

Микродисковые лазеры с квантовыми точками: современное состояние и перспективы интеграции с кремнием

Алексей Жуков

*Санкт-Петербургский
национальный исследовательский
Академический университет
Российской академии наук*

лаборатория Нанопотоники



194021, Санкт-Петербург, ул. Хлопина 8(3)
e-mail: zhukale@gmail.com

Коллектив



- Академический университет, Санкт-Петербург (Н. Крыжановская, Э. Моисеев, Ю. Полубавкина, Ф. Зубов, М. Максимов, Г.Э. Цырлин, Р.Р. Резник) ○ Оптические исследования, лазерные измерения, конструкция микролазеров, МПЭ рост нанопроволок



- ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург (М. Кулагина, С. Трошков, Ю. Задиранов, С. Минтаиров, Н. Калюжный) ○ Пост-рост лазеров, МОГФЭ КЯ-структур на GaAs



- Innolume GmbH, Dortmund, DE (D. Livshits) ○ МПЭ КТ-структур на GaAs



- University College London, UK (M. Tang, M. Liao, J. Wu, S. Chen, H. Liu) ○ МПЭ КТ-структур на Si



- Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород (Н. Байдусь, А. Дубинов, Э. Красильник, А. Новиков, Д. Павлов, А. Рыков, А. Сушков, Д. Юрасов) ○ МОГФЭ КЯ-структур на Si



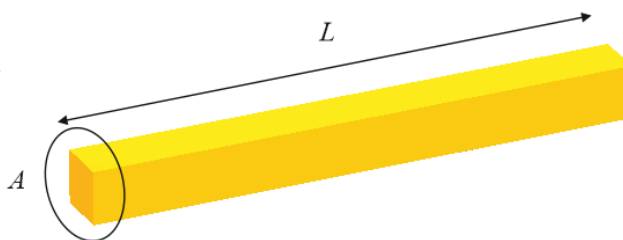
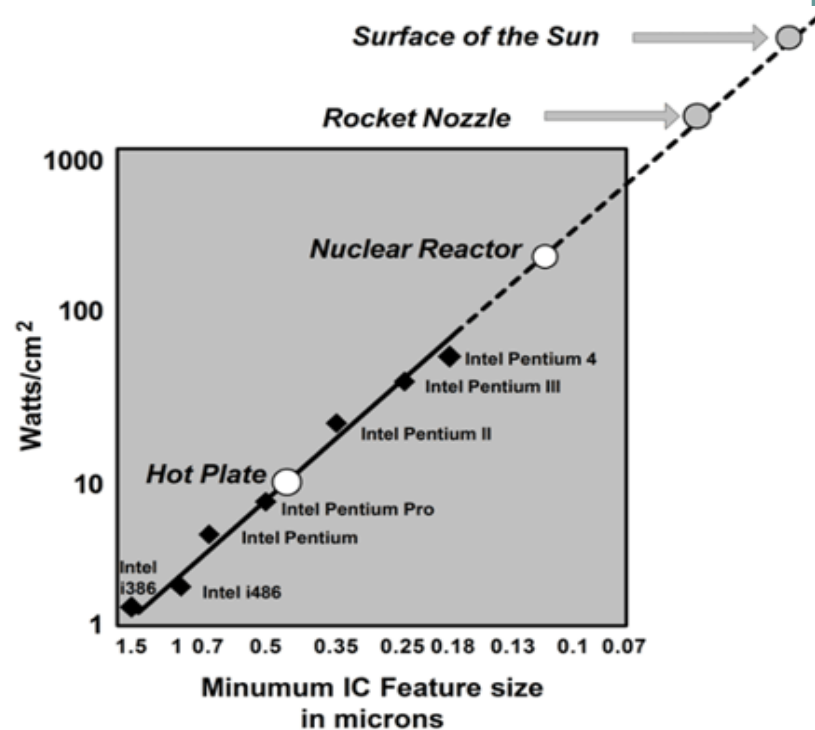
- Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург (С. Щербак, В. Журихина, А. Липовский) ○ Моделирование модовой структуры

План

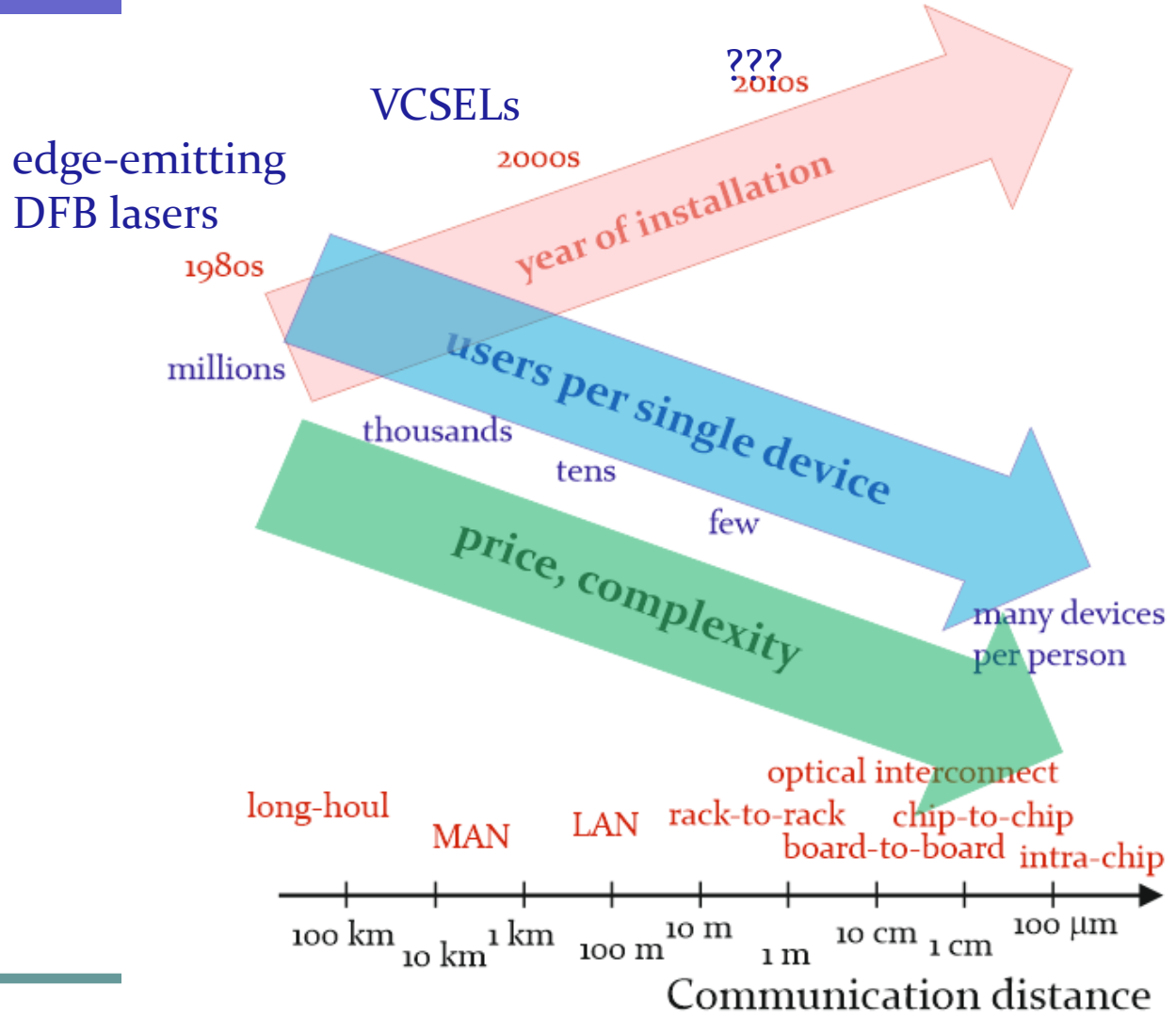
- Мотивация
- Микродисковые лазеры с квантовыми точками на GaAs
- Микродисковые лазеры с квантовыми точками на кремнии
- Микродисковые лазеры на основе плотных массивов квантовых точек
- Нанопроволоки с квантовыми точками на кремнии
- Заключение

ФОТОНЫ ПРОТИВ ЭЛЕКТРОНОВ

- Скорость распространения (c/n) на 2-3 порядка выше (v_{sat})
- Возможность пересечения фотонов (спектральное уплотнение каналов)
- Распространение без Джоулевых потерь (свободное пространство или волновод ~ 0.2 дБ/км)
- Скорость модуляции ограничена источником фотонов (>10 Гб/с), а не электрическим проводником
 - $B < B_0 A / L^2$; $B_0 \sim 10^{15}-10^{16}$ бит/с [D.A.V. Miller & H.M. Ozaktas, J.Paral.Distrib.Comp.-1996]
 - $A=1$ мкм², $L=1$ см $\rightarrow B < 0.1$ Гб/с

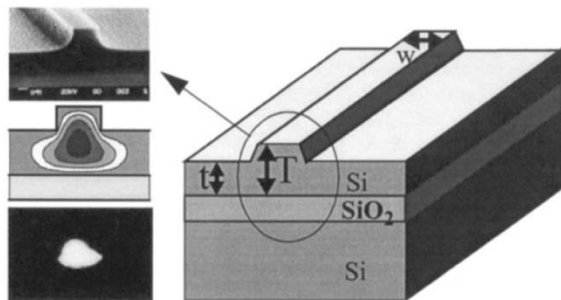


Оптическая связь и межсоединения



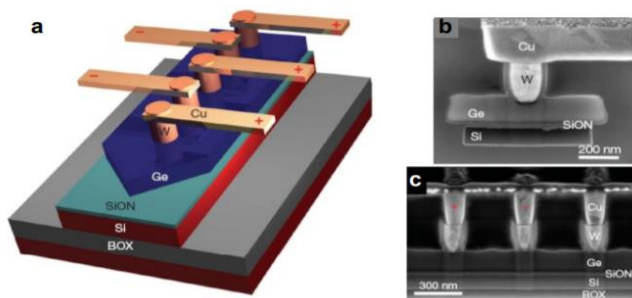
Кремниевая фотоника

Волноводы



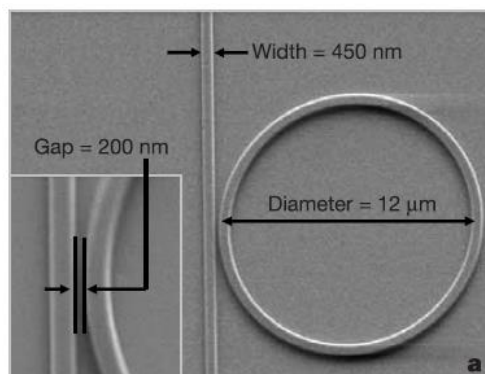
[B. Jalali, et al, JSTQE-1998]

Волноводные фотоприемники



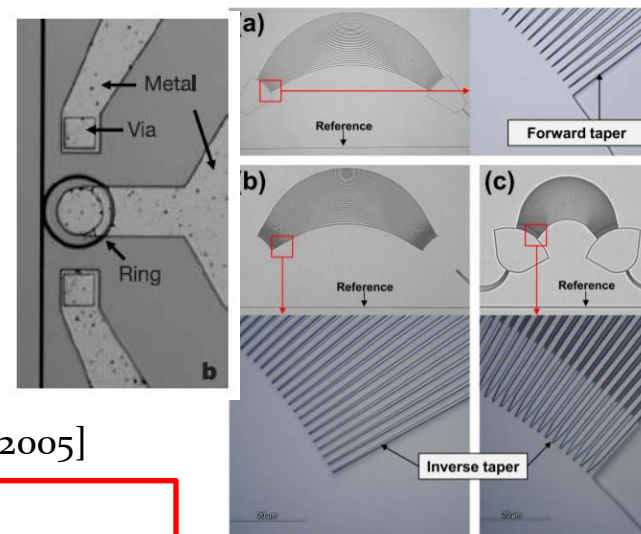
[S. Assefa, et al, Nat.-2010]

Спектрально-селективные модуляторы



[Q. Xu, et al, Nat. Lett.-2005]

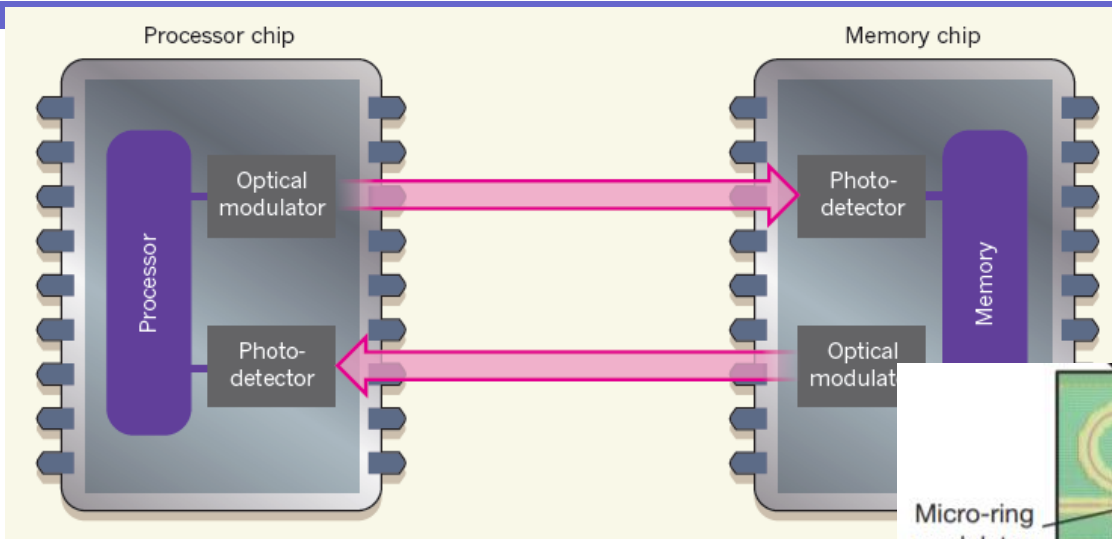
Мультиплексоры/демultipлексоры



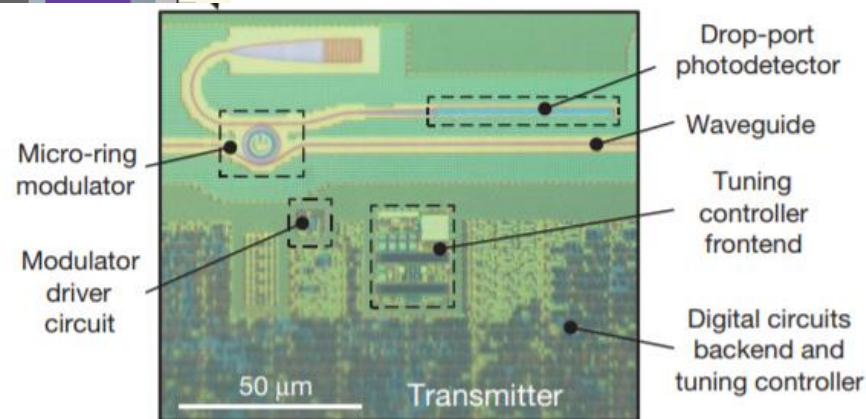
[J. Park, et al, J.Opt.-2017]

Отсутствует инжекционный лазер, который мог бы быть интегрирован с устройствами Si-фотоники

Оптическая передача chip-to-chip

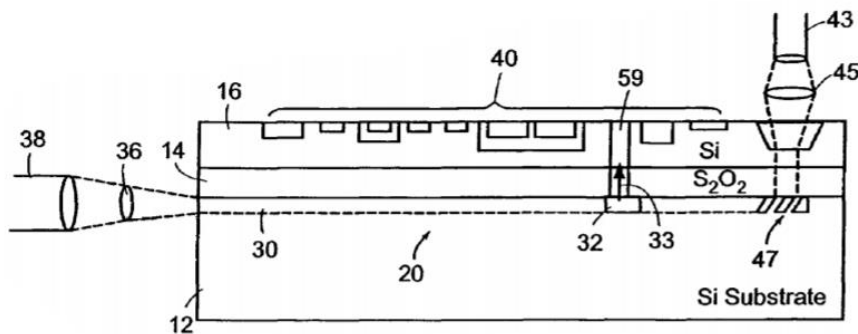


[C.Sun, et al, Nat. Lett.-2015]



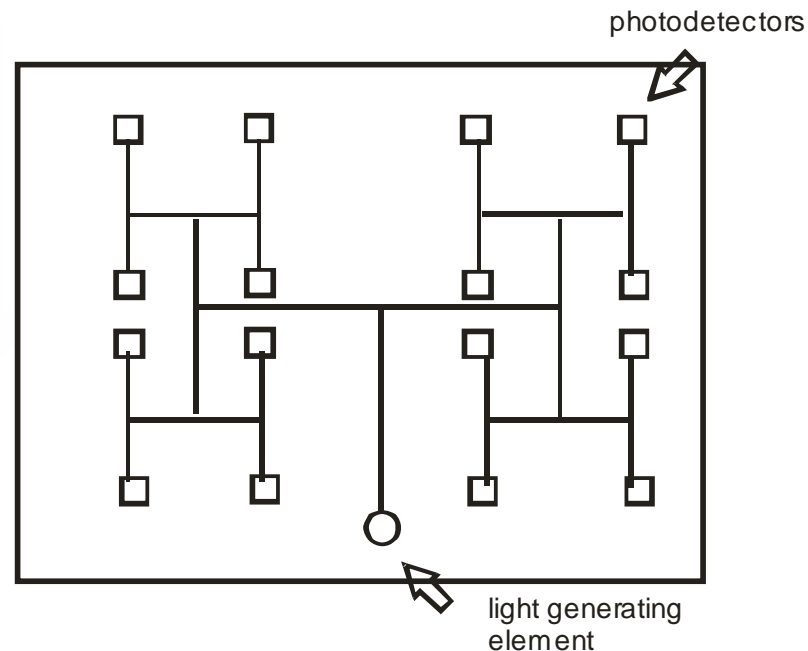
A single 1,183-nm continuous-wave off-chip solid-state laser acts as the light source, with output power split 50/50 to share it across both the D → M and M → D links. To overcome the 4.6 dB coupling losses

Оптическая передача intra-chip



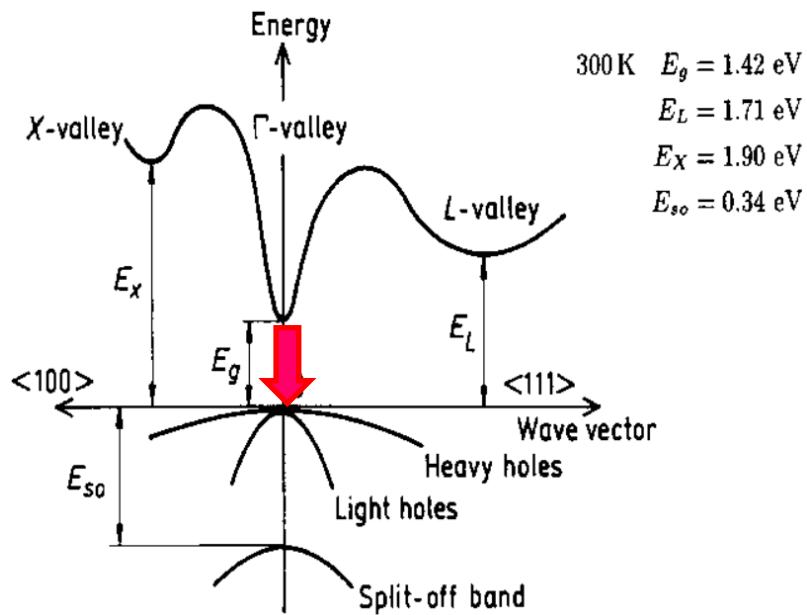
[Optical ready wafers
L.C.West, et al, US Pat 7,043,106 (2006)]

- optical clock signal distribution network
 - С внешним оптическим источником
 - Со встроенным оптическим источником (микролазер)

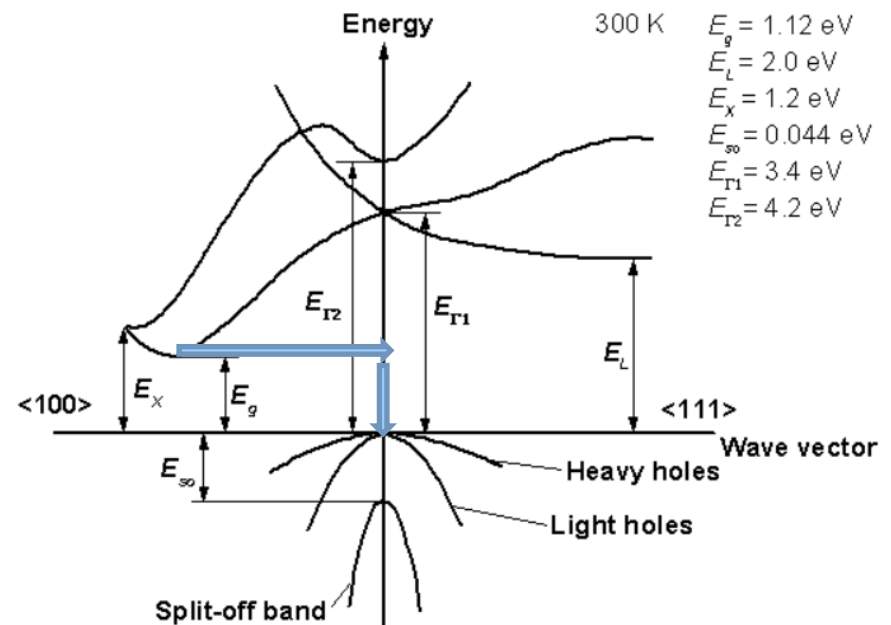


Зонная структура

- Direct-gap (GaAs)

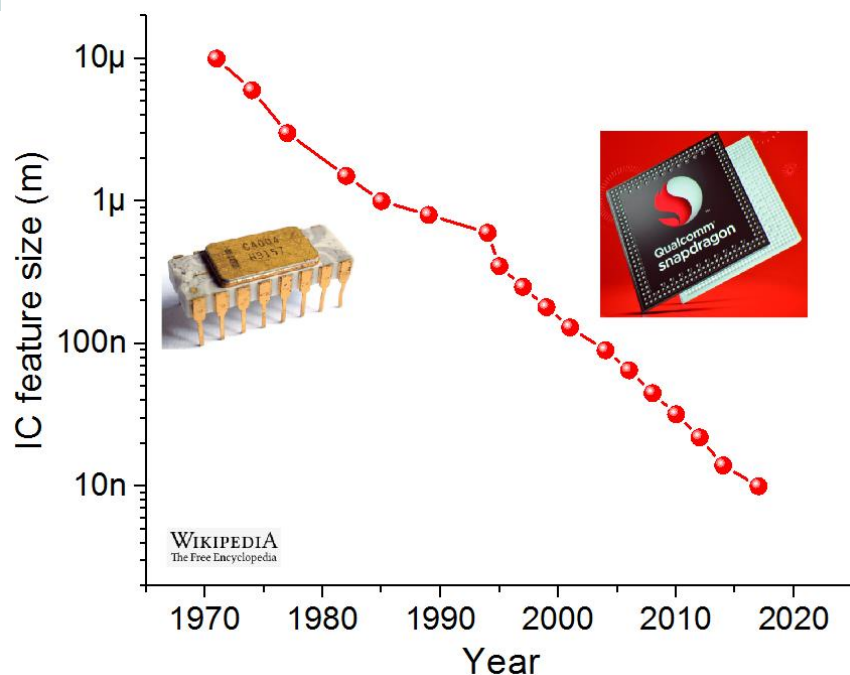


- Indirect-gap (Si)



Размер прибора

Эволюция уровня технологии транзисторных ИС

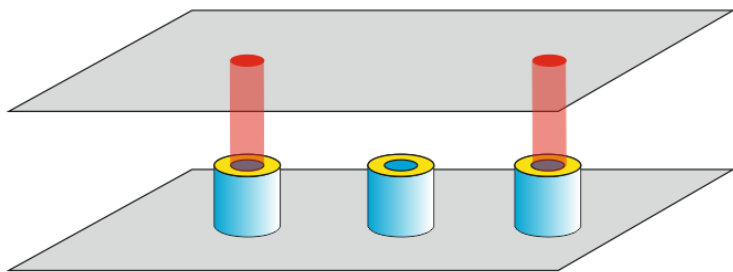


● П/п торцевой лазер (с момента изобретения по настоящее время)

- Размер ~ 1 мм
- III-V подложки (GaAs, InP)

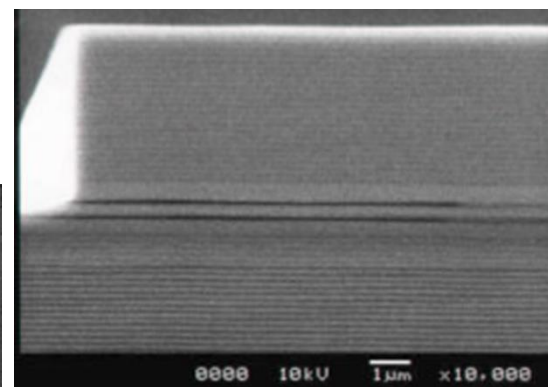
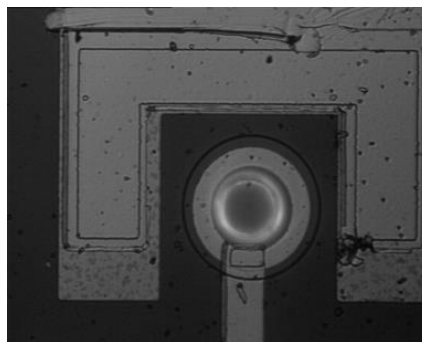
- Требуется микролазер на Si подложке
 - Сверхмалые размеры
 - Сверхнизкое энергопотребление
 - Простота конструкции (низкая стоимость)

Вертикально-излучающие микролазеры



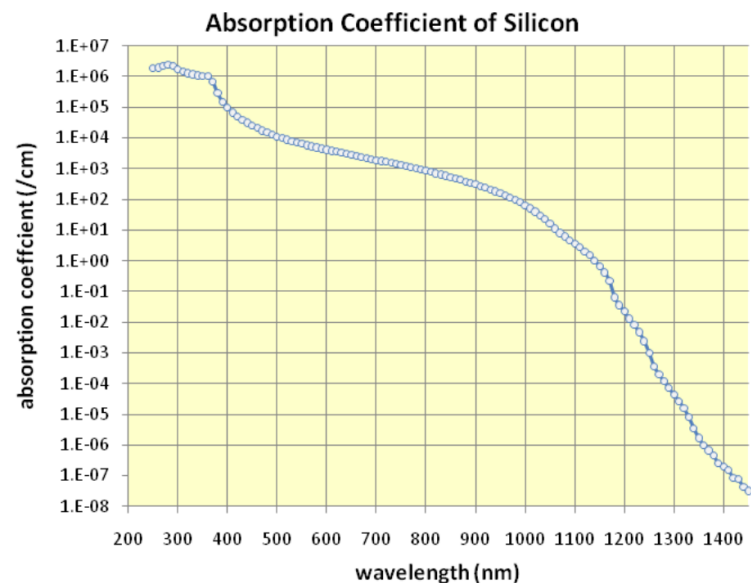
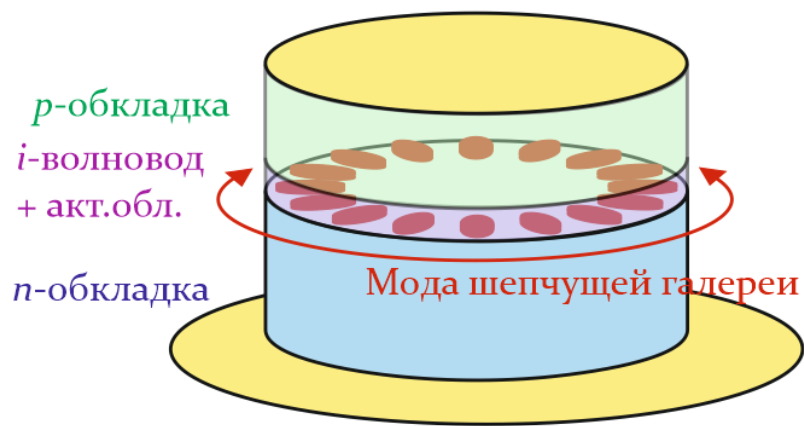
- Массивы излучателей
- Вертикальный вывод излучения
- Низкие рабочие токи, высокая скорость модуляции
- Компактные латеральные размеры

- Сложный пост-рост
- Большая толщина эпитаксиальной структуры
- Трудность создания длинноволновых излучателей
- Трудность латерального вывода излучения



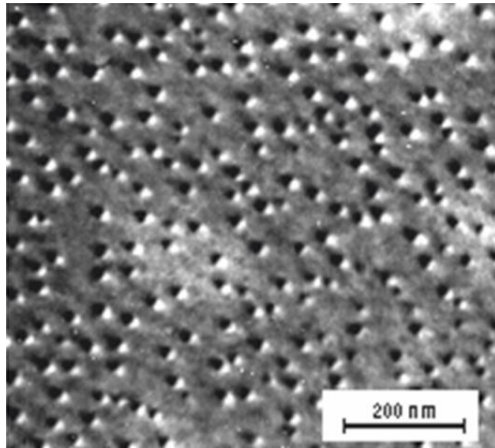
Микродисковые (микрокольцевые) лазеры

- Стандартная лазерная структура
- Простой пост-рост

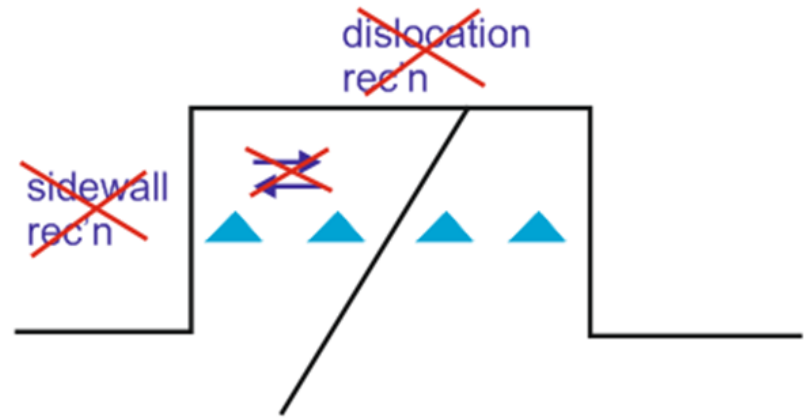
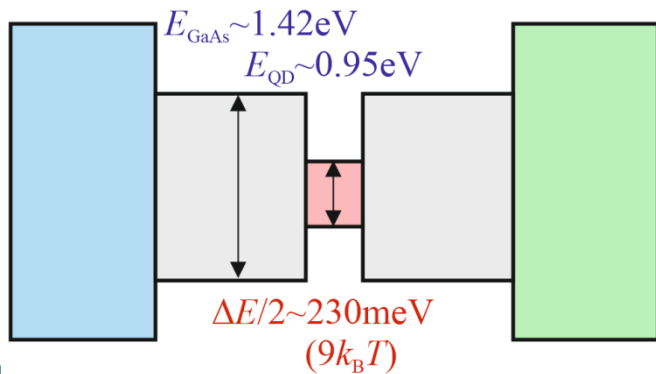


- Требуется $\lambda > 1.17$ мкм
 - InGaAsP/InP кв. ямы:
 - Низкий темп поверхностной рекомбинации
 - Низкая температурная стабильность
 - InAs/GaAs кв. точки

Квантовые точки



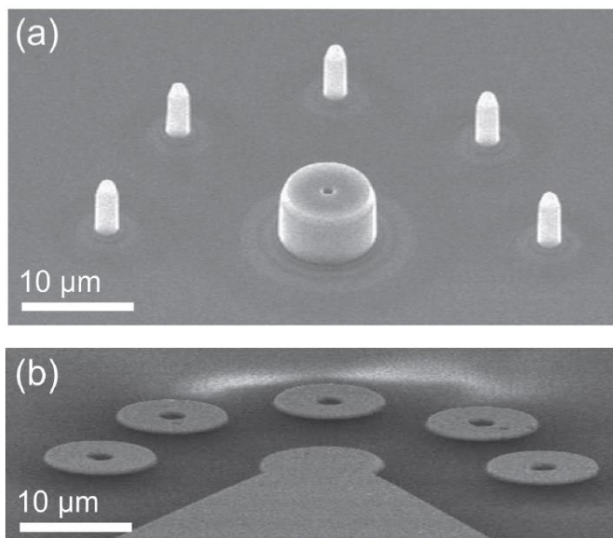
- $\lambda \sim 1.3$ мкм; локализация > 200 мЭВ
- В торцевых лазерах InAs/GaAs
 - Высокая стабильность ($T_0 \rightarrow \infty$; $T_{\max} = 220^\circ\text{C}$)
 - Низкий пороговый ток ($10 \dots 100$ А/см²)



- Подавленный транспорт носителей в плоскости активной области:
 - Подавление безызлучательной рекомбинации на боковых гранях/дислокациях

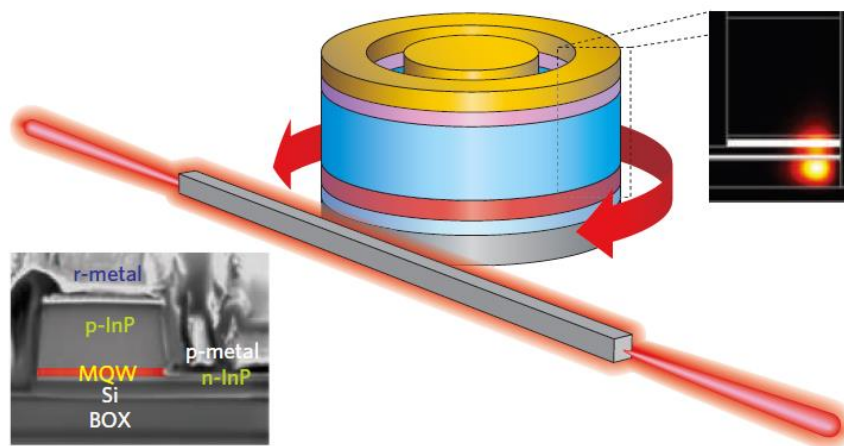
Латерально-излучающие микролазеры

Вывод излучения из микродиска в свободное пространство



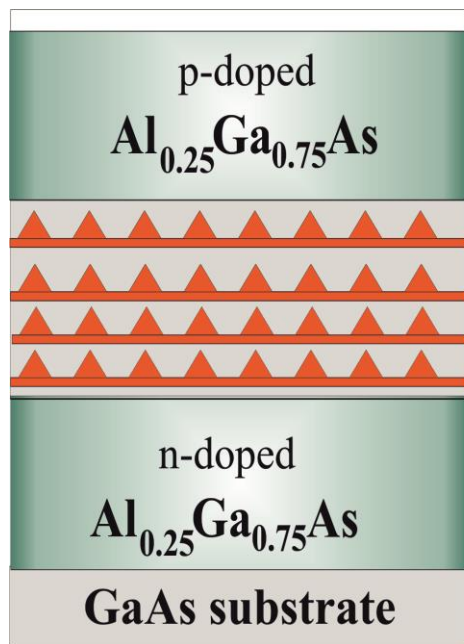
InAs-КТ микродиск на GaAs
[E.Stock, et al, Adv.Mat.-2013]

Вывод излучения из микродиска в волокно

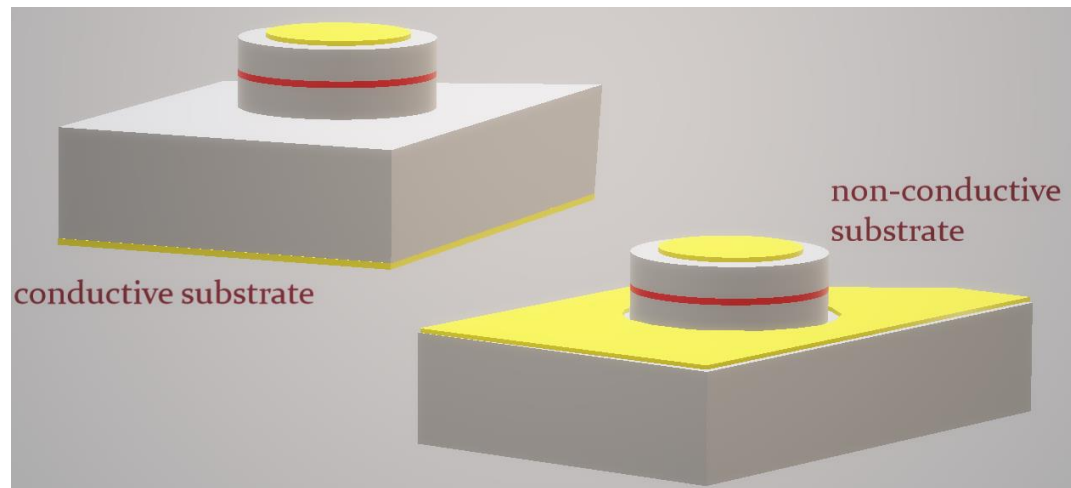


InGaAsP-КЯ микродиск на Si [D.Liang, et al, JSTQE-2011]

Инжекционные КТ-микролазеры на GaAs

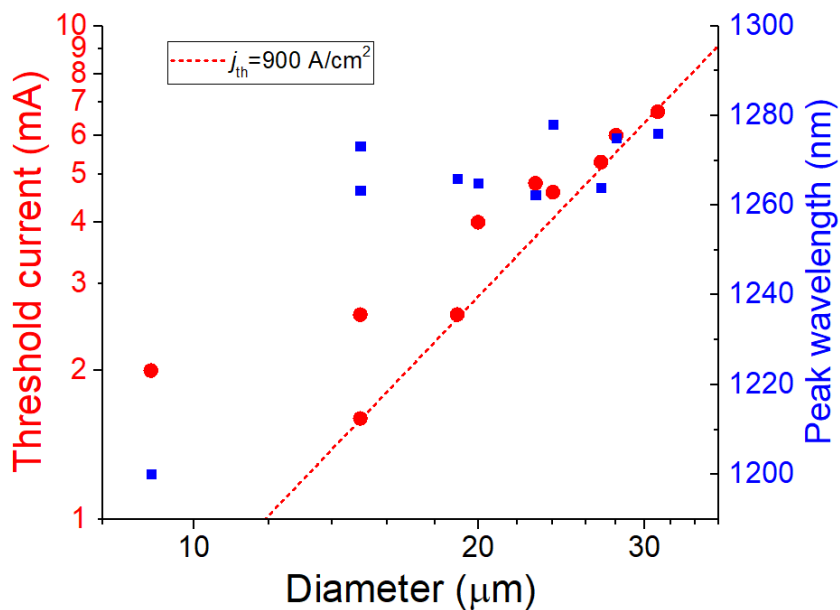
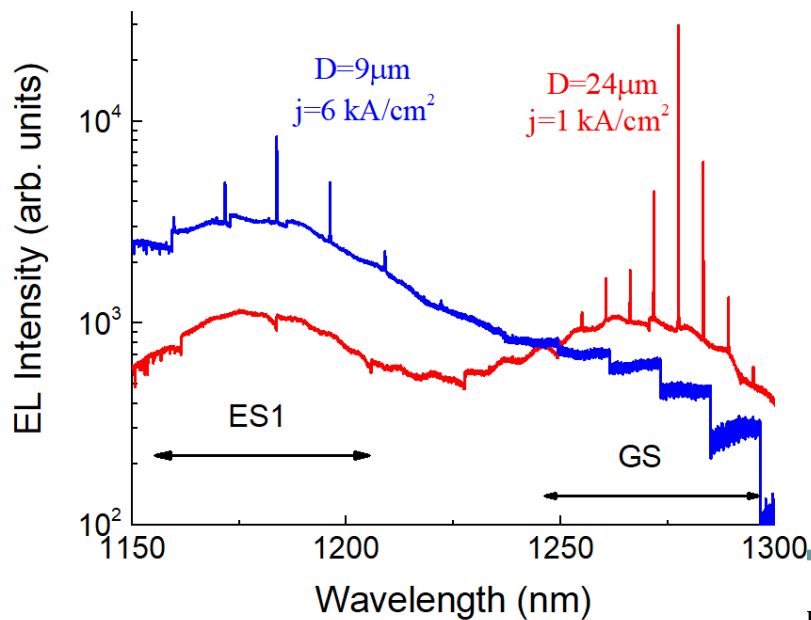
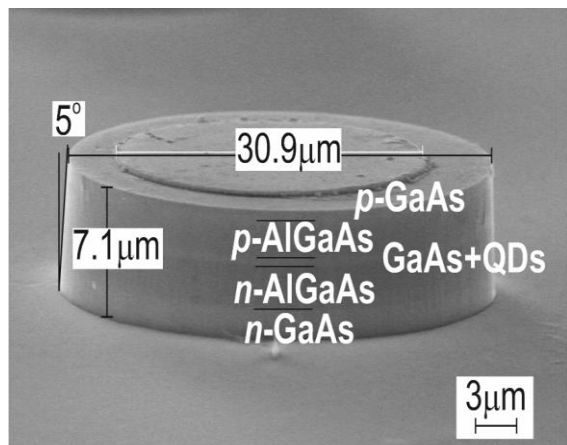


10 layers
InAs/InGaAs QDs



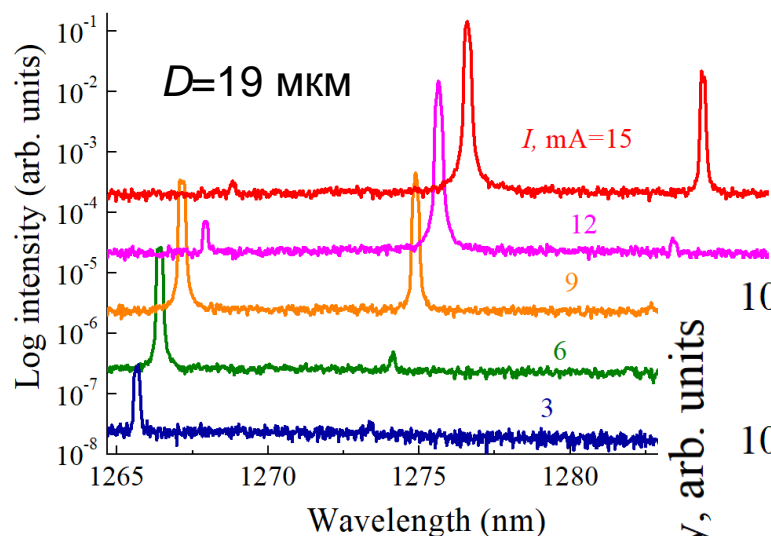
- Стандартная лазерная гетероструктура
- Одна или две литографии
- Не требуется пассивация
- Непрерывный режим работы без принудительного охлаждения

Спектры излучения и пороговая плотность тока

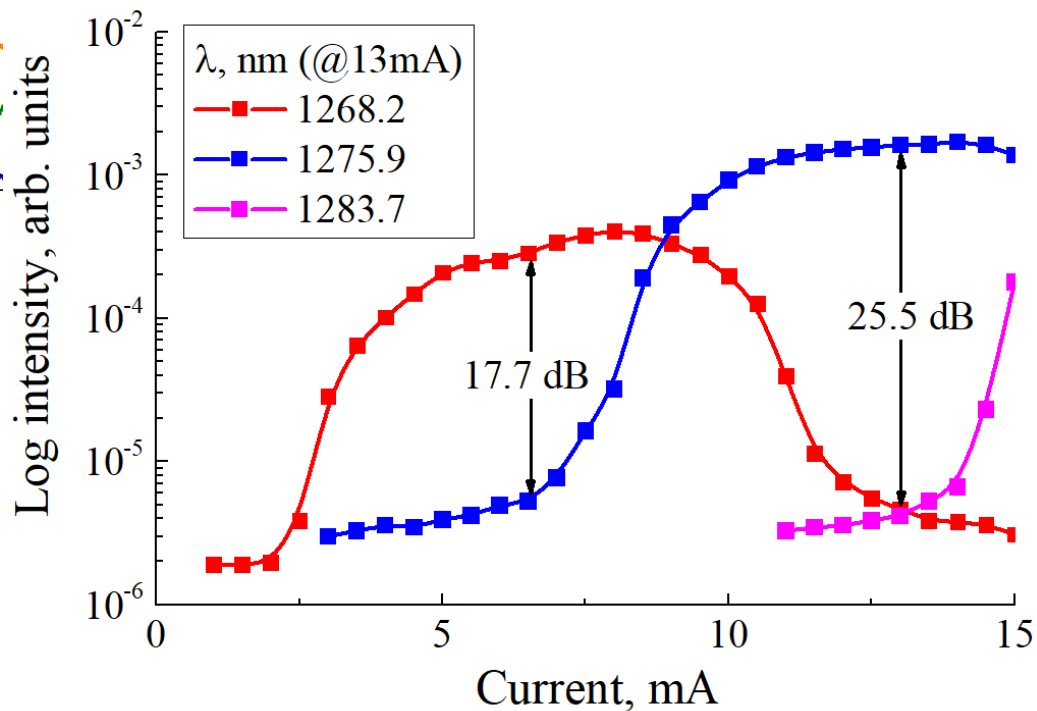


- Вплоть до $D=15\text{ мкм}$
- WGM линии вблизи длины волны основного перехода КТ
- Пороговая плотность тока около 900 A/cm^2

Квази-одночастотная генерация

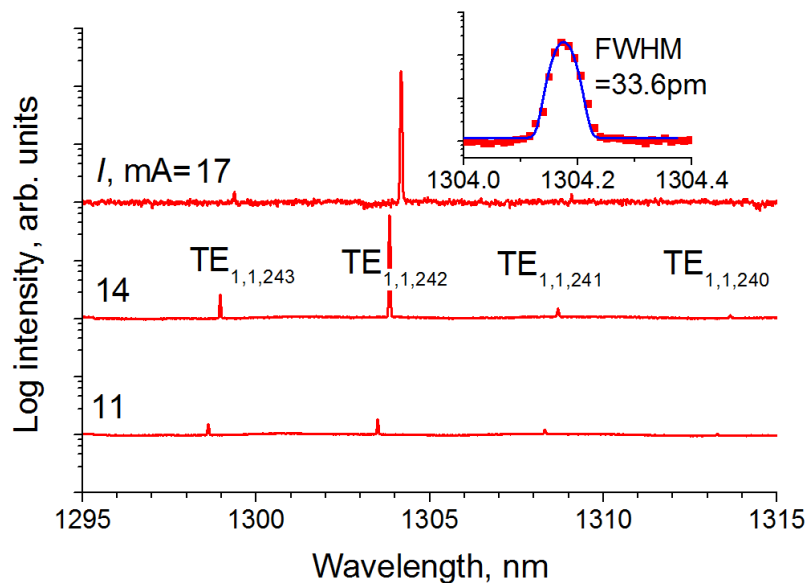


- Одновременная генерация 1...3 соседних WGM
- SMSR может превышать 20 дБ

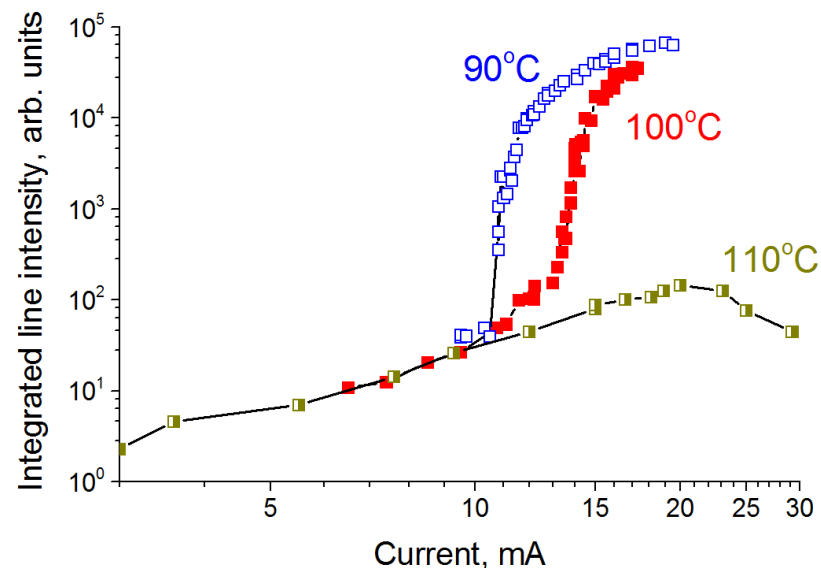


Высокотемпературная генерация в инжекционных КТ-микродисках

Спектры излучения при различном токе (300 K)



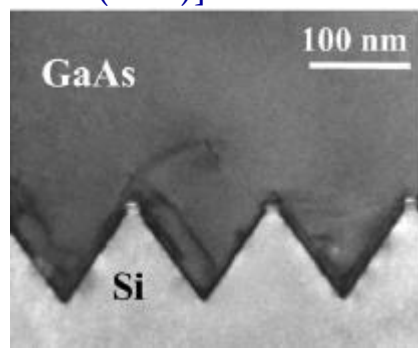
Зависимость свет-ток для доминантной линии при различных температурах



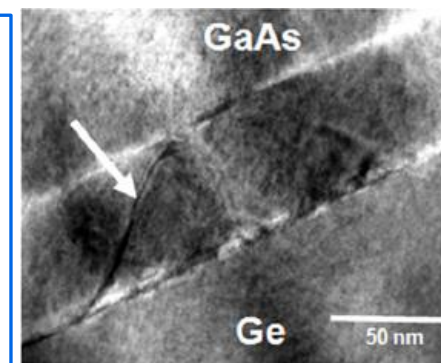
- Генерация вплоть до 100°C
- Спектральная ширина линии 30-40 пм
- Длина волны генерации > 1.3 мкм

Рост АзВ5 на кремнии

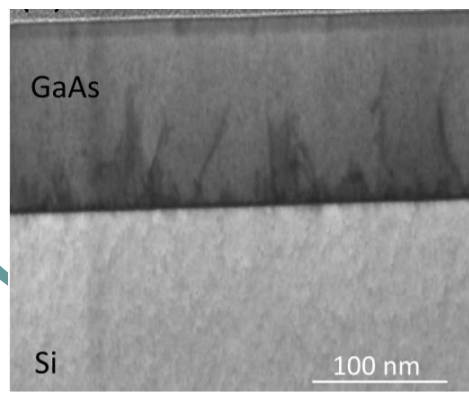
- Si(100) + Ge буфер (InGaAs QW, MBE+MOCVD): 5.5кА/см² RT pulsed [V. Ya. Aleshkin, et al, Appl. Phys. Lett. 109, 061111 (2016)]



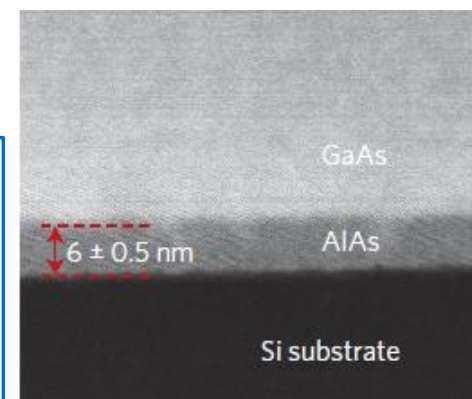
- Si(100) + {111} V-канавки в направлении [110] (QD, MBE): генерация при 80°C CW [J. Norman, et al, Opt. Exp. 25, 3927 (2017)]



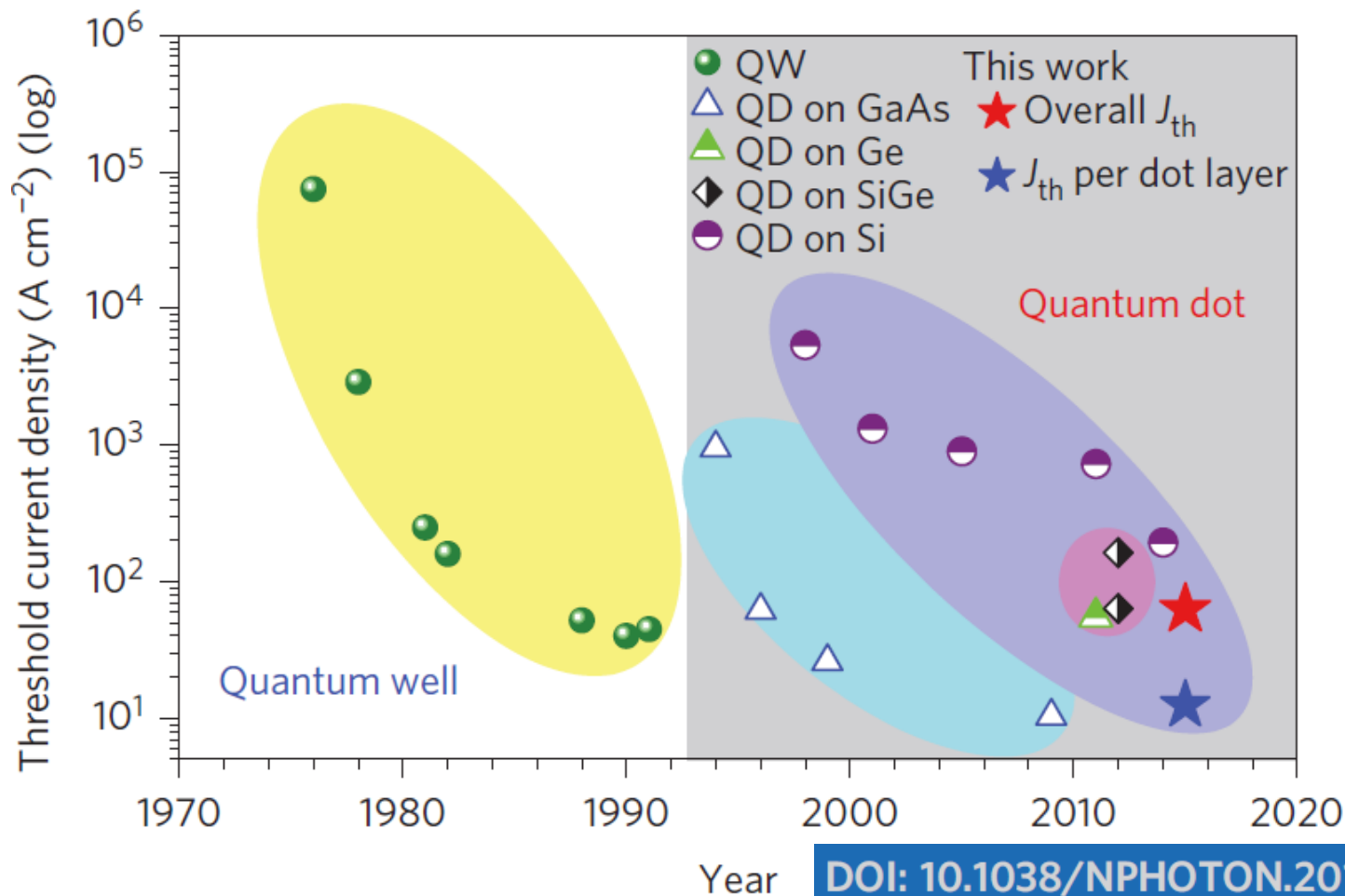
- Si(100) + разориентация к [011] (QD, MBE): 62.5 А/см² CW RT; MTTF > 100 000 часов [S. Chen, et al, Nat. Photon. 10, 307 (2016)]



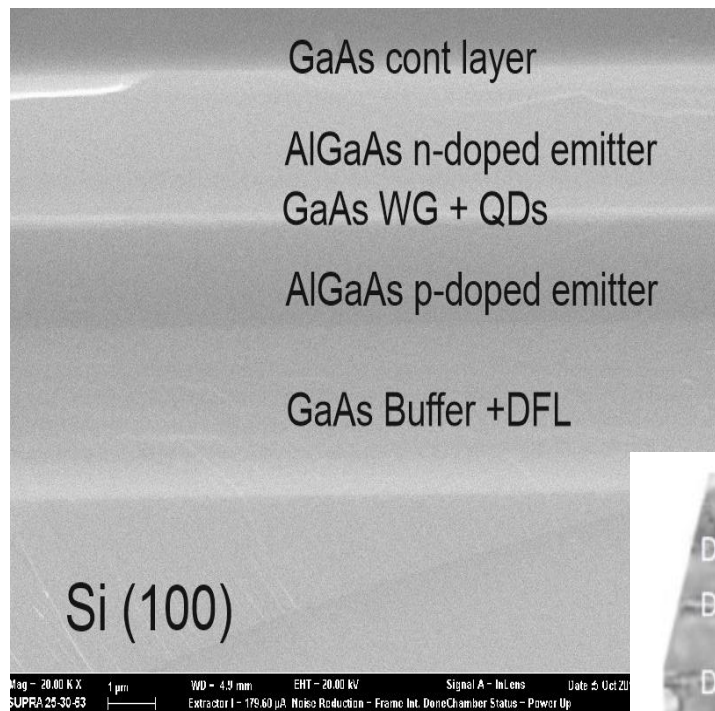
- Si(100) + «замораживание» реконструкции 2 x 1 (QD, MOCVD+MBE): генерация при 100°C pulsed [S. Chen, et al, Opt. Exp. 25, 4632 (2017)]



Лазерная эволюция



Лазерная КТ-структура на Si-подложке



GaAs cont layer

AlGaAs n-doped emitter

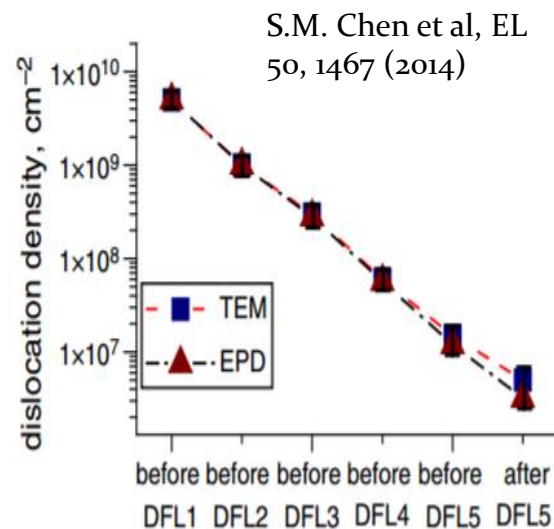
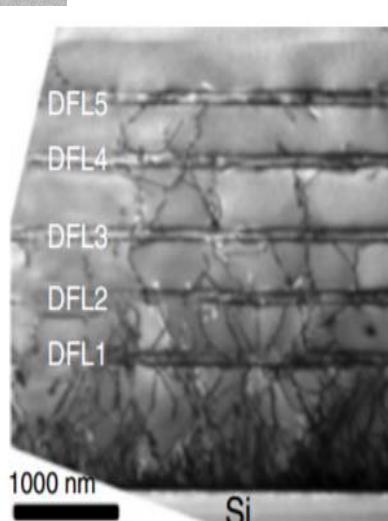
GaAs WG + QDs

AlGaAs p-doped emitter

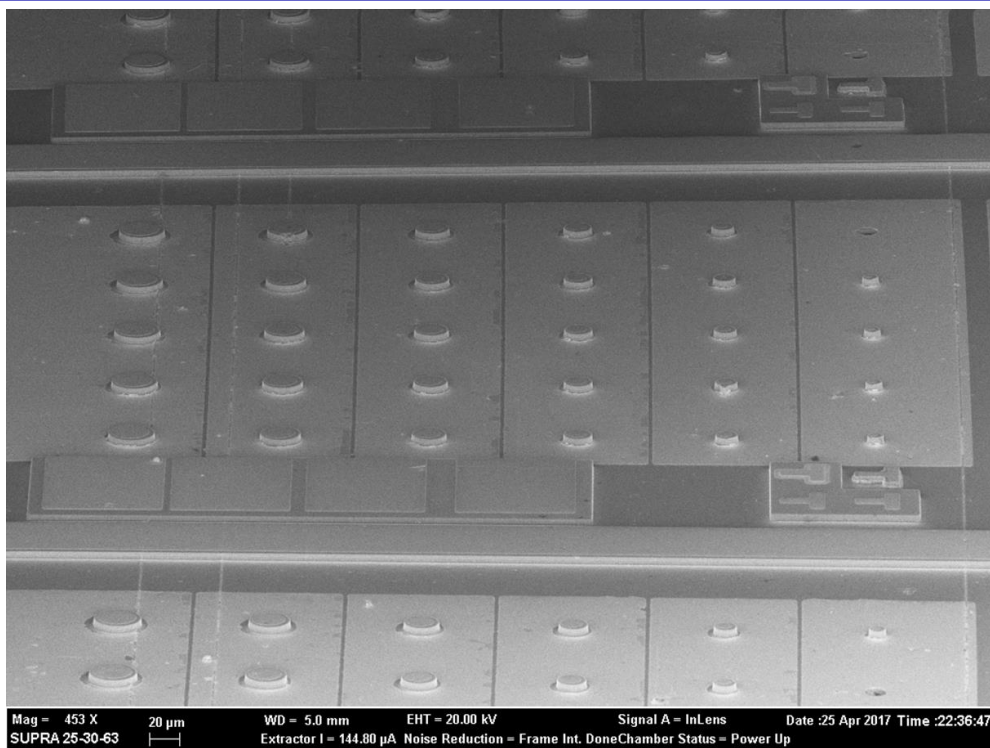
GaAs Buffer +DFL

Si (100)

- МПЭ (UCL)
- Подложка Si(100) offcut 4° к [011]
- Буфер: AlAs + GaAs + InGaAs/GaAs dislocation filter layers (DFL)
- Лазерная структура: $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ / GaAs / КТ



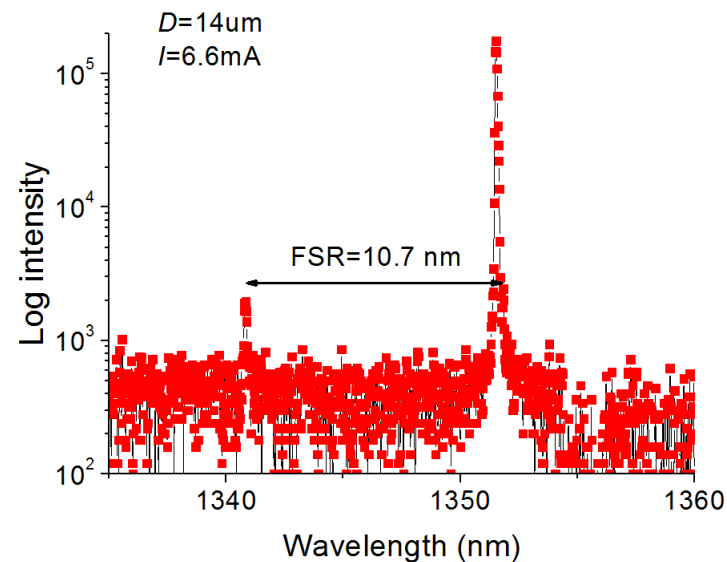
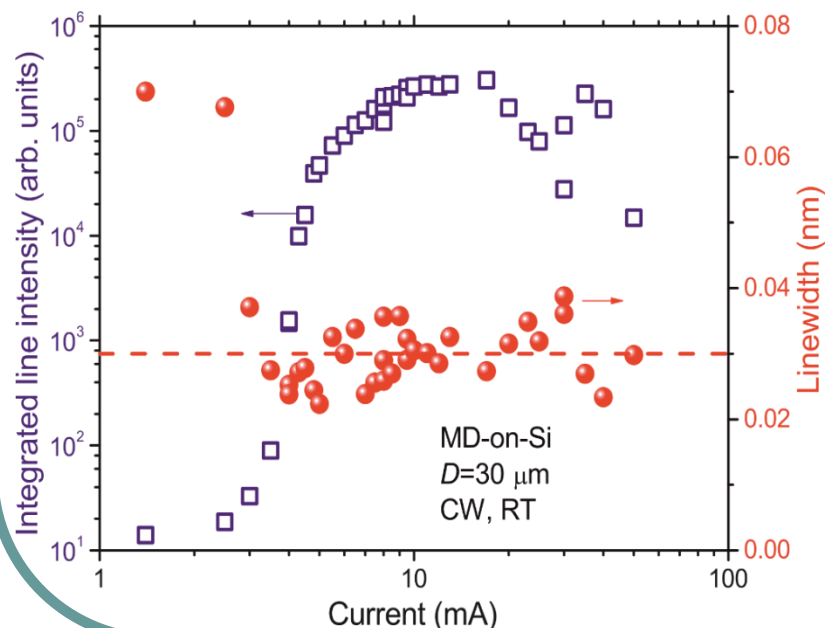
Микродисковые лазеры на Si



- $D = 10\text{-}30$ мкм (фотолитография)
 - $H \sim 4.5$ мкм; $\alpha < 5^\circ$ (BCl_3/Ar IC-plasma dry etching process)
 - Без пассивации
 - р-контакт AgMn/NiAu (дисковый на вершине мез)
 - п-контакт AuGe/Ni/Au (сплошной у основания)
- Измерения: ИК-объектив x 10, Horiba FHR 1000 монохроматор, Horiba Symphony InGaAs CCD матрица (спектральное разрешение 30 пм);
 - CW без принудительного охлаждения, 0...50 мА

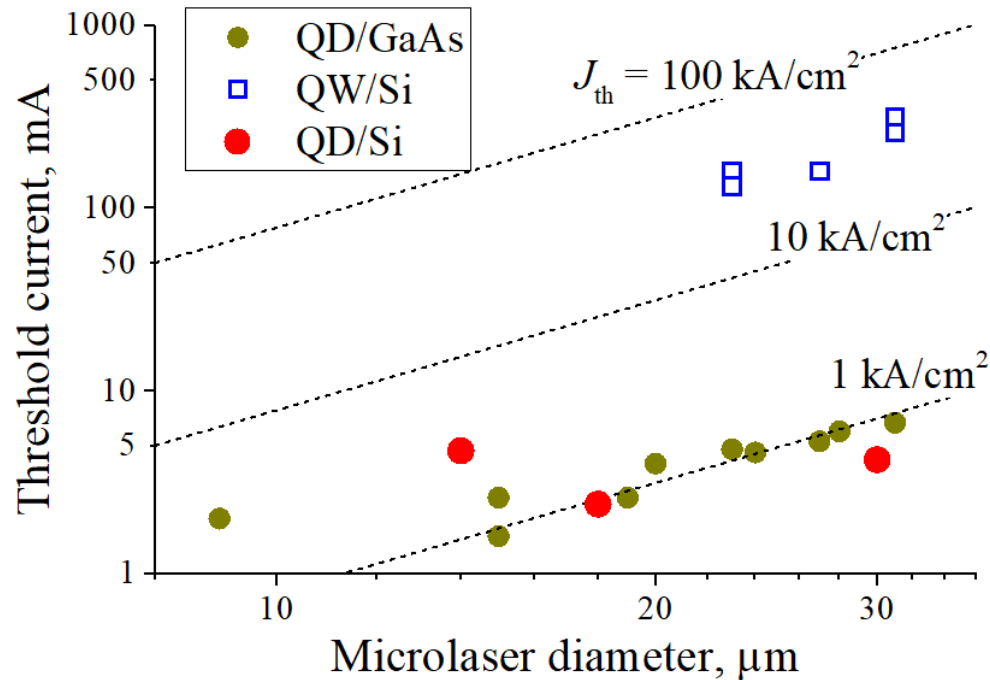
Интенсивность и ширина линии излучения микрлазеров КТ/Si

- В лазерном режиме ширина линии излучения 30 пм
 - Ограничена спектральным разрешением измерительной системы



- Пороговый ток 4.2 мА ($D=30\ \mu\text{м}$)
 - $J_{\text{th}} = 594\ \text{A}/\text{cm}^2$
(всего в 1.4 раза больше, чем в полосковом лазере)

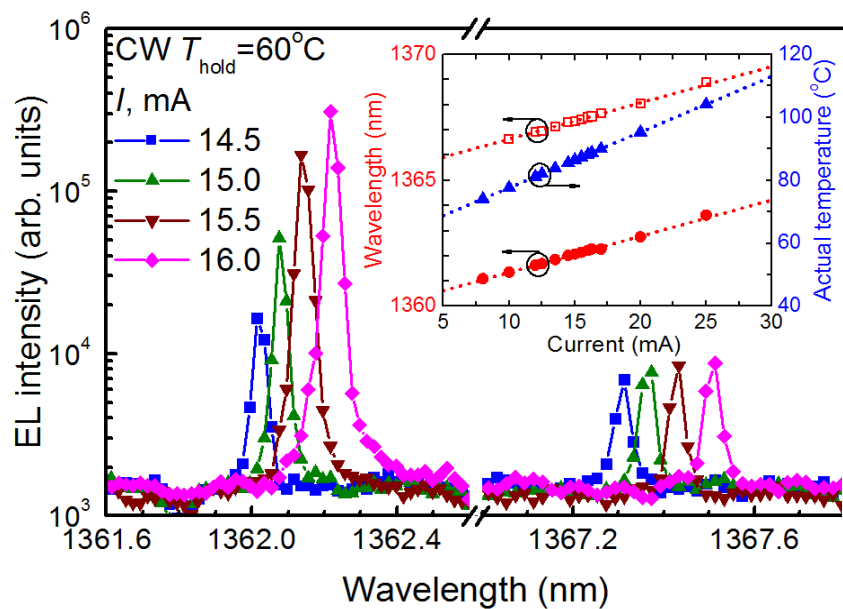
Пороговые характеристики микродисковых КТ/Si-лазеров



- Пороговая плотность тока КТ-микрولазеров на Si (в отличие от квантовых ям) сравнима с лазерами на родной подложке

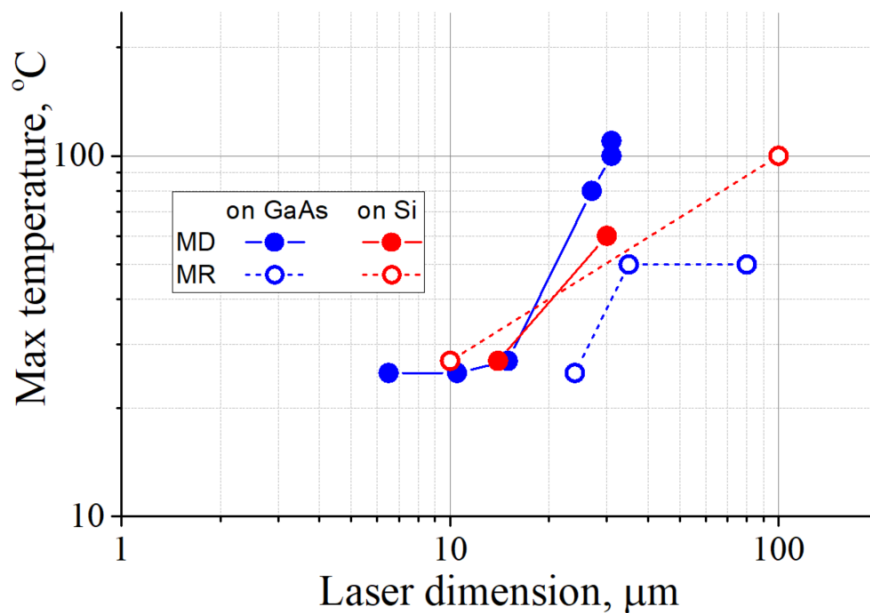
[N. Kryzhanovskaya, et al, Opt. Lett. 42(17) 3319-3322 (2017); N.V. Kryzhanovskaya, et al, Opt. Express 25, 16754 (2017); N. V. Kryzhanovskaya et al, Semicond. 50, 390 (2016)]

Высокотемпературная генерация КТ-микродисков на Si

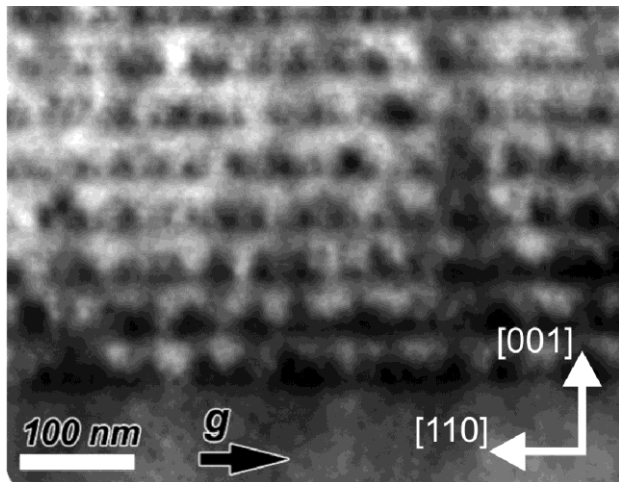


● Максимальная T генерации:

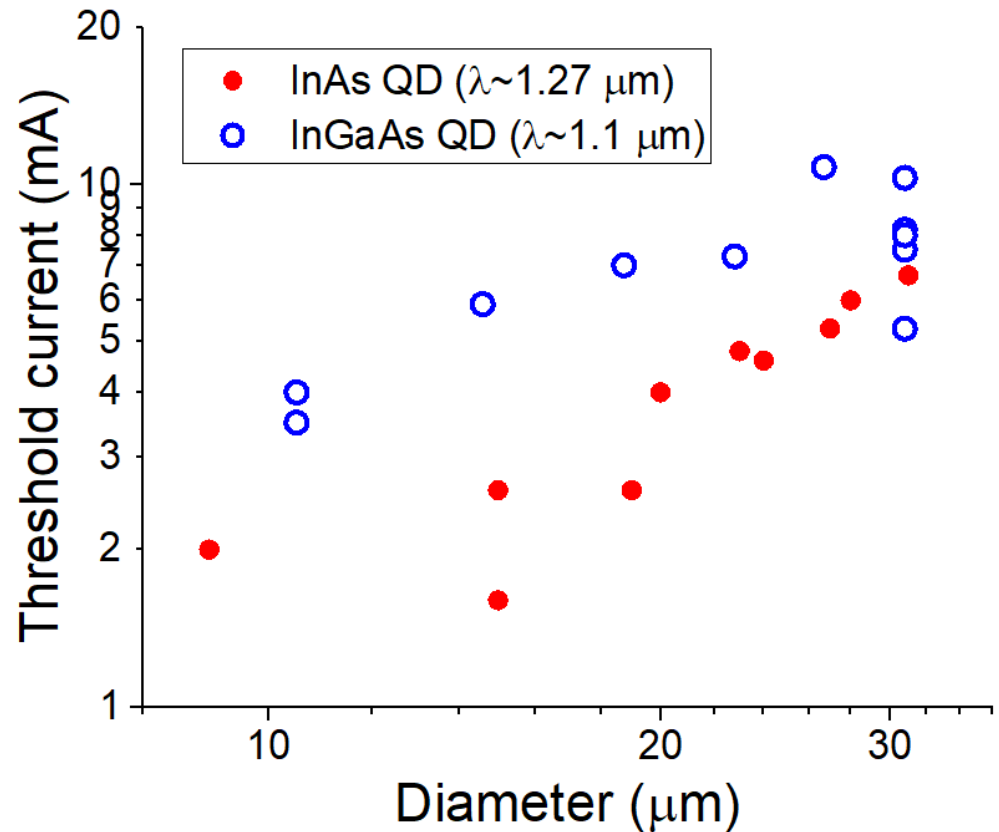
- 60°C (CW)
- 110°C (0.5- μ s-pulses)
($T_0 \sim 30$ K)



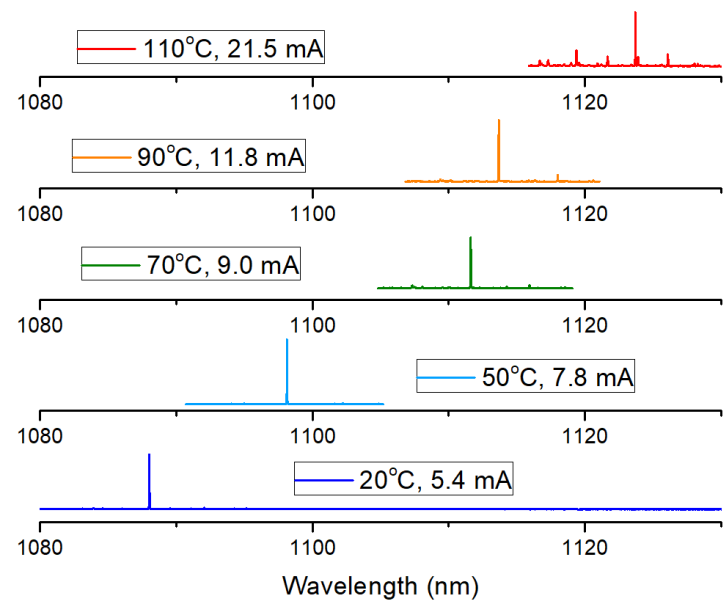
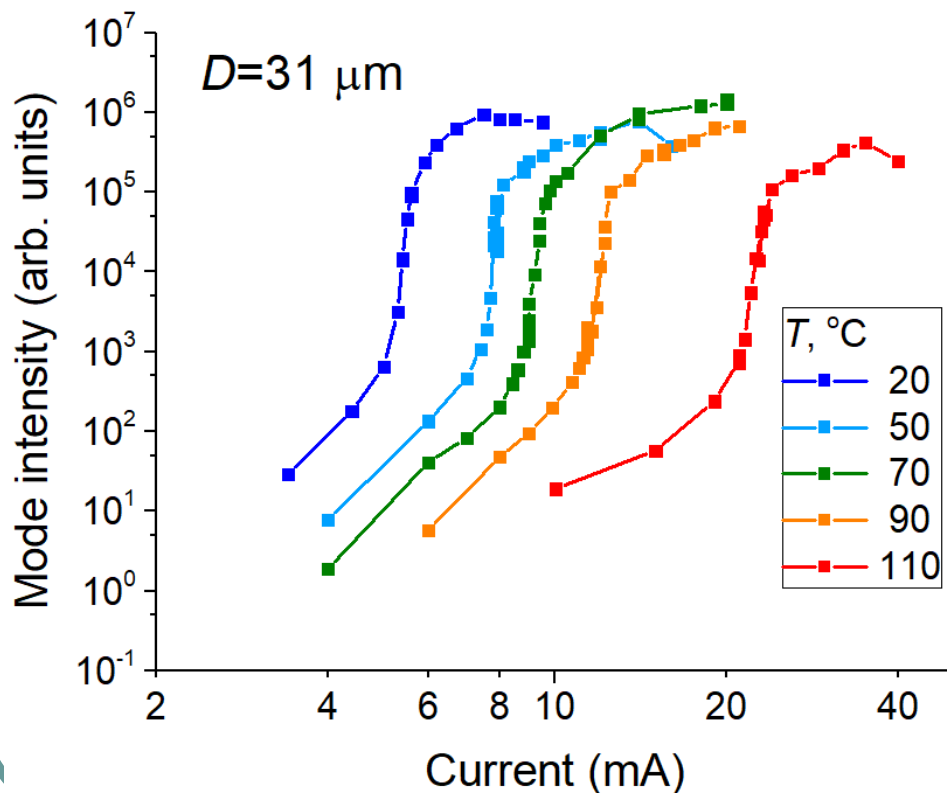
Микролазеры на основе плотных массивов InGaAs КТ



- $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $x \sim 40\%$, 8-10 монослоев, GaAs(100) 6° разориентация к (111)
 - $n_{\text{QD}} \sim (3-5) \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$
 - $\lambda \sim 1.1 \text{ мкм (RT)}$

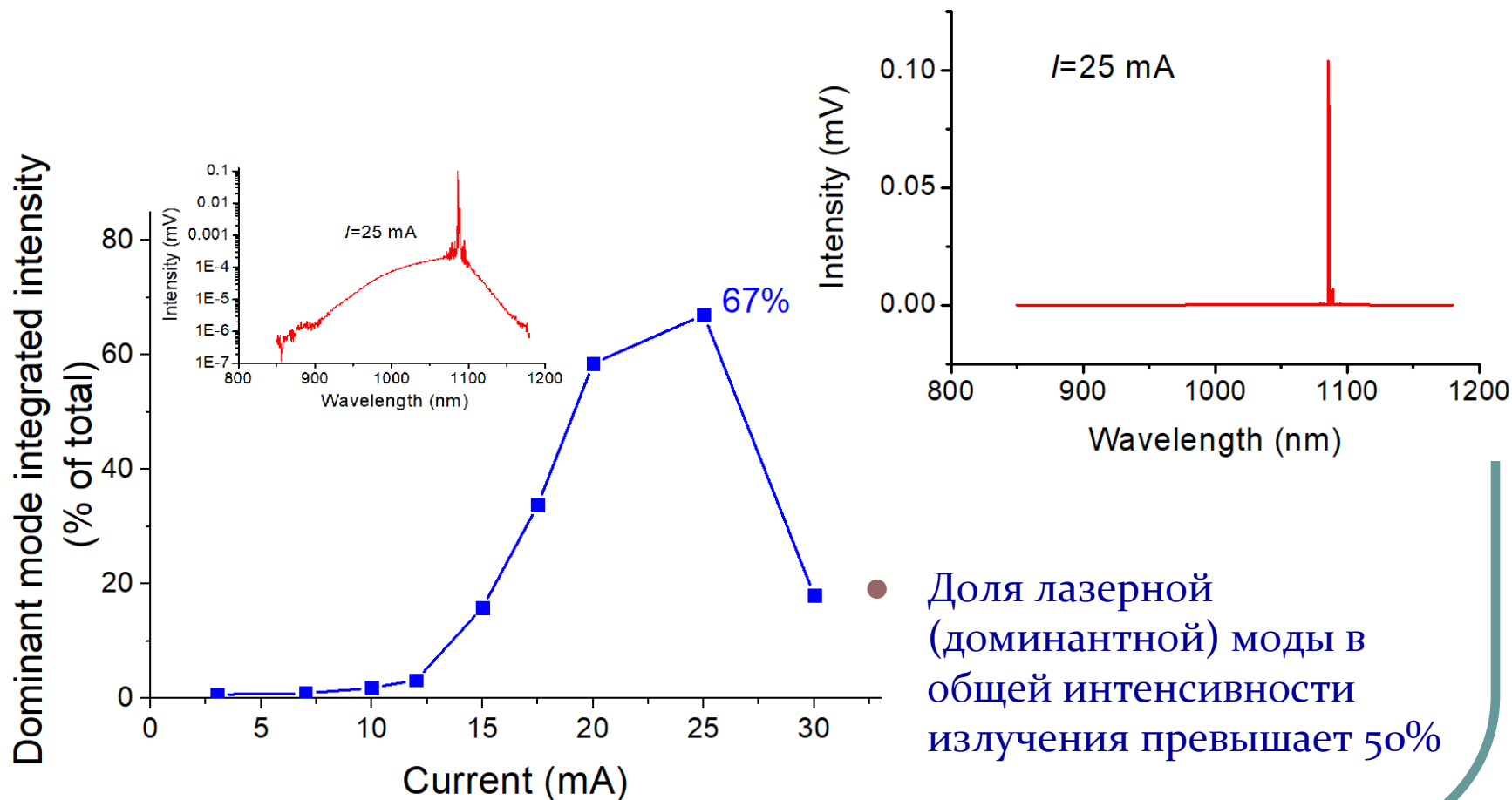


Высокотемпературная генерация InGaAs-КТ микролазеров



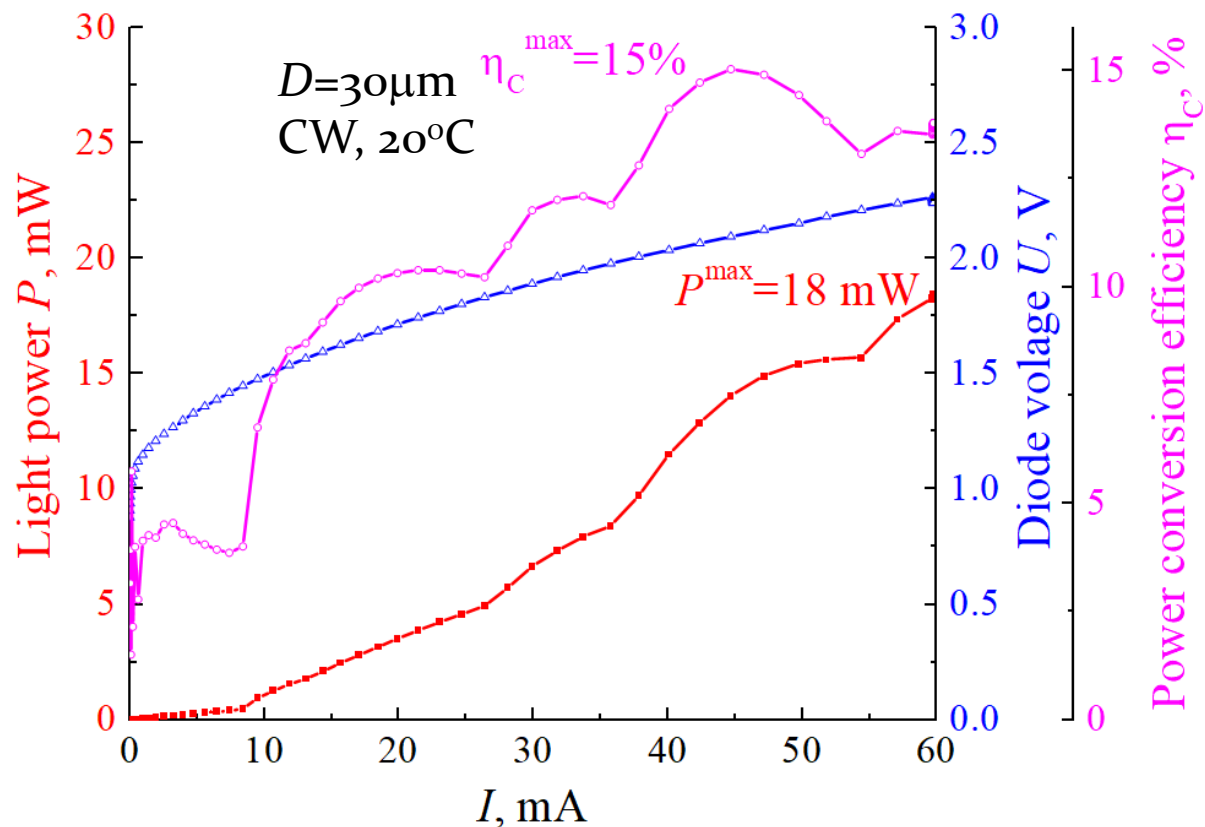
- Генерация вплоть до 110°C в непрерывном режиме (наибольшая T для всех КТ микродисковых лазеров)

Высокая доля интенсивности в лазерной моде

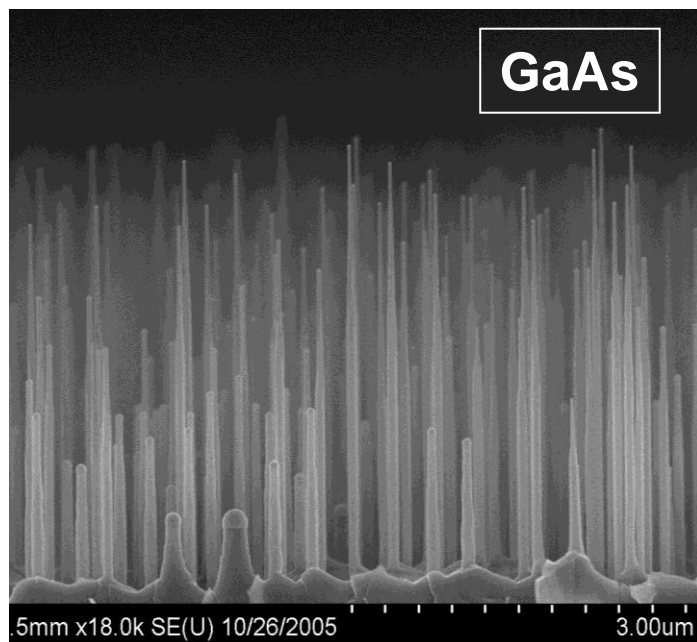


Выходная мощность и КПД

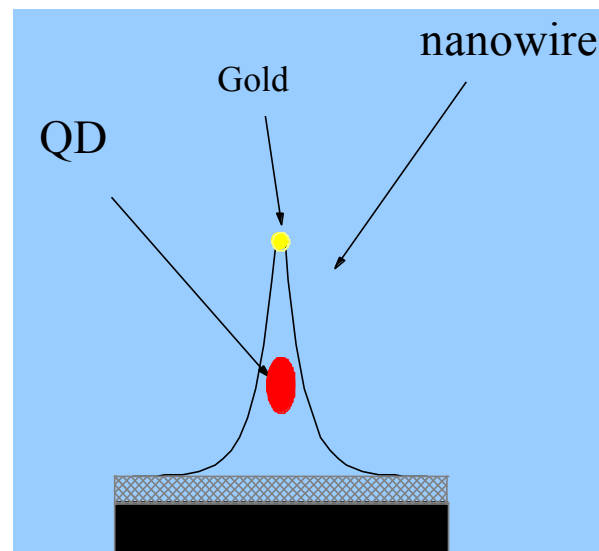
- Рекордная для микродискового лазера выходная мощность излучения в свободное пространство
- Рекордный КПД микродискового лазера



Нанопроволоки



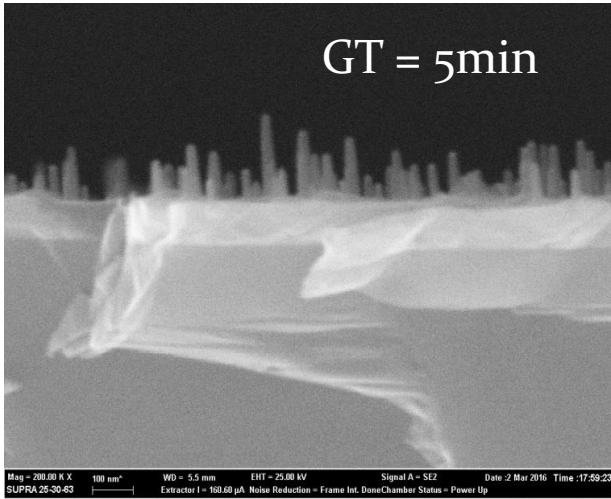
- ❑ $d = 10 \dots 200 \text{ нм}$
- ❑ h до 20 мкм
- ❑ Плотность $\sim 10^6 - 10^{10} \text{ см}^{-2}$



- ❑ Возможность формирования одиночных КТ с predetermined местоположением

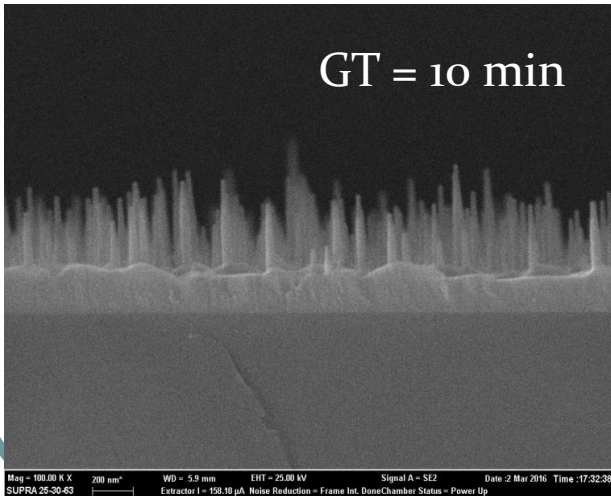
AlGaAs нанопроволоки + GaAs КТ на подложках Si(111)

GT = 5min



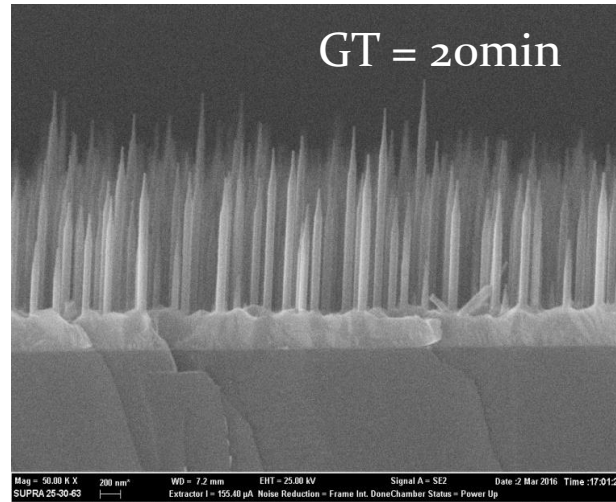
Mag = 200.00 K X 100 nm* WD = 5.5 mm EHT = 25.00 kV Signal A = SE2 Date : 2 Mar 2016 Time : 17:59:23
SUPRA 25-30-63 Extractor I = 100.00 μ A Noise Reduction = Frame Int. Dome Chamber Status = Power Up

GT = 10 min



Mag = 100.00 K X 200 nm* WD = 5.9 mm EHT = 25.00 kV Signal A = SE2 Date : 2 Mar 2016 Time : 17:32:38
SUPRA 25-30-63 Extractor I = 150.10 μ A Noise Reduction = Frame Int. Dome Chamber Status = Power Up

GT = 20min

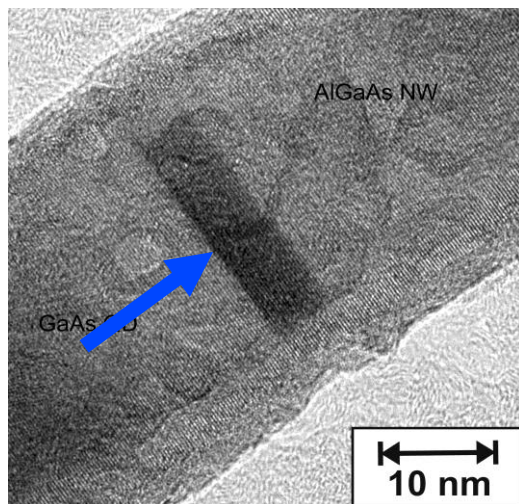


Mag = 50.00 K X 200 nm* WD = 7.2 mm EHT = 25.00 kV Signal A = SE2 Date : 2 Mar 2016 Time : 17:01:27
SUPRA 25-30-63 Extractor I = 155.40 μ A Noise Reduction = Frame Int. Dome Chamber Status = Power Up

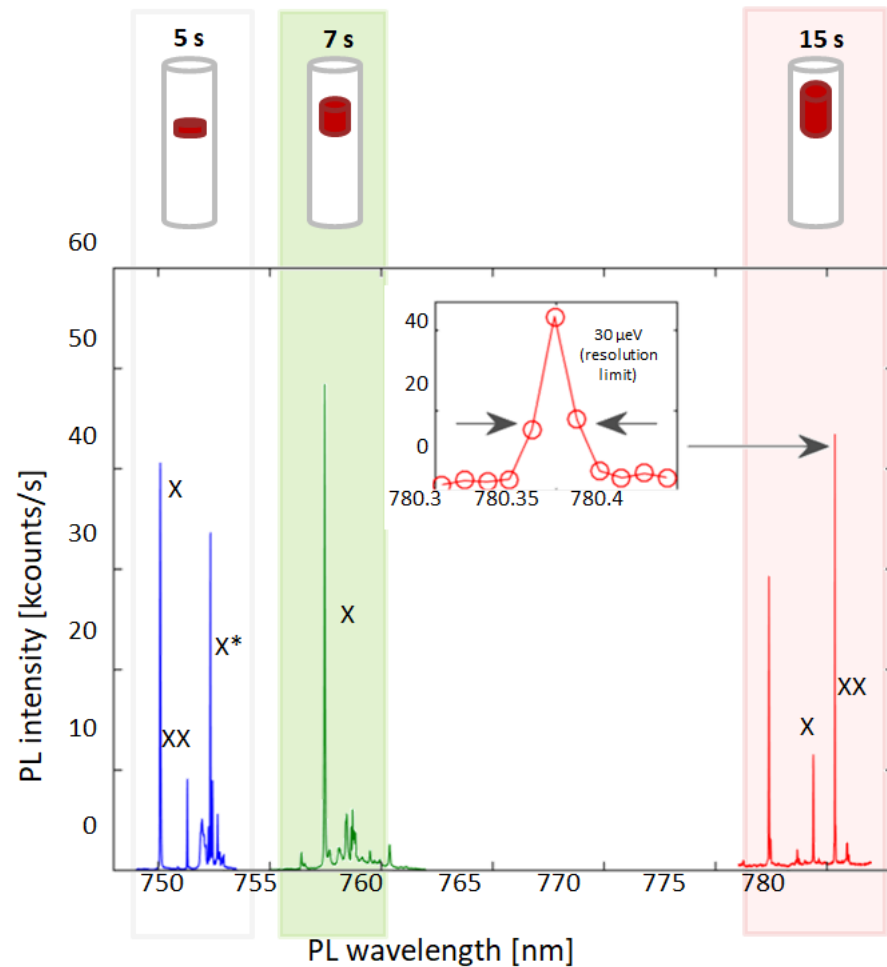
- Обработка Si(111) в HF + дегазация в МПЭ камере при 850 C
- формирование Au капель
- МПЭ рост: AlGaAs NWs + n сек GaAs КТ + AlGaAs заращивание
- $T_{sub} \sim 510$ C

Свойства AlGaAs/GaAs КТ на Si

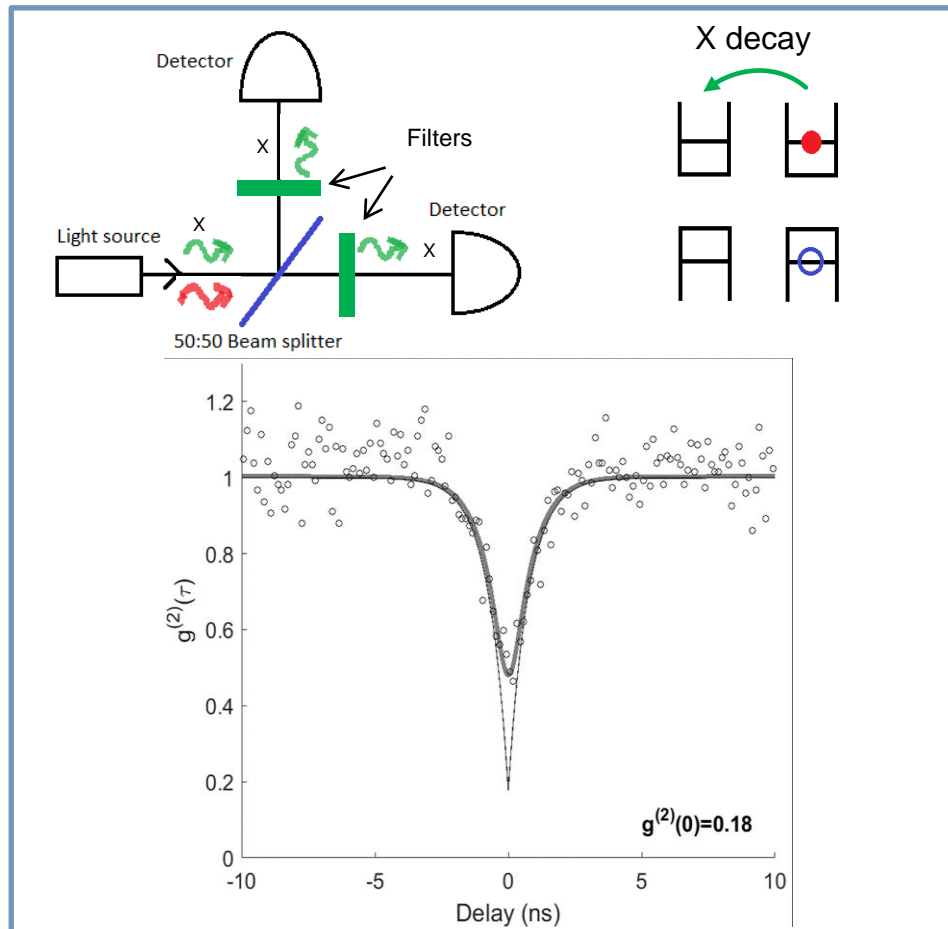
ПЭМ изображение
одиной КТ GaAs в
нанопроволоке AlGaAs на Si



- Увеличение размеров КТ ведет к закономерному длинноволновому сдвигу линий излучения



Свойства AlGaAs/GaAs КТ на Si (II)

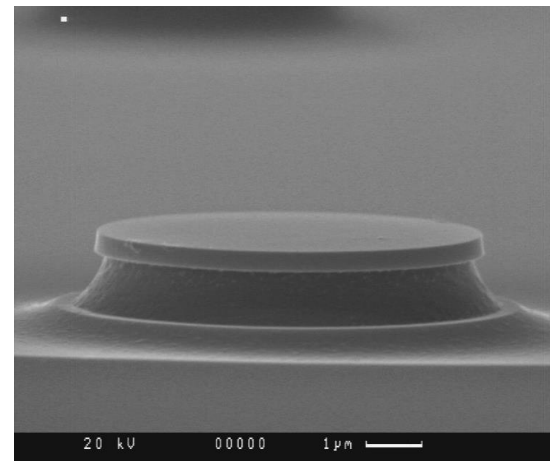


- Измерение автокорреляционной кривой демонстрирует $g^{(2)}(0) < 0.5$ (суб-Пуассоновская статистика фотонов)
 - Излучение одиночных фотонов

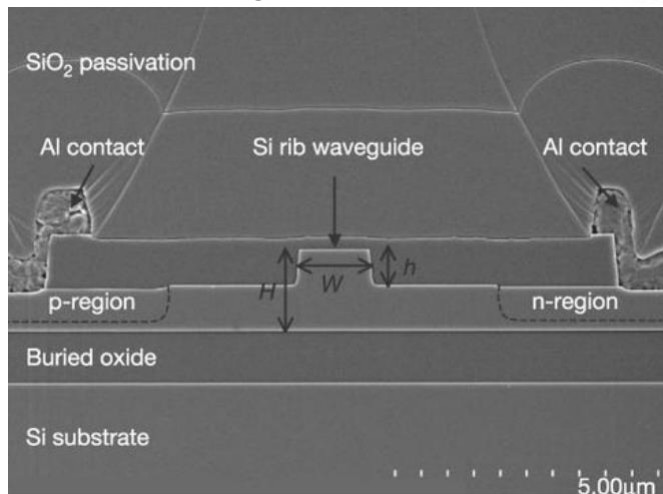
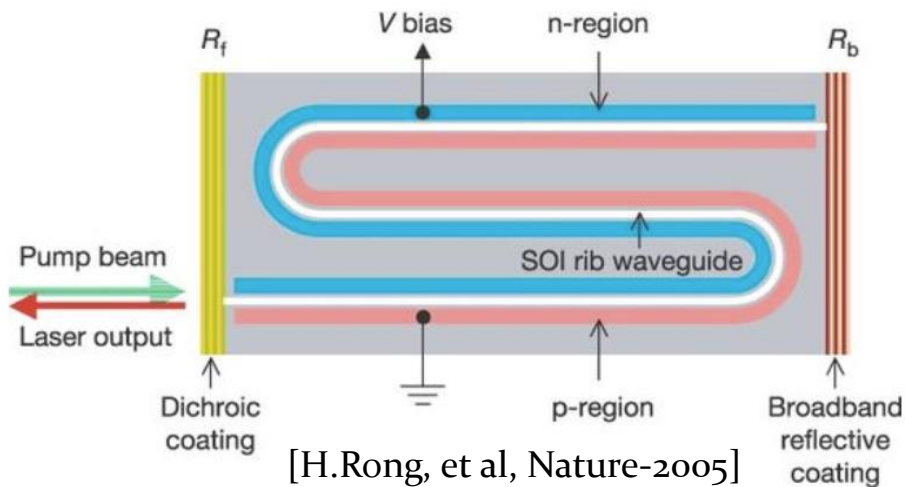
Заключение

- Микродисковые лазеры могут быть созданы на основе гетероструктур с квантовыми точками с помощью глубокого травления
- Микродисковые лазеры с квантовыми точками могут быть созданы на основе гетероструктур, синтезированных на кремнии
- Достигнута низкопороговая генерация в непрерывном режиме без принудительного охлаждения, в том числе генерация при повышенных температурах, квазиодночастотная генерация и узкие линии излучения
- Достигнута (пока на GaAs) рекордно высокая эффективность и мощность вывода в свободное пространство
- Продемонстрировано излучение одиночных фотонов квантовыми точками в нанопроволоках на кремнии
- Планы: Мощность в волноводе; Быстродействие

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



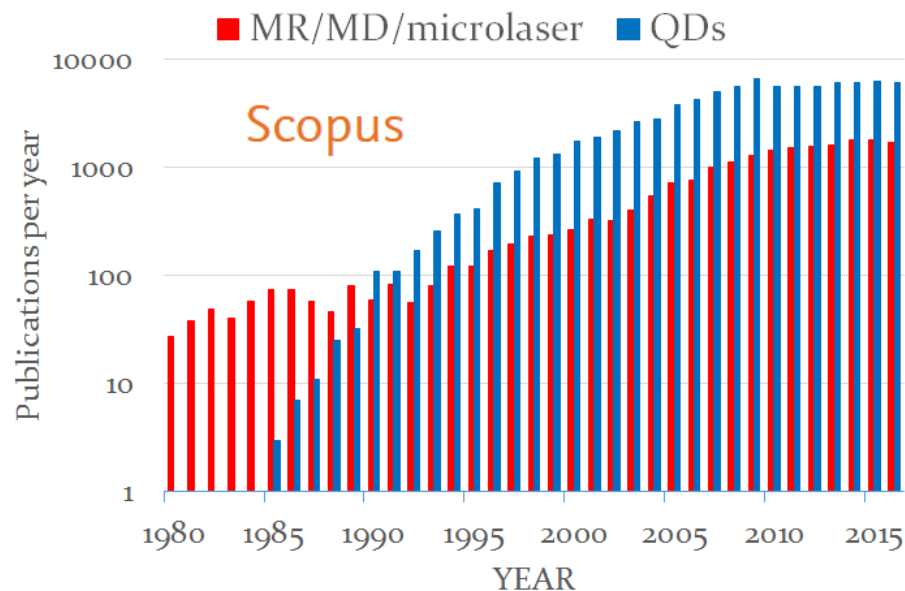
Рамановский лазер на кремнии



- Внешний оптический источник все же требуется!

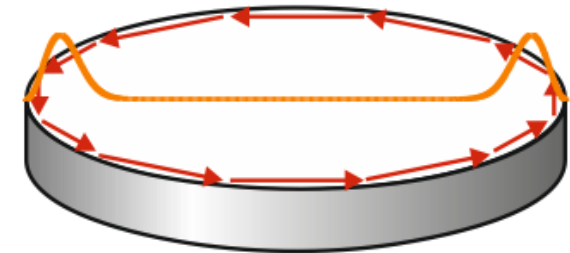
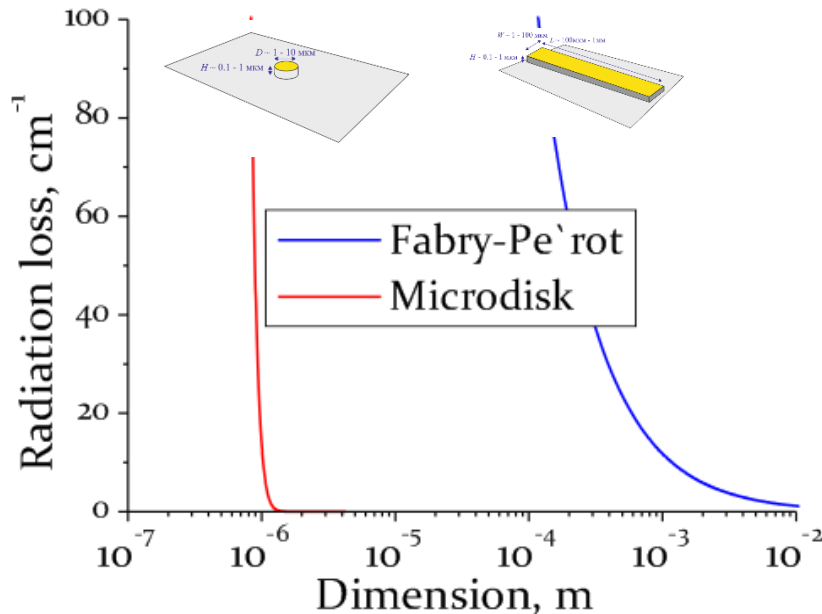
МШГ-микролазеры с КТ

- **1992:** п/п μ -дисковый-лазер (InGaAsP QW) [S.L.McCall et al, APL 60, 289 (1992)]
- **1999:** МШГ-излучение в КТ μ -структуре (8К) [B. Gayral et al, APL 75, 1908]
- **2000:** μ -лазер (опт. накачка, 77К) [H. Cao et al, APL 76, 3519]
- **2003:** Инжекционный μ -лазер (5К) [L. Zhang and E. Hu, APL 82, 319]
- **2011:** Инжекционный μ -лазер при RT [M.-H. Mao, et al, OE 19, 14145]
- **2015:** μ -лазер \varnothing 1 мкм (RT) [N. Kryzhanovskaya et al, JSTQE, 21, 1900905 (2015)]; генерация в инжекционном μ -лазере при 100°C [N. Kryzhanovskaya et al, EL 51, 1354]
- **2017:** Инжекционные КТ-микролазеры на Si
 - μ -кольцевые \varnothing 10 мкм (RT CW)... 100 мкм (100°C CW) [Y. Wan et al, CLEO-2017]
 - μ -дисковые \varnothing 14...30 мкм (RT...65°C CW, 110°C pulsed) [эта работа]

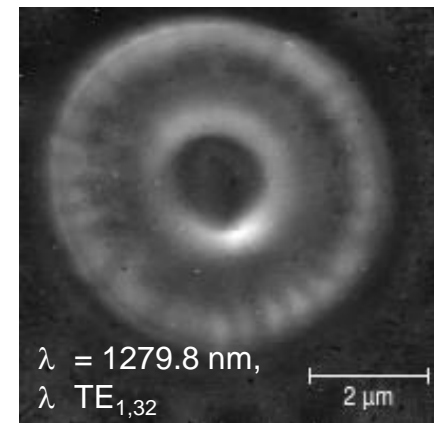


Оптические микрорезонаторы с модами шепчущей галереи

- Полное внутреннее отражение света, распространяющегося по периферии микрорезонатора
- По сравнению с резонатором Фабри-Перо, размер МШГ-резонатора может быть снижен на 3 порядка

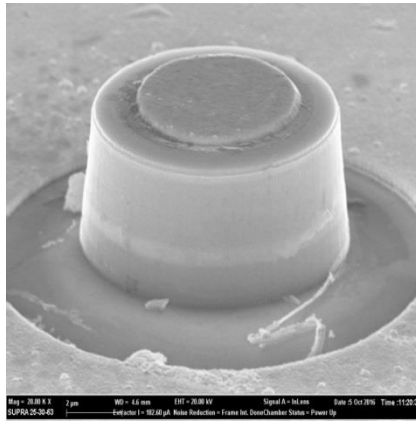


Ближнеполевая оптическая микроскопия (NSOM)

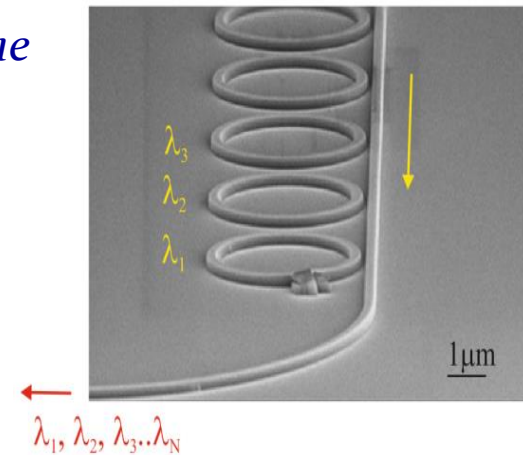


Использование МШГ-микрорезонаторов

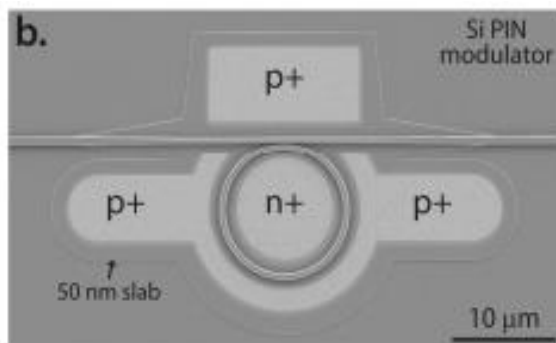
Микролазеры



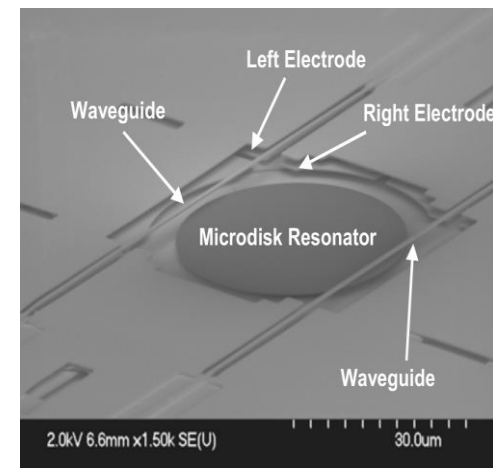
Частотные фильтры



Модуляторы

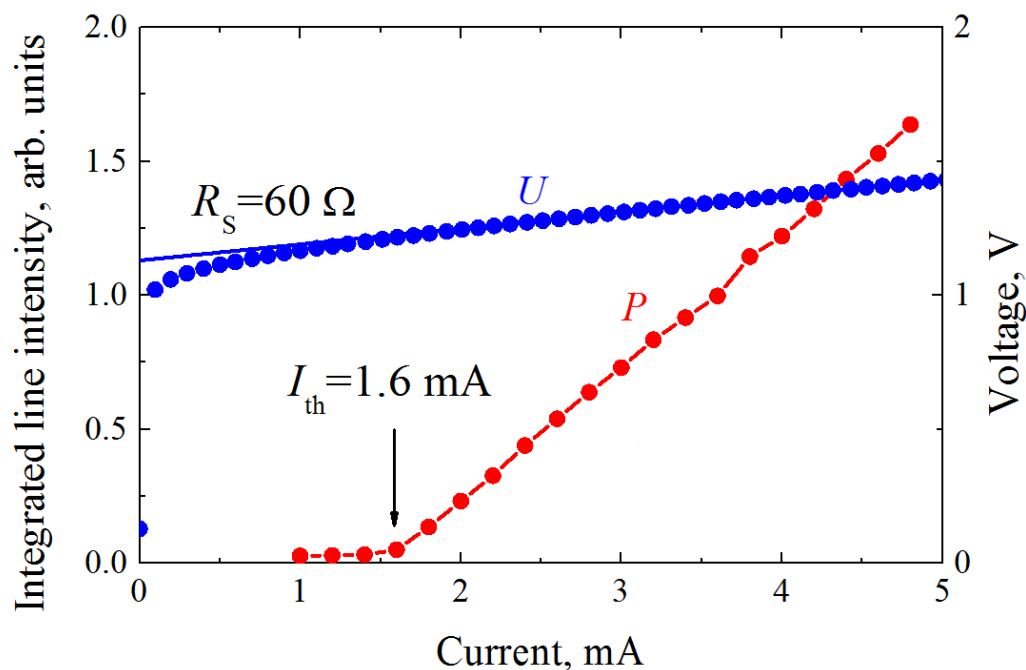


Управление характеристиками с помощью МЭМС



Лазерная генерация инжекционных КТ-микродисков (300К)

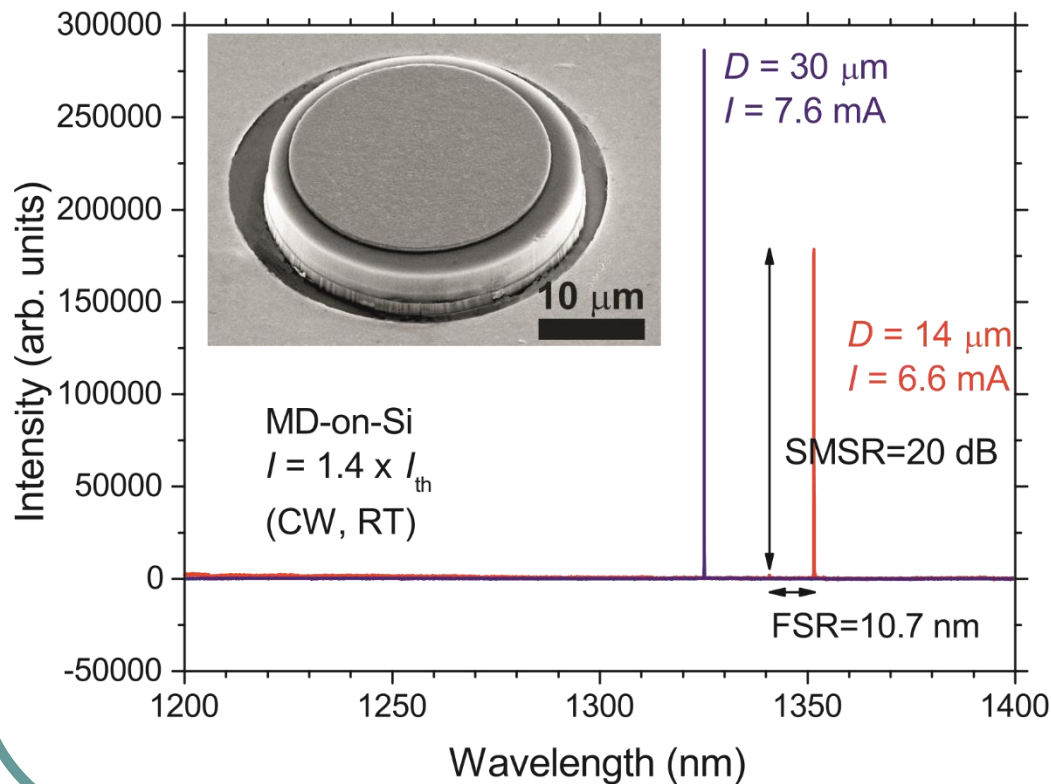
Ватт- и воль-амперные характеристики ($D = 15 \text{ мкм}$)



- Удельное последовательное сопротивление $10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$
- Пороговый ток $\sim \text{мА}$

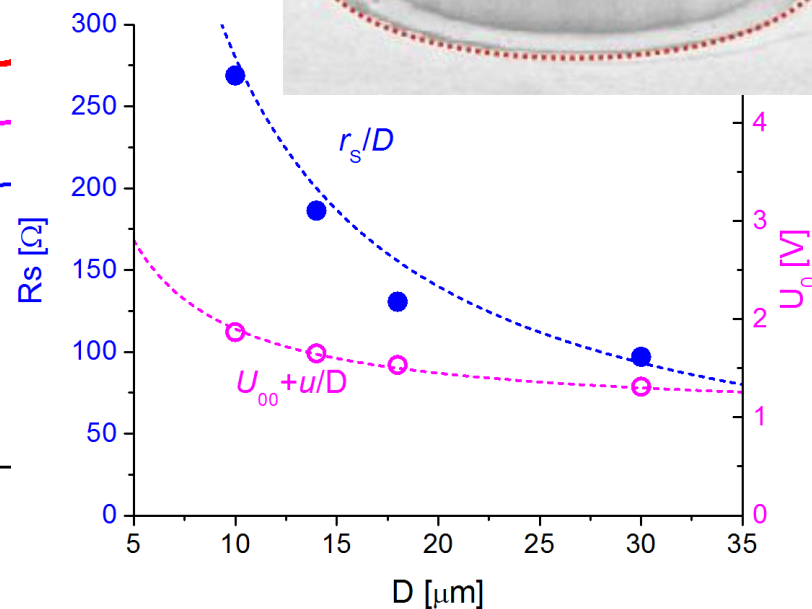
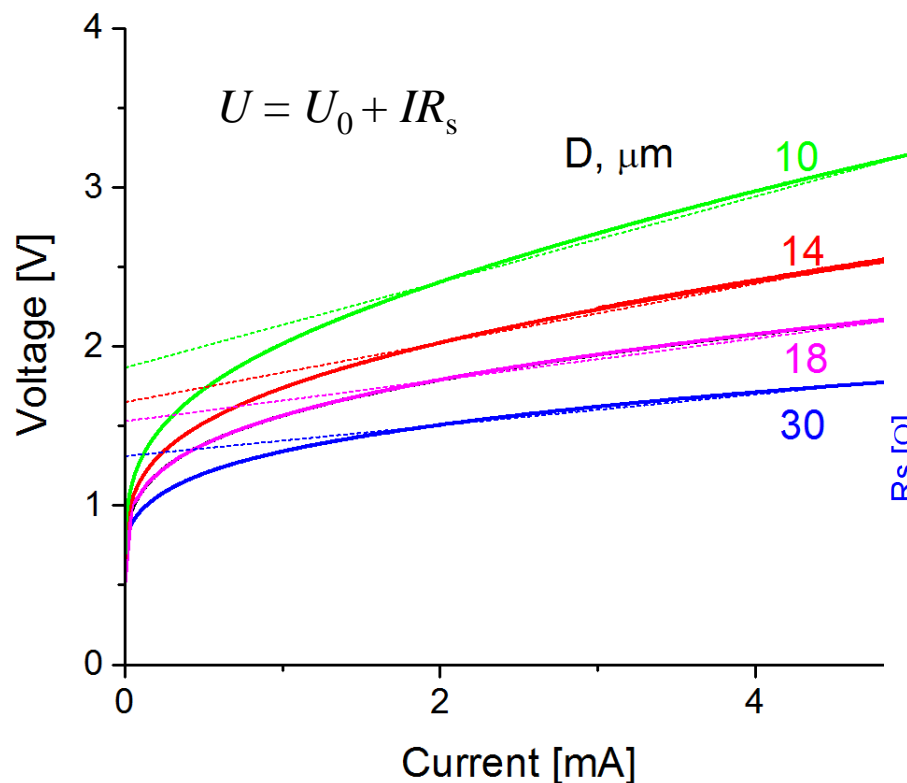
Спектры излучения микродисковых КТ/Si-лазеров

Спектры электролюминесценции микродисковых лазеров ($D = 14$ и 30 мкм)



- Длина волны генерации $\lambda > 1.3$ мкм
 - (основное состояние КТ)
- Пороговый ток мА-уровня
- Квази-одночастотная генерация
 - SMSR > 20 дБ

КТ-микролазеры на Si: Параметры ВАХ

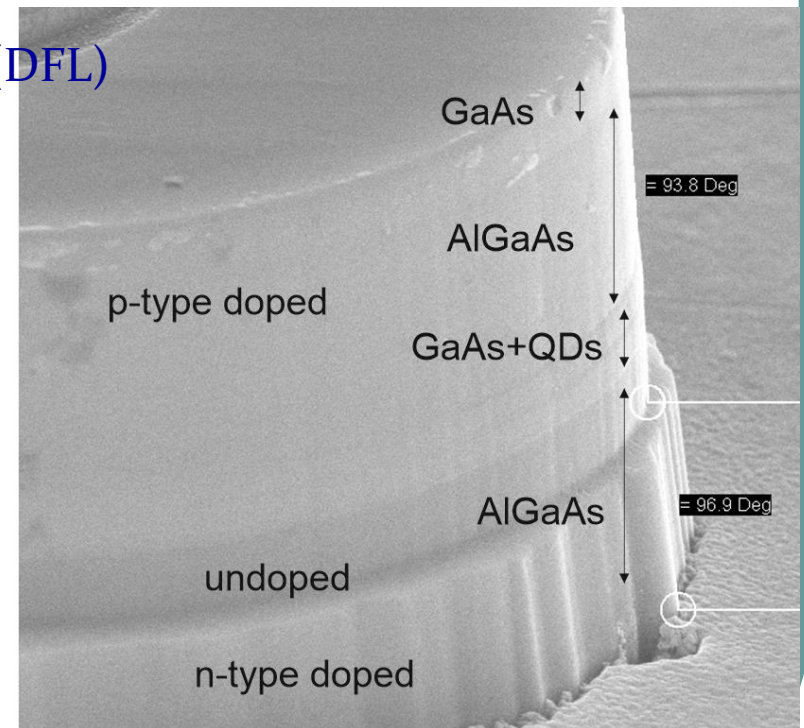


- $R_s = r_s/D$ – масштабируется пропорционально периметру ($r_s = 2.8 \text{ кОм} \cdot \mu\text{м}$)
- $U_0 = U_{00} + u/D$; $U_{00} = 1 \text{ В}$, $u = 9 \text{ В} \cdot \mu\text{м}$

UCL228R7

	Material	Thickness	doping	Repeat
	GaAs p contact	300 nm	Be doping $1.15E19$	1
p-type cladding	$Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ /GaAs SPL	50 nm	Be doping	1
	$Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ cladding	1400 nm	Be doping $9.8E15$ to $7.12E17$	
	$Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ cladding	30 nm	ud	
	$Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ /GaAs SPL	24 nm	ud	
	GaAs confining layer	31.5 nm	ud	
Active Region	GaAs spacer layer	38.5 nm	ud	7
	$In_{0.18}Ga_{0.82}As$ capping	6 nm	ud	
	InAs	2.7 ML	ud	
	$In_{0.18}Ga_{0.82}As$	2 nm	ud	
	GaAs confining layer	70 nm	ud	1
	$Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ /GaAs SPL	24 nm	ud	
n-type cladding	$Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ cladding	30 nm	ud	1
	$Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ cladding	1400 nm	Si doping $1.85E18$ to $9E17$	
	$Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ /GaAs SPL	50 nm	Si doping $1.85E18$	
DFL	<u>GaAs DFL layer</u>	<u>1600 nm</u>	Si doping $2 E18$	
	<u>GaAs buffer layer</u>	<u>100 nm</u>	Si doping $2.85 E18$	1
	$Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ /GaAs SPS	200 nm	Si doping $2.5 E18$	
GaAs Buffer layer	GaAs	570 nm	Si doping $2.85 E18$	1
AlAs nucleation layer	AlAs	30 nm	ud	
	Si Substrate	350 um	N doped	

- n-doped silicon (001) substrate with 4° offcut to the [011] plane
- oxide desorption @ 900°C for 10 min in MBE reactor
- 30 nm AlAs nucleation layer
- GaAs / Al_{0.4}Ga_{0.6}As/GaAs SL buffers
- InGaAs/ GaAs dislocation filter layers (DFL)
- QD laser structure



Electrically pumped continuous-wave 1.3 μm InAs/GaAs quantum dot lasers monolithically grown on on-axis Si (001) substrates

SIMING CHEN,^{1,*} MENGYA LIAO,¹ MINGCHU TANG,¹ JIANG WU,¹ MICKAEL MARTIN,² THIERRY BARON,² ALWYN SEEDS,¹ AND HUIYUN LIU¹

¹Department of Electronic and Electrical Engineering, University College London, London, WC1E 7JE, UK

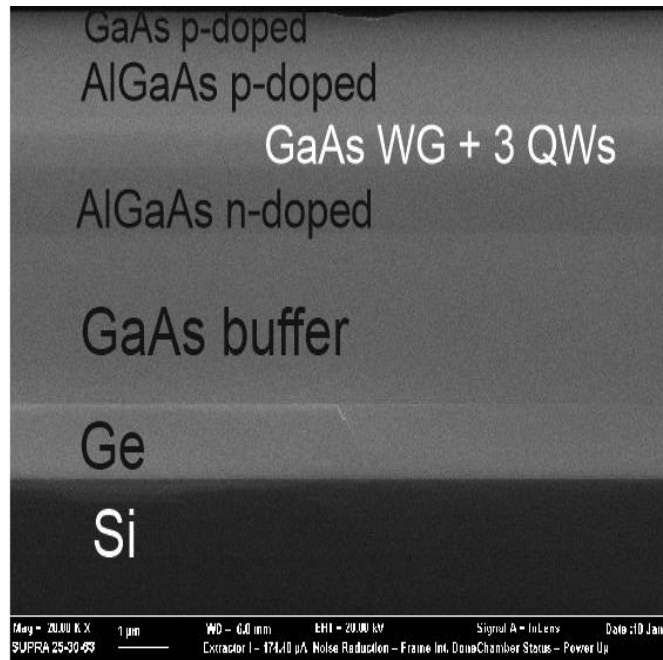
²Univ. Grenoble Alpes, CNRS, CEA-LETI, MINATEC, LTM, F-38054 Grenoble, France

*siming.chen@ucl.ac.uk

- on-axis Si (001)
- deoxidation using a NF_3/NH_3 remote plasma
- H_2 annealing @ at 900 °C using purified H_2 as the carrier gas in MOCVD reactor to promote structuring of the 2×1 surface
- ramp below 700 °C within 30 s to freeze the silicon surface structure
- GaAs layers growth sequentially with a two-step process:
 - a 40 nm GaAs nucleation layer at low temperature (400–500 °C);
 - a 360 nm GaAs layer at a higher temperature (600–700 °C).
- transfer into MBE system for QD laser structure growth directly on the virtual GaAs/Si (001) substrate

Инжекционный КЯ микродиск на Si

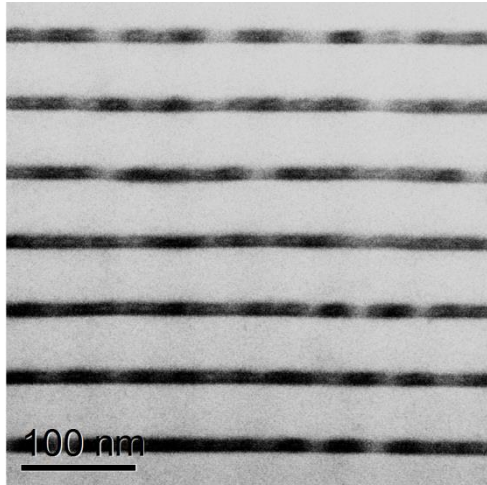
*QW laser structure
on Si/Ge template*



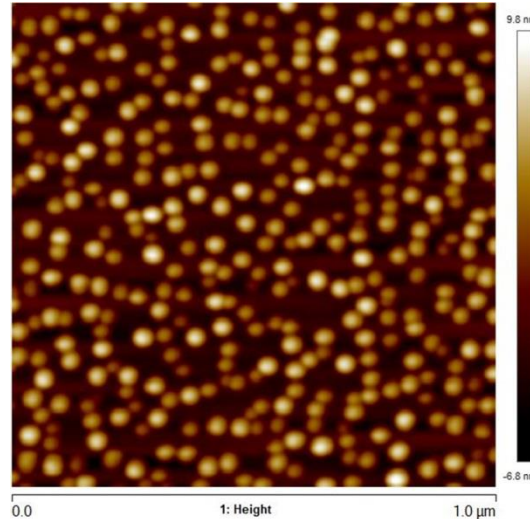
- Photolithography and plasma chemical etching
- Etch depth ~ 3 mm;
- Diameter 20...30 mm;
- AgMn/Ni/Au p-contact metal
- AuGe/Ni/Au n-top contact metal

InAs/InGaAs/GaAs квантовые точки на Si подложке

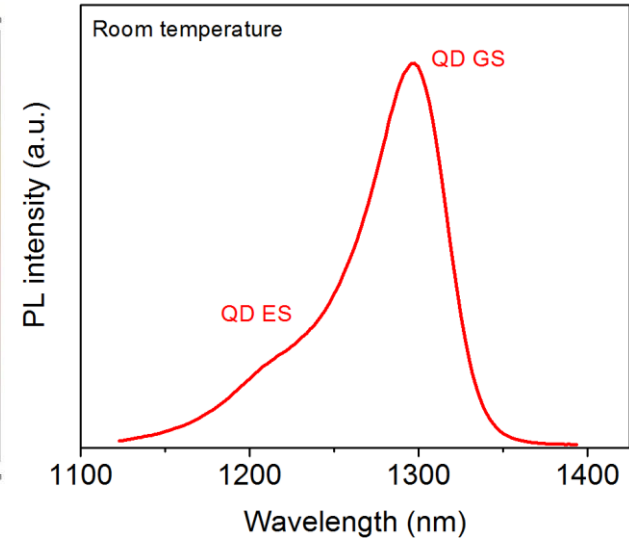
ПЭМ, скол



АСМ, вид в плане



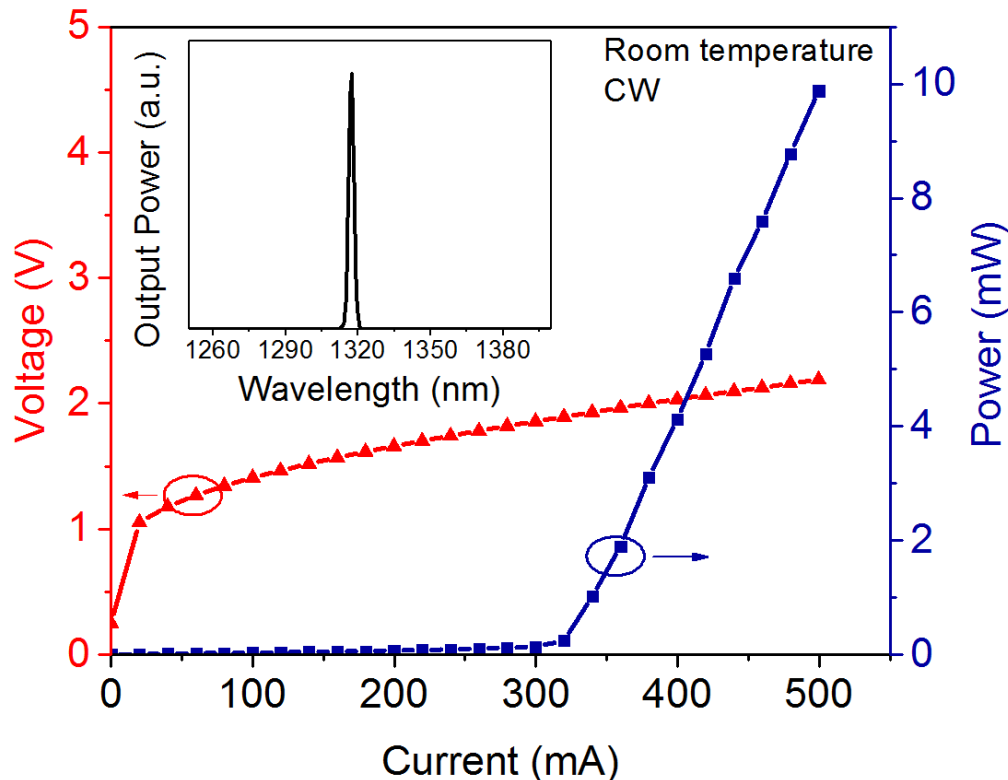
ФЛ (300 K)



- КТ: InAs/InGaAs/GaAs x 7
- Плотность $\sim 3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ (аналогичный непокрытый массив КТ на Si)
- Длина волны @ 300K :
 - основной переход $\sim 1.3 \text{ мкм}$
 - 1-й возбужденный $\sim 1.21 \text{ мкм}$

Характеристики полоскового КТ-лазера на Si

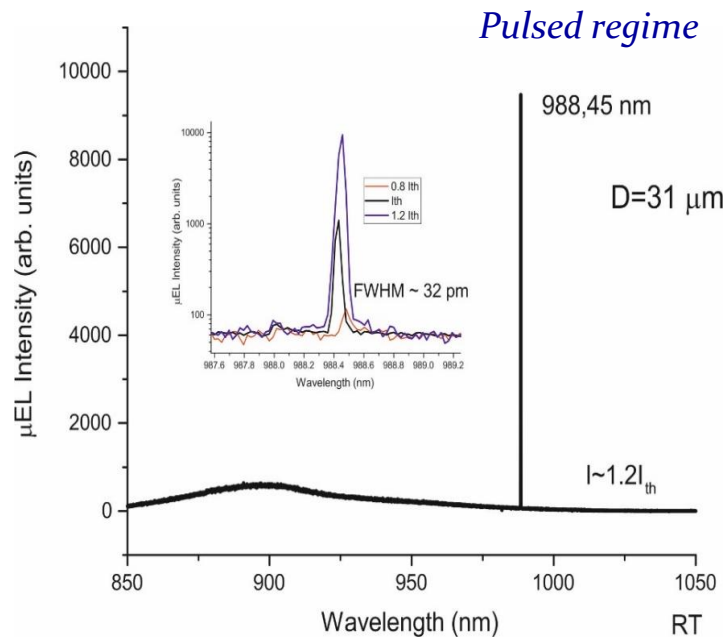
V_{mAX}/V_{AAX} , $W=25$ мкм, $L=3$



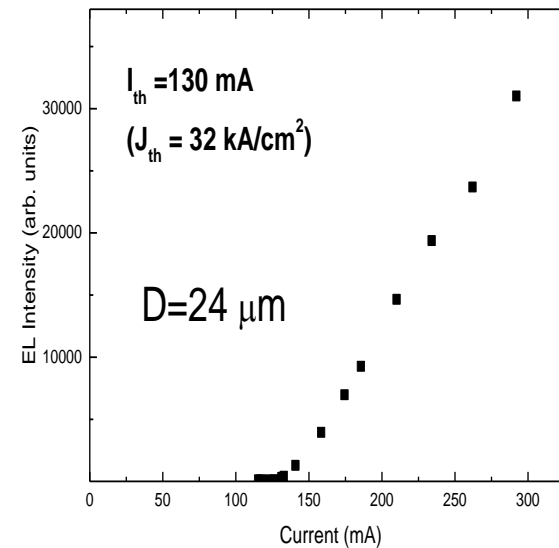
- Длина волны генерации $\lambda = 1.32$ мкм
- Пороговая плотность тока $J_{th} = 427$ A/cm²
 - (в лучших аналогичных структурах 62.5 A/cm² при 300K и CW-режим до 120 °C)
- Напряжение открытия 1.22 В
 - (ождается ~1 В)
- Последовательное сопротивление 2 Ом ($\sim 10^{-3}$ Ом*см²)
 - (в лазерных структурах на GaAs типично $\sim 10^{-4}$ Ом*см²)

Спектральные характеристики инжекционных микролазеров на Si

- *Emission spectra at RT*



- *L-I curve*



For the first time RT lasing in injection QW microdisk laser on Si is demonstrated!

Публикации

- Н.В. Крыжановская, М.В. Максимов, А.Е. Жуков, Перспективные устройства нанофотоники на основе квантово-размерных структур и оптических микрорезонаторов, Научная сессия «МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СОВРЕМЕННОЙ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ» Научного совета РАН по физико-химическим основам полупроводникового материаловедения, АО «НИИМЭ», Сколковского института науки и технологий и Фонда «Сколково», Москва, Сколково, 18 мая 2017. (<http://sk.ru/events/3559.aspx>)
- N. V. Kryzhanovskaya, E. I. Moiseev, Yu. S. Polubavkina, M. V. Maximov, M. M. Kulagina, S. I. Troshkov, Yu. M. Zadiranov, A. A. Lipovskii, N. V. Baidus, A. A. Dubinov, Z. F. Krasilnik, A. V. Novikov, D. A. Pavlov, A. V. Rykov, A. A. Sushkov, D. V. Yurasov, and A. E. Zhukov, Electrically pumped InGaAs/GaAs quantum well microdisk lasers directly grown on Si(100) with Ge/GaAs buffer, Opt. Express 25(14), 16754-16760 (2017). <https://doi.org/10.1364/OE.25.016754>. See also: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2017/jul/ras_310717.shtml
- N. Kryzhanovskaya, E. Moiseev, Yu. Polubavkina, M. Maximov, M. Kulagina, S. Troshkov, Yu. Zadiranov, Yu. Guseva, A. Lipovskii, M. Tang, M. Liao, J. Wu, S. Chen, H. Liu, A. Zhukov, Heatsink-free CW operation of injection microdisk lasers grown on Si substrate with emission wavelength beyond 1.3 μm , Opt. Lett. 42(17) 3319-3322 (2017) <https://doi.org/10.1364/OL.42.003319>
- N. V. Kryzhanovskaya, E. I. Moiseev, Yu. S. Polubavkina, M. V. Maximov, D. Mokhov, I. Morozov, M. M. Kulagina, Yu. M. Zadiranov, A. A. Lipovskii, M. Tang, M. Liao, J. Wu, S. Chen, H. Liu, A. E. Zhukov, Elevated temperature lasing from injection microdisk lasers on silicon, Submitted to Las. Phys. Lett.

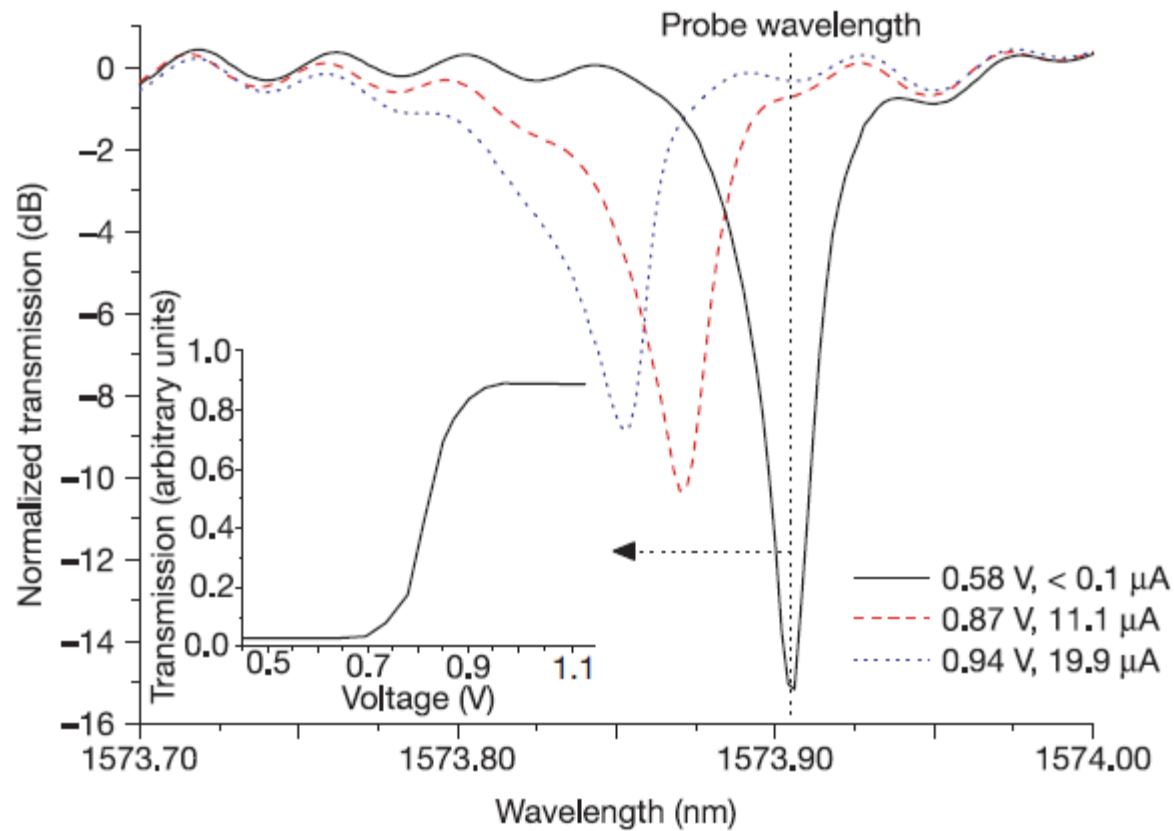
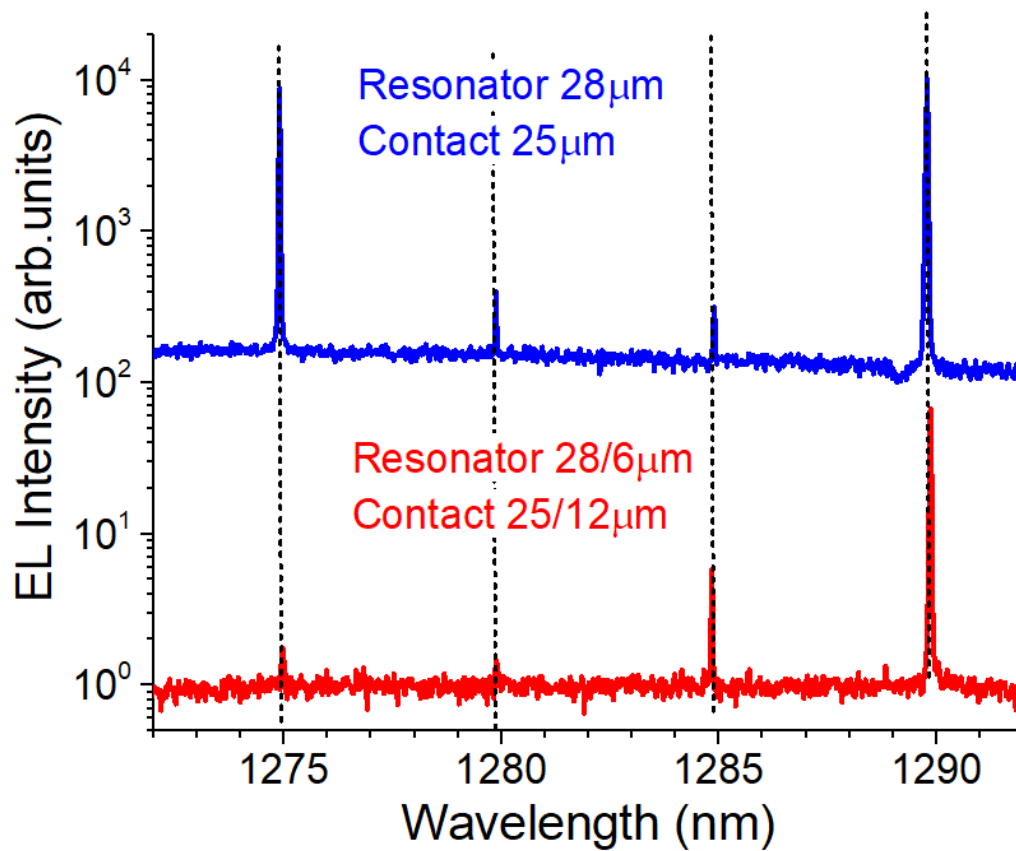
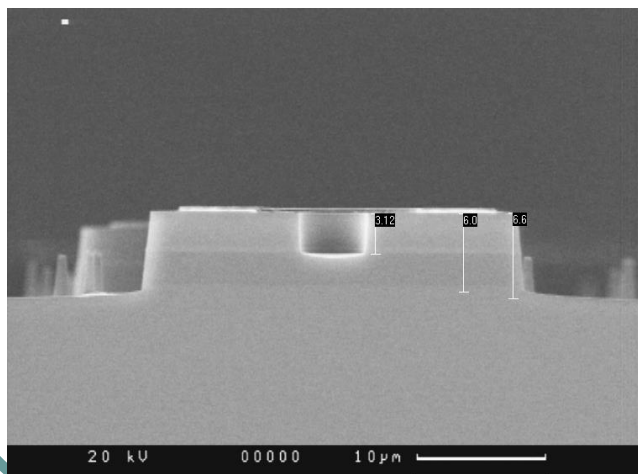
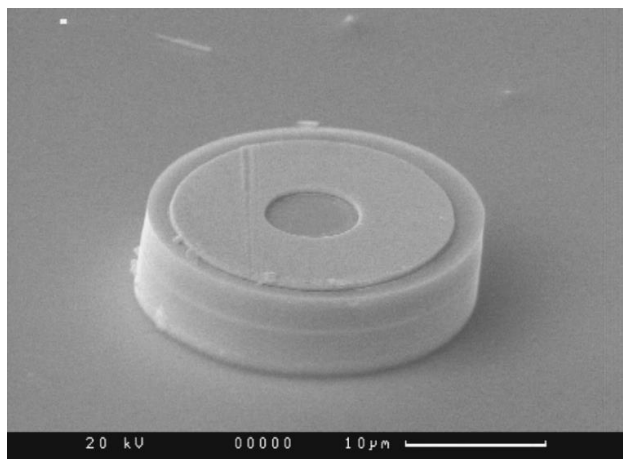
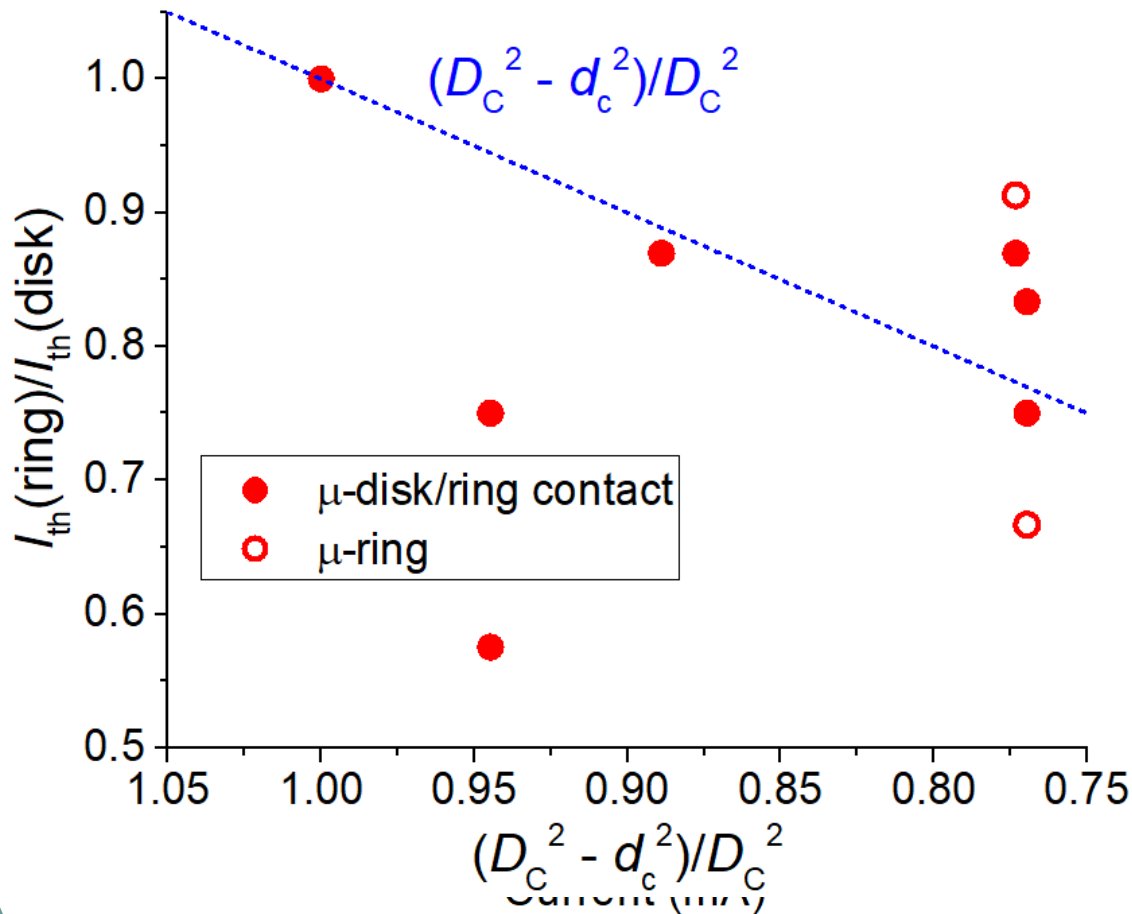


Figure 3 | DC measurement of the ring resonator. The main panel shows the transmission spectra of the ring resonator at the bias voltages of 0.58 V, 0.87 V, and 0.94 V, respectively. The vertical dashed line marks the position of the probe wavelength used in the transfer function and dynamic modulation measurements. The inset shows the transfer function of the modulator for light with a wavelength of 1,573.9 nm.

Кольцевые контакты / резонаторы

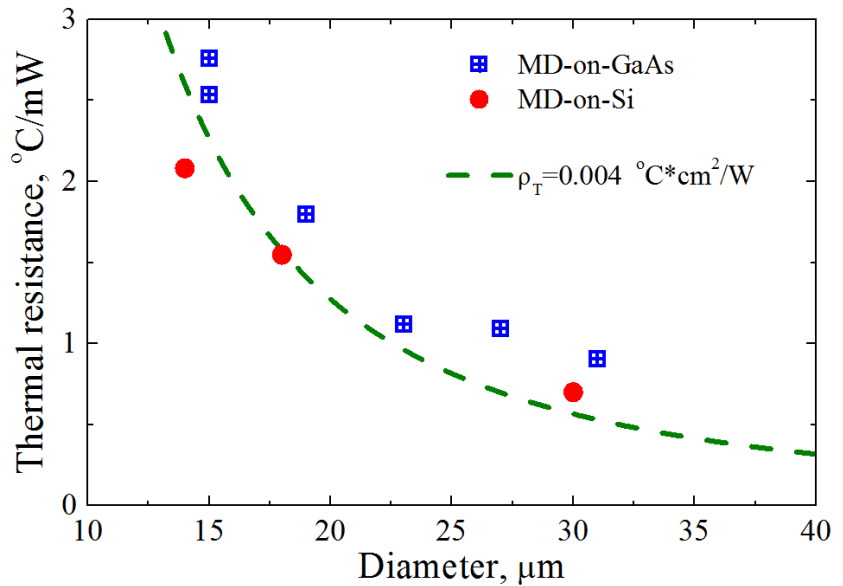
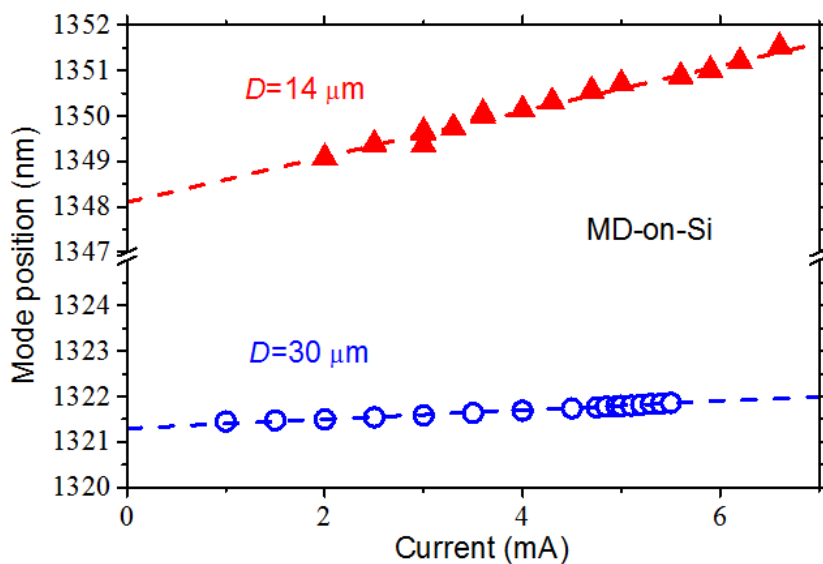


ВАХ и порог микролазеров с кольцевым контактом



- Последовательное сопротивление растет при уменьшении площади кольцевого контакта
- Сопротивление меняется так, как будто нет растекания тока в плоскости резонатора
- Пороговый ток в микрокольцах снижается

КТ-микролазеры на Si: Тепловое сопротивление



- Сдвиг линии в CW режиме вследствие саморазогрева ($d\lambda/dT \sim 0.08 \text{ nm}/^\circ\text{C}$) $\Delta\lambda=2.5 \text{ nm} \Rightarrow \Delta T=30^\circ\text{C}$
- Тепловое сопротивление $R_T (= \Delta T/Q) = \rho_T * S$
- Удельное тепловое сопротивление $\rho_T = 4 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}\times\text{cm}^2/\text{W}$.