



ДЛС-семинар
Москва 2009

Полупроводниковые лазеры в
средней ИК-области спектра
(2-4 μm) на модах шепчущей
галереи

Ю.П. Яковлев

Участники работы

Россия: Н.С.Аверкиев, А.П. Астахова, Е.А.Гребенщикова,
К.В.Калинина, С.С.Кижаяев, А.М.Монахов, В.В. Шерстнев,
Ю.П.Яковлев. -- ФТИ им.А.Ф.Иоффе

Англия: Prof.A.Krier, Dr.D.Wright, Dr.G.Noris. -- Lancaster University,

Франция: Prof.A.N.Baranov, G.Boissier, R.Teissier. -- Université Montpellier 2,
CNRS.

Работа поддержана международными грантами РФФИ 07-02-92170-НЦНИ_а и
08-02-90039-Бел_а и программой Президиума РАН № 27 "Основы фундаментальных
исследований нанотехнологий и наноматериалов"

Содержание доклада

- Предыстория появления WGM лазеров
- Мотивация работы
- Дисковые лазеры ($3\text{ }\mu\text{m}$) на основе InAs(Sb)/InAsSbP
- Электролюминесцентные свойства
- Дисковые лазеры ($\sim 2\text{ }\mu\text{m}$) на основе наноразмерных структур AlGaAsSb/GaInAsSb
- Электролюминесцентные свойства
- Дисковые лазеры с усеченным резонатором
- Электролюминесцентные свойства дисковых лазеров с усеченным резонатором
- Заключение



1542 г

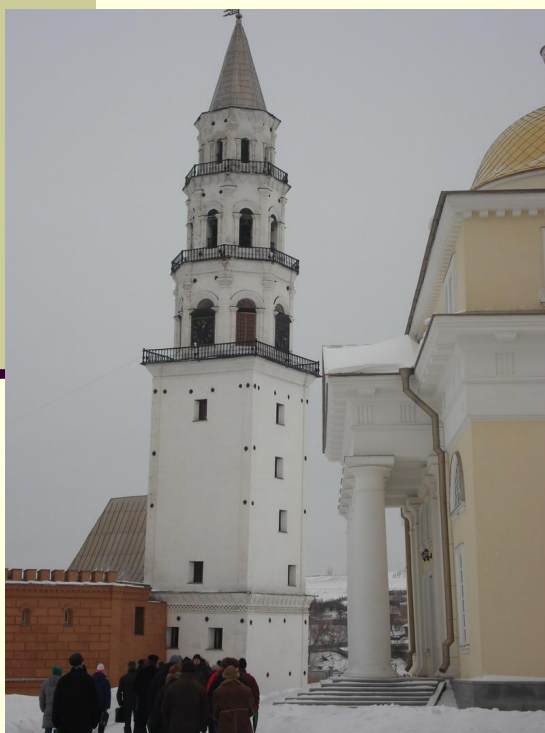
www.Gardener.ru

[1001]

CXII. *The Problem of the Whispering Gallery.*

By Lord RAYLEIGH, O.M., F.R.S.*

THE phenomena of the whispering gallery, of which there is a good and accessible example in St. Paul's cathedral, indicate that sonorous vibrations have a tendency to cling to a concave surface. They may be reproduced upon a moderate scale by the use of sounds of very high pitch (wave-length=2 cm.), such as are excited by a bird-call, the percipient being a 'high' pressure sensitive flame†. Especially remarkable is the narrowness of the obstacle, held close to the concave surface, which is competent to intercept most of the effect.



Невьянская башня 1725

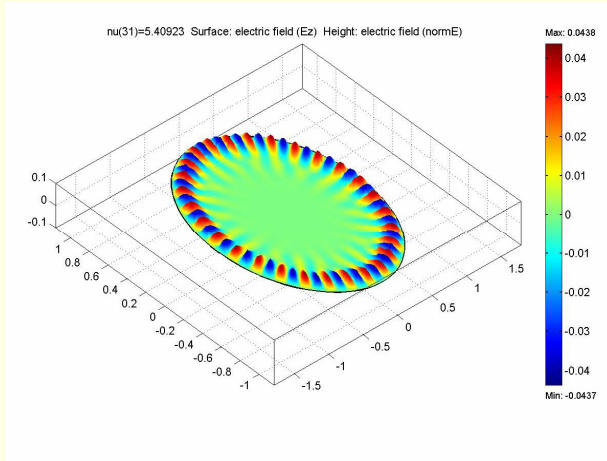


1887 г

Мотивация

- Высокая добротность Q
 - $FP \sim 300 < WG \sim 10^6$
- Длинный резонатор
- Работа при комнатной температуре
- Оптический компьютер
- Нелинейные эффекты в физике лазеров

Моды шепчущей галереи (WGM).



Уравнения Максвелла

$$\Delta \vec{E} + \frac{\omega^2 n^2}{c^2} \vec{E} = 0,$$

$$(\Delta \vec{E})_z = \Delta E_z$$

$$(\Delta \vec{E})_\rho = \Delta E_\rho - \frac{E_\rho}{\rho^2} - \frac{2}{\rho^2} \frac{\partial E_\varphi}{\partial \varphi}$$

$$(\Delta \vec{E})_\varphi = \Delta E_\varphi - \frac{E_\varphi}{\rho^2} + \frac{2}{\rho^2} \frac{\partial E_\rho}{\partial \varphi}$$

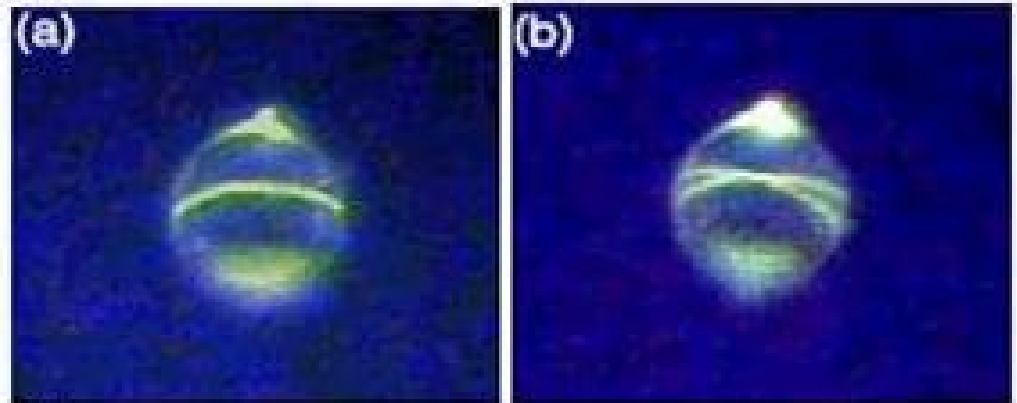
WGM приближение

$$\Delta U + \frac{\omega^2}{v^2} U = 0 \quad U|_{\partial\Omega} = 0 \quad \mathbf{E}|_{\partial\Omega} = \mathbf{0}$$

$$U = U_0 J_m(\chi\rho) \sin(m\theta + \varphi_m) \cos(kz) e^{-i\omega t}$$

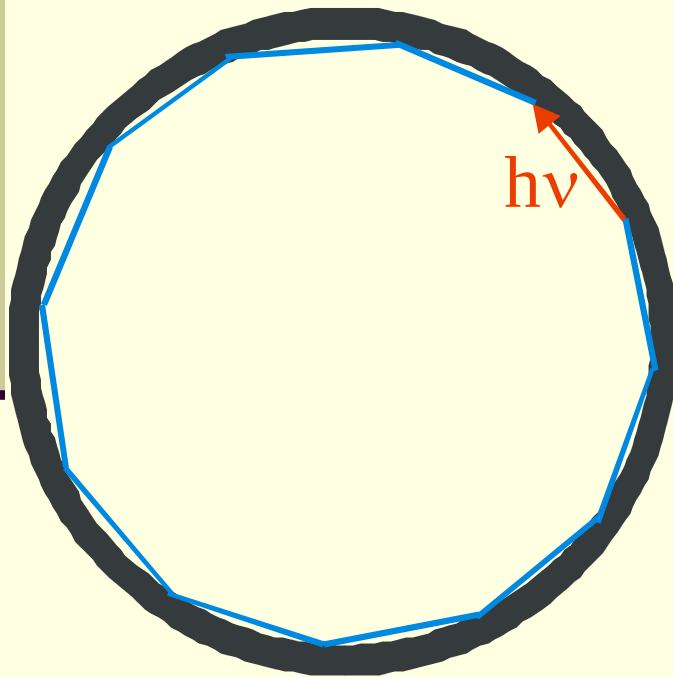
$$\chi^2 = \frac{\omega^2}{v^2} - k^2 \quad k = \frac{\pi l}{h}, l = 0, 1, \dots$$

$$\chi R = X_m^n \quad J_m(X_m^n) = 0$$



Моды шепчущей галереи (WGM).

Схематическое
изображение луча в
диске



Из простых геометрических соображений

$$2\pi R = \lambda k \quad \lambda = \frac{2\pi R}{k}$$

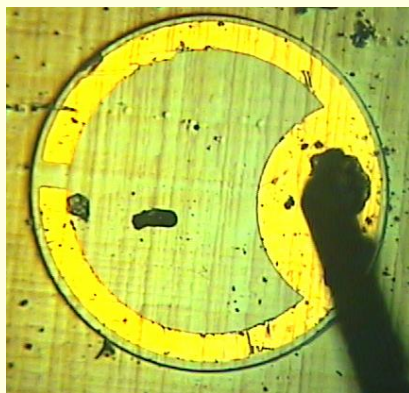
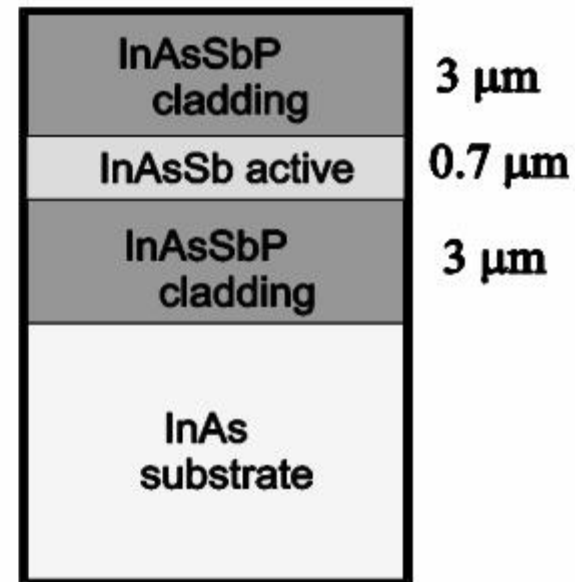
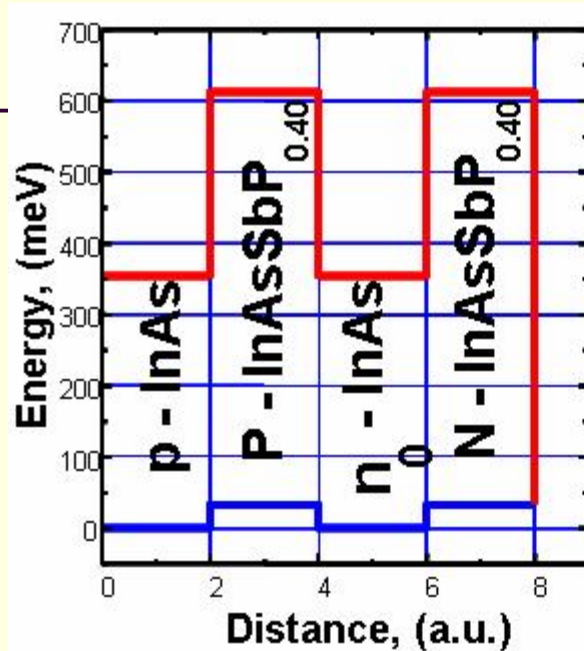
Межмодовое расстояние

$$\Delta\lambda = \frac{2\pi R}{m} - \frac{2\pi R}{m+1} \approx \frac{\lambda^2}{2\pi R n}$$

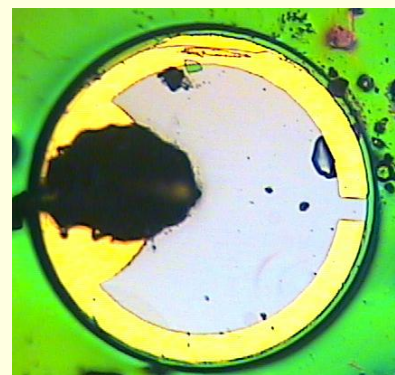
Межмодовое расстояние для FP лазера

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2Ln}$$

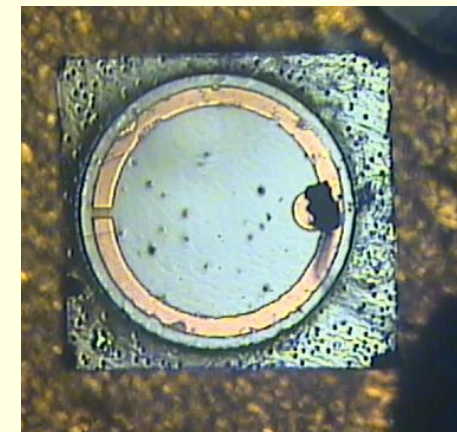
Дисковые лазеры ($3\text{ }\mu\text{m}$) на основе InAs(Sb)/InAsSbP



$d = 200\text{ }\mu\text{m}$, cont.= $180 \times 30\text{ }\mu\text{m}$,

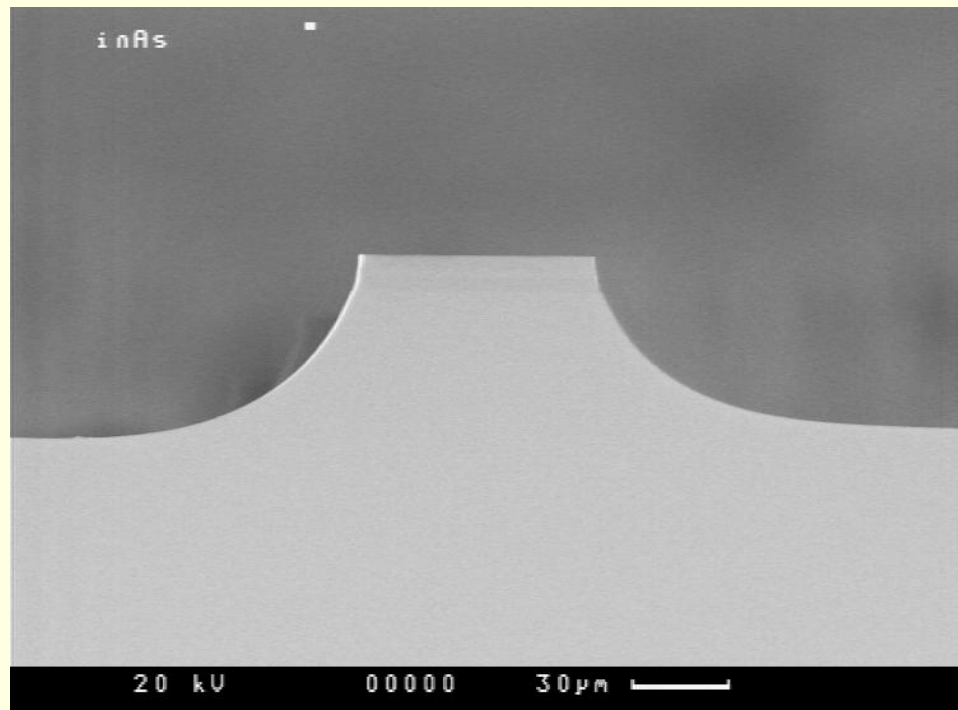


$d = 400\text{ }\mu\text{m}$, cont.= $380 \times 30\text{ }\mu\text{m}$

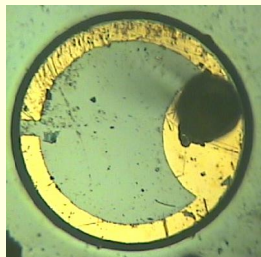
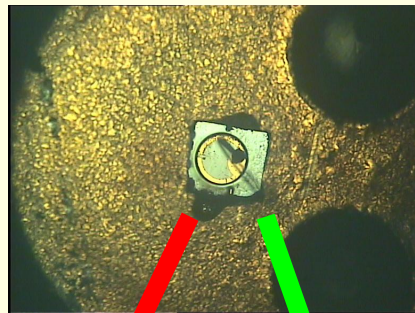


$d = 1000\text{ }\mu\text{m}$, cont.= $950 \times 30\text{ }\mu\text{m}$

Микрофотография скола WGM лазера на основе DH InAsSbP/InAs



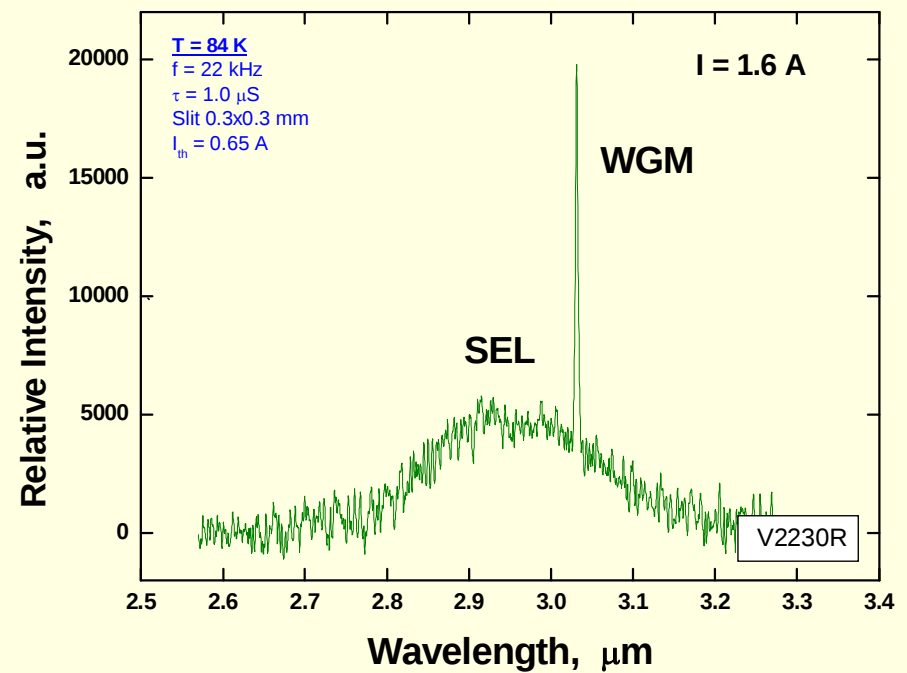
SEL и WGM в лазерах среднего ИК диапазона



$d = 400 \mu\text{m}$



$d = 200 \mu\text{m}$

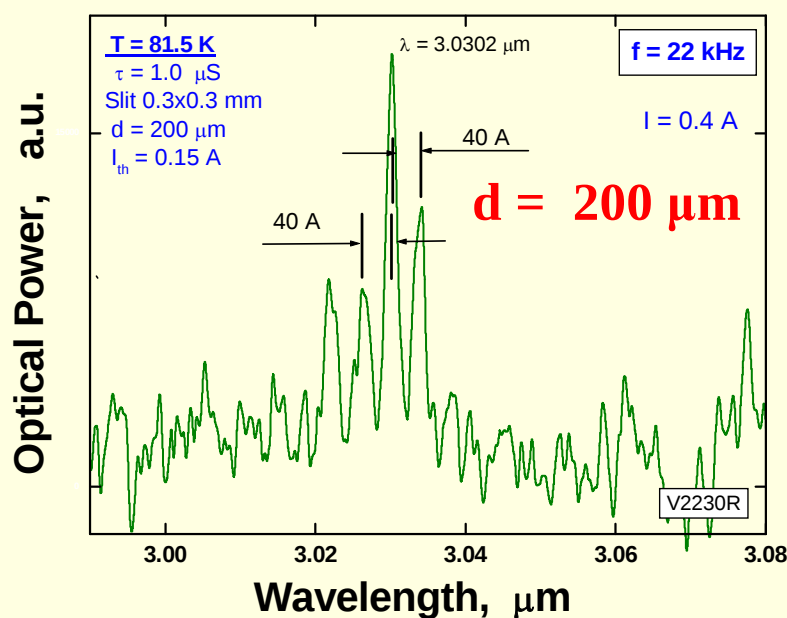


2003

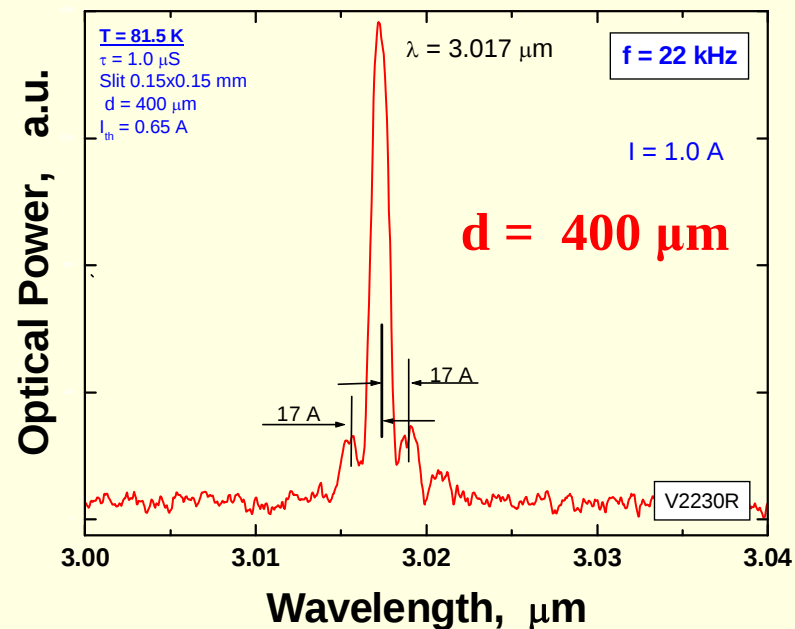
V.V.Sherstnev, A.Krier, A.M.Monakhov and G. Hill.
El. Lett., 39(12), pp.916-917, 2003.

WGM лазеры среднего ИК диапазона (модовая структура)

$$\Delta\lambda = 40 \text{ \AA}$$



$$\Delta\lambda = 17 \text{ \AA}$$



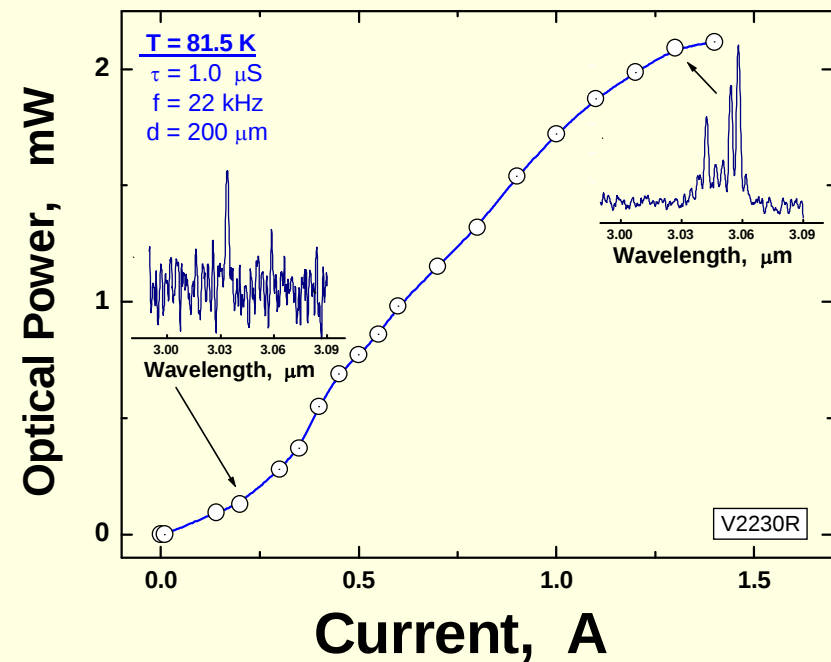
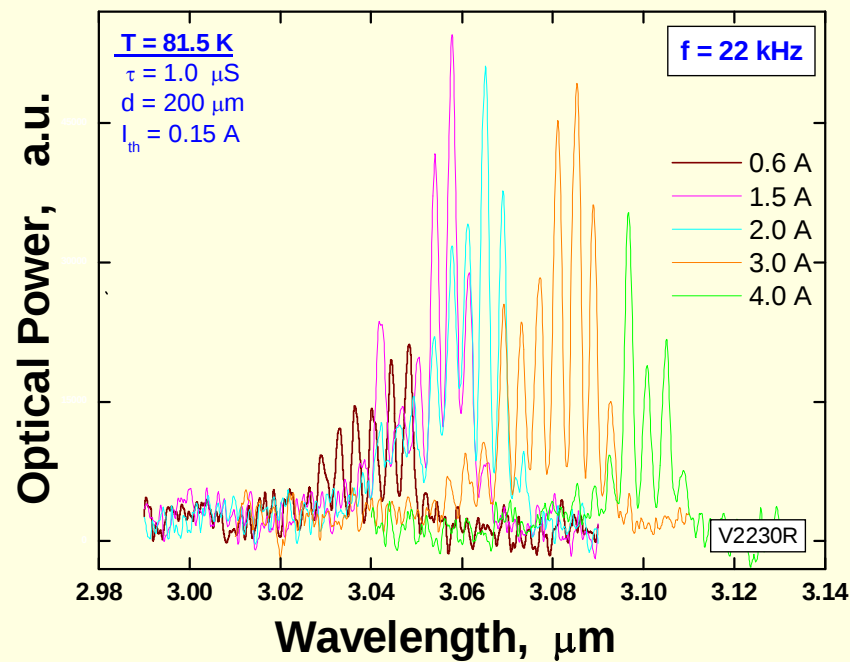
$$\Delta\lambda = \lambda^2/(\pi*D*n_0)$$

d_{mesa} (μm)	$\Delta\lambda_{\text{cal}}$ ($\text{\AA}$)	$\Delta\lambda_{\text{exp.}}$ ($\text{\AA}$)	d_{mesa} (μm)
200	43	40	190
400	21	17	386

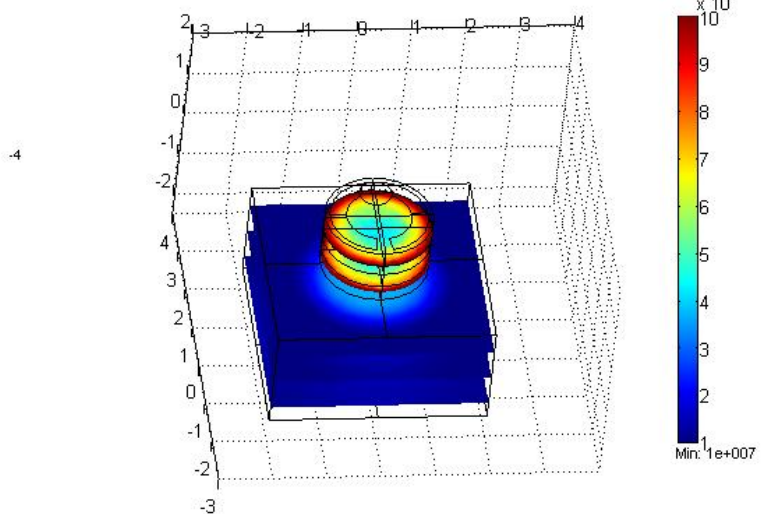
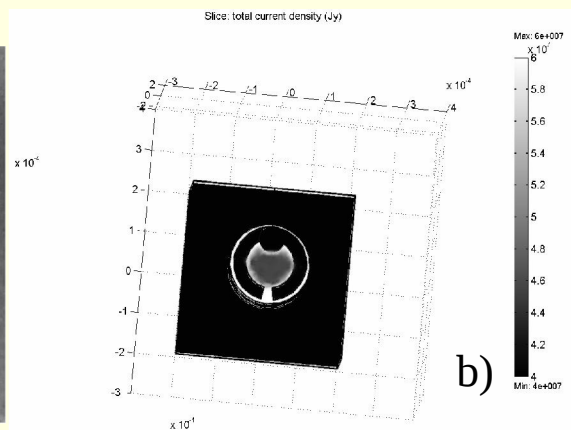
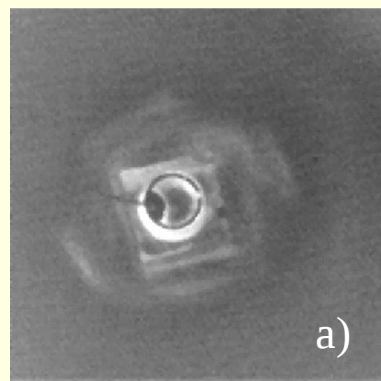
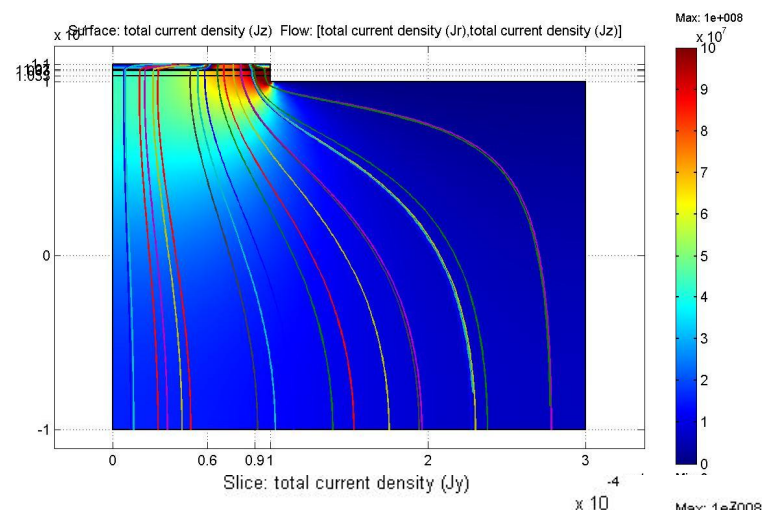
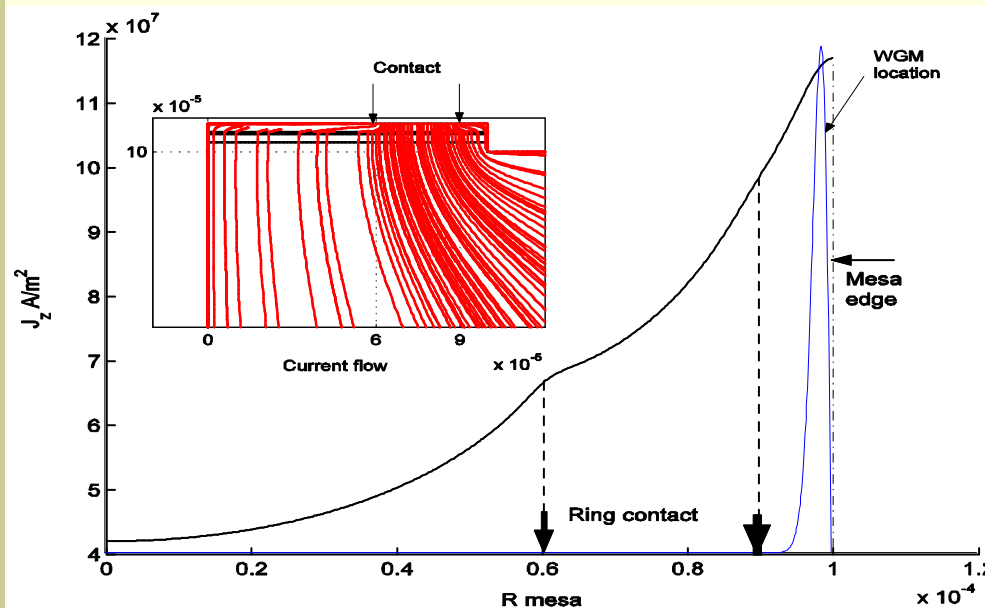
WGM лазеры ($d=200\text{ }\mu\text{m}$).

$$\Delta\lambda = 40\text{ }\text{\AA}$$

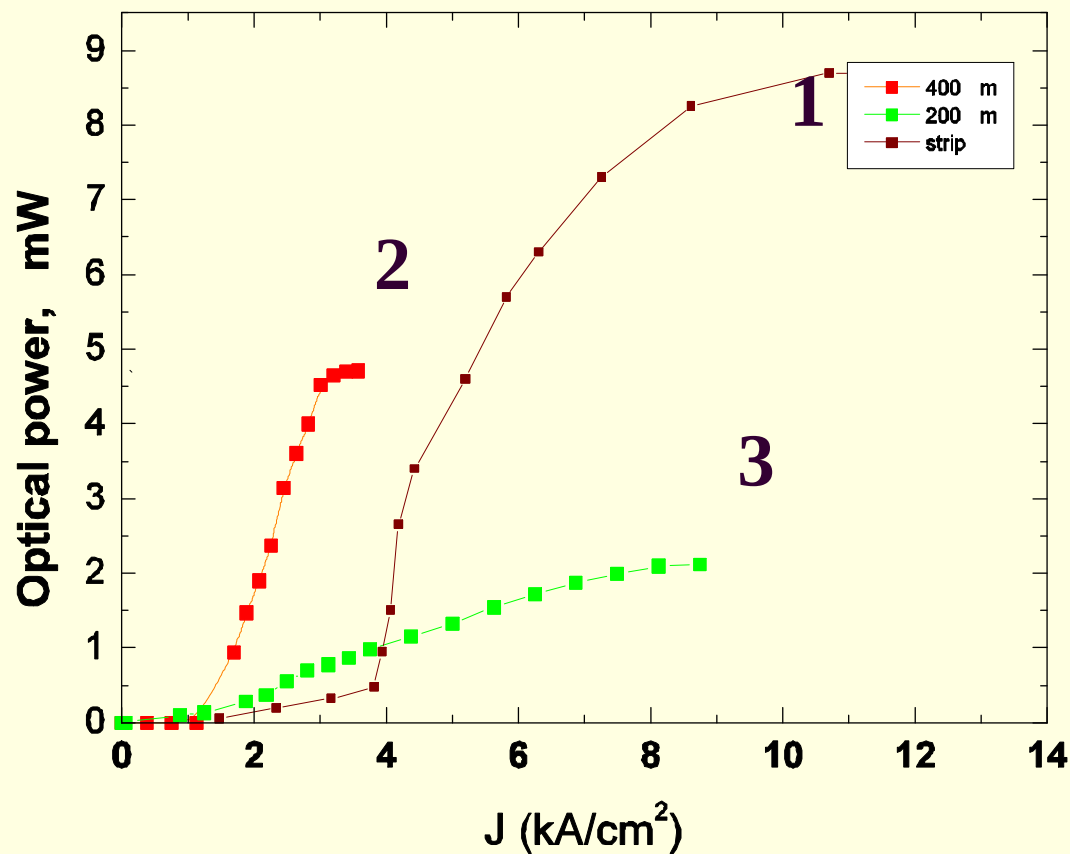
$$P > 2\text{ mW}$$



WGM лазеры среднего ИК диапазона. (Распределение плотности тока)



Пороговый ток WGM лазеров среднего ИК диапазона.



1.FP – $T_{\max}$ – 110 K.

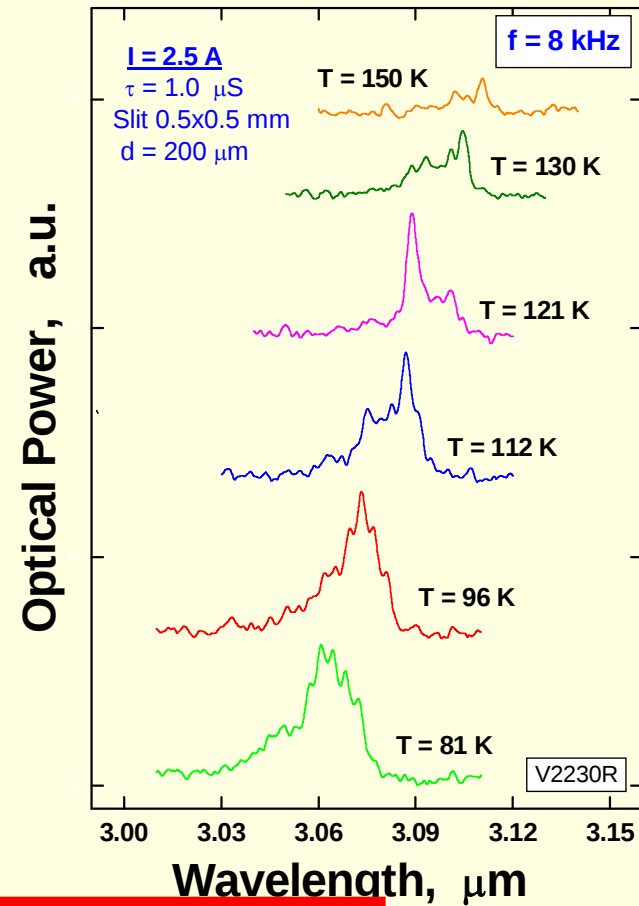
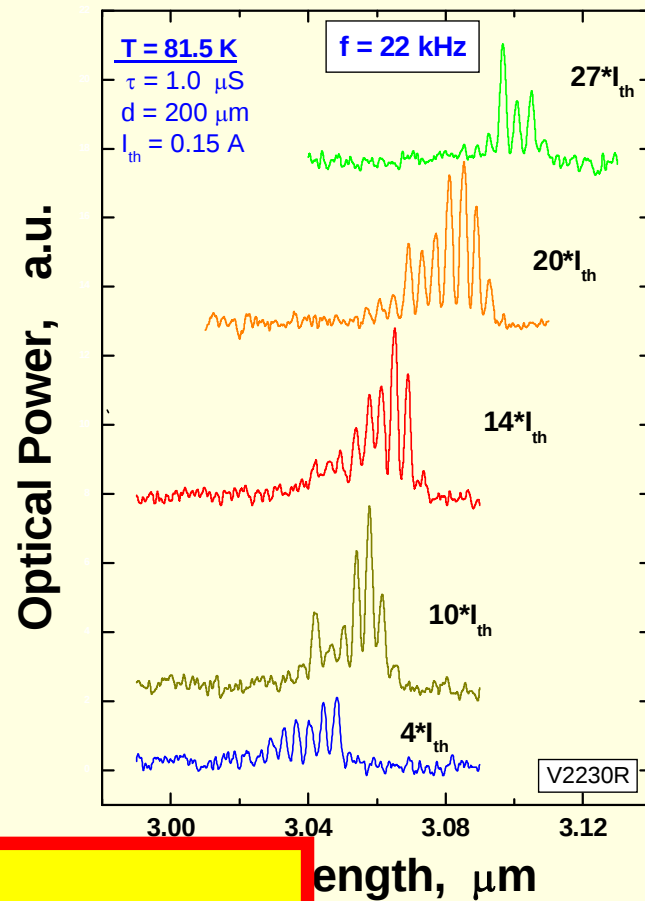
2.WGM (400 μm) –
 $T_{\max}$ – 125 K.

3. WGM (200 μm) -
 $T_{\max}$ – 150 K.

$$\Delta T = 40 \text{ K}$$

WGM лазеры ($d=200\text{ }\mu\text{m}$).

(Токовая и температурная зависимость)

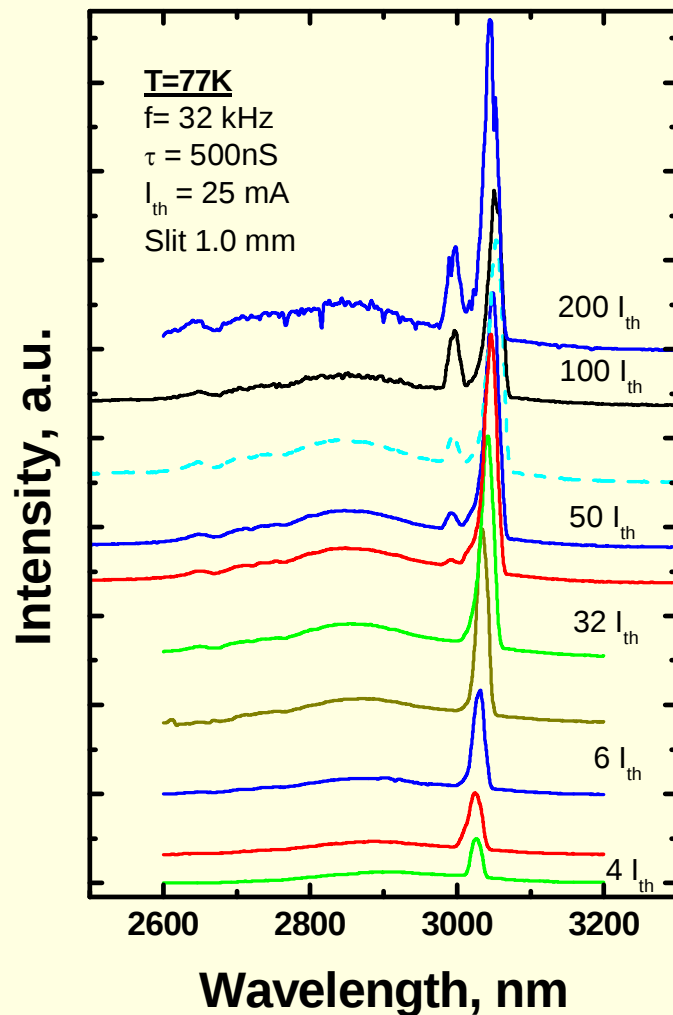


$27 \cdot I_{th}$

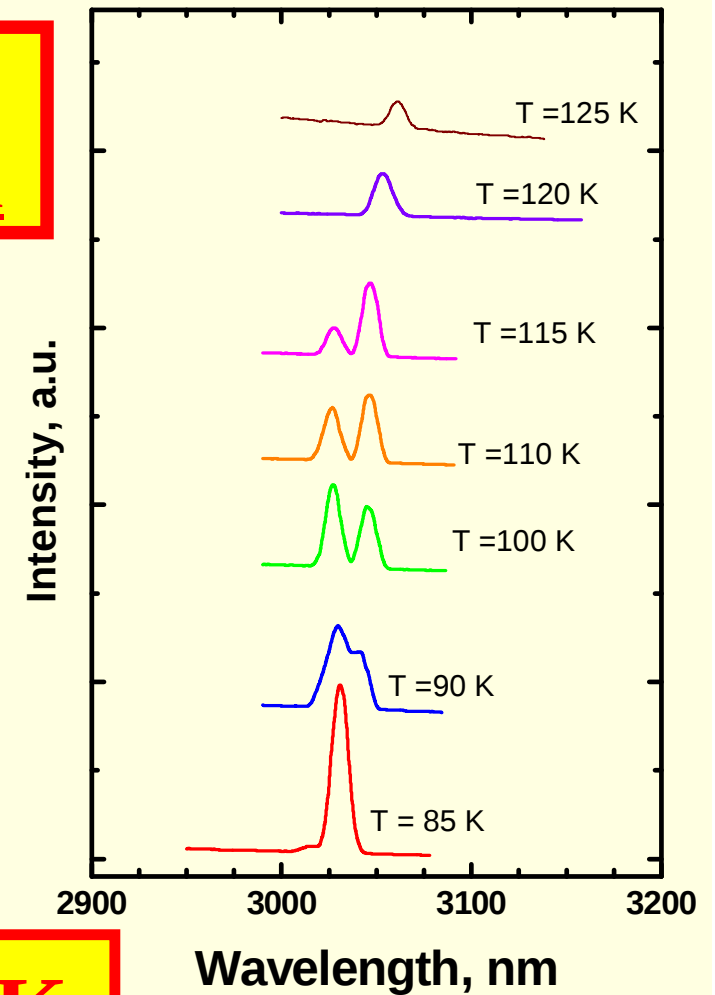
$T = 150\text{ K}$

WGM лазеры ($d=200\text{ }\mu\text{m}$), выращенные методом MOCVD

(Токовая и температурная зависимость)

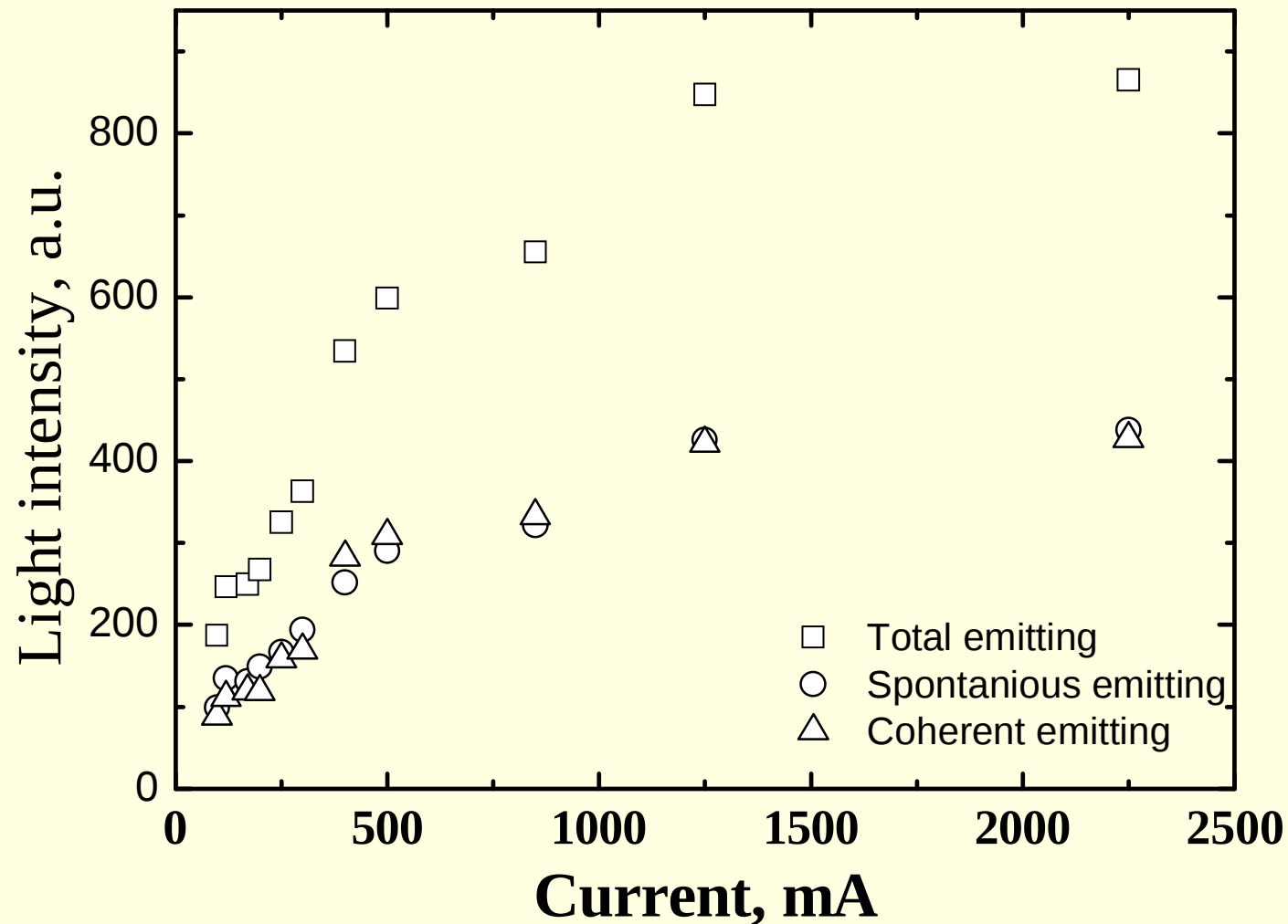


$200 * I_{th}$



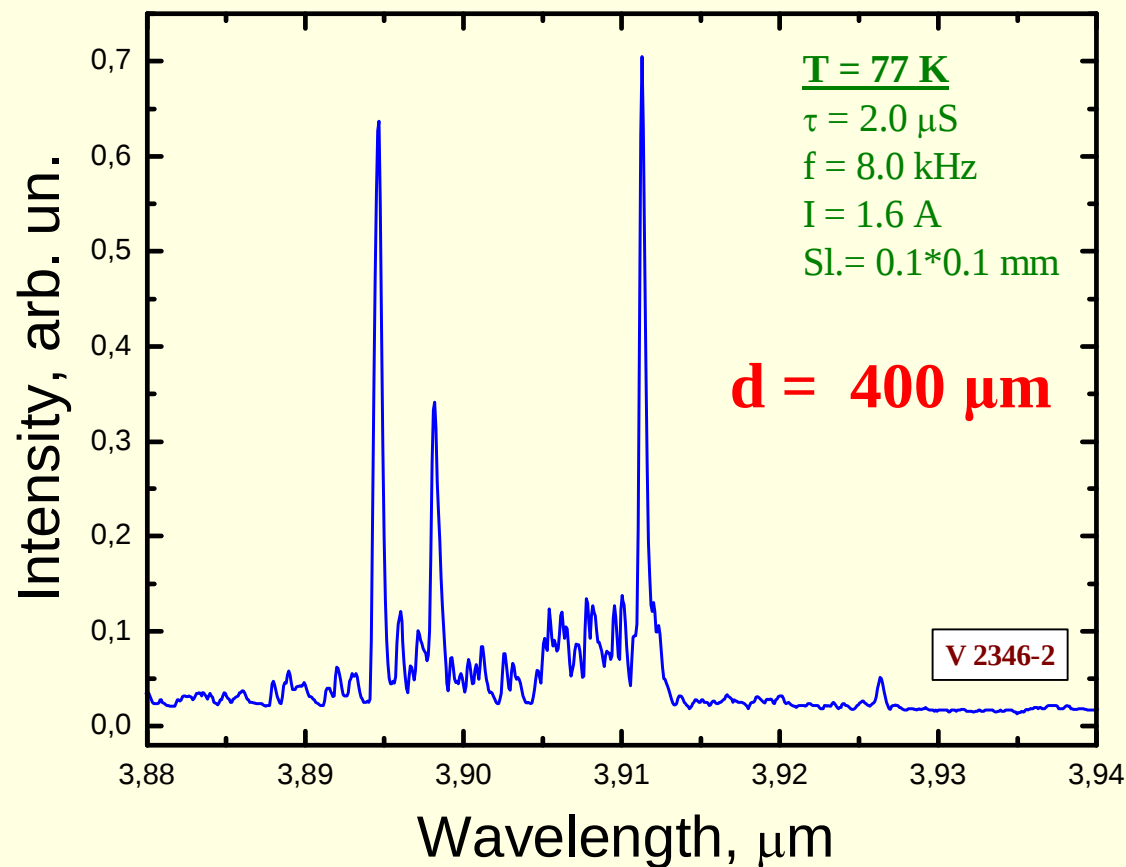
T=125K

Спонтанное и когерентное излучение в дисковых лазерах ($\lambda=3.05\text{ }\mu\text{m}$)

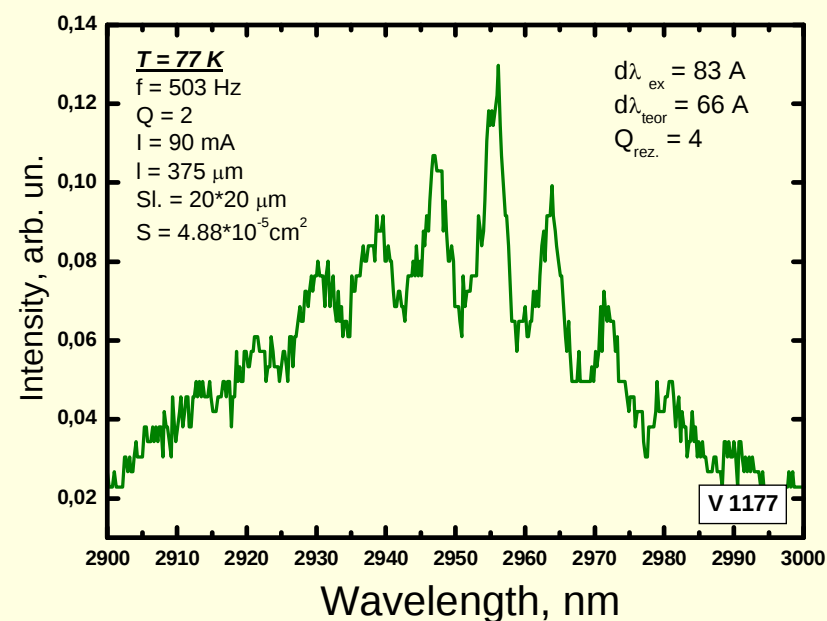
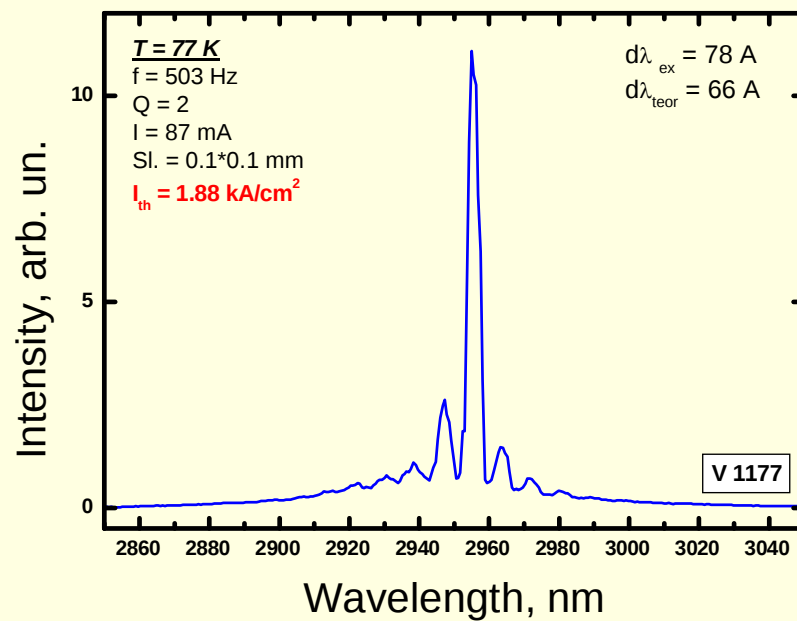


WGM лазеры среднего ИК диапазона

$\lambda = 3.9 \text{ }\mu\text{m}$.

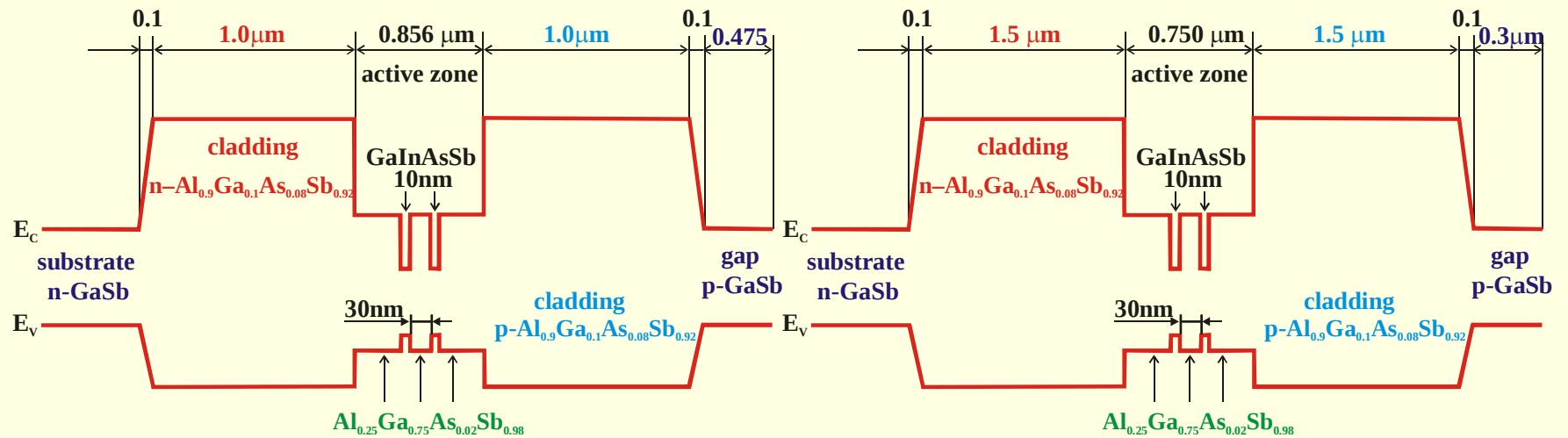


Лазеры (FP) для среднего ИК диапазона.



$T_{max} = 110\text{ K}$

Энергетические диаграммы лазеров (2-2.4 μm) на основе QW AlGaAsSb/GaInAsSb, выращенных методом MBE

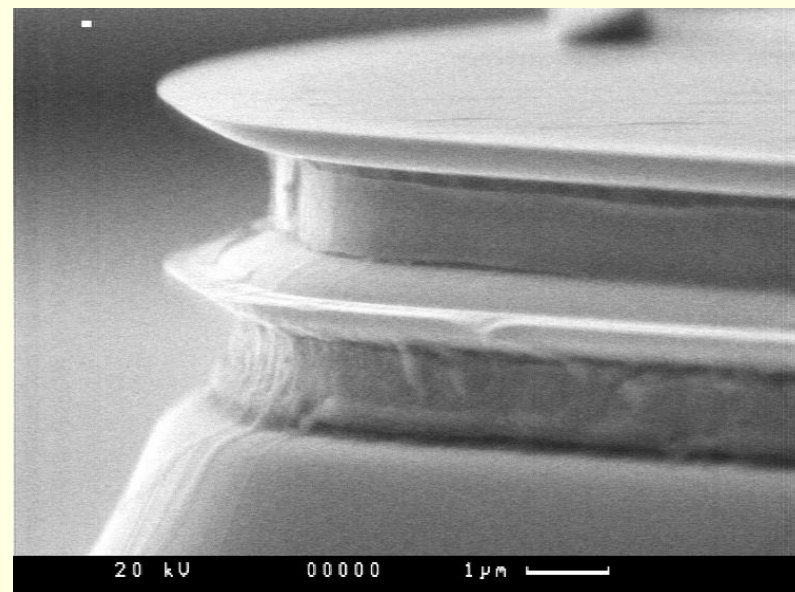
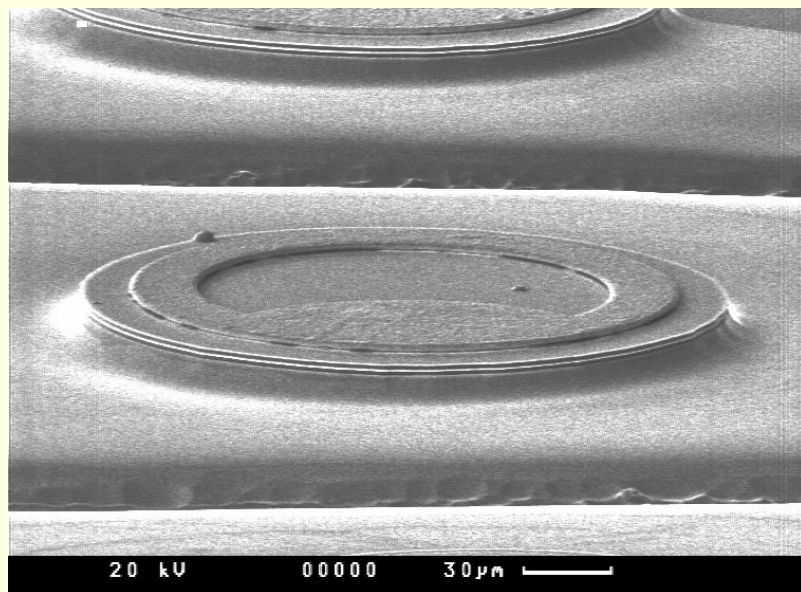


2.4 μm structure

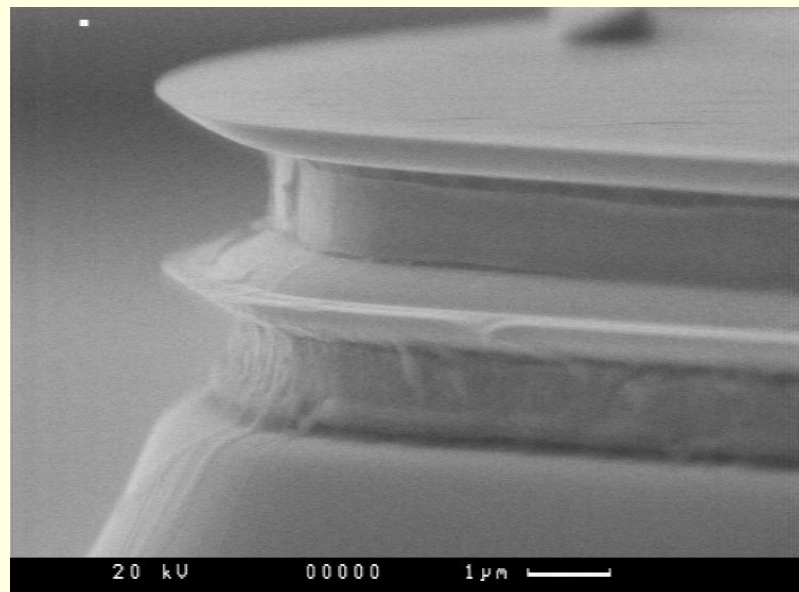
2 μm structure

Конструкция дисковых лазеров

Из созданных структур методом фотолитографии и жидкостного химического травления изготавливались лазерные чипы с резонатором цилиндрической формы диаметром $300\text{ }\mu\text{m}$ и высотой $15\text{ }\mu\text{m}$.

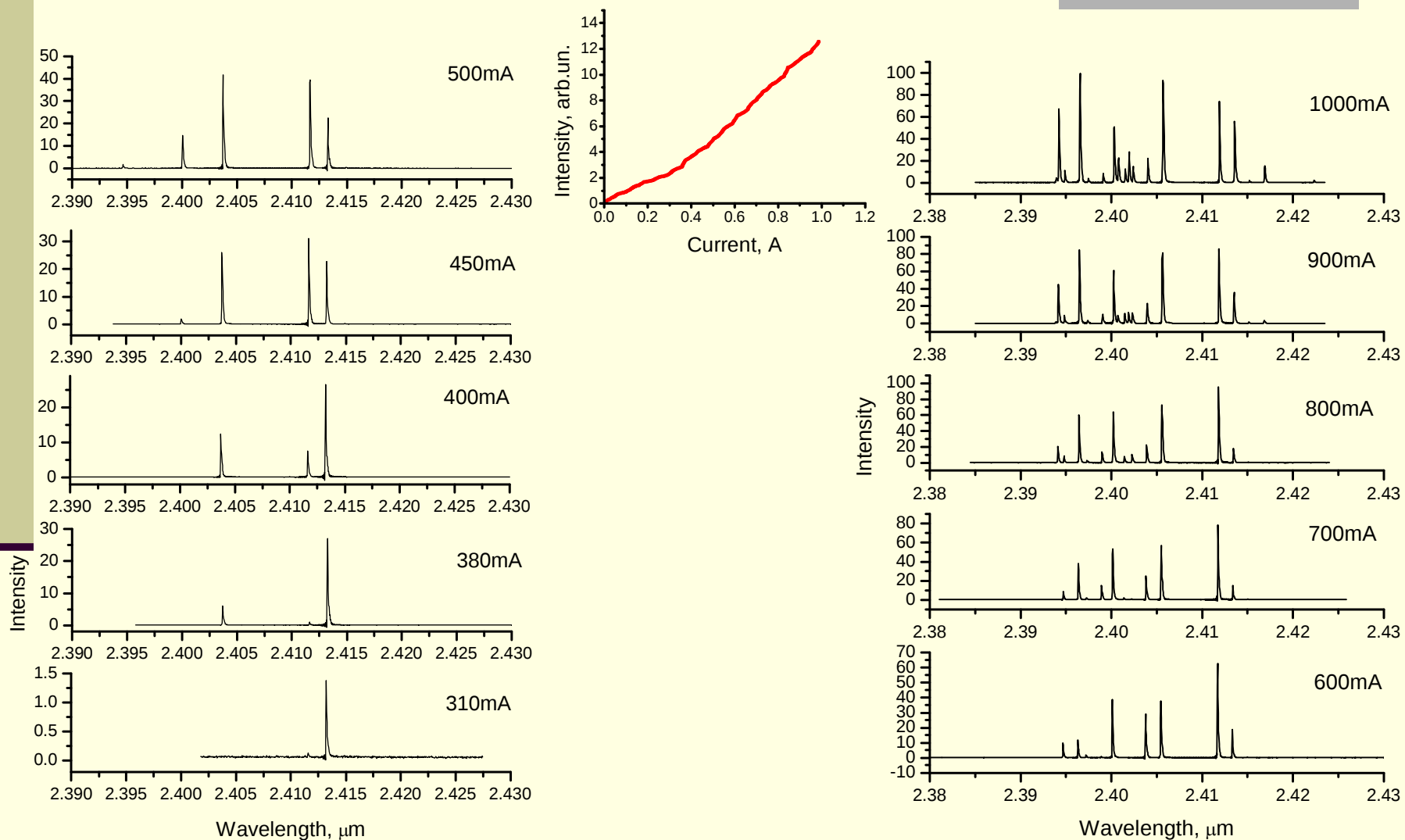


Храм «неба» и дисковый лазер

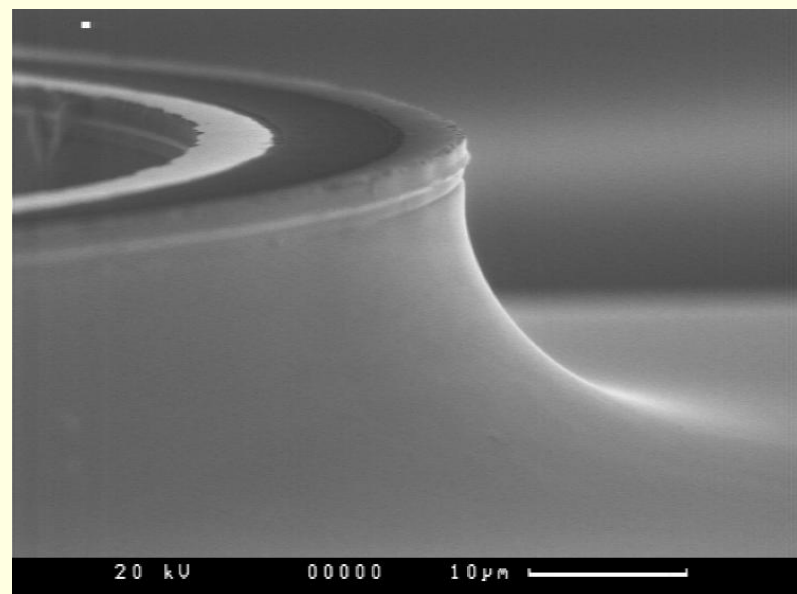
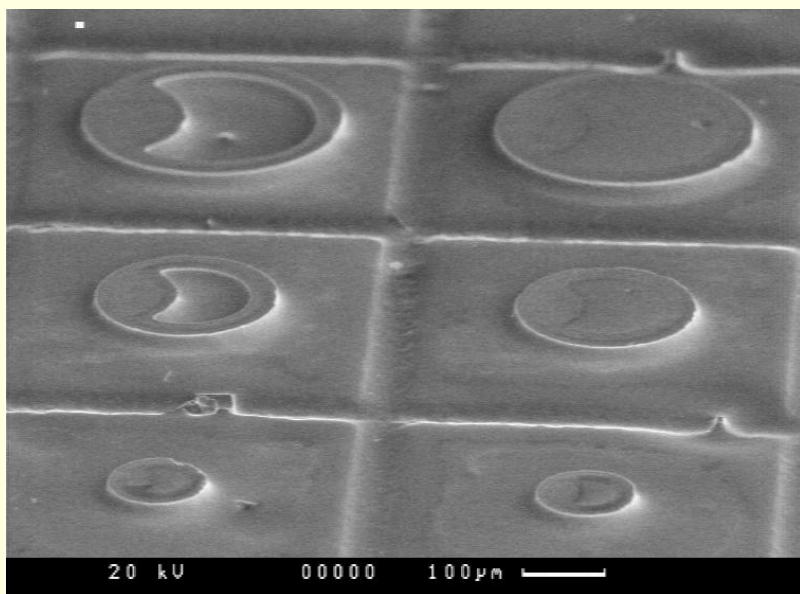


Письма в ЖТФ ., 34(21), pp.27-32, 2008.

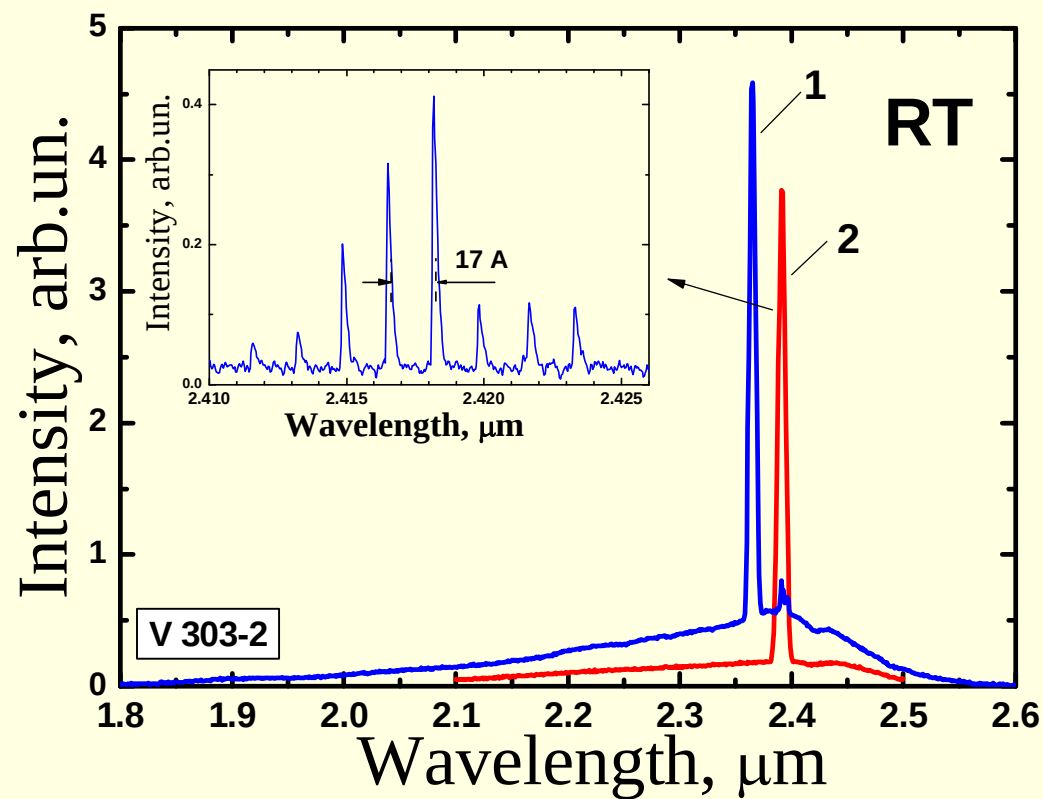
Спектры дисковых лазеров, выращенных методом МВЕ



WGM лазеры среднего ИК диапазона. *(Резонатор в виде диска или кольца)*



Спектры лазеров с резонатором в виде кольца и диска, выращенных методом МВЕ



WGM лазеры (2-2.4 μm) , выращенных методом МВЕ

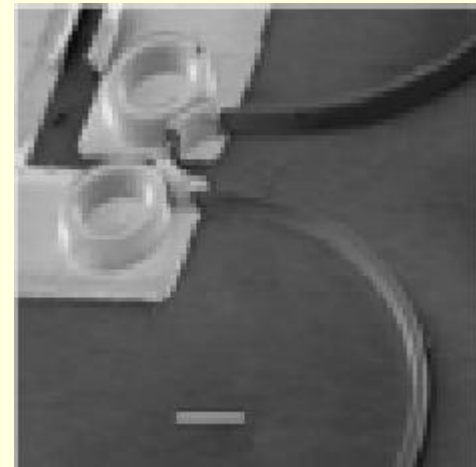
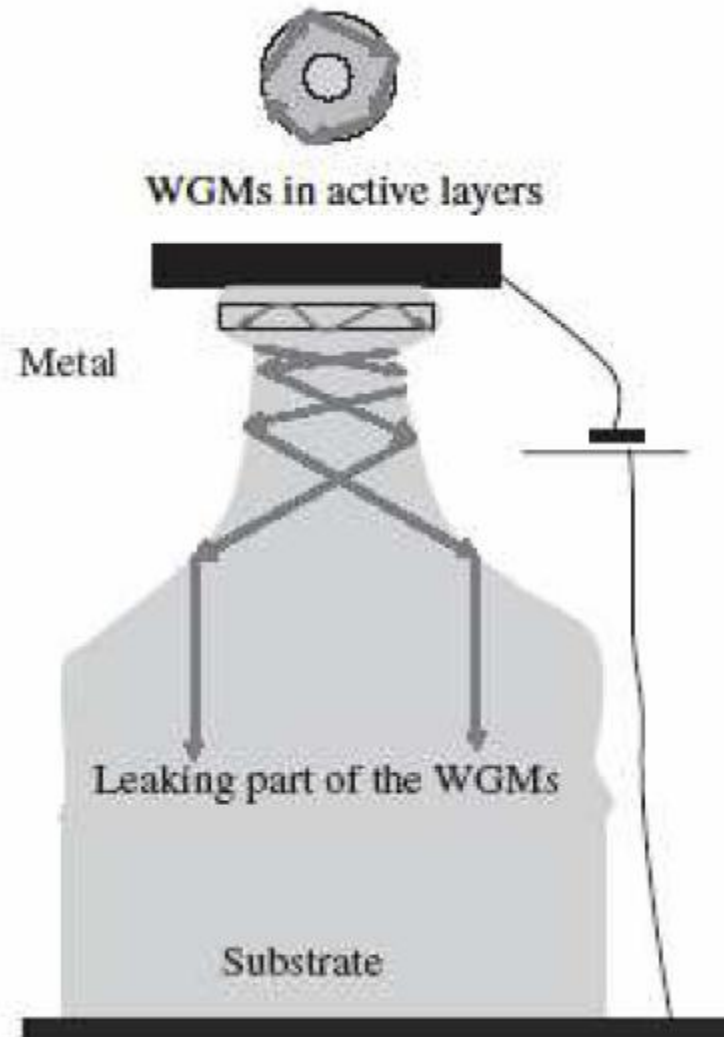
Дисковые лазеры

d_{mesa} (μm)	$\Delta\lambda_{\text{cal}}$ (Å)	$\Delta\lambda_{\text{exp.}}$ (Å)	d_{mesa} (μm)
300	18	18-19	292
200	25	24-27	190
100	53	51	92

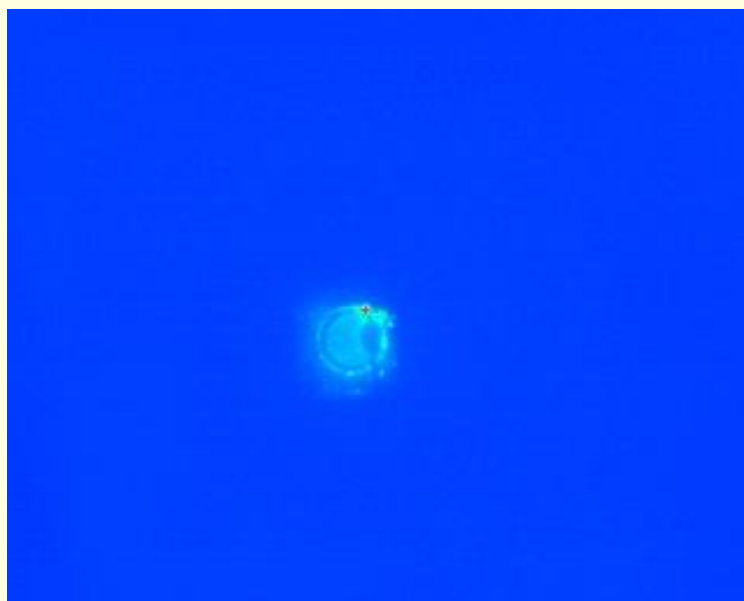
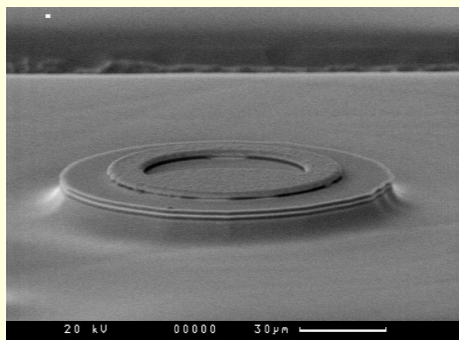
Кольцевые лазеры

d_{mesa} (μm)	$\Delta\lambda_{\text{cal}}$ (Å)	$\Delta\lambda_{\text{exp.}}$ (Å)	d_{mesa} (μm)
300	18	18-20	293
200	25	24-27	192
100	53	52	94

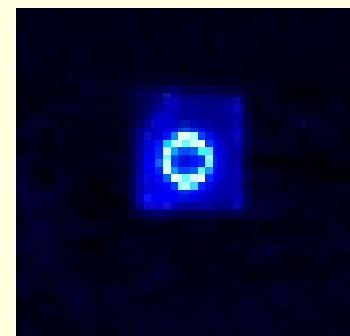

$$\Delta\lambda_{\text{WGM}} = \frac{\lambda^2}{2\pi R n}$$



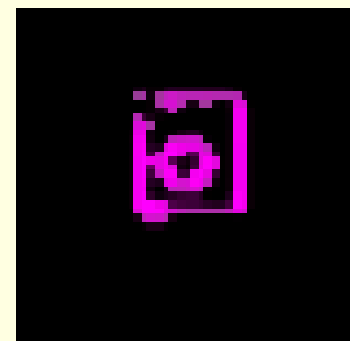
Инфракрасное изображение дискового лазера ($2\text{-}2.4\text{ }\mu\text{m}$)



Вид со стороны эпитаксиальной
структуры



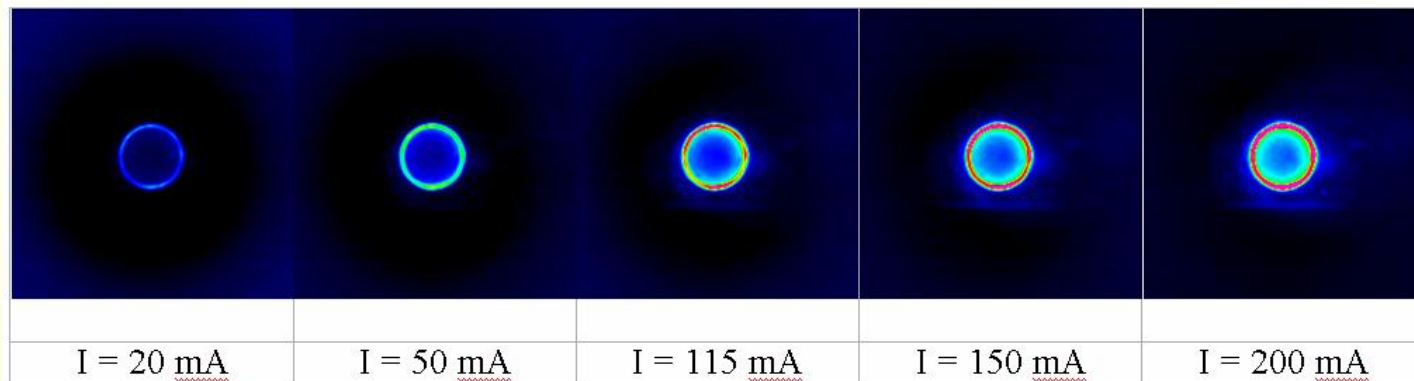
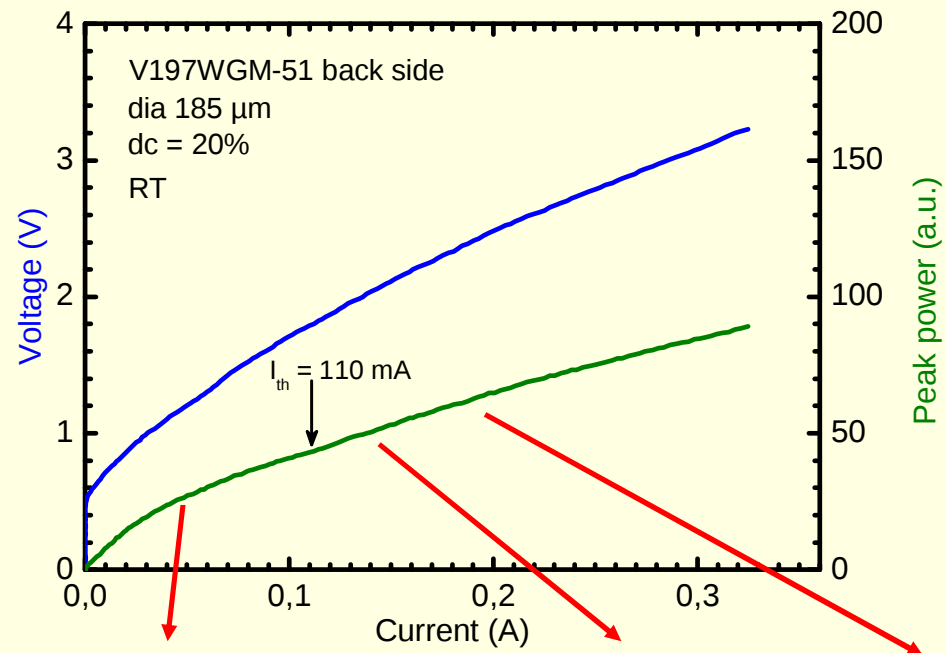
Spontaneous emission



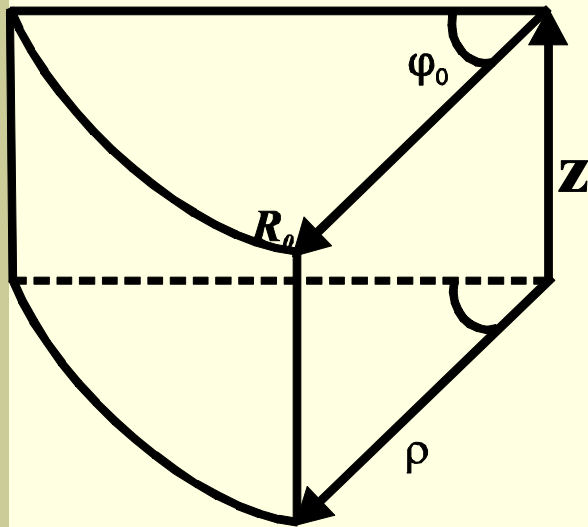
Laser emission

Вид со стороны подложки GaSb

Инфракрасное изображение дискового лазера (2-2.4 μm)



Решение уравнения Гельмгольца для усеченного цилиндрического лазерного резонатора



Разделением переменных в цилиндрических координатах, это уравнение сводится к трем обычным дифференциальным уравнениям :

$$\begin{aligned}
 E_z &= Z(z)\Phi(\varphi)R(\rho) \\
 \frac{d^2 Z}{dz^2} &= -k^2 Z \\
 \frac{d^2 \Phi}{d\varphi^2} &= -\nu^2 \Phi \\
 \frac{d^2 R}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{dR}{d\rho} + \left(\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\nu^2}{\rho^2} \right) R &= 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

С граничными условиями:

$$Z(0) = Z(h) \quad R(R_0) = 0 \quad \Phi(0) = \Phi(\varphi_0) = 0 \tag{2}$$

Решение уравнения: $Z = A \sin(kz)$, $R = J_\nu\left(\frac{\omega}{c} \rho\right)$, $\Phi = \sin(\nu\varphi)$, где ν

получается из уравнения $\sin(\nu\varphi_0) = 0$ и ω из

$$J_\nu\left(\frac{\omega}{c} R_0\right) = 0 \tag{3}$$

Межмодовое расстояние у лазеров с усеченным цилиндрическим резонатором

Межмодовое расстояние для $\varphi_0 = \pi$ и $\varphi_0 = \pi/2$:

$$\Delta\lambda \cong \frac{\lambda^2}{2\pi R_0 n}, \quad (4)$$

Для четверти диска уравнение (3) сводится:

$$J_{2m} \left(\frac{\omega}{c} R_0 \right) = 0,$$

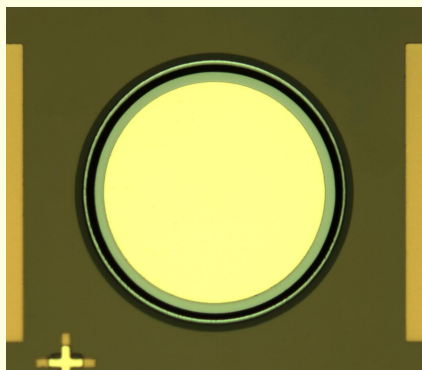
где m положительное целое число. Межмодовое расстояние для достаточно больших индексов m может быть получено из известной асимптотической оценки положения первого корня функции Бесселя: $J_m(x)=0$ и $x=m$, следовательно: $\lambda \cong 2\pi R_0 / m$

То есть межмодовое расстояние в четверть-дисковом резонаторе удвоено :

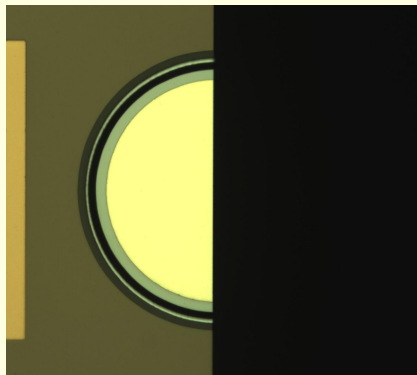
$$\Delta\lambda \cong 2\pi R_0 \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m+2} \right) \cong 2 \frac{\lambda^2}{2\pi R_0 n}$$

Для лазеров, излучающих в диапазоне 2.0-2.4 μm , с диаметром диска 200mm и показателем преломления $n=3.7$ расчетное межмодовое расстояние получается **1.25 μm** для полного и половинки диска и **2.50 μm** для четверть-дискового лазера.

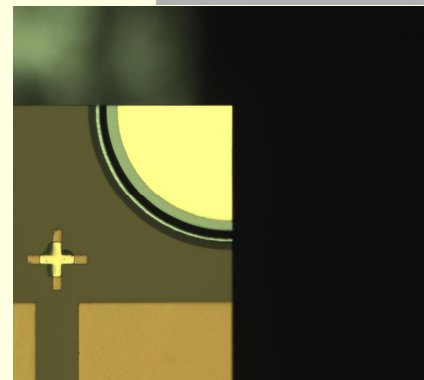
Исследуемые лазеры



а



б

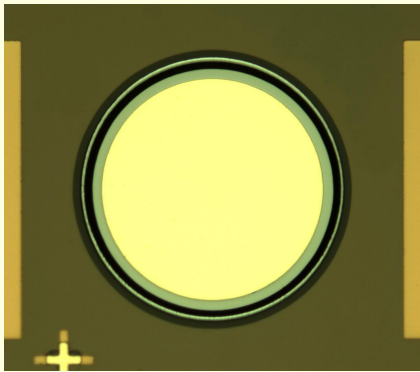


с

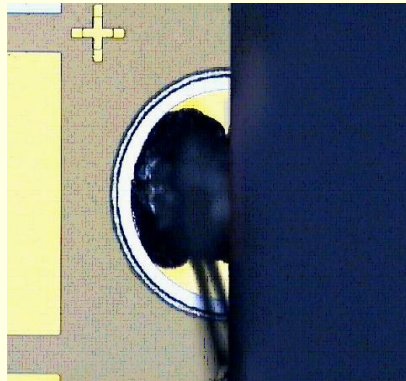
Из полученных чипов методом раскалывания изготавливались симметричные лазерные кристаллы с резонаторами в форме полу-диска и четверть-диска .

Лазеры работали в постоянном режиме при комнатной температуре и имели пороговые токи: для лазера с полным диском - 48-55 мА, с половиной диска- 75-80 мА и четвертью диска - 57-60 мА.

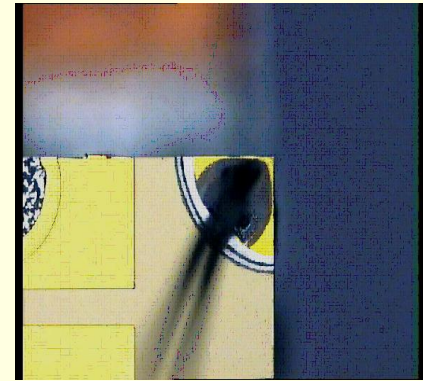
Исследуемые лазеры (2-2.4 μm).



$I_{th} = 48-55 \text{ mA}$
($J_{th} = 75-85 \text{ A/cm}^2$)

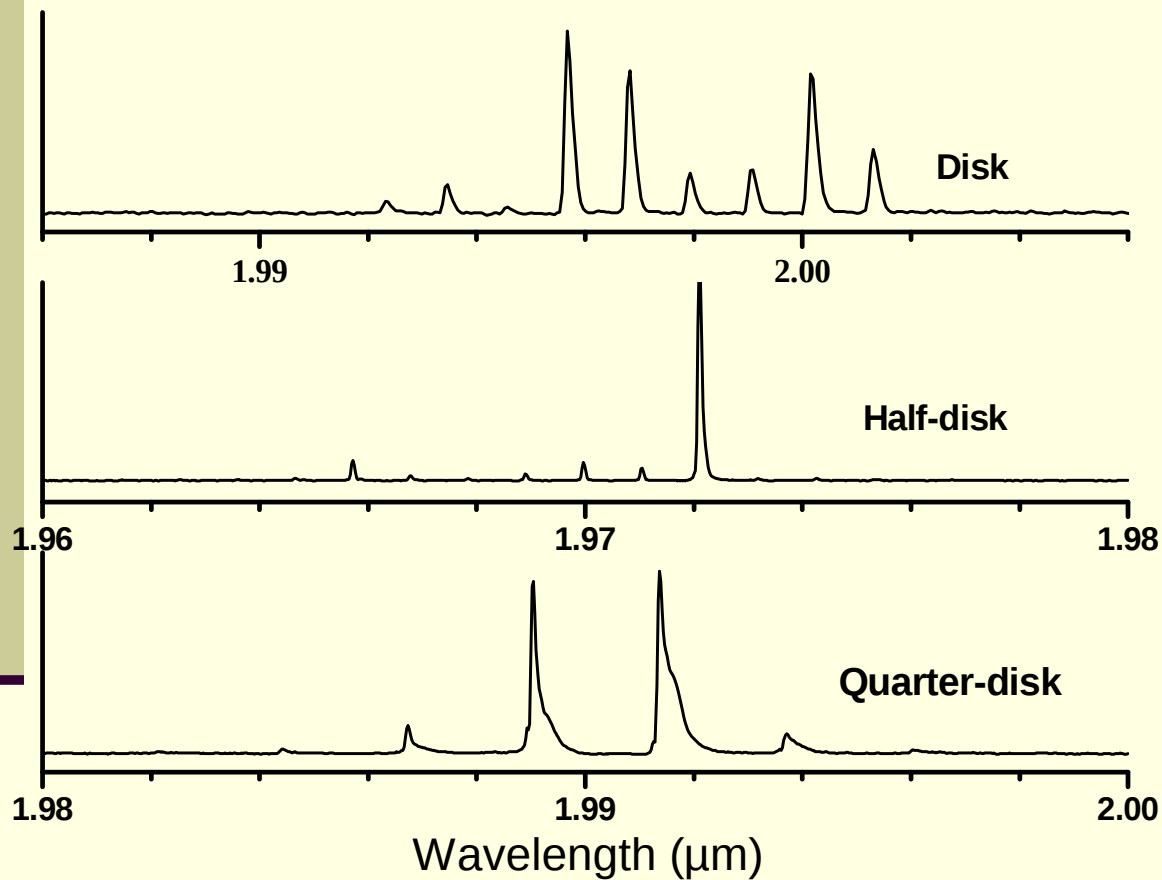


$I_{th} = 75-80 \text{ mA}$
($J_{th} = 175 \text{ A/cm}^2$)



$I_{th} = 57-60 \text{ mA}$
($J_{th} = 350 \text{ A/cm}^2$)

Спектры излучения



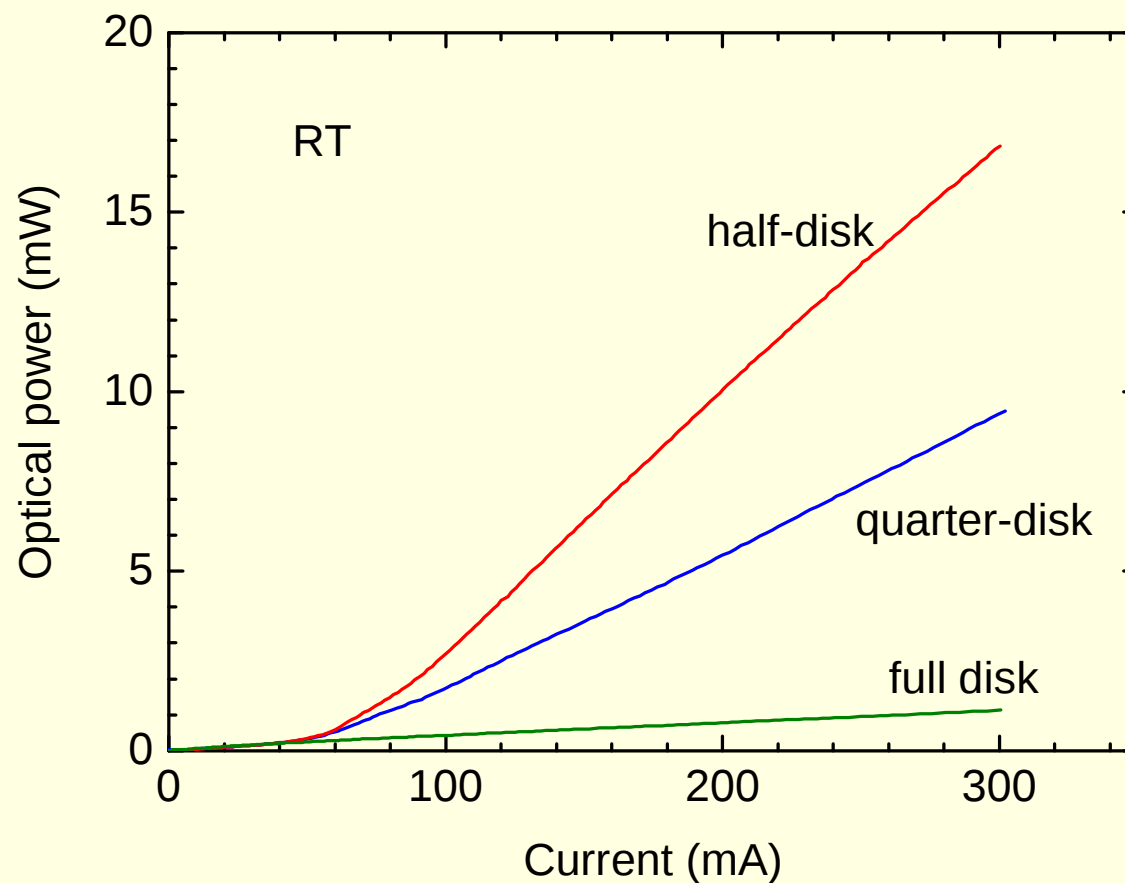
$$\Delta\lambda_{\text{exp}} = 11.7 \text{ \AA}$$

$$\Delta\lambda_{\text{cal}} = 12.5 \text{ \AA}$$

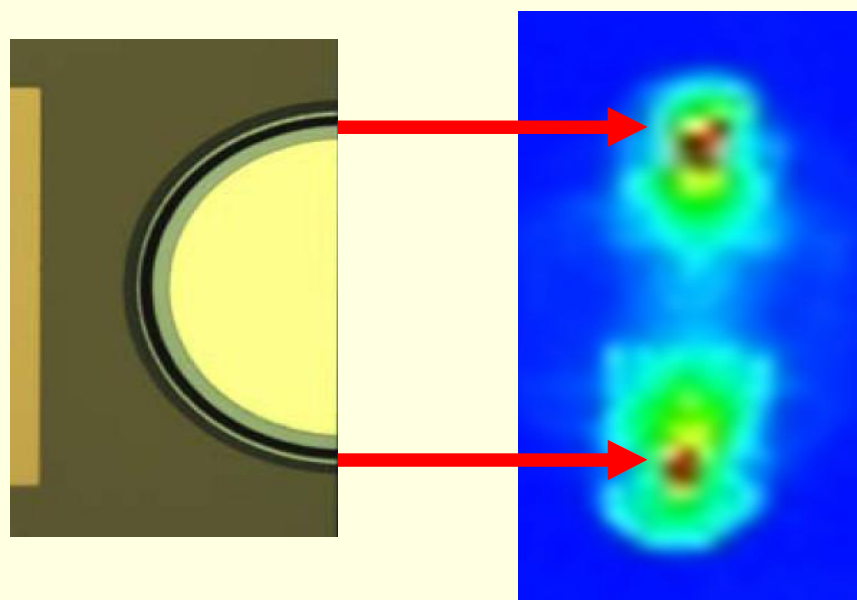
$$\Delta\lambda_{\text{exp}} = 23.5 \text{ \AA}$$

$$\Delta\lambda_{\text{cal}} = 25.0 \text{ \AA}$$

Зависимость мощности излучения лазеров различной геометрии диска от тока

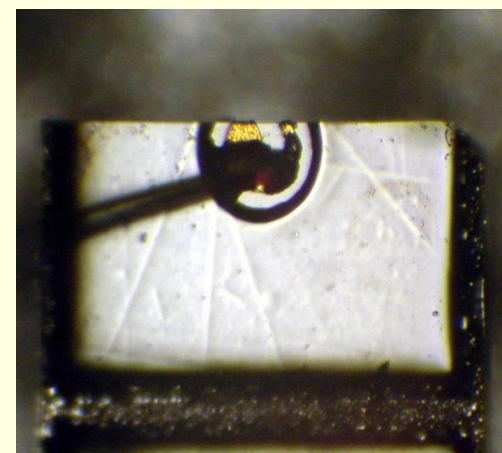
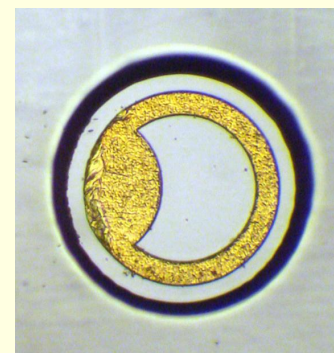
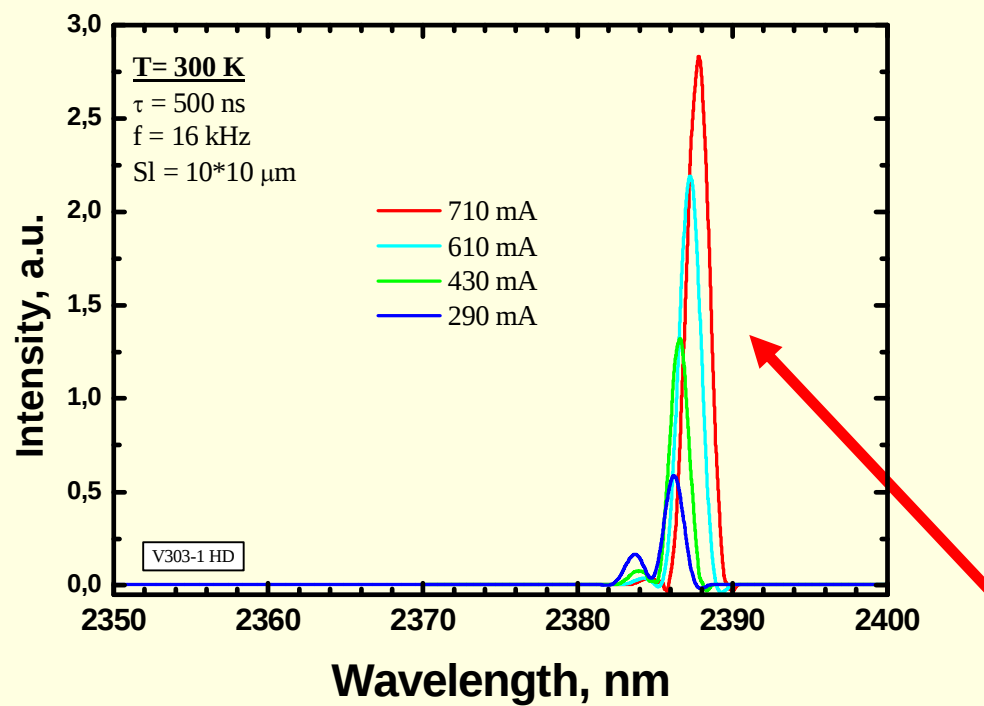


Инфракрасное изображение WGM лазера с половиной диска (со стороны скола)



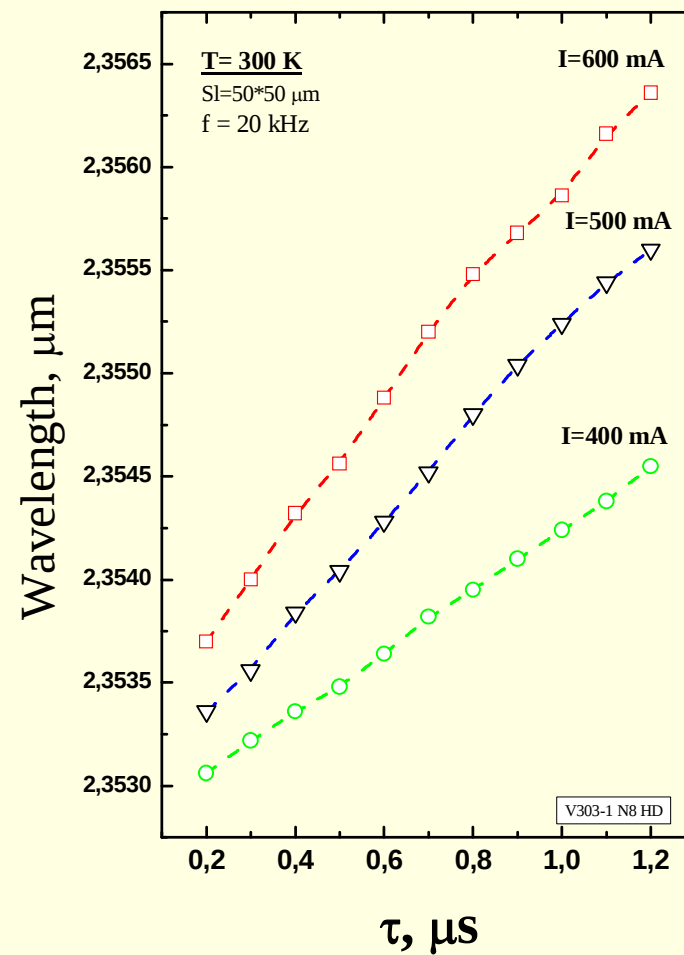
V-107#14 $d=300\text{mkm}$
side view

Перестраиваемый WGM лазер, работающий при комнатной температуре



$$\Delta\lambda = 29\text{ }\text{\AA}$$

Перестраиваемый WGM лазер, работающий при комнатной температуре



Заключение

- Впервые созданы полупроводниковые WGM лазеры для среднего ИК диапазона 2-4 мкм.
- Продемонстрировано, что WGM лазеры (3,0 мкм) работают до **$I_{\max} = 200 \cdot I_{\text{th}}$**
- Созданы WGM лазеры (2-2,4 мкм), работающие при комнатной температуре в CW режиме.
- Наблюдались моды шепчущей галереи в дисковых лазерах различной геометрии: как в целом, так и в усеченном дисковом резонаторе (на примере 2,0 мкм лазера).
- Межмодовое расстояние дисковых лазеров определяется выражением для целого и пол-диска

$$\Delta\lambda_{\text{WGM}} = \frac{\lambda^2}{2\pi R n}$$

и это расстояние удваивается для четверть диска.

- Решена проблема вывода излучения из дисковых лазеров за счет использования дисковых резонаторов с усеченной геометрией или резонатора конусообразной формы.