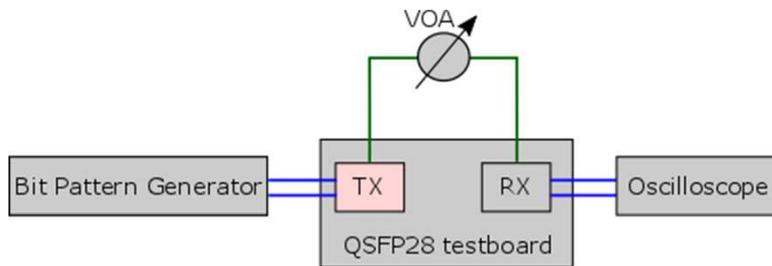
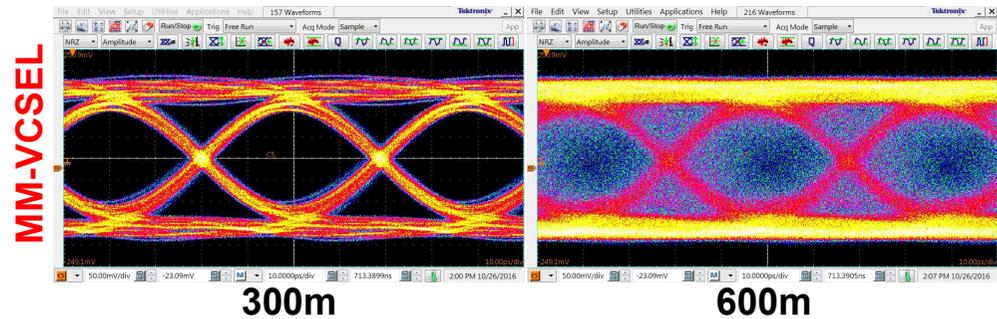
Преимущество одномодовых ВИЛ для передачи данных



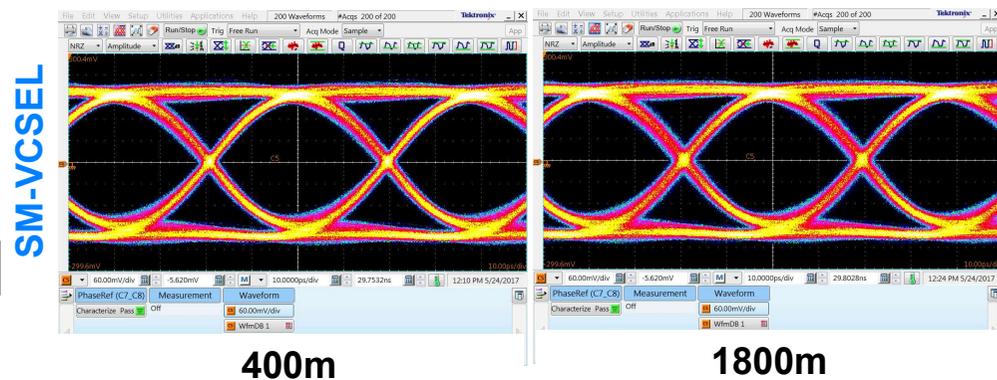
QSFP28 commercial transceiver

25.78 Gb/s eye diagrams OM5 fiber

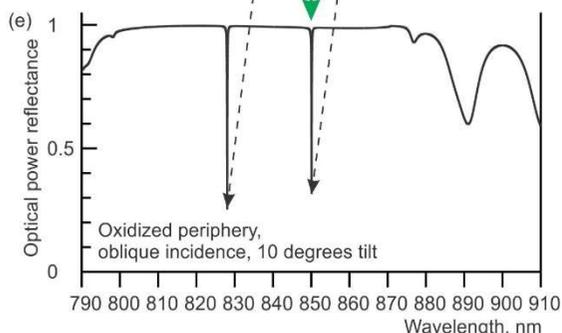
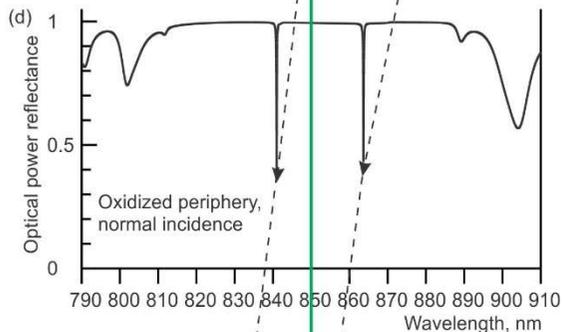
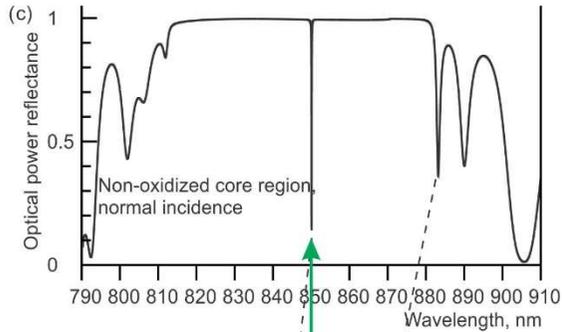
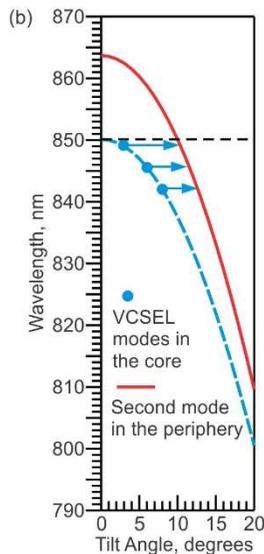
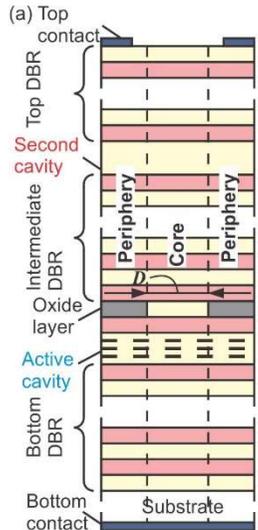
Finisar TX



VIS 850nm qSM VCSEL



Конструирование селекции мод через утекание

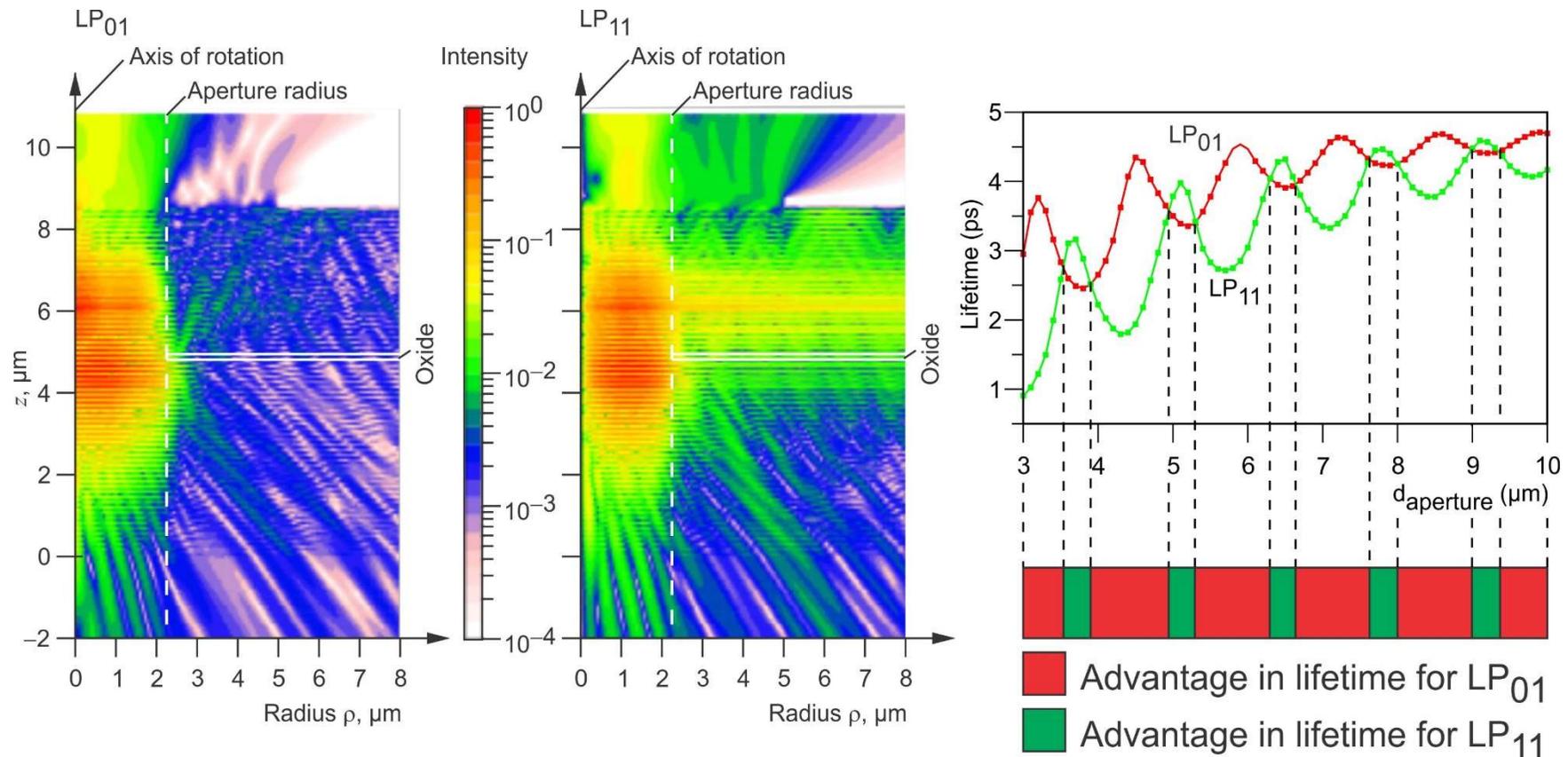


- Вертикальная мода центральной неоксидированной части всегда лежит на фоне сплошного спектра мод оксидированной периферии
- Оксидирование меняет показатель преломления $3 \rightarrow 1.5-1.6$
- После оксидирования уменьшается оптическая толщина слоя (в ~ 2 раза). Напр., $\lambda/2$ слой может превратиться в слой $\lambda/4$.
- Может быть создана или уничтожена оптическая полость.
- Длинноволновые моды периферии могут быть созданы оксидированием и сформировать сплошной спектр для утекания мод из центральной части

N. N. Ledentsov, V. A. Shchukin, and J. A. Lott, Proc. FTM-7, 2012, in Future Trends in Microelectronics: Into the Cross Currents, 2013, Wiley.

2D моделирование: Конкуренция латеральных мод

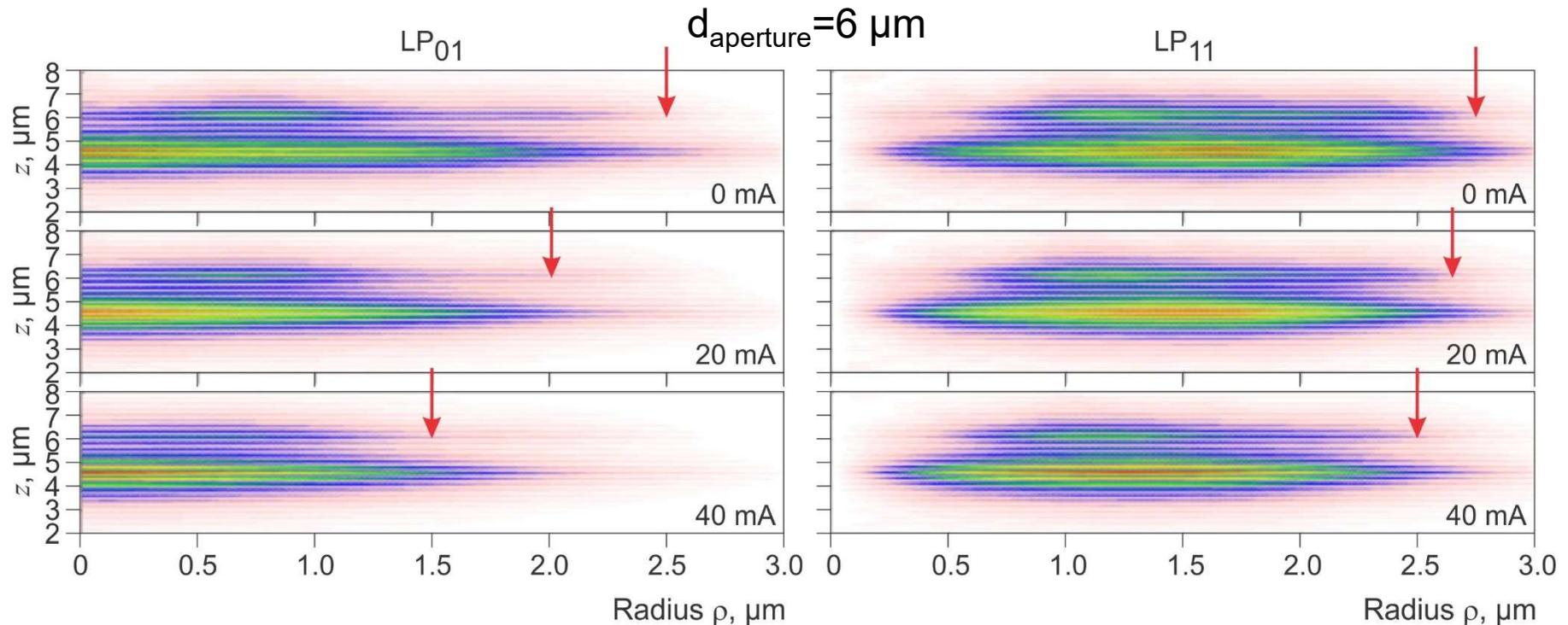
V. A. Shchukin, et al., *IEEE J. Quant. Electron.* **50**, 960 (2014)



- Для большинства диаметров: Фундаментальная мода LP₀₁ имеет преимущество по времени жизни
- Более сильное латеральное утекание LP₁₁ – через вторую полость

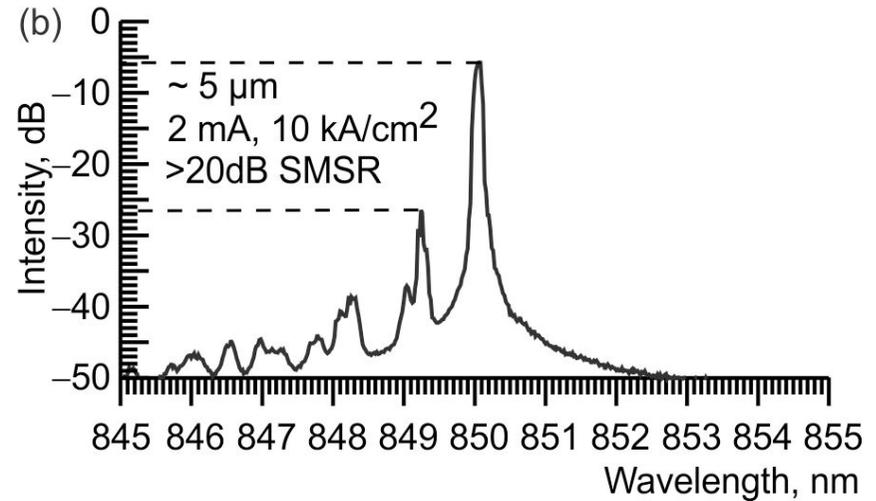
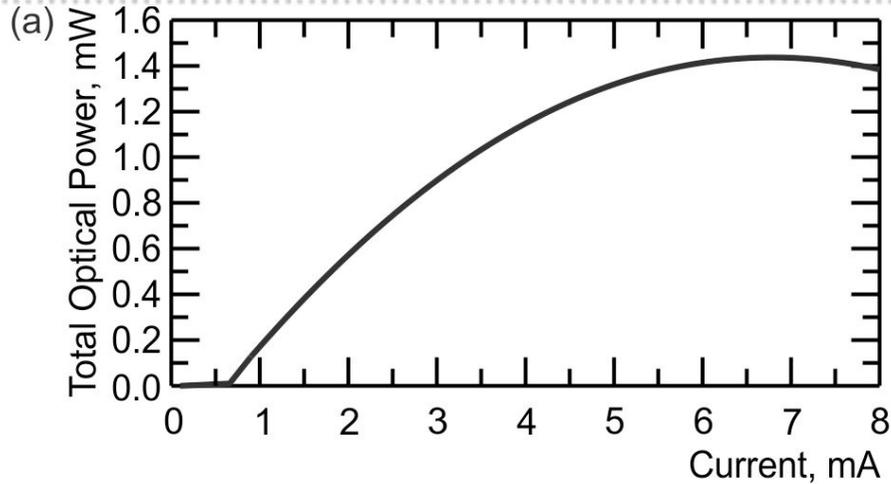
Профили LP_{01} при различных токах

Профили LP_{11} при различных токах



- Два источника разогрева: Джоулево тепло и инфракрасное поглощение
- Протяжённость LP_{01} во второй полости сокращается
- Эффект тепловой фокусировки сильнее для LP_{01}
- Утеkanie обеих мод уменьшается и время жизни возрастает
- Эффект сильнее для LP_{01} , преимущество LP_{01} по времени жизни растёт

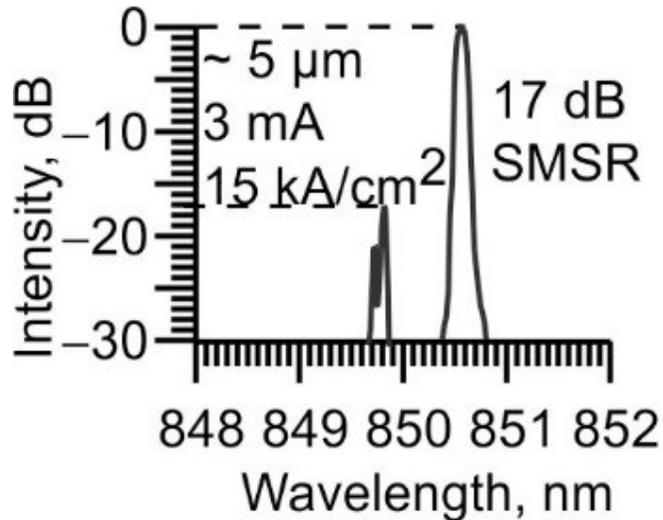
Одномодовый ВИЛ с широкой апертурой



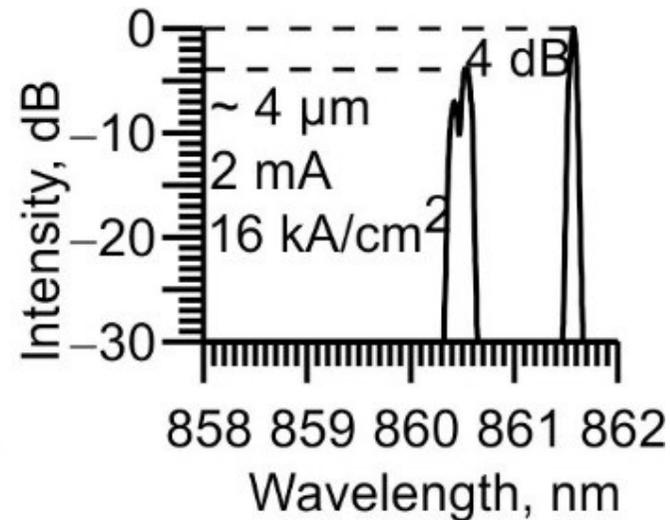
→ Апертура 5 μm . Коэффициент подавления боковых мод > 20 dB

Сравнение с традиционным ВИЛ

ВИЛ с сконструированным
утеканием

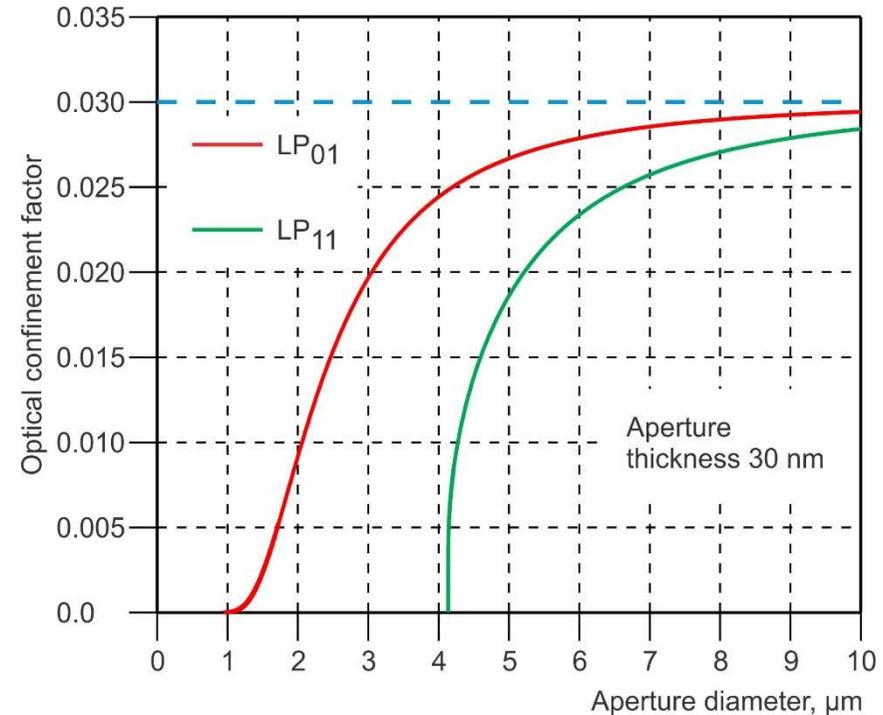
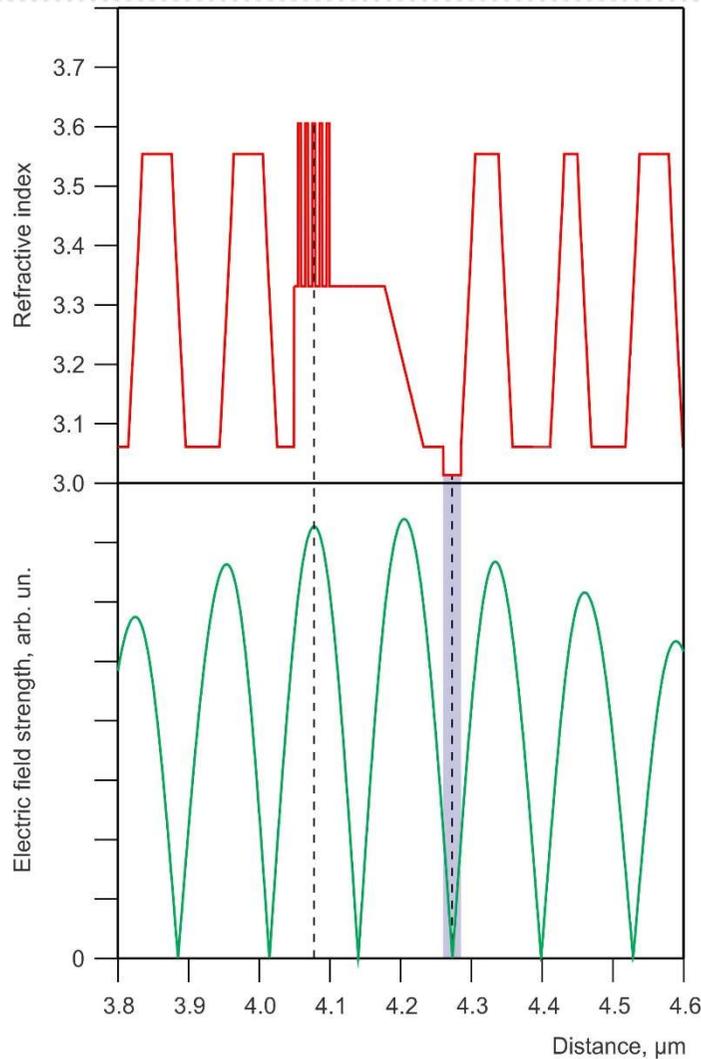


Традиционный ВИЛ



- Новый ВИЛ. Диаметр апертуры 5 μm . 15 kA/cm^2 . Коэффициент подавления боковых мод ~17 dB
- Традиционный ВИЛ. Близкий диаметр апертуры. Близкая плотность тока. Многомодовое излучение

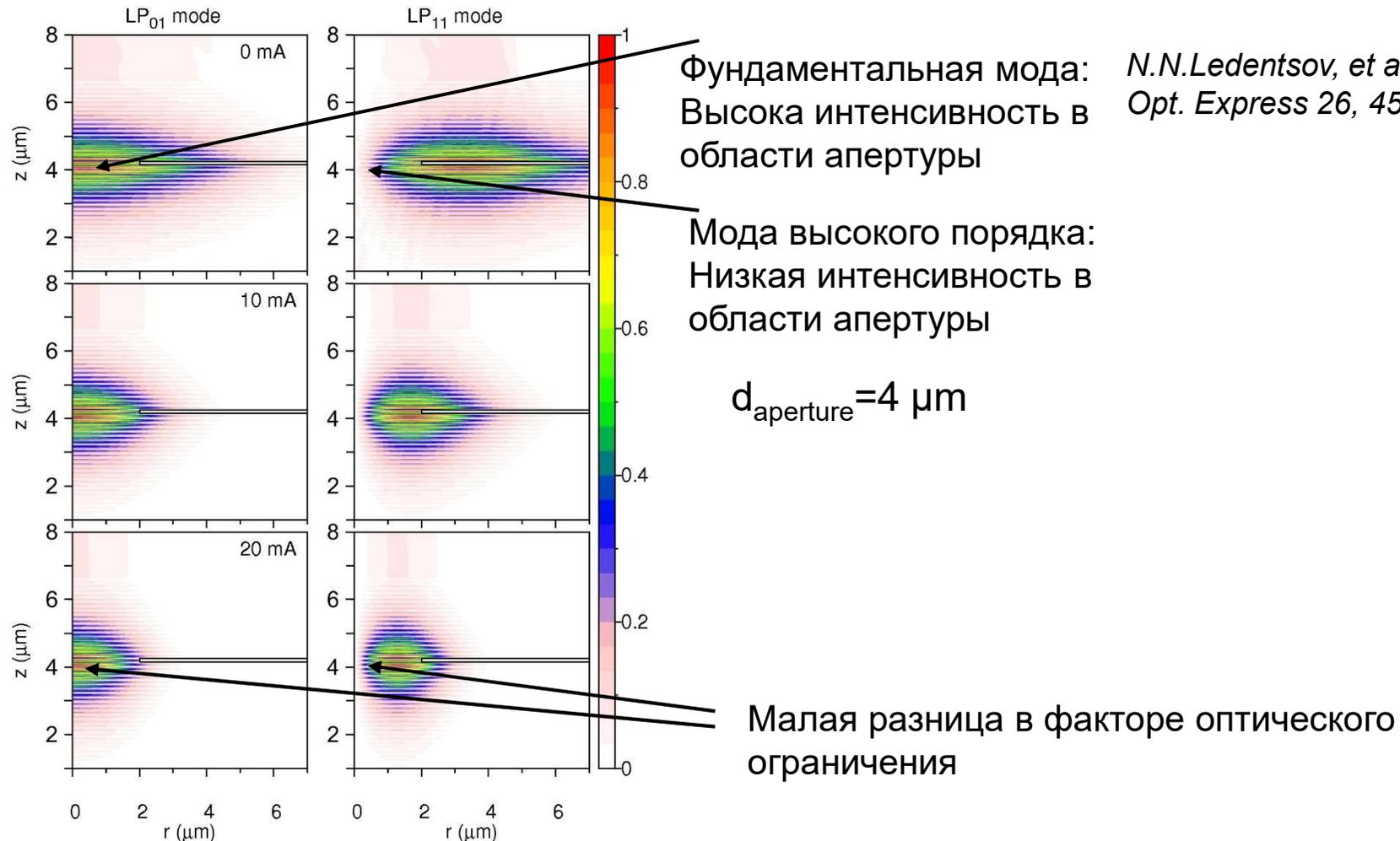
по фактору оптического ограничения



→ Тонкий апертурный слой
в узле продольной моды

- Локализация фундаментальной моды
- Локализация мод высокого порядка слабая
- Фундаментальная мода имеет преимущество по Γ -фактору

Влияние тока на конкуренцию мод

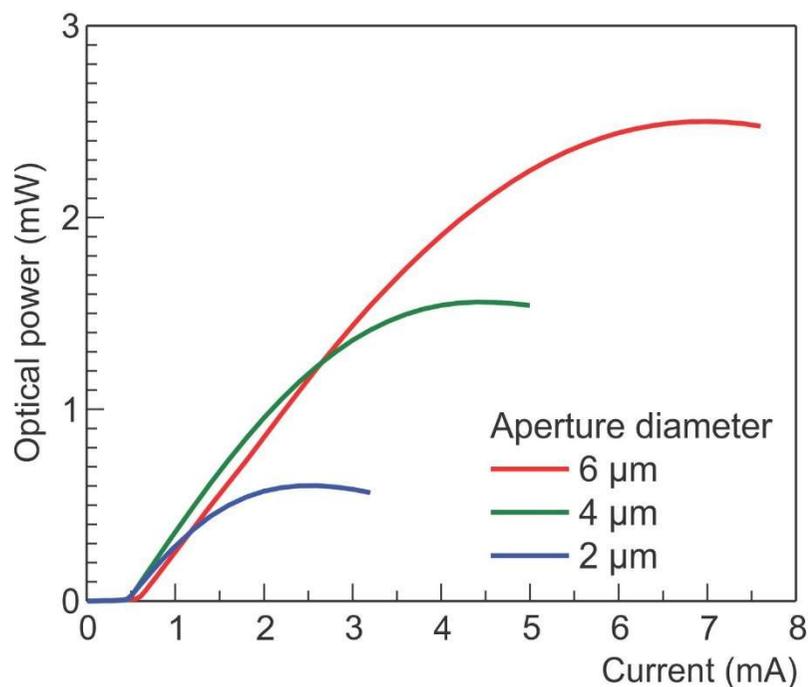


N.N.Ledentsov, et al.
Opt. Express 26, 454 (2018)

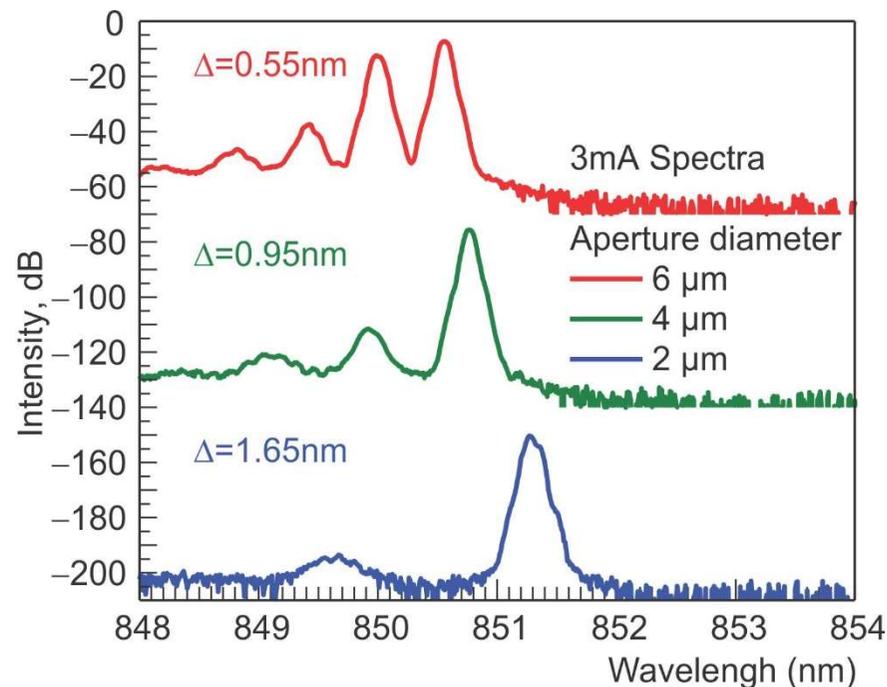
- Сильное преимущество фундаментальной моды LP₀₁ при малом токе
- С увеличением тока различие в Γ -факторах падает

Одномодовые ВИЛ: подтверждение концепции

L-I curves



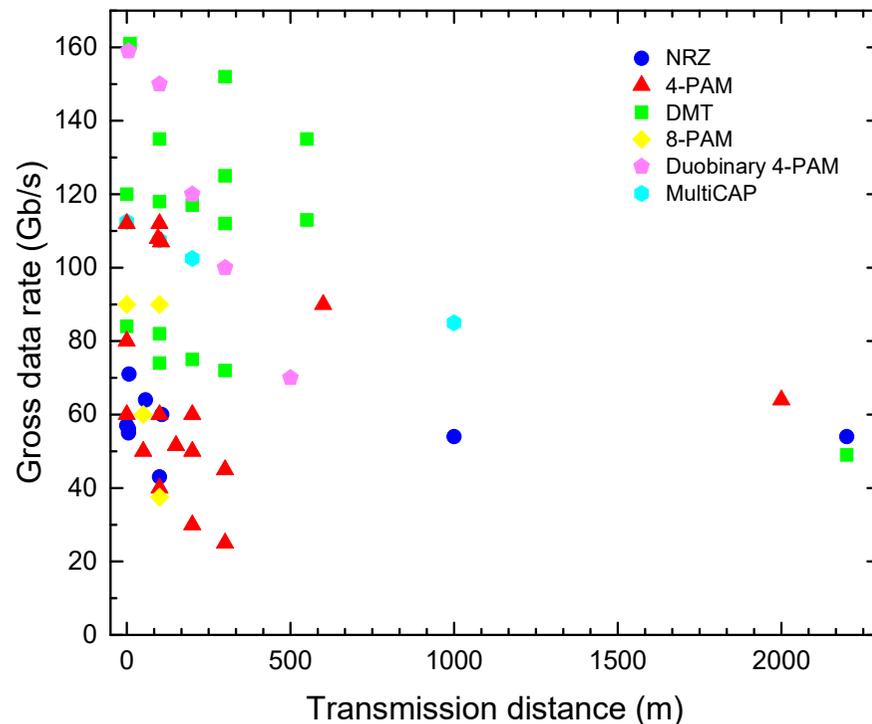
Спектры электролюминесценции



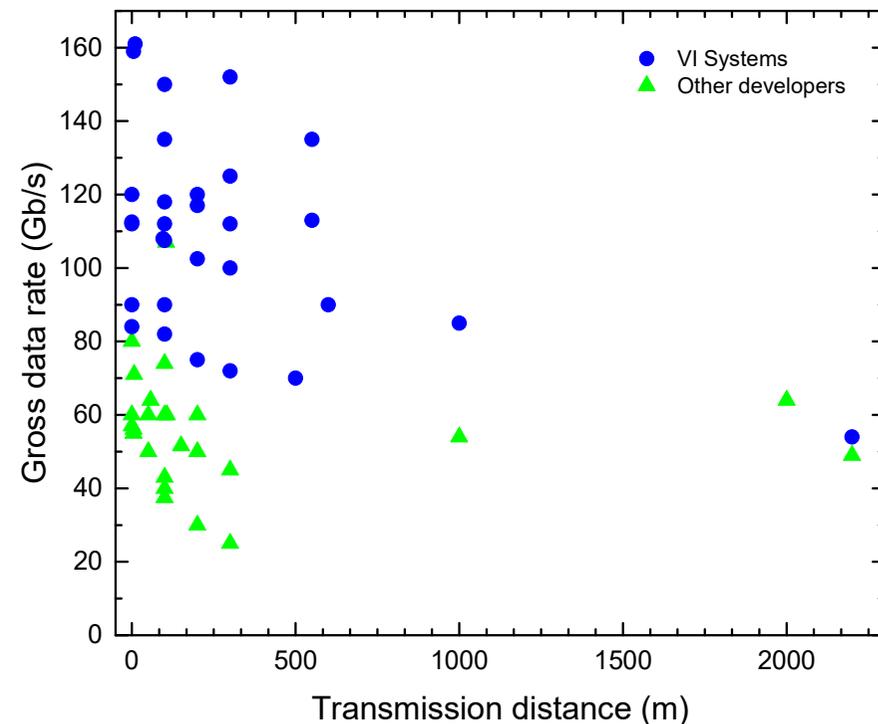
- Одномодовые ВИЛ при диаметре апертуры 4 мкм
- Коэффициент подавления боковых мод >35 dB при 3 мА (1.4 мВт)

Основные публикации по передачи данных через многомодовые волокна на основе 850 нм ВИЛ

Sorted by modulation format

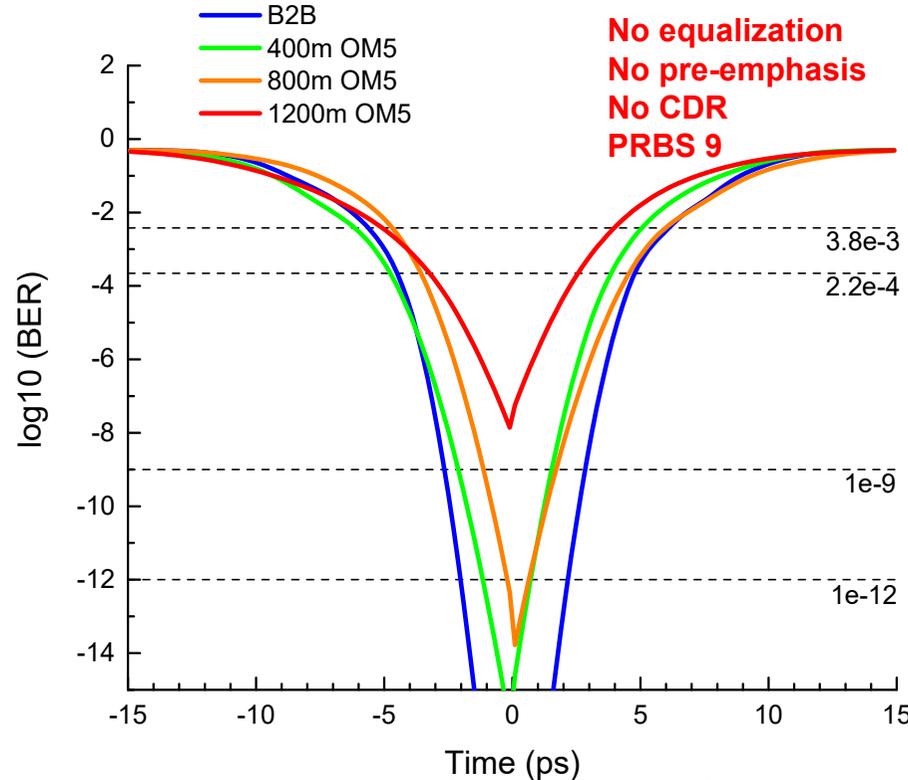


Sorted by VCSEL developer

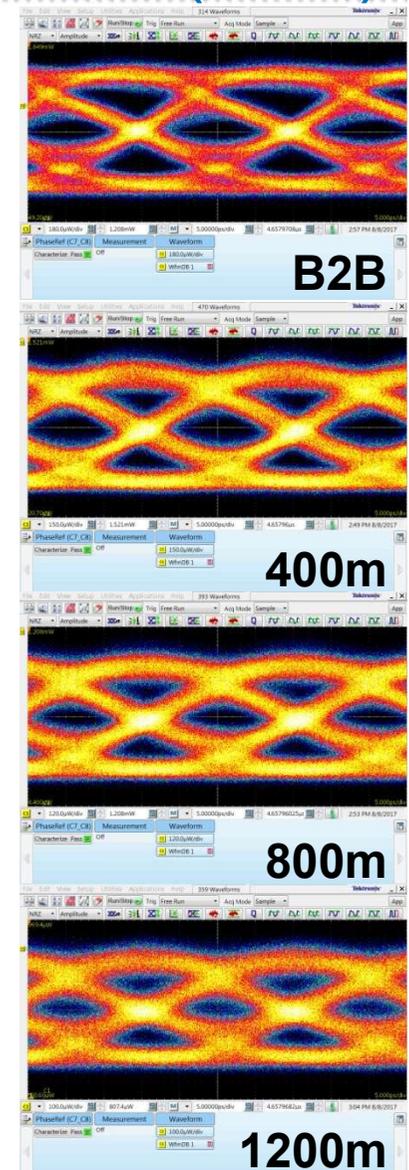


50 Гб/с передача в формате non-return-to-zero (NRZ)

- TX: VIS 850nm SM-VCSEL 2.8mA 0.65Vpp 1mW $SMSR_{3mA} = 25dB$
- RX: Tektronix 32GHz oscilloscope optical module 80C15



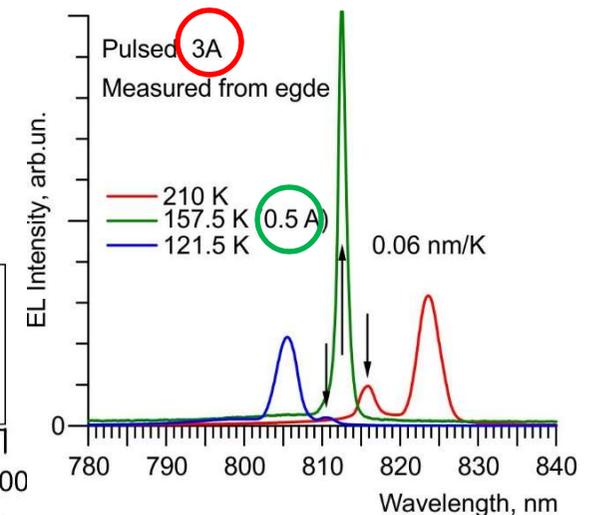
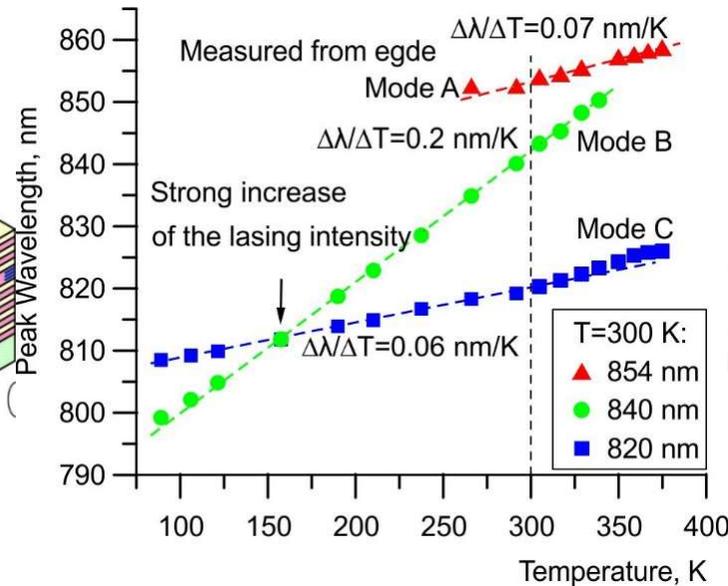
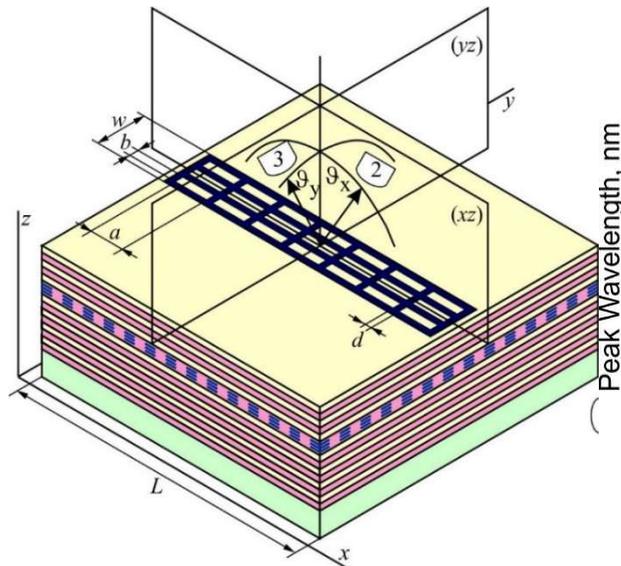
**With off-line equalization:
54Gb/s over 2.2 km MMF is demonstrated
161 Gb/s DMT BTB
155Gb/s DMT over 300m MMF**



	1e-12	1e-9	2.2e-4	3.8e-3
B2B	4.2ps	5.5ps	9.3ps	12.9ps
400m OM5	1.8ps	3.6ps	8.6ps	11.2ps
800m OM5	0.9ps	2.8ps	8.0ps	10.6ps
1200m OM5	/	/	5.8ps	9.1ps

- Введение
- Антиволноводный вертикально–излучающий лазер (ВИЛ)
- Одномодовый ВИЛ
 - Конструирование утекания мод с помощью оксидных слоёв
 - Одномодовый ВИЛ с тонкими апертурами в узлах продольного поля
 - Результаты применения одномодовых ВИЛ для передачи данных
- Поверхностная оптическая мода и лазер ближнего поля
- Выводы

V.A. Shchukin, et al. Proc. SPIE 10552, 10552–07 (2018)

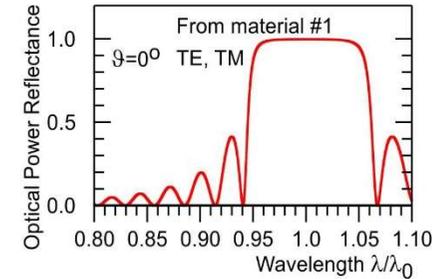
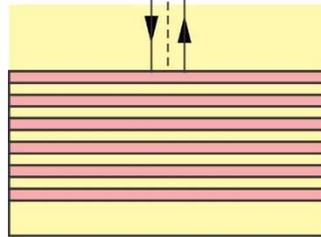


- Эпитаксиальная пластина антиволноводного ВИЛ
- Прямоугольный кристалл
- Сеточный металлический контакт

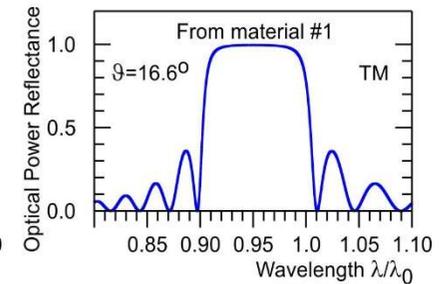
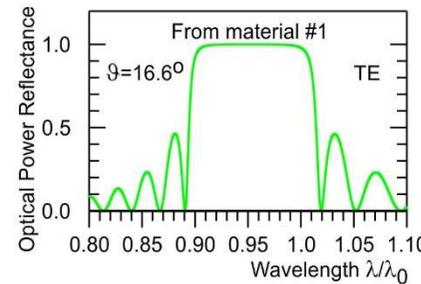
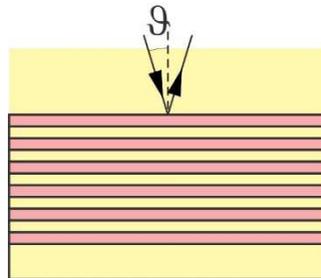
- Mode A: 0.07 nm/K ~ dn/dT : мода ВИЛ
- Mode B: 0.22 nm/K определяется спектром усиления (наклонная мода)
- Mode C: 0.06 nm/K ~ dn/dT (новая мода, стабилизированная по длине волны)

Распределённый Брэгговский отражатель при наклонном падении света

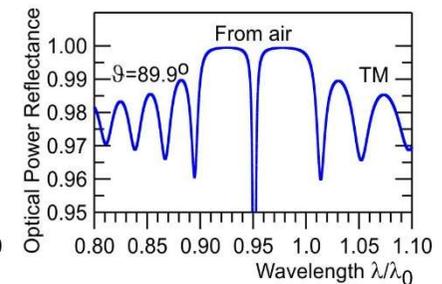
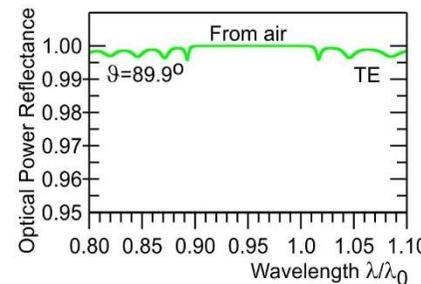
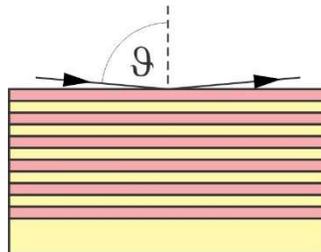
Нормальное падение из материала #1



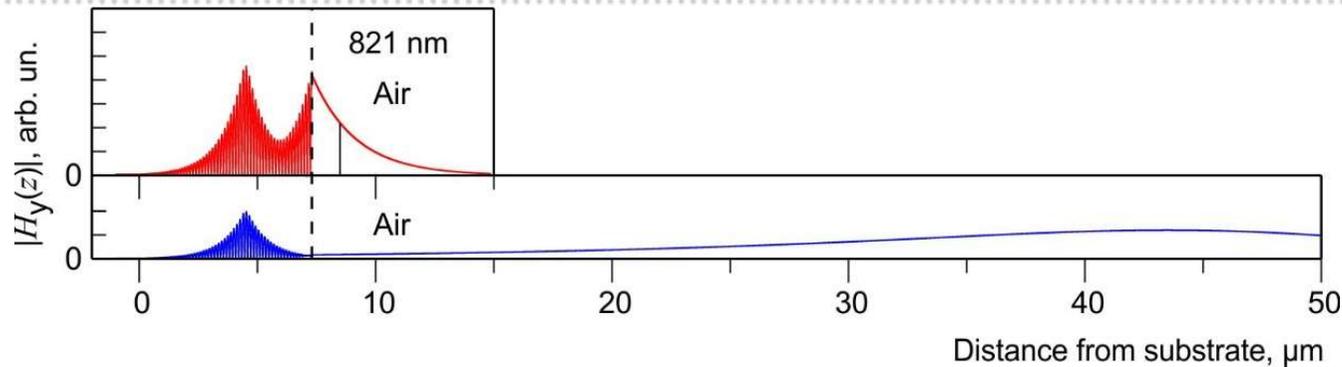
Наклонное падение из материала #1



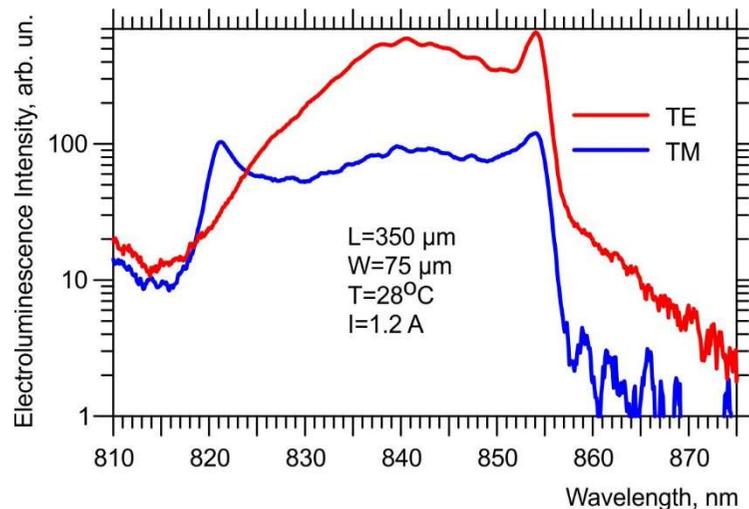
Наклонное падение из воздуха под скользящими углами



- Резонанс при наклонном падении TM волны из воздуха
- Виртуальная полость на границе РБО и воздуха!!!
- Локализованная мода на границе РБО и воздуха!!!



→ **ТМ-поляризованная мода на границе Брэгговского отражателя и воздуха, резонансно-связанная с модой оптической полости ВИЛ**



V.A. Shchukin, et al. Optics Express 26, 25280 (2018)

→ **Излучение на 820 нм ТМ-поляризовано**

→ **Всё остальное излучение ТЕ-поляризовано**

- **Введение**
- **Антиволноводный вертикально–излучающий лазер (ВИЛ)**
- **Одномодовый ВИЛ**
 - **Конструирование утекания мод с помощью оксидных слоёв**
 - **Одномодовый ВИЛ с тонкими апертурами в узлах продольного поля**
 - **Результаты применения одномодовых ВИЛ для передачи данных**
- **Поверхностная оптическая мода и лазер ближнего поля**
- **Выводы**

- Антиволноводный ВИЛ – основа всех современных дизайнов ВИЛ
- Одномодовый ВИЛ на основе сконструированного утекания
 - Одномодовый ВИЛ на 850 нм при диаметре апертуры $\sim 5 \mu\text{m}$
 - При плотности тока 10 kA/cm^2 коэффициент подавления боковых мод $> 20 \text{ dB}$
 - 25 Гбит/с
- Одномодовый ВИЛ с тонким апертурным слоем в узле продольной моды
 - Одномодовый ВИЛ на 850 нм при диаметре апертуры $\sim 4 \mu\text{m}$
 - При плотности тока 25 kA/cm^2 коэффициент подавления боковых мод $> 35 \text{ dB}$
 - 56 Гбит/с без дополнительной электроники
- 160 Гбит/с с эквализацией
- Поверхностная мода на границе Брэгговского отражателя и воздуха позволяет создать лазер с прямым вводом излучения через ближнее поле в оптоволокно



Vertically Integrated Systems



Спасибо за внимание!