

*10 апреля 2019
ДЛС 25, Москва*

Перестраиваемые по частоте
WGM - лазеры в средней ИК-
области спектра (2-2.4 μm)

Ю.П. Яковлев

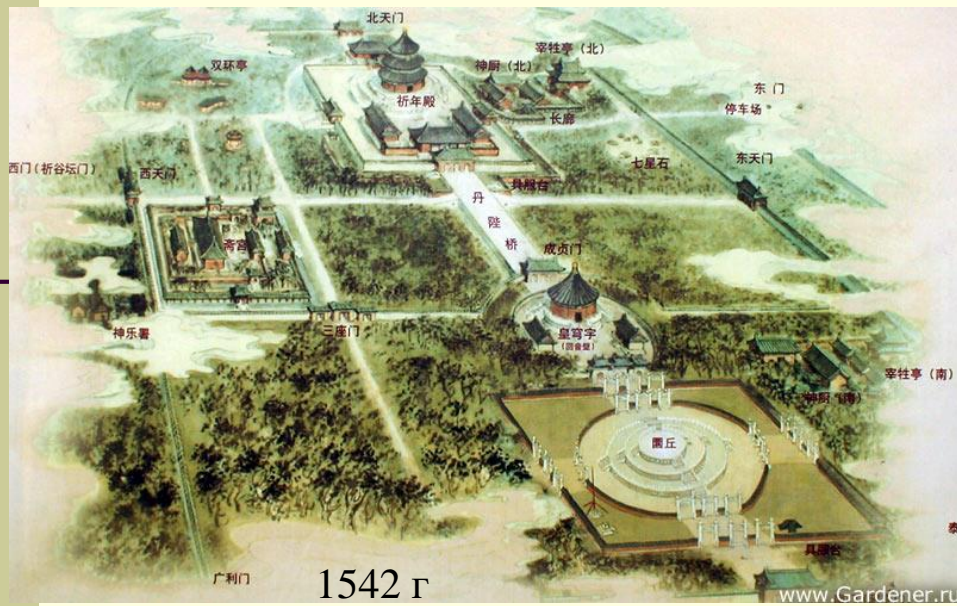
Участники работы

Россия: В.В. Шерстнев, А.М.Монахов,Е.В.Куницына Е.А.Гребенщикова,
Ю.П.Яковлев -- ФТИ им.А.Ф.Иоффе

Франция: Prof.A.N.Baranov. -- Université Montpellier 2,
CNRS.

Содержание доклада

- Предыстория появления WGM лазеров
- Мотивация работы
- Дисковые лазеры ($\sim 2 \mu\text{m}$) на основе наноразмерных структур AlGaAsSb/GaInAsSb
- Электролюминесцентные свойства
- Дисковые лазеры с усеченным резонатором
- Электролюминесцентные свойства дисковых лазеров с усеченным резонатором
- Перестраиваемые по частоте WGM лазеры за счет нагревания током
- Перестраиваемые по частоте WGM лазеры с управляемым поглотителем
- Механизм частотной перестройки WGM-лазера с управляемым поглотителем
- Заключение



1542 г

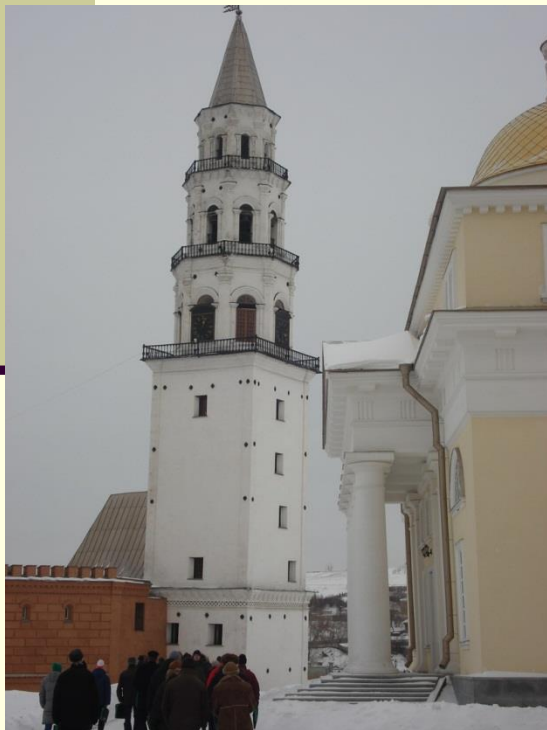
www.Gardener.ru

[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

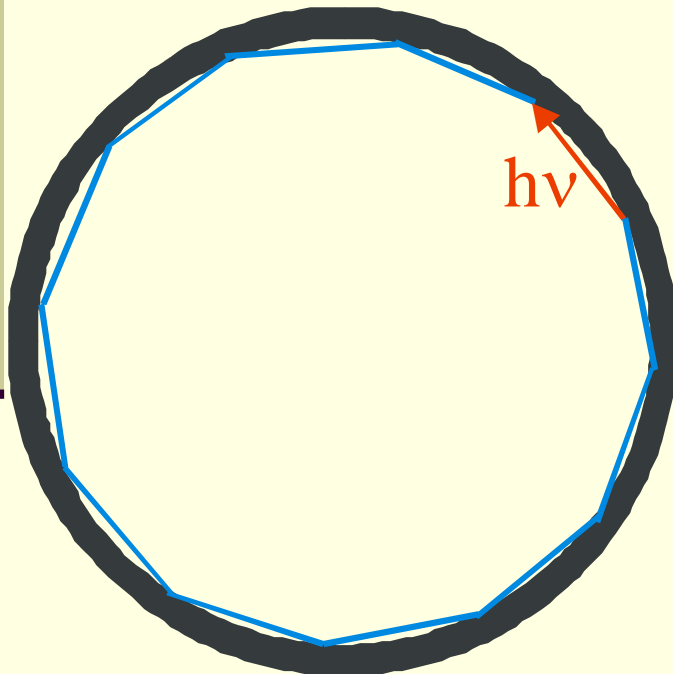


Мотивация

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

Моды шепчущей галереи (WGM).

Схематическое
изображение луча в
диске



Из простых геометрических соображений

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

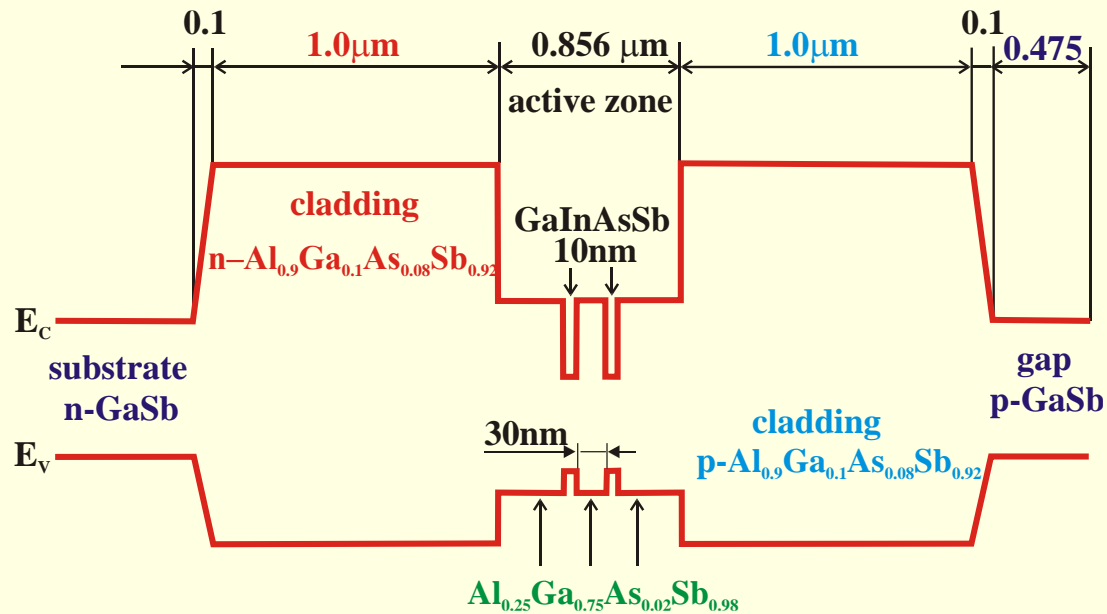
Межмодовое расстояние

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

Межмодовое расстояние для FP лазера

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

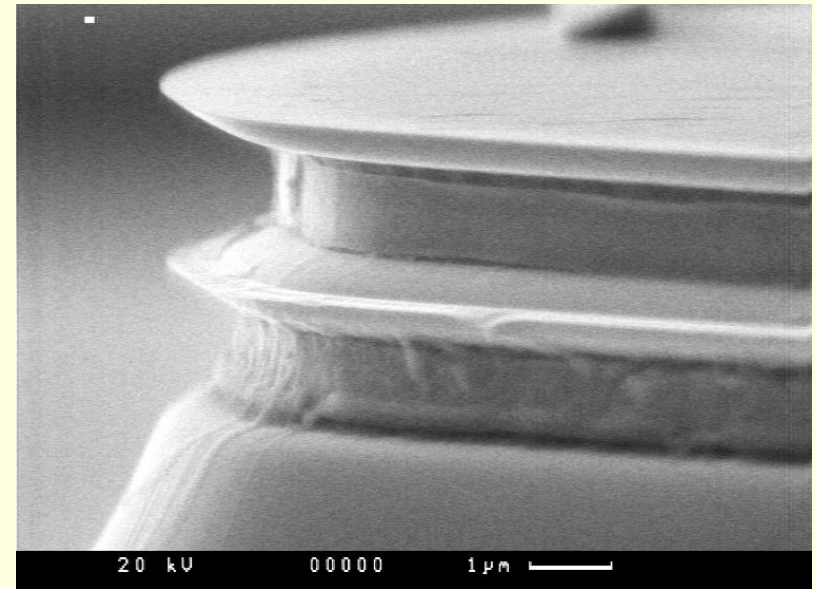
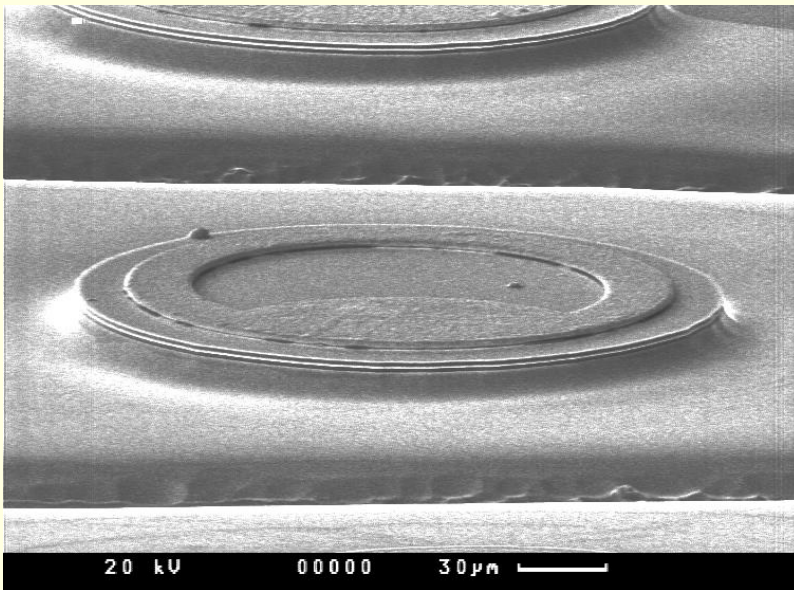
Энергетические диаграммы лазеров (2-2.4 μm) на основе QW AlGaAsSb/GaInAsSb, выращенных методом МВЕ



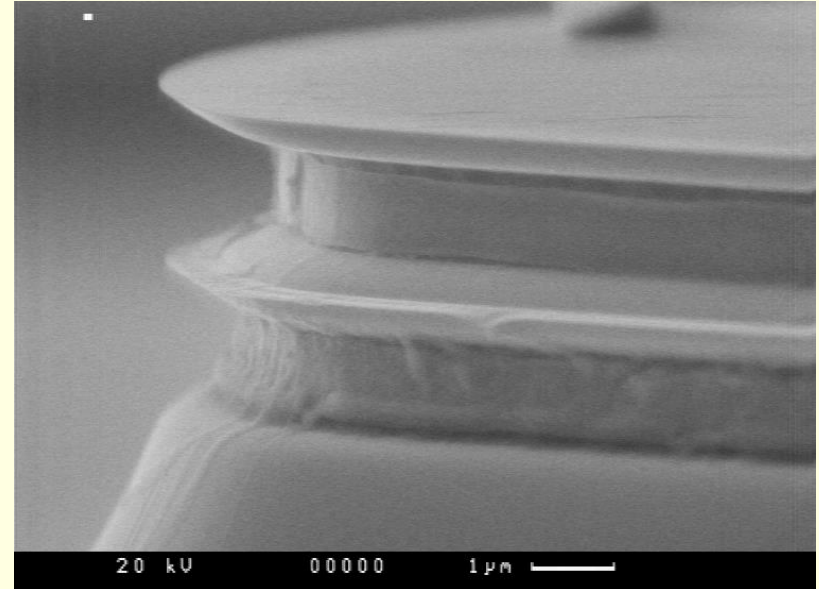
2.4 μm structure

Конструкция дисковых лазеров

Из созданных структур методом фотолитографии и жидкостного химического травления изготавливались лазерные чипы с резонатором цилиндрической формы диаметром $300\ \mu\text{m}$ и высотой $200\ \mu\text{m}$ и $15\ \mu\text{m}$.

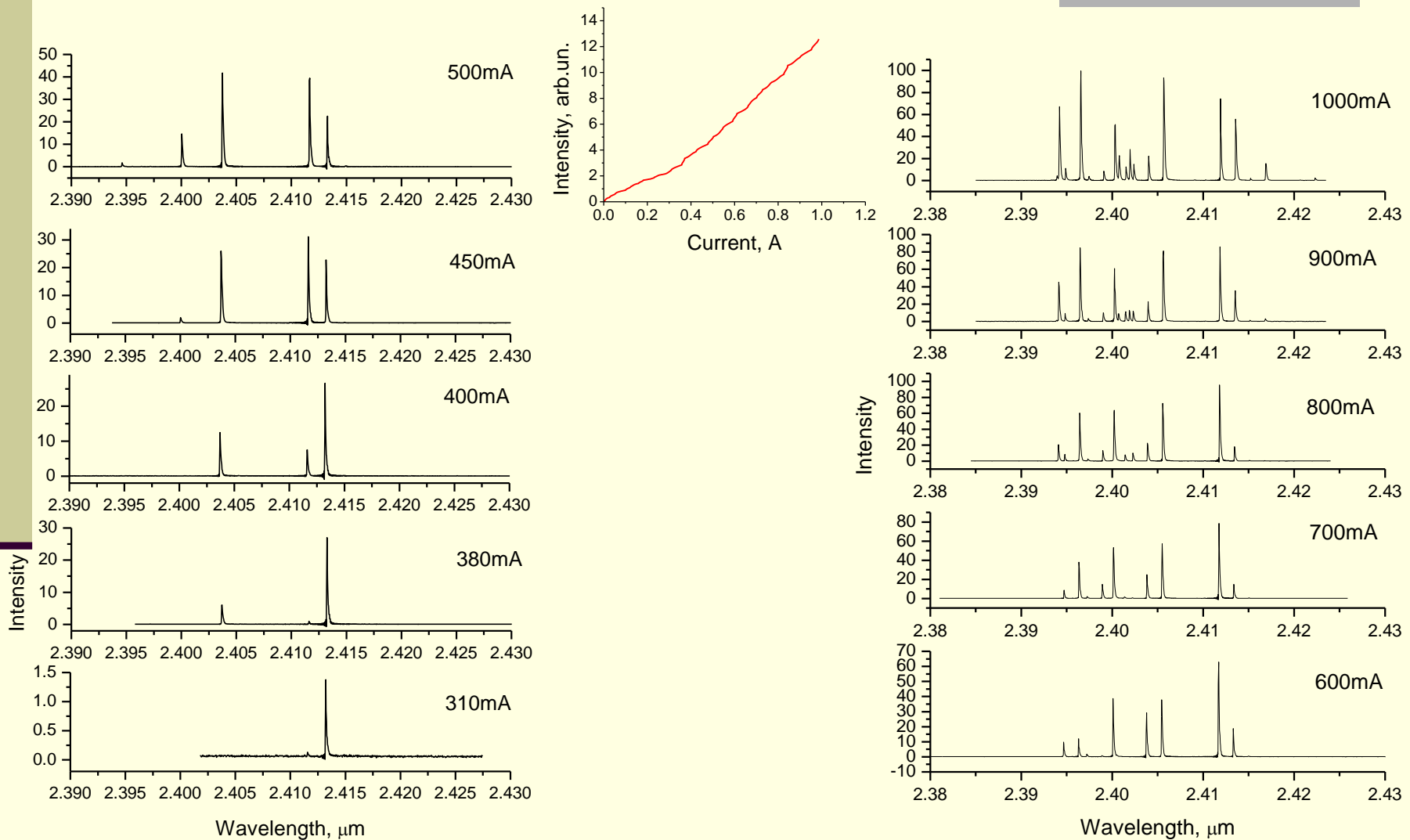


Храм «неба» и дисковый лазер



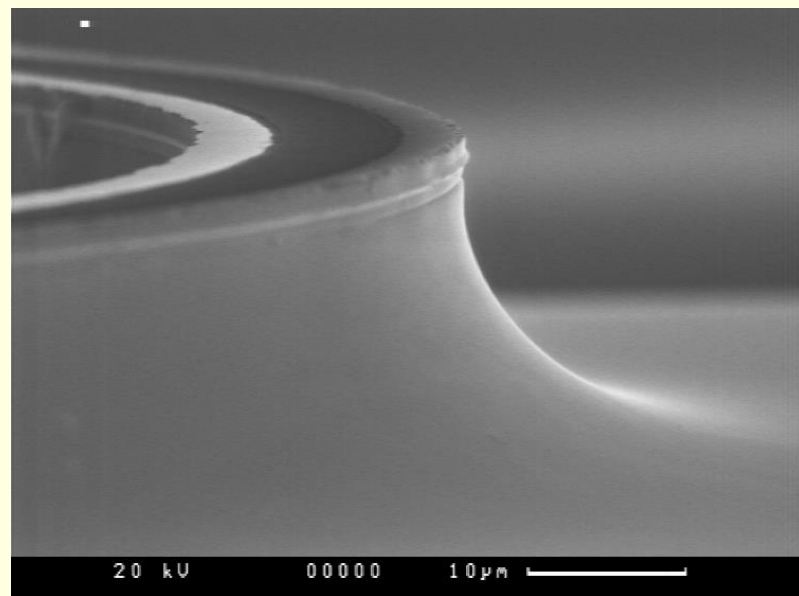
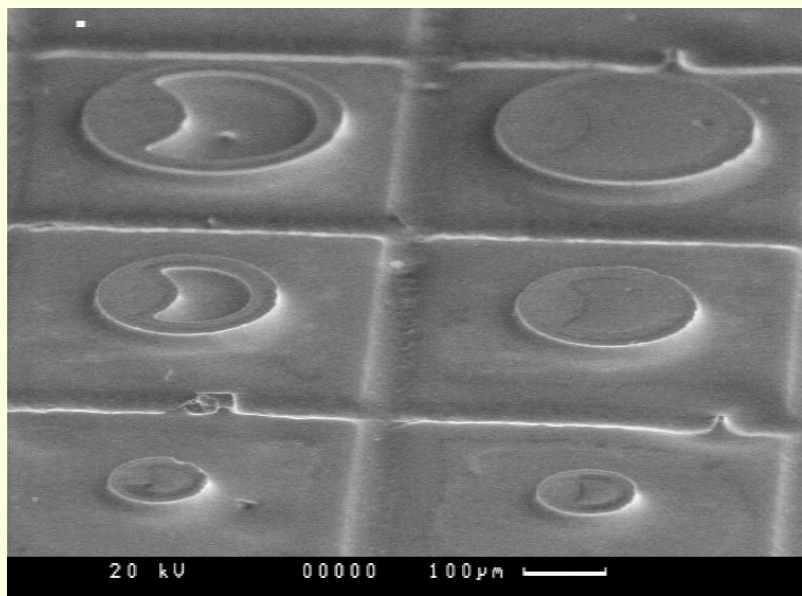
Письма в ЖТФ ., 34(21), pp.27-32, 2008.

Спектры дисковых лазеров, выращенных методом МВЕ

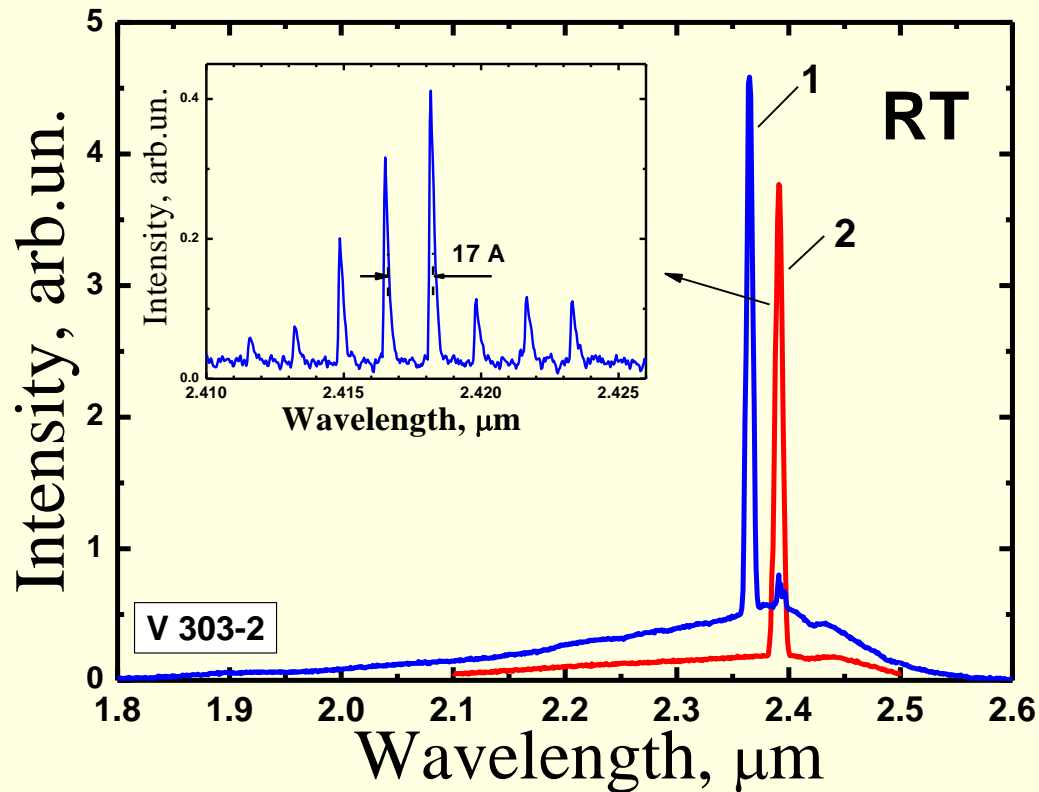


WGM лазеры среднего ИК диапазона.

(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

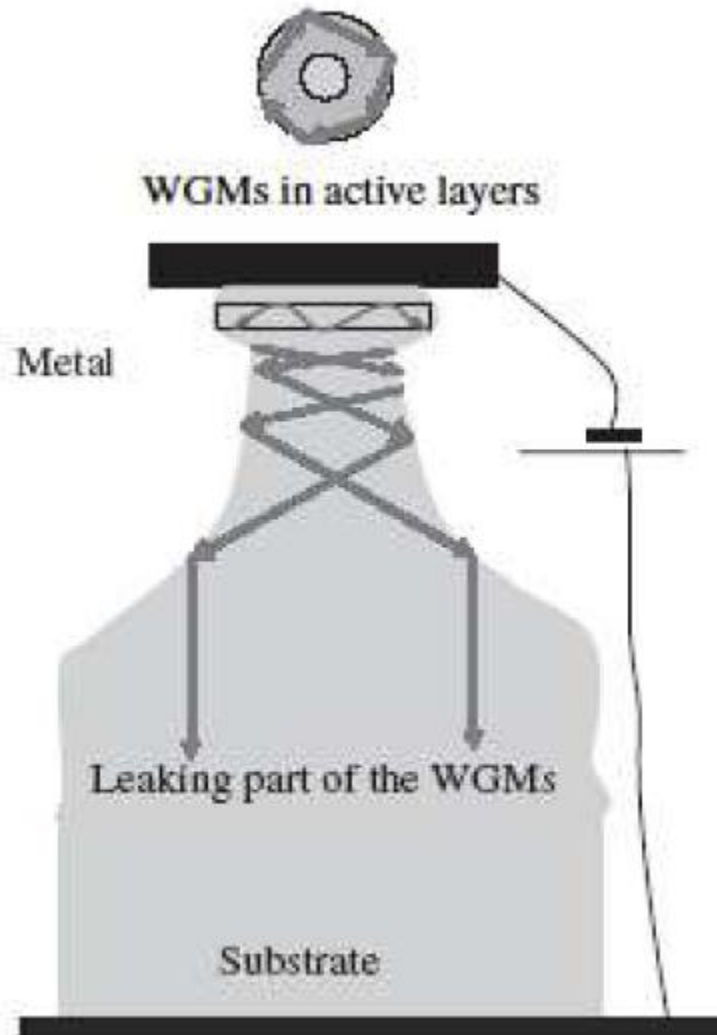
d_{mesa} (μm)	$\Delta\lambda_{\text{cal}}$ (Å)	$\Delta\lambda_{\text{exp.}}$ (Å)	d_{mesa} (μm)
300	18	18-19	292
200	25	24-27	190
100	53	51	92

Кольцевые лазеры

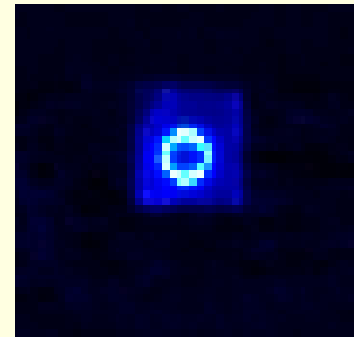
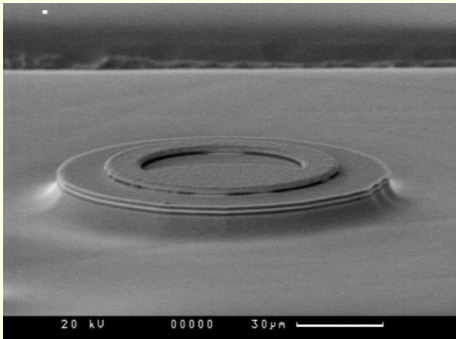
d_{mesa} (μm)	$\Delta\lambda_{\text{cal}}$ (Å)	$\Delta\lambda_{\text{exp.}}$ (Å)	d_{mesa} (μm)
300	18	18-20	293
200	25	24-27	192
100	53	52	94


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

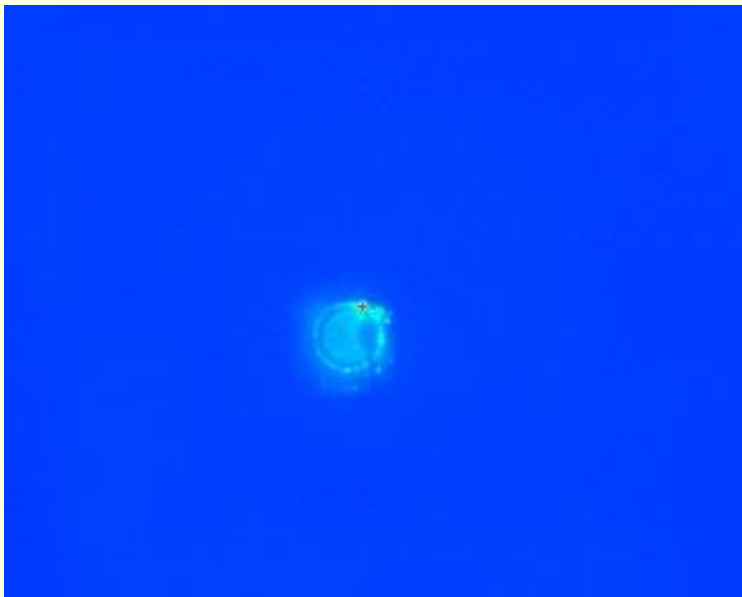
■ Вывод излучения из WGM лазеров



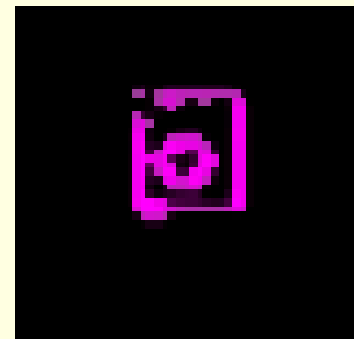
Инфракрасное изображение дискового лазера (2-2.4 μm)



Spontaneous emission



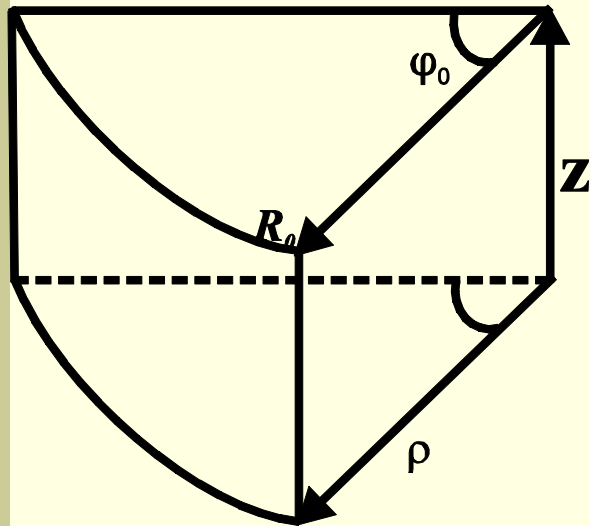
Вид со стороны эпитаксиальной
структуры



Laser emission

Вид со стороны подложки GaSb

Решение уравнения Гельмгольца для усеченного цилиндрического лазерного резонатора



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

$$E_z = Z(z)\Phi(\varphi)R(\rho)$$

$$\frac{d^2 Z}{dz^2} = -k^2 Z$$

$$\frac{d^2 \Phi}{d\varphi^2} = -\nu^2 \Phi \quad (1)$$

$$\frac{d^2 R}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{dR}{d\rho} + \left(\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\nu^2}{\rho^2} \right) R = 0$$

С граничными условиями:

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

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

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

Межмодовое расстояние у лазеров с усеченным цилиндрическим резонатором

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

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

Для четверти диска уравнение (3) сводится:

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

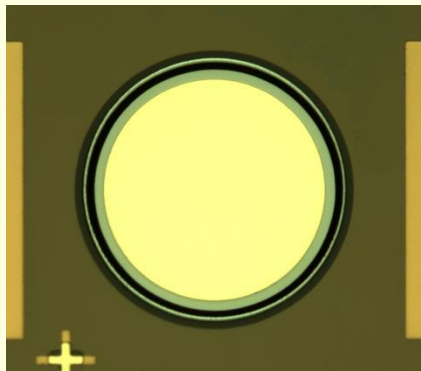
где m положительное целое число. Межмодовое расстояние для достаточно больших индексов m может быть получено из известной асимптотической оценки положения первого корня функции Бесселя: $J_m(x) = 0$ и $x = m$, следовательно: $\lambda \cong 2\pi R_0 / m$

То есть межмодовое расстояние в четверть-дисковом резонаторе удвоено :

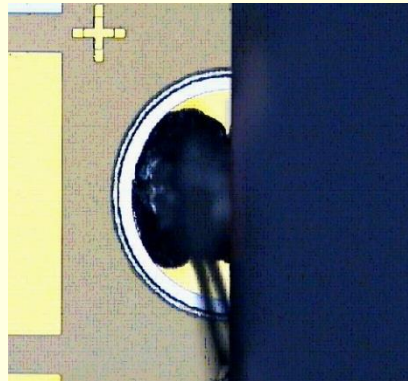
$$\Delta\lambda \cong 2\pi R_0 \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m+2} \right) \cong 2 \frac{\lambda^2}{2\pi R_0 n}$$

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 nm** для полного и половинки диска и **2.50 nm** для четверть-дискового лазера.

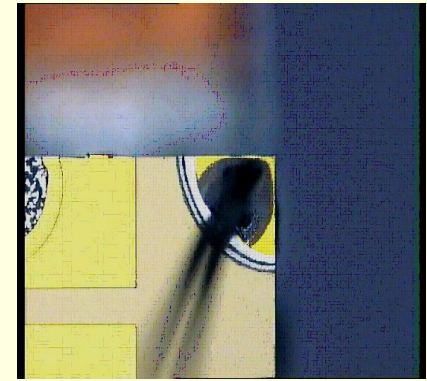
Исследуемые лазеры (2-2.4 μm).



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

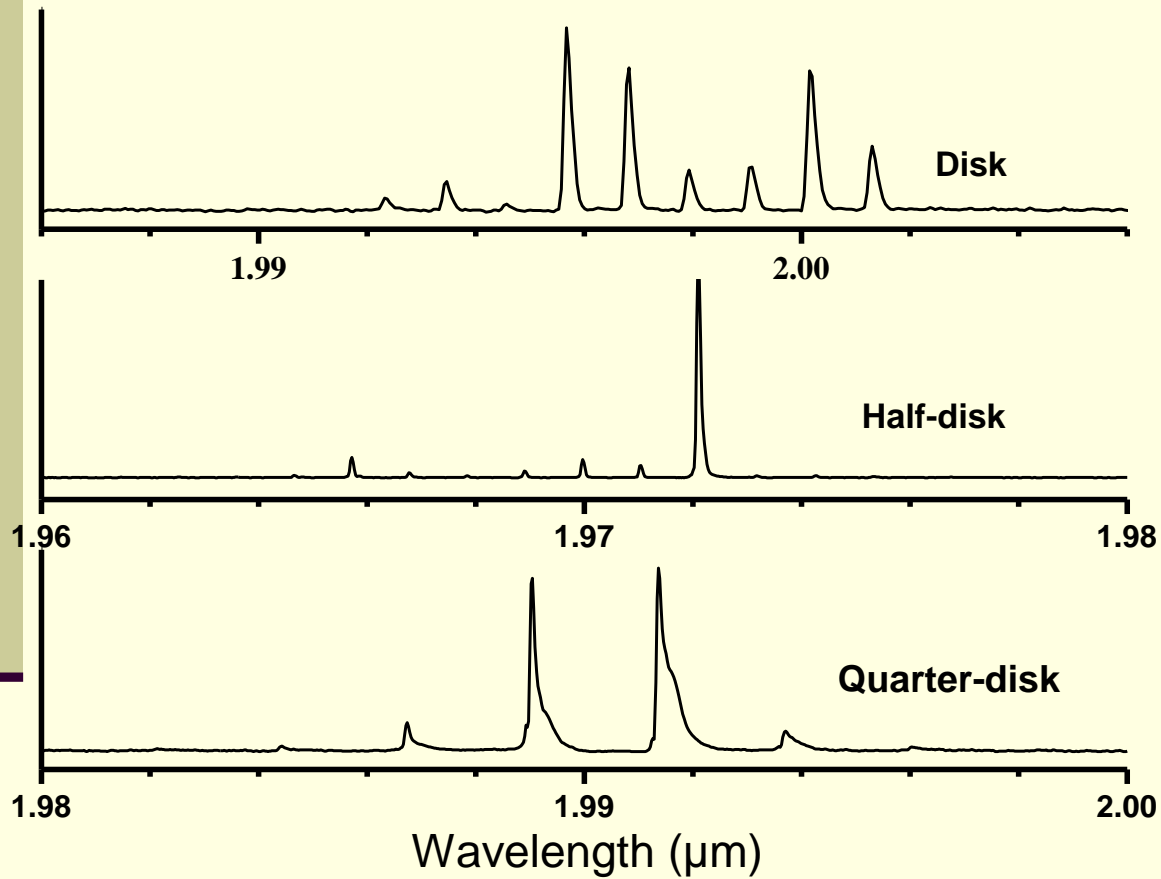


$I_{th} = 75-80 \text{ mA}$
($J_{th} = 175 \text{ A/cm}^{**2}$)



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

Спектры излучения



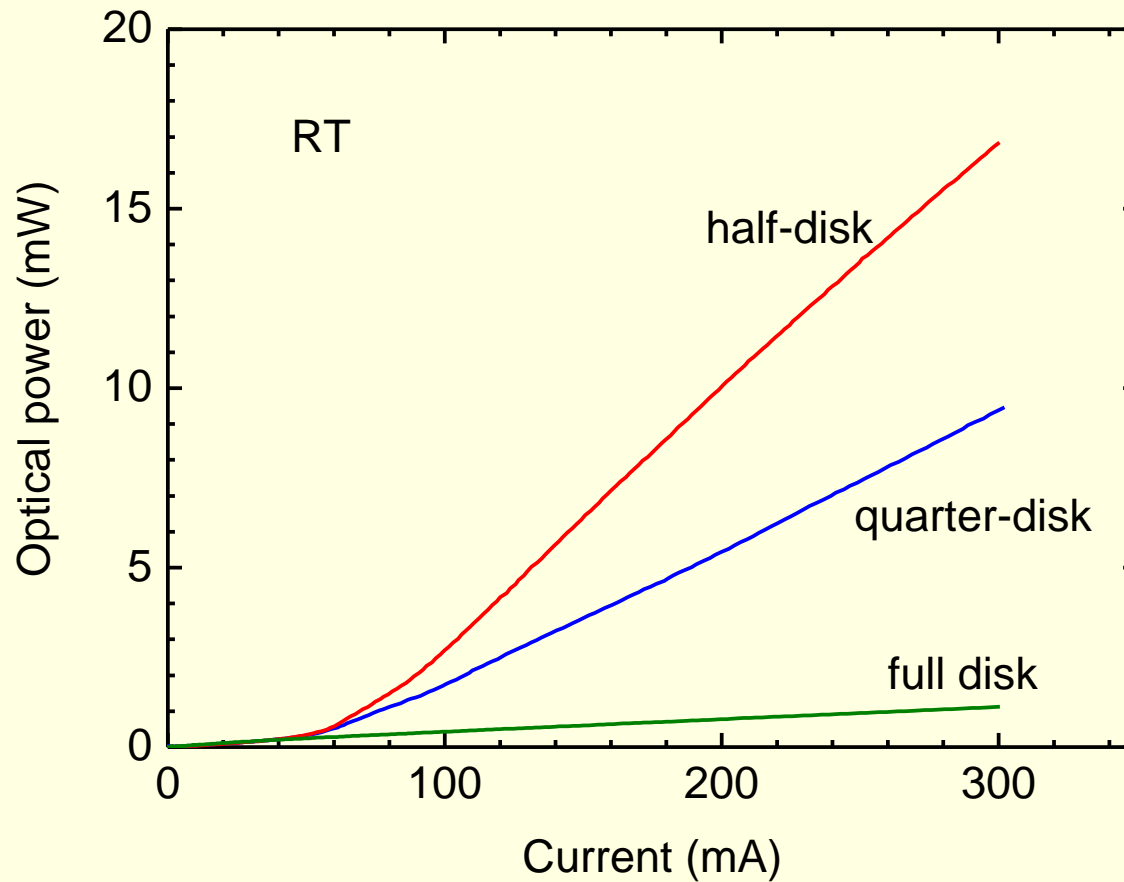
$$\Delta\lambda_{\text{exp}} = 11.7 \text{ \AA}$$

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

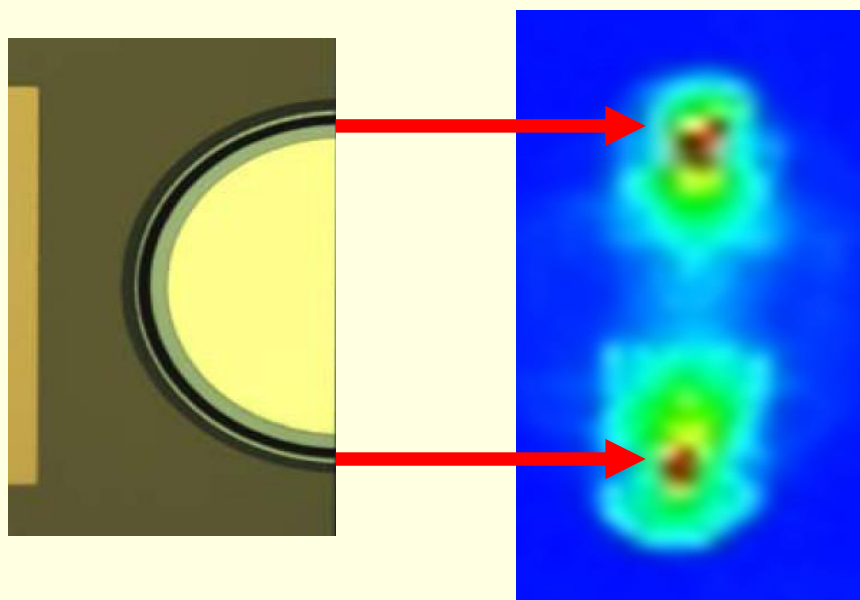
$$\Delta\lambda_{\text{exp}} = 23.5 \text{ \AA}$$

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

Зависимость мощности излучения лазеров различной геометрии диска от тока

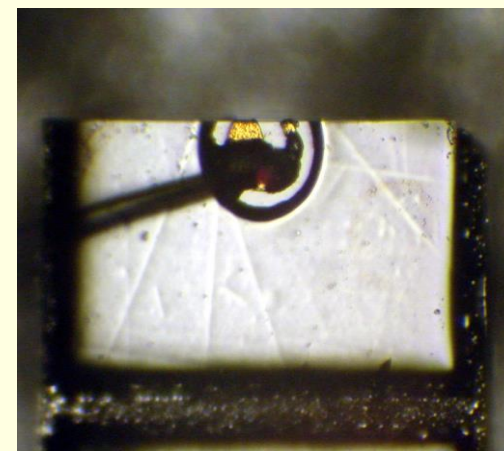
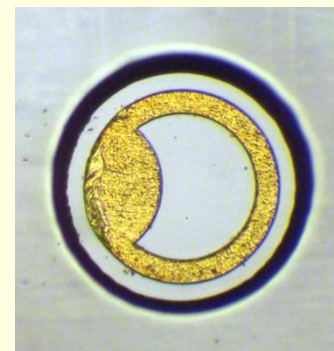
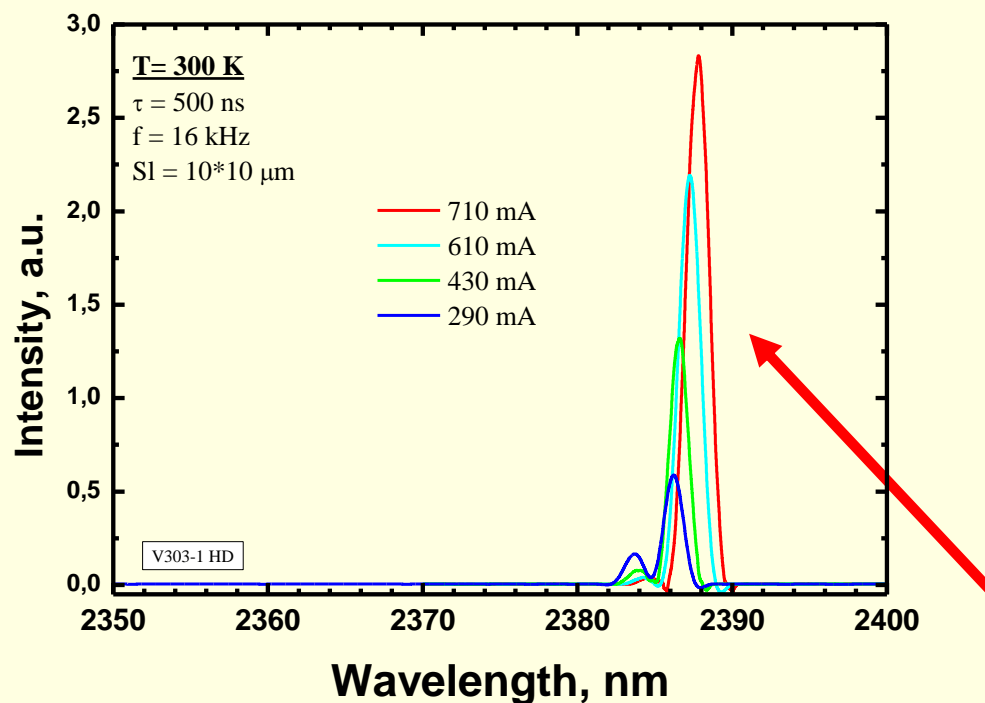


Инфракрасное изображение WGM лазера с половиной диска (со стороны скола)



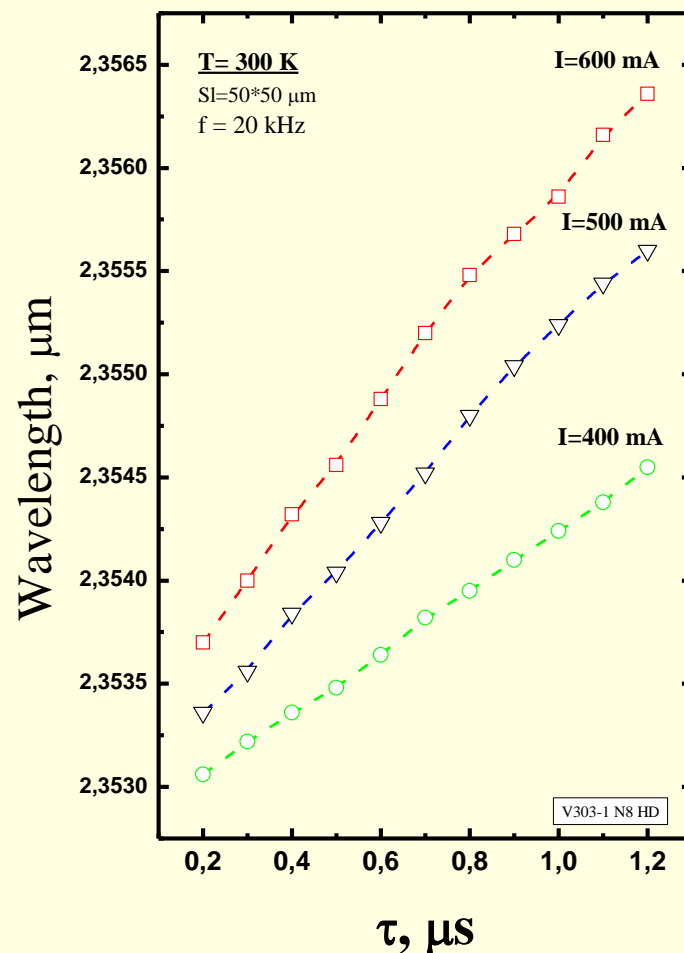
V-107#14 d=300mkm
side view

Перестраиваемый WGM лазер, работающий при комнатной температуре



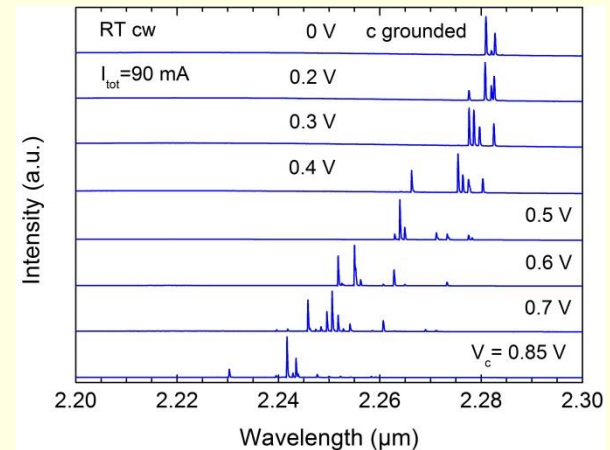
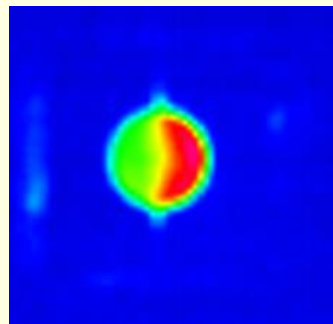
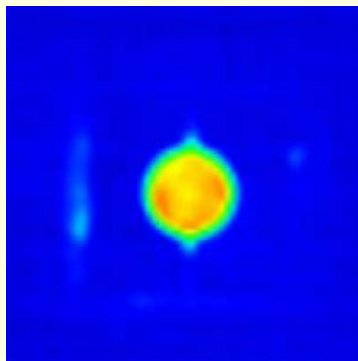
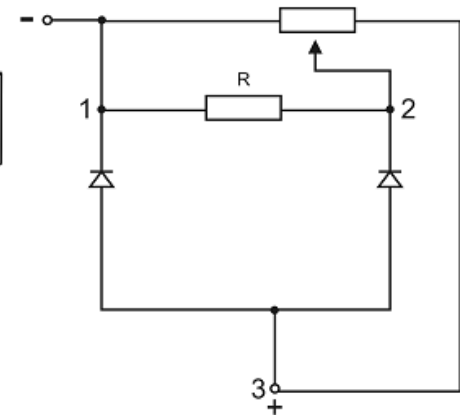
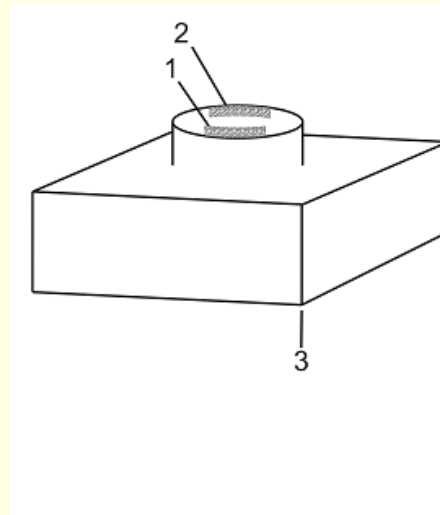
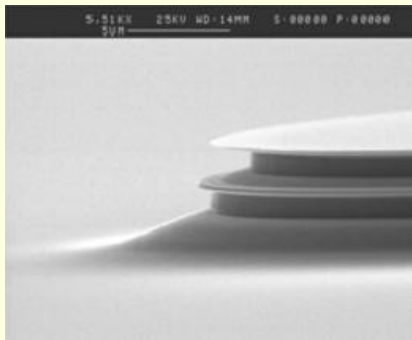
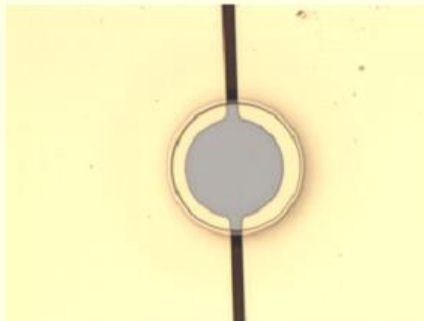
$$\Delta\lambda = 29 \text{ \AA}$$

Перестраиваемый WGM лазер, работающий при комнатной температуре



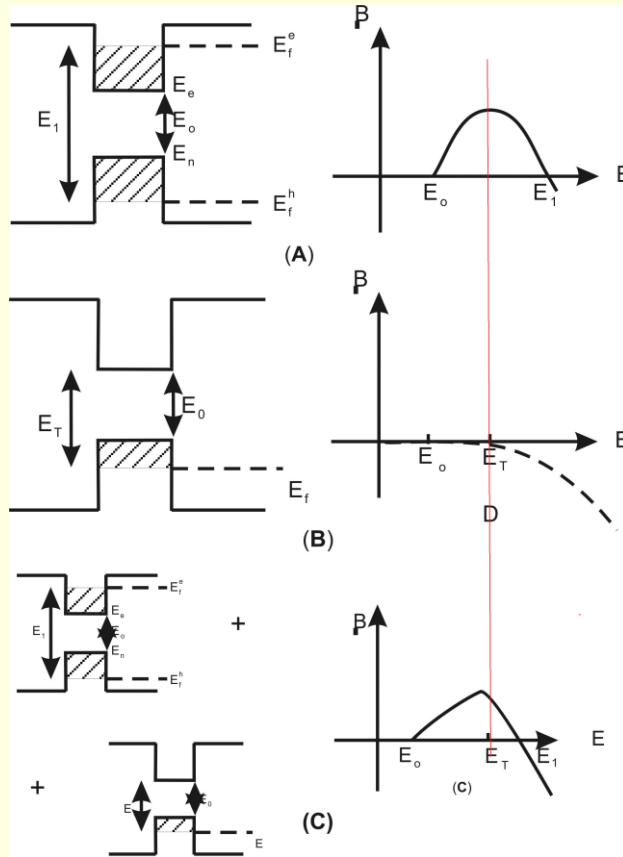
$$\Delta\lambda = 29 \text{ \AA}$$

Перестраиваемый WGM лазер с управляемым поглотителем

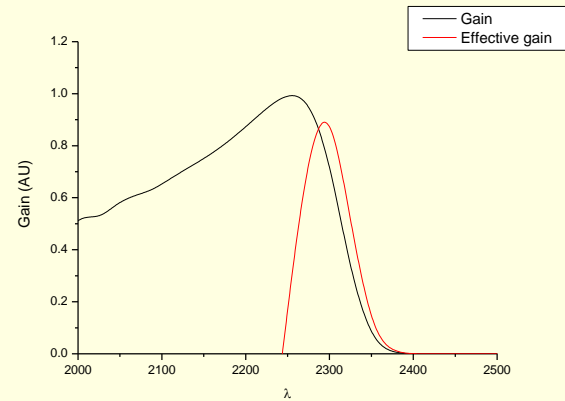


The spectra of the laser under different biases on the control contact.

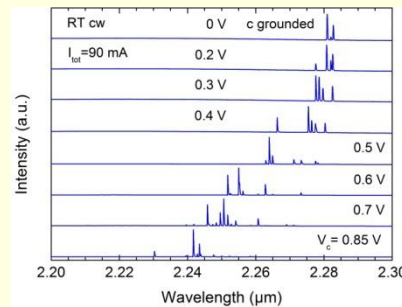
Перестраиваемый WGM лазер с управляемым поглотителем



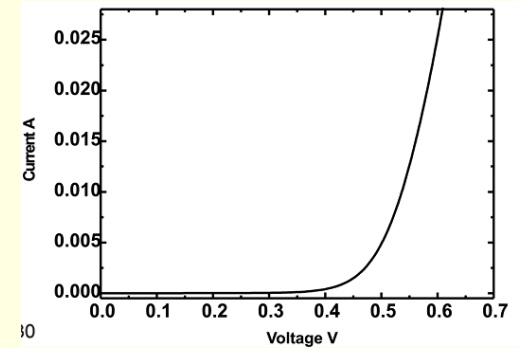
Sketches of the zone diagram and optical amplification-absorption spectra for a single-well semiconductor laser. (A) – in a lasing regime, (B) – under zero bias and (C) – total amplification spectrum when the control contact is grounded.



Gain (dash line) and effective gain (solid line) of the structure shown in Fig. 1, calculated for carrier density 2×10^{12} in the amplifying sector and 8×10^{11} holes density in absorbing sector.



The spectra of the laser under different biases on the control contact.



I-V characteristic.

Заключение

- 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

$$\Delta\lambda_{WGM} = \frac{\lambda^2}{2\pi Rn}$$

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.
- Созданы перестраиваемые по частоте WGM лазеры за счет нагрева короткими импульсами тока (0.2-1. μ s). Диапазон перестройки лазеров 30 А.
- Созданы перестраиваемые по частоте WGM лазеры с управляемым поглотителем. Диапазон перестройки таких лазеров 400 А.