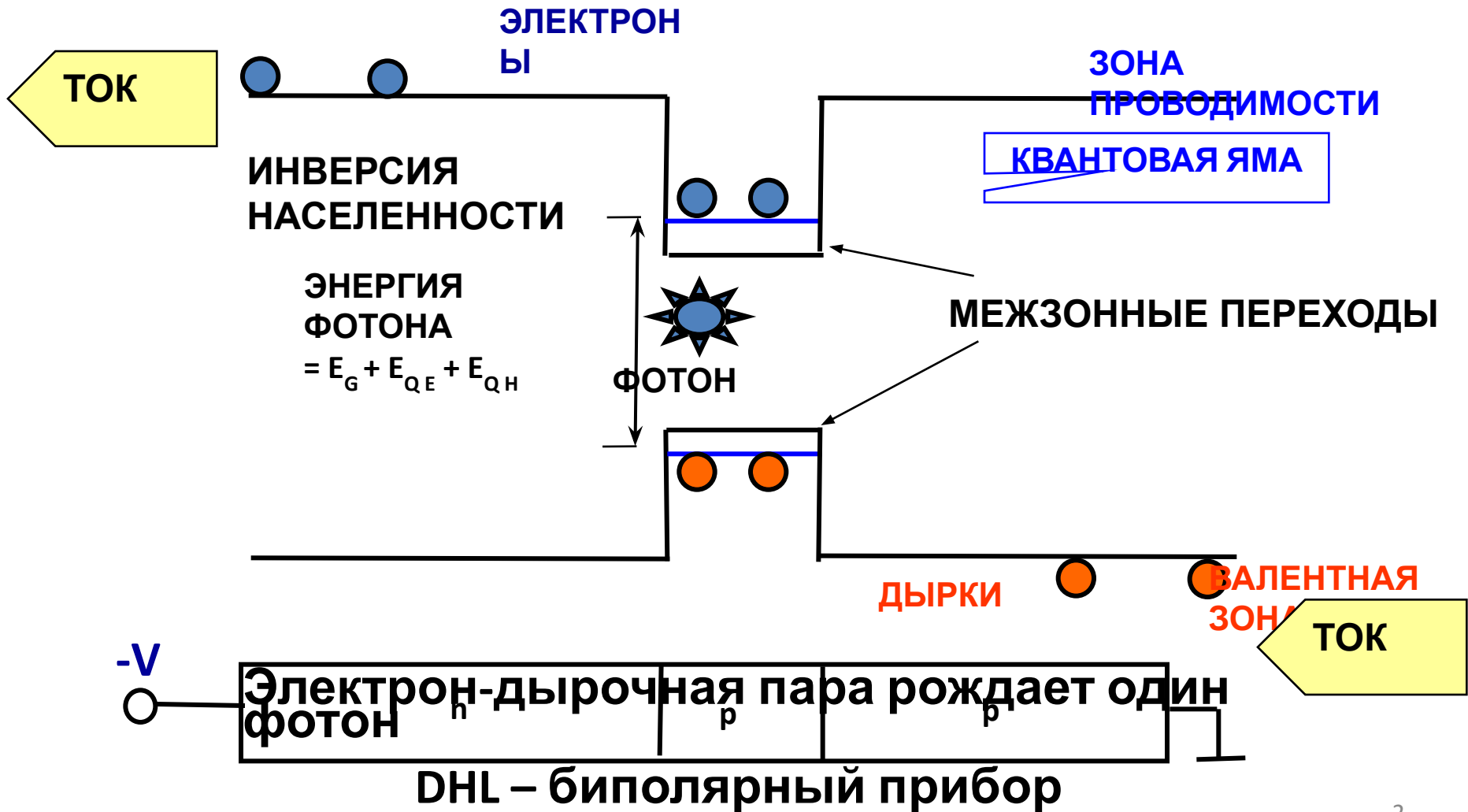


КВАНТОВЫЕ КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ

Ластовкин АА

Лазер на двойной гетероструктуре: МЕЖЗОННЫЕ ПЕРЕХОДЫ

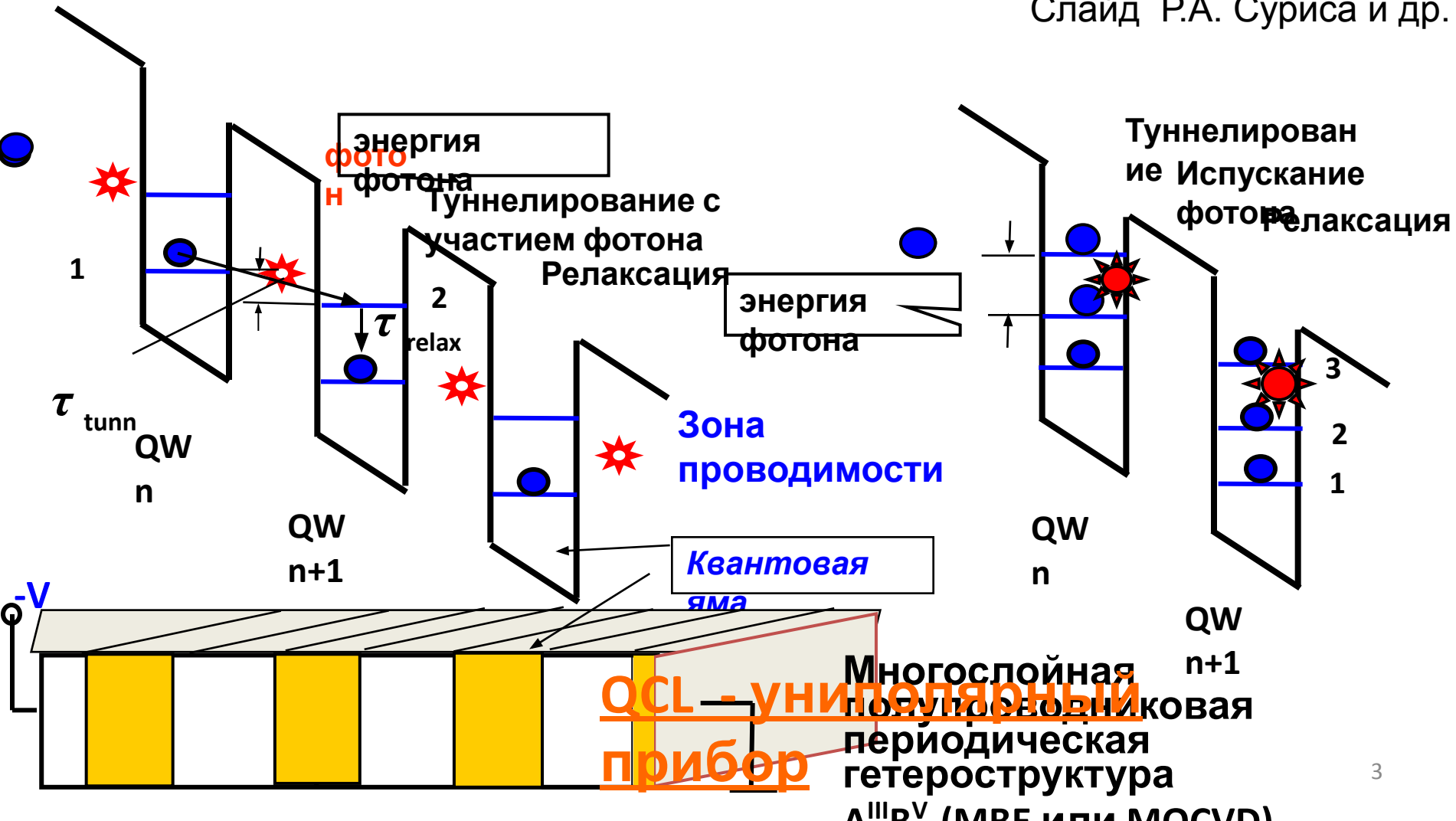


Квантовый каскадный лазер:

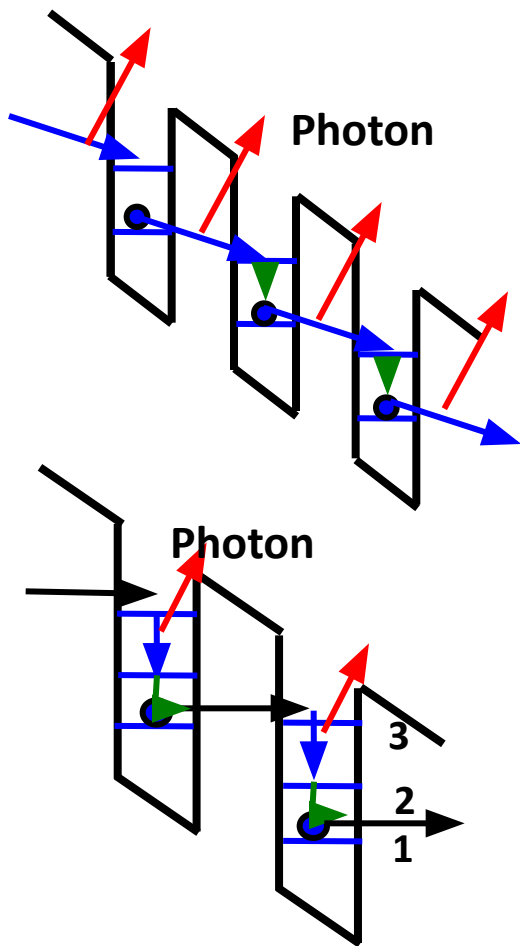
межподзональные переходы

Исходная концепция: Р.Ф.Казаринов, Р.А.Сурис, ФТП, т.5, с.797 (1971)

Слайд Р.А. Суриса и др.



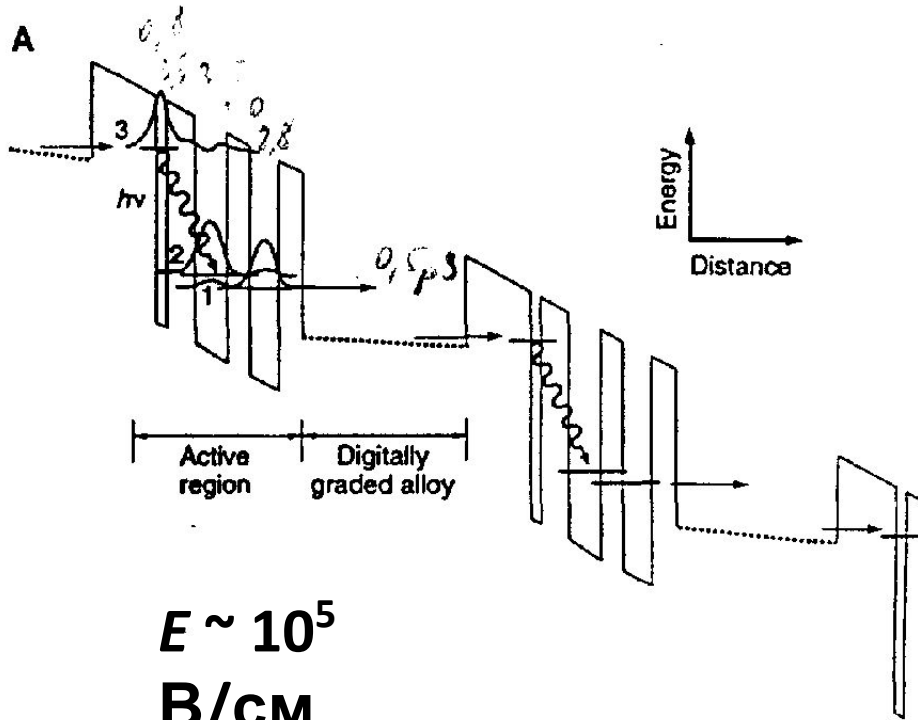
Преимущества ККЛ



- Энергии электронных уровней в структуре с квантовыми ямами зависят от толщин слоев и от смещения
 - ▶ Частота лазерного излучения зависит от толщин слоев
 - ▶ Частота лазерного излучения перестраивается приложенным напряжением
- Один электрон, проходя через каскадную структуру, рождает много фотонов
 - ▶ Предпосылки для высокой выходной мощности
- Возможность создания инверсии населенности при $k_B T > \hbar \omega$
 - ▶ Длинноволновое лазерное излучение при комнатной температуре

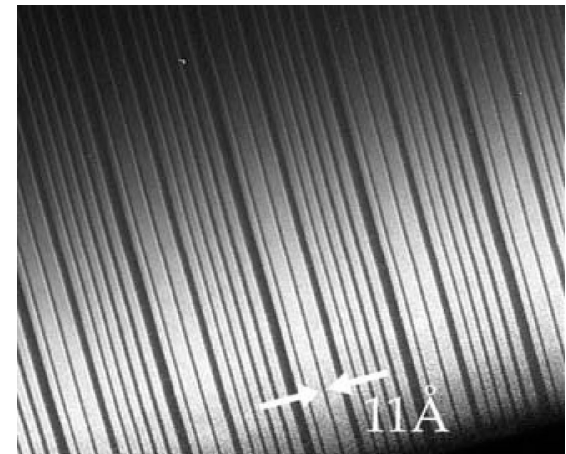
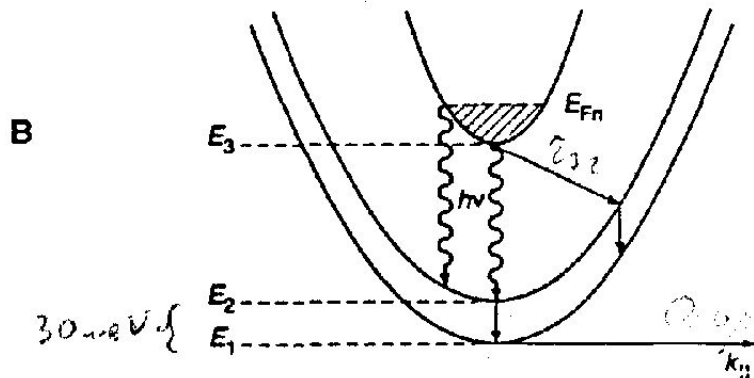
Первый ККЛ ($\lambda = 71$ ТГц, $P = 8$ мВт, $T_{\text{макс}} = 90$ К)

J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson, A. Y. Cho, Science 264, 553

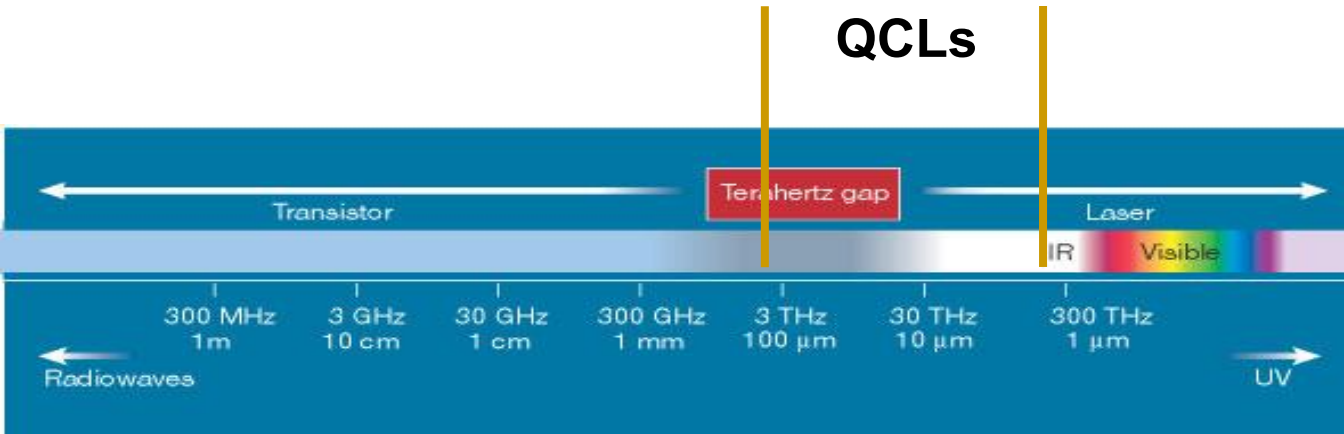


Диэлектрический волновод
с обкладками из $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$,
 $w = 12$ мкм, $L \leq 700$ мкм
 $\Gamma = 0.46$, $n = 3.26$, $R = 0.27$

Пример ККЛ на основе A^{III}B^V



Приложения ККЛ

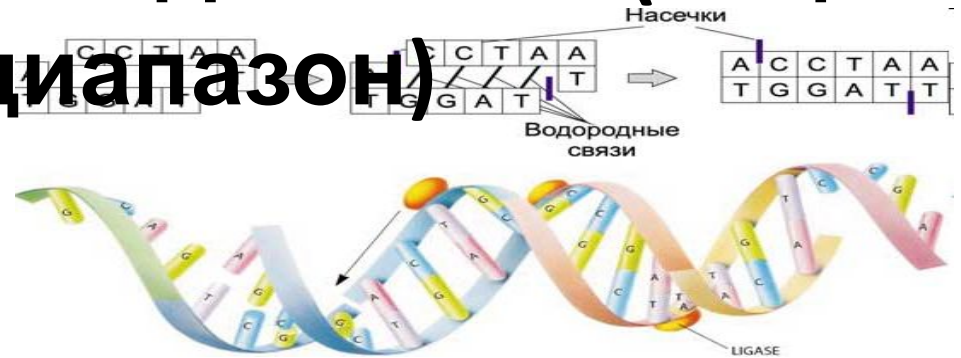


λ , μm	2.5	\div	150
$\hbar\omega$, meV	500	\div	8
f , THz	120	\div	2

Средний ИК

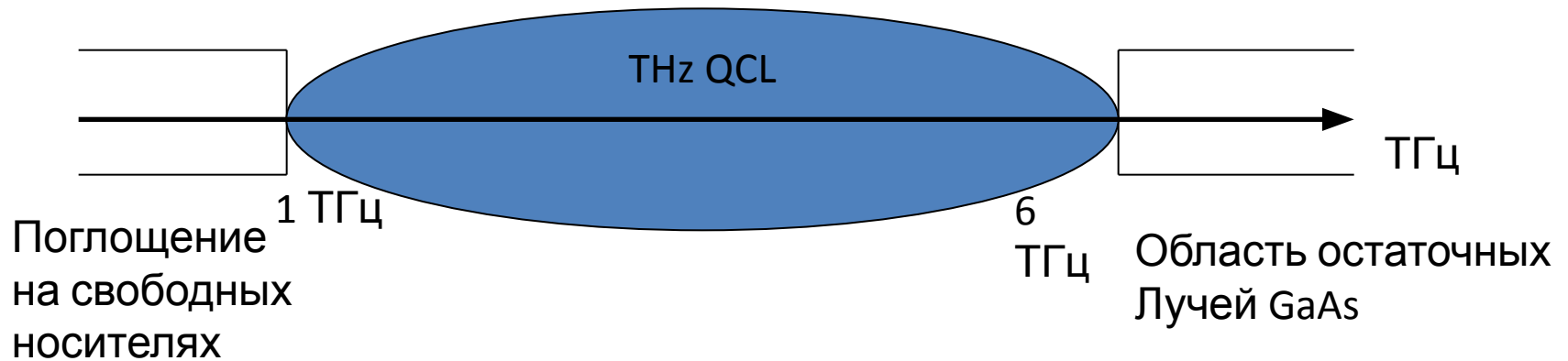
- 23 \div 85 THz – fingerprint region of trace gases (NH_4 , CO, N_2O , ...)
 - ▶ Датчики контроля загрязнения окружающей среды
 - ▶ Контроль технологических процессов в промышленности
 - ▶ Медицина: анализ выдоха, ранняя диагностика язвы, рака *etc*
- 23 \div 37 THz, 60 \div 100 THz – atmospheric windows
 - ▶ Оптическая связь (через туман, дождь, дым – благодаря длинным волнам)
 - ▶ Круиз-контроль в автомобилях

Дальний ИК диапазон (ТГц диапазон)



1 ÷ 6 THz

- Переходы с участием мелких примесей
- Циклотронный и парамагнитный резонансы
- Вращательные и колебательные возбуждения в жидкостях, газах и биологических объектах (колебания коллективных мод ДНК и белков)



- S.W. Smye, J.M. Chamberlain, A.J. Fitzgerald and E. Berry // Phys. Med. Biol. – 2001. – Vol.46. – P.R101-R112.

Волноводы

Дальний ИК

Средний ИК

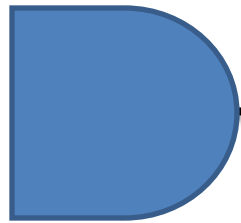
1 ТГц

6
ТГц

9
ТГц

120
ТГц

ТГц



Двойной
металлический
волновод



Область остаточных
Лучей GaAs

1. Диэлектрические волноводы
2. SL-SP

SI-SP – semi-insulating surface-plasmon

Поглощение
на свободных
носителях

ККЛ для газовой спектроскопии:

DFB

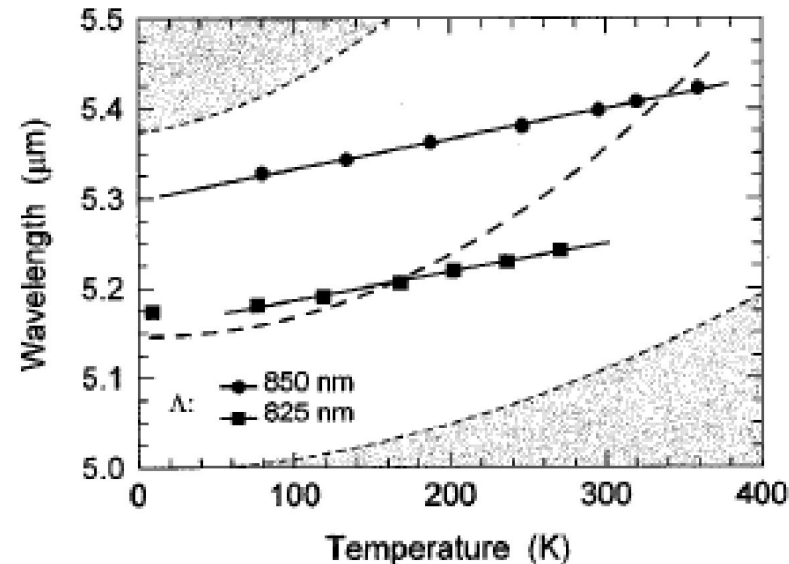
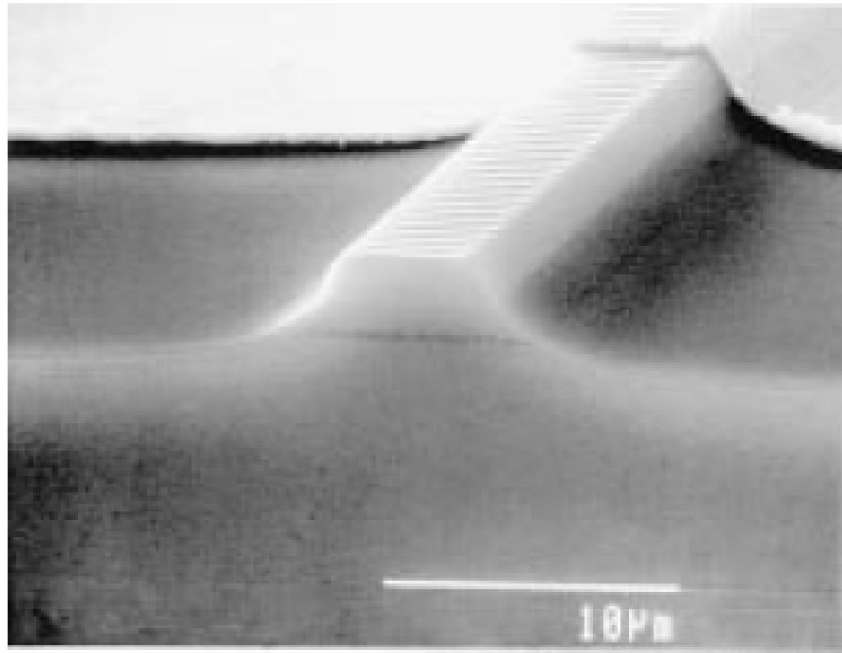
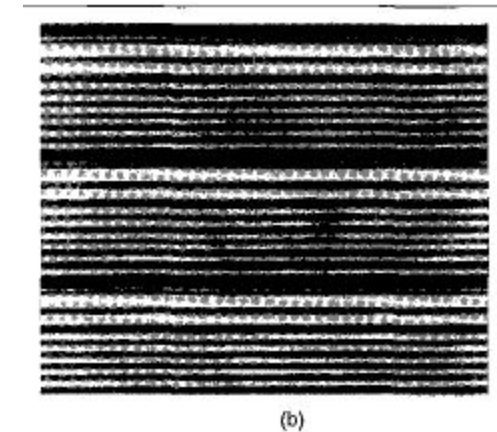
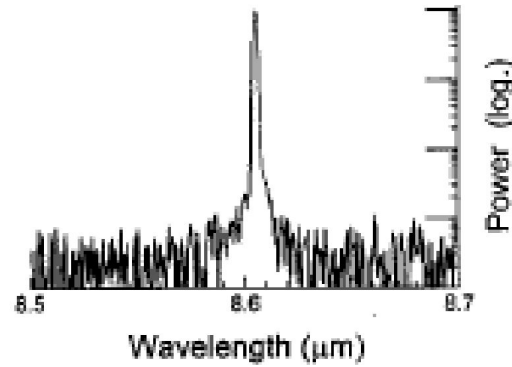
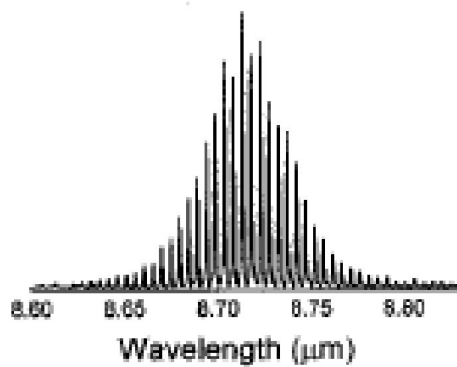


Fig. 2. Scanning electron microscope image of the front facet and portion of a QC-DFB laser ridge with a top grating. The laser emitted at $\lambda \sim 5.4 \mu\text{m}$ for a grating period of 850 nm [9].

IEEE J. Quant. Electr.
V.38, P.569 (2002)

Применения ККЛ: газовая спектроскопия

IEEE J. Quant. Electr.
V.38, P.582 (2002)

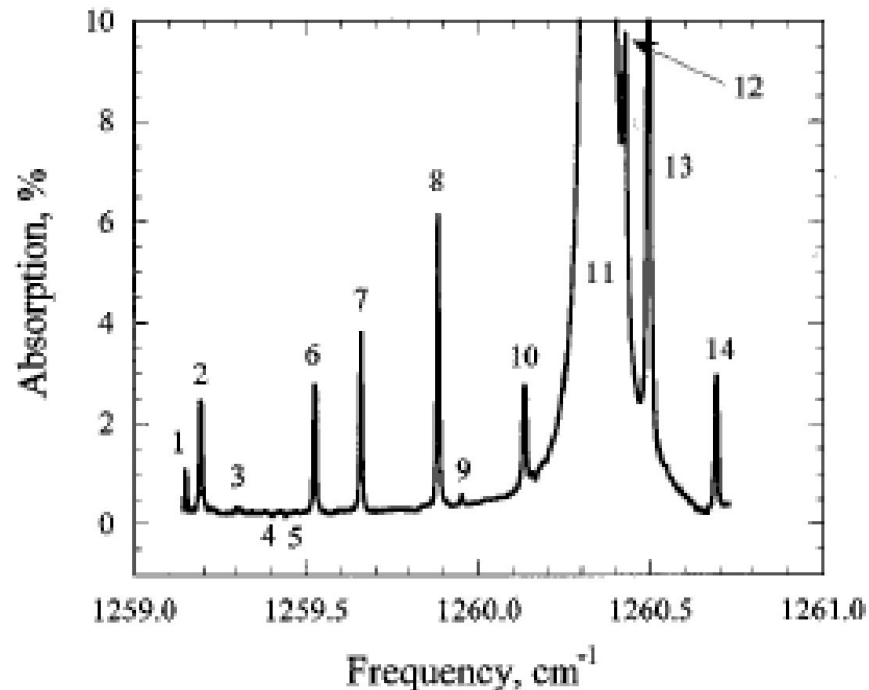
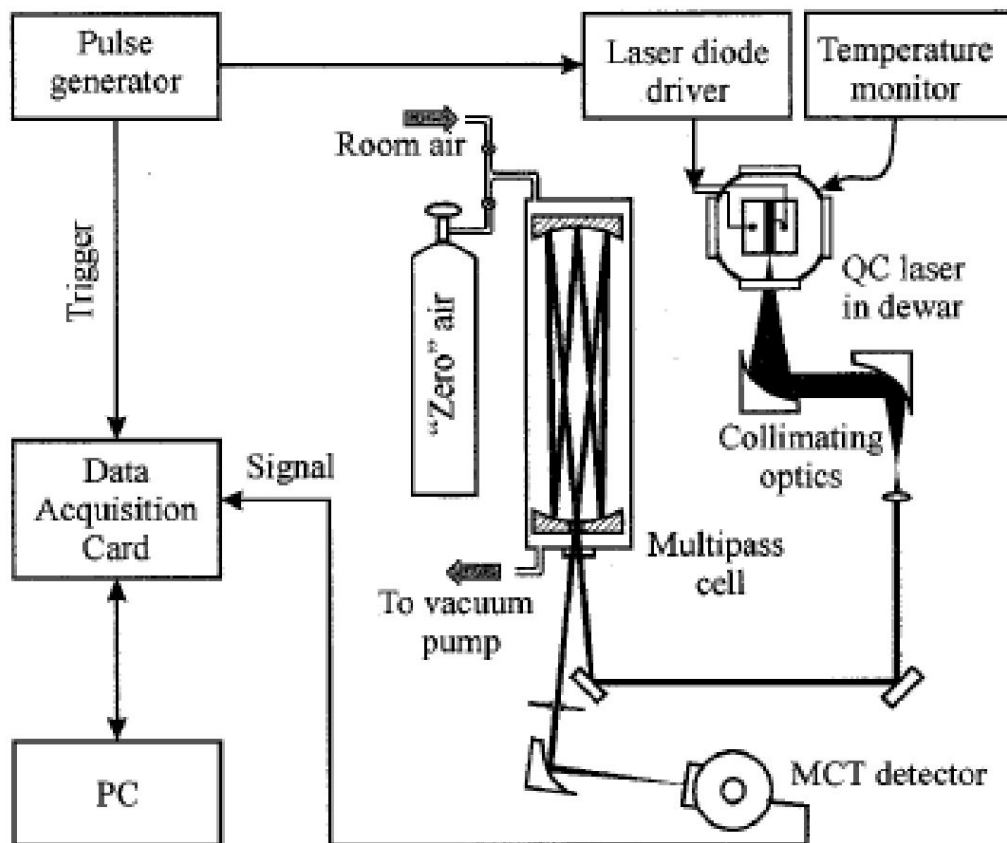
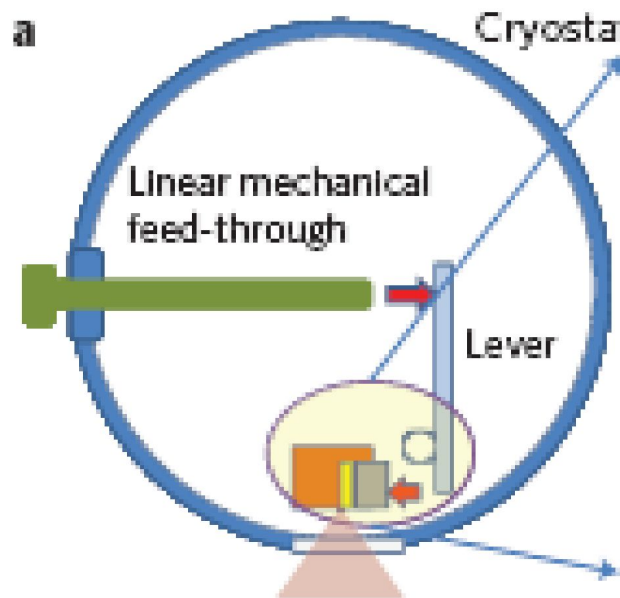
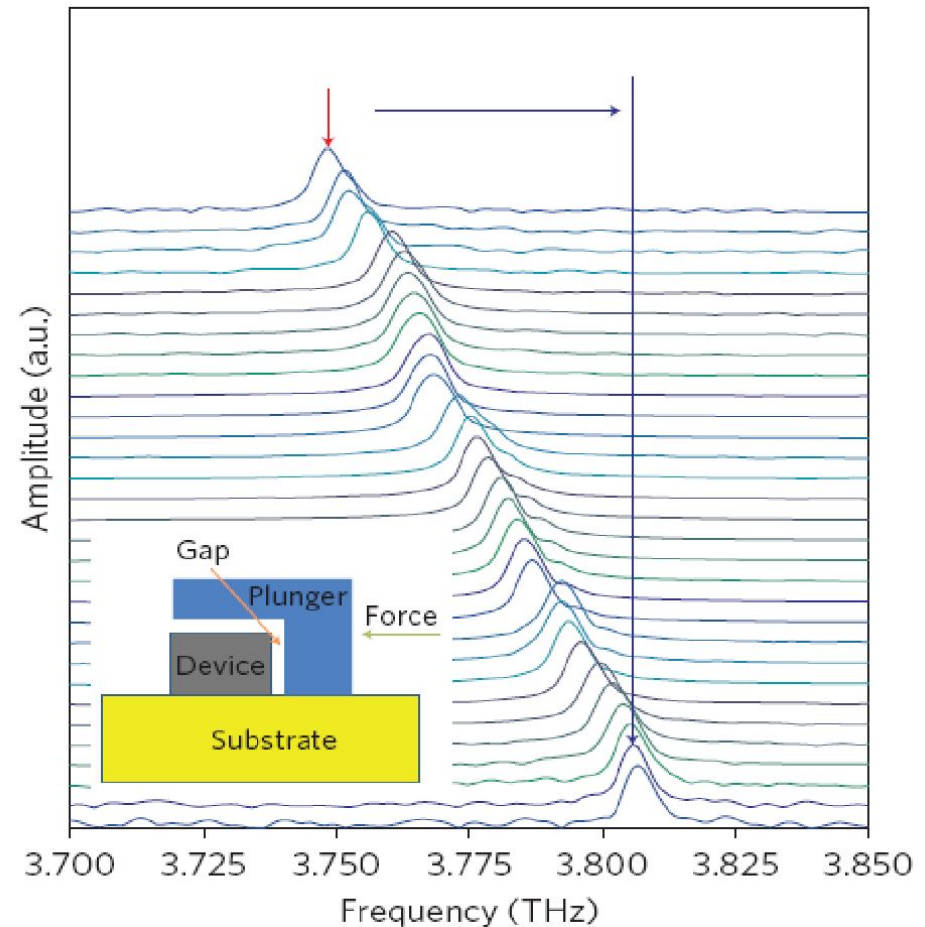


Fig. 2. An example of an absorption spectrum of room air obtained with a gas sensor depicted in Fig. 1. The assignment of the stronger spectral lines is shown: H_2^{16}O —1, 11, 13; N_2O —2, 3, 10; CH_4 —6, 7, 8, 14; H_2^{18}O —9; HDO —12; and CO_2 in the reference zero-air that appears as a negative absorption—4, 5.

Перестройка частоты



a 67 GHz continuous blueshift tuning

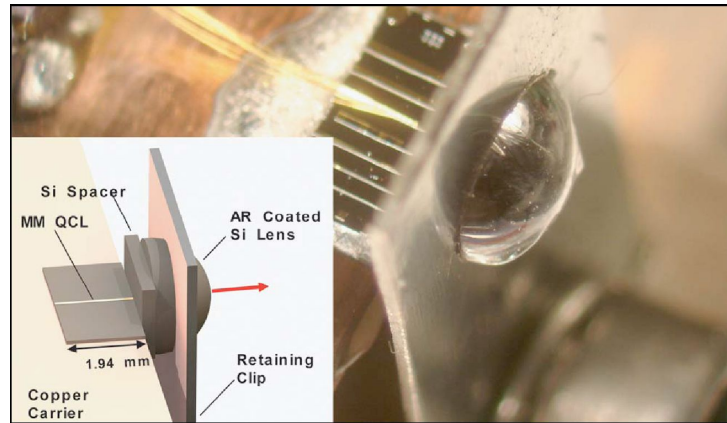
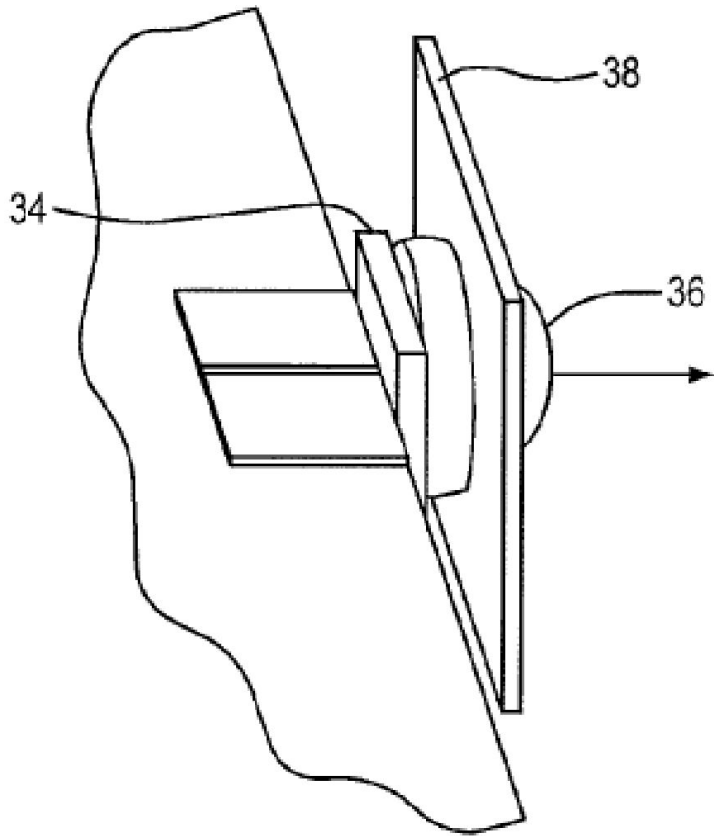


Линзы

34 – spacer

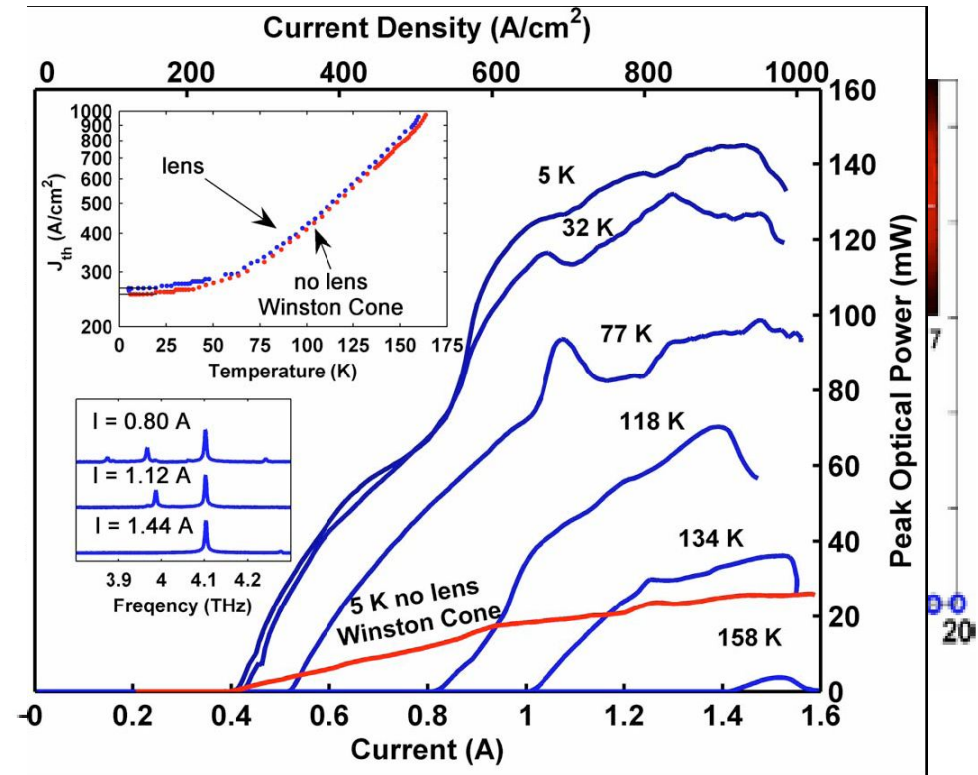
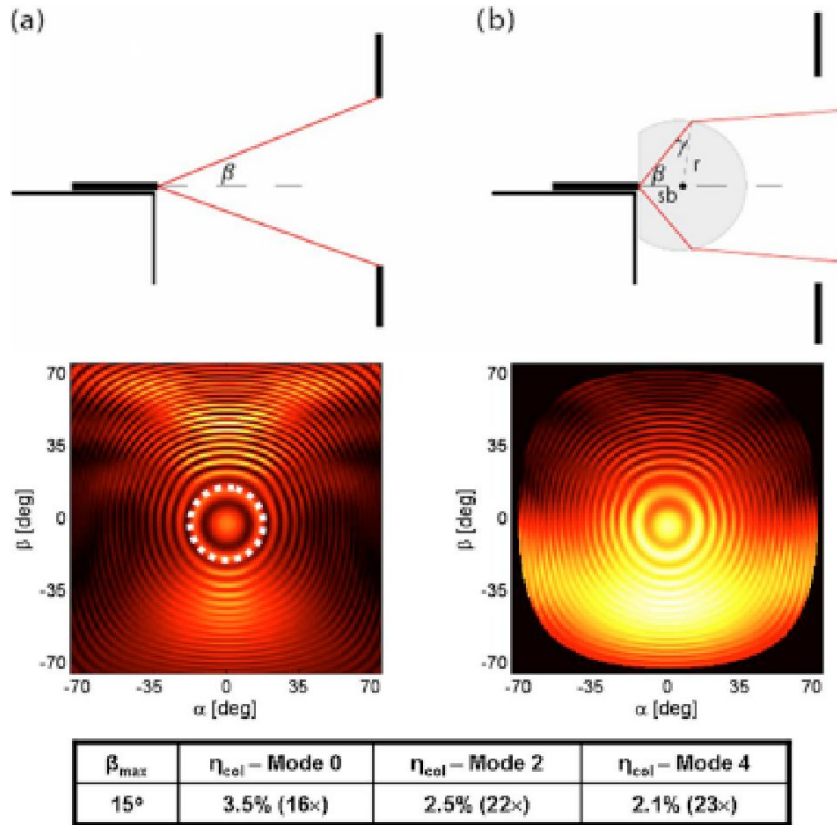
36 – lens

38 – retaining clip



Qing Hu, Alan W. Min Lee, Sushil Kumar,
OPTICS LETTERS / Vol. 32, No. 19 / October 1, 2007

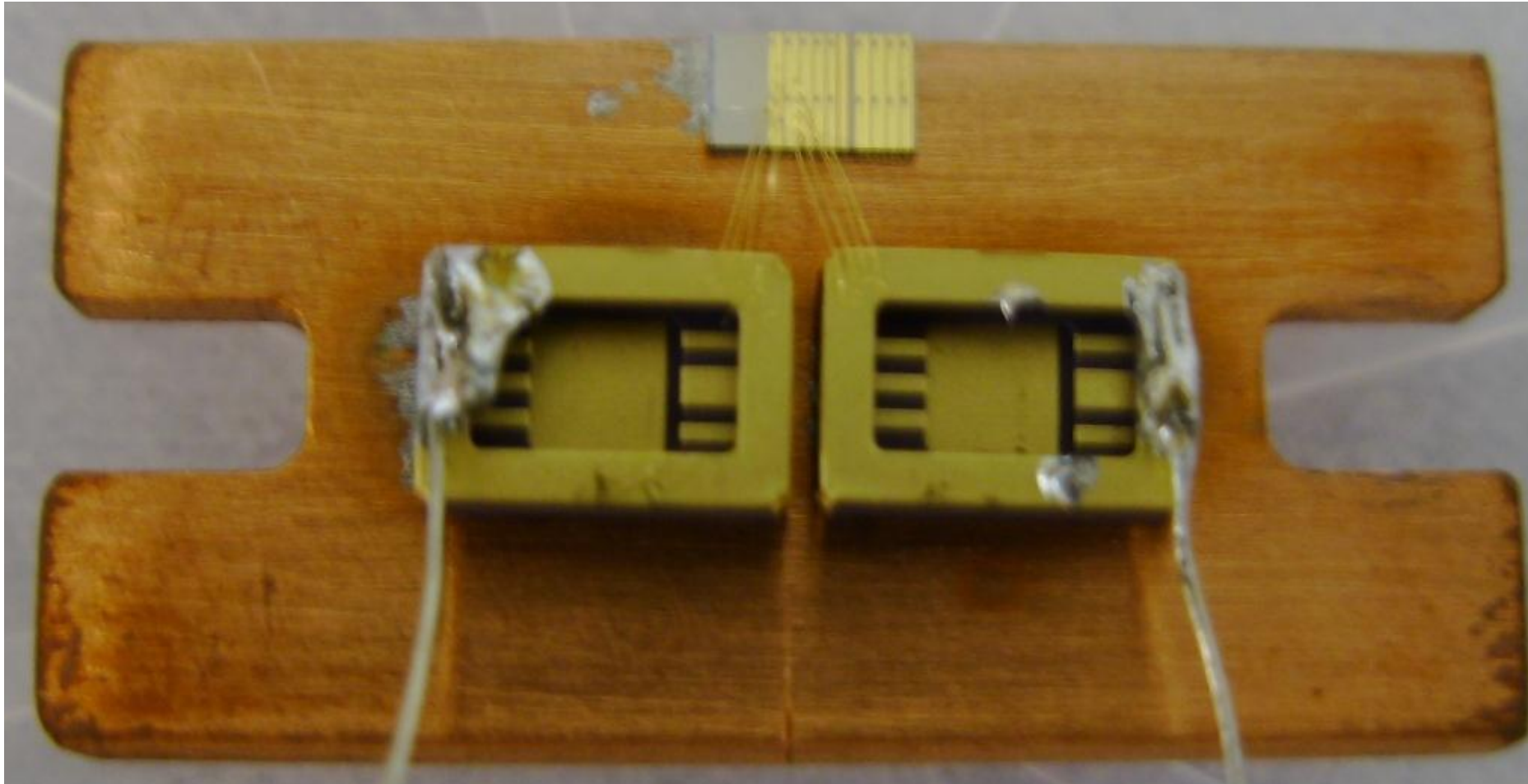
ЛИНЗЫ



Frequency 4.1 THz

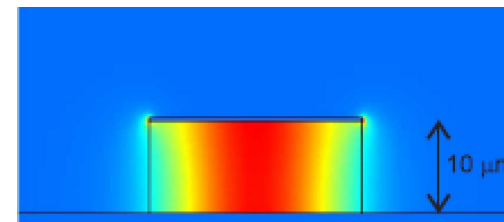
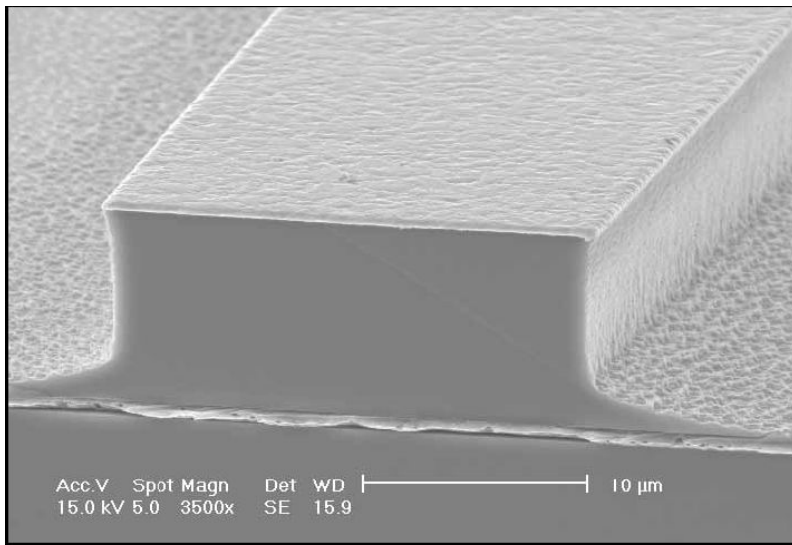
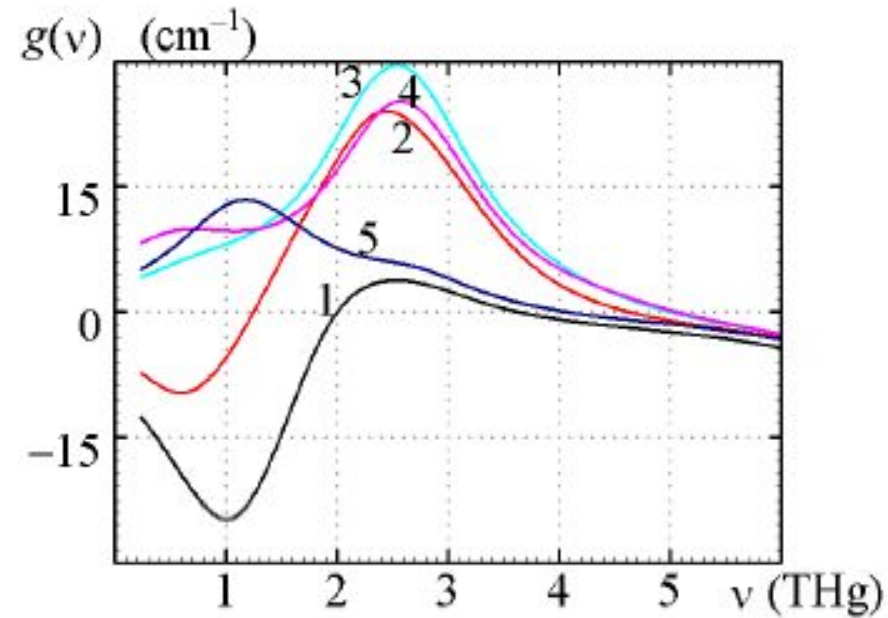
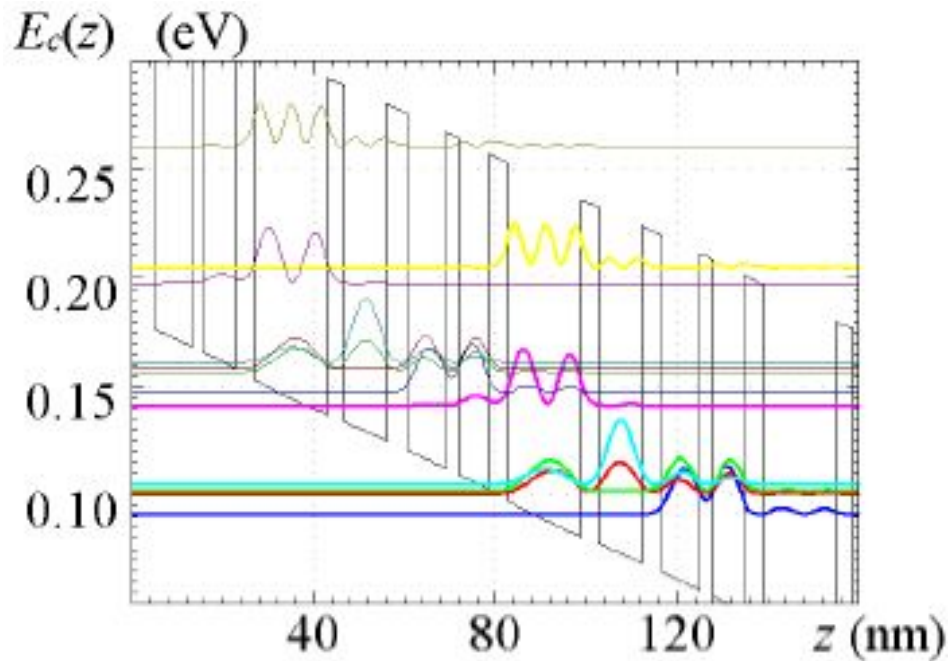
Qing Hu, Alan W. Min Lee, Sushil Kumar,
OPTICS LETTERS / Vol. 32, No. 19 / October 1, 2007

ККЛ в ИФМ РАН



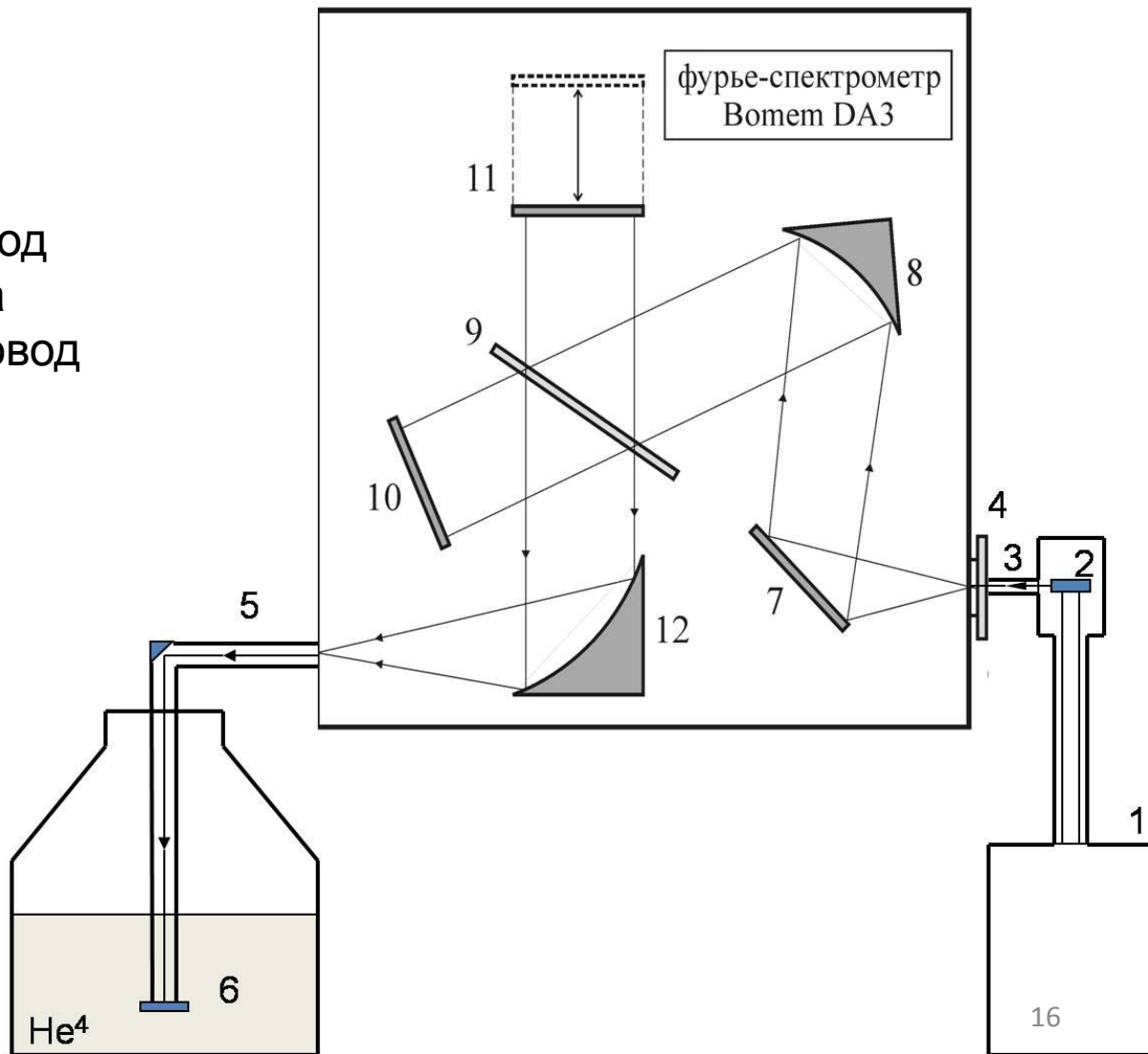
***Фото ТГц ККЛ фирмы TRION (г.Темпе, Аризона); $L \sim 1.5$ мм,
 $w \sim 100$ мкм. Ю.Г.Садофьев***

Квантовые каскадные лазеры

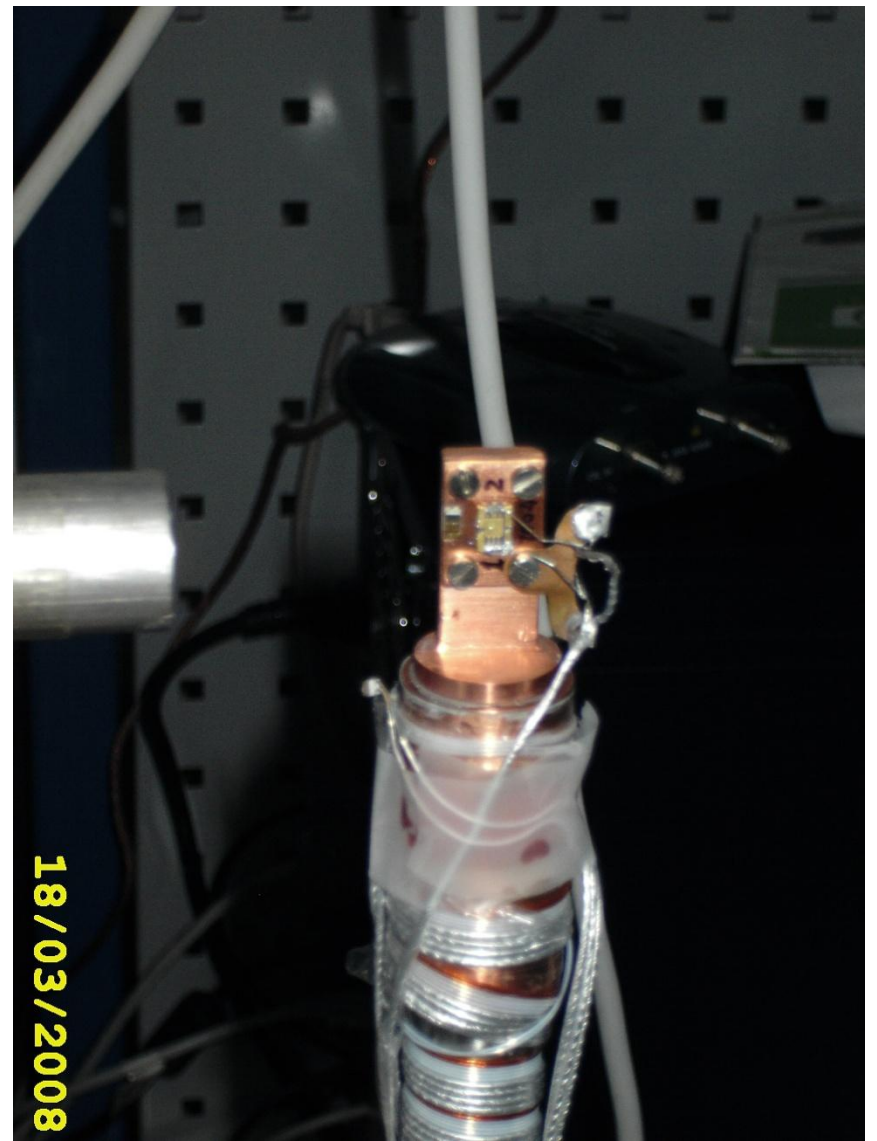
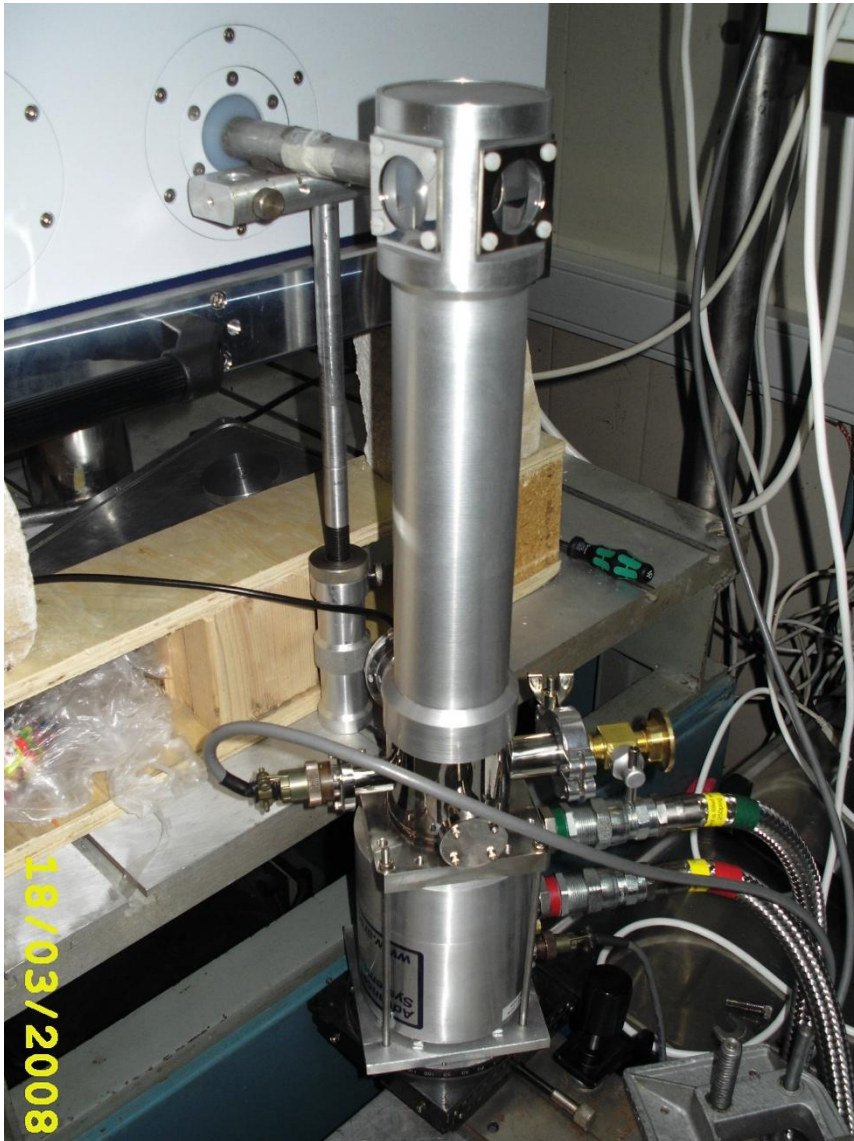


Оптическая схема установки

- 1 – криостат замкнутого цикла
- 2 – лазер
- 3 – входной вакуумный волновод
- 4 – входное окно спектрометра
- 5 – выходной вакуумный волновод
- 6 – Ge/Ga приемник
- 7 – поворотное зеркало
- 8 – сферическое зеркало
- 9 – кварцевый делитель пучка
- 10 – неподвижное зеркало
- 11 – сканирующее зеркало
- 12 – сферическое зеркало

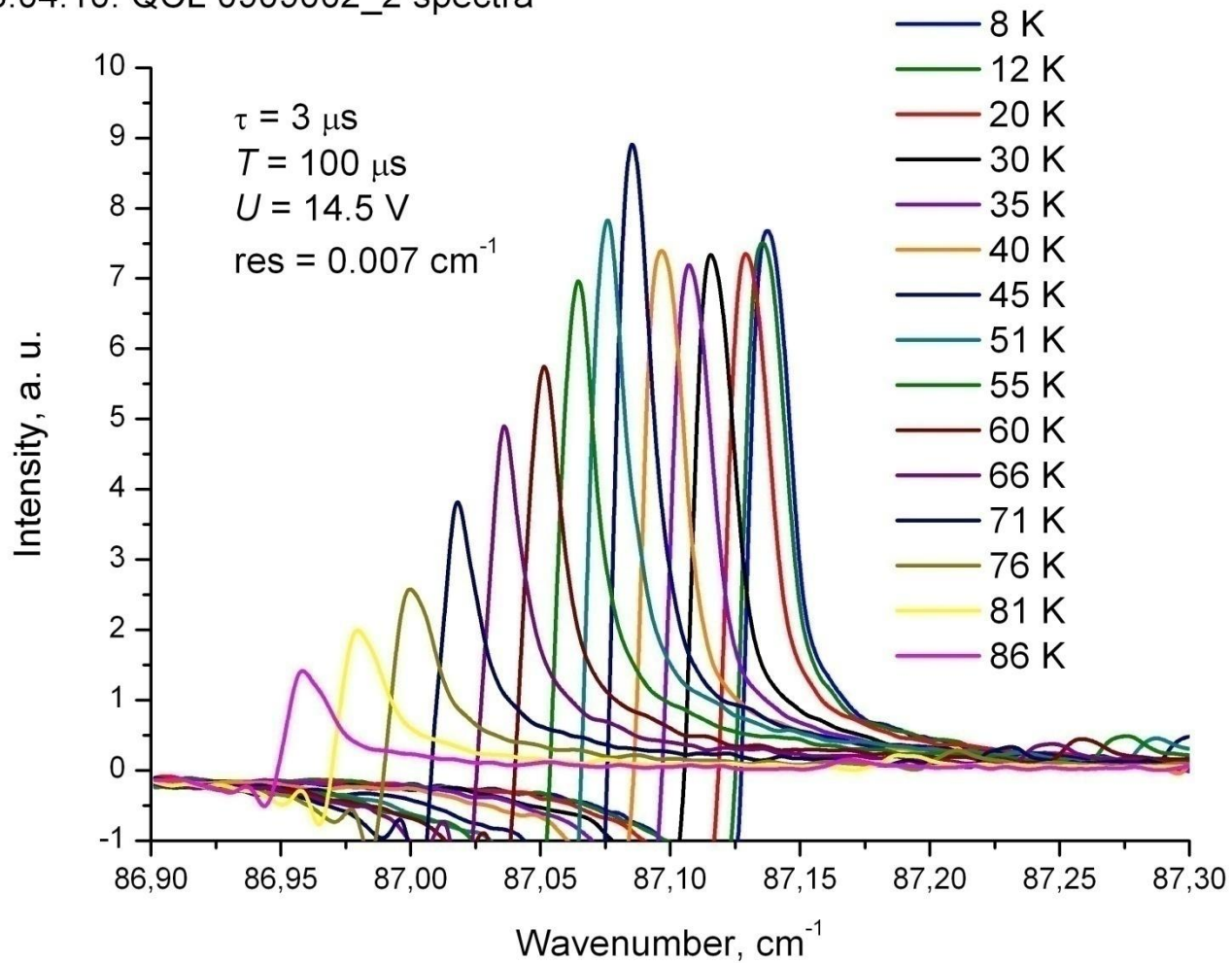


ККЛ в ИФМ РАН



Спектры ККЛ

08.04.10. QCL 0909002_2 spectra



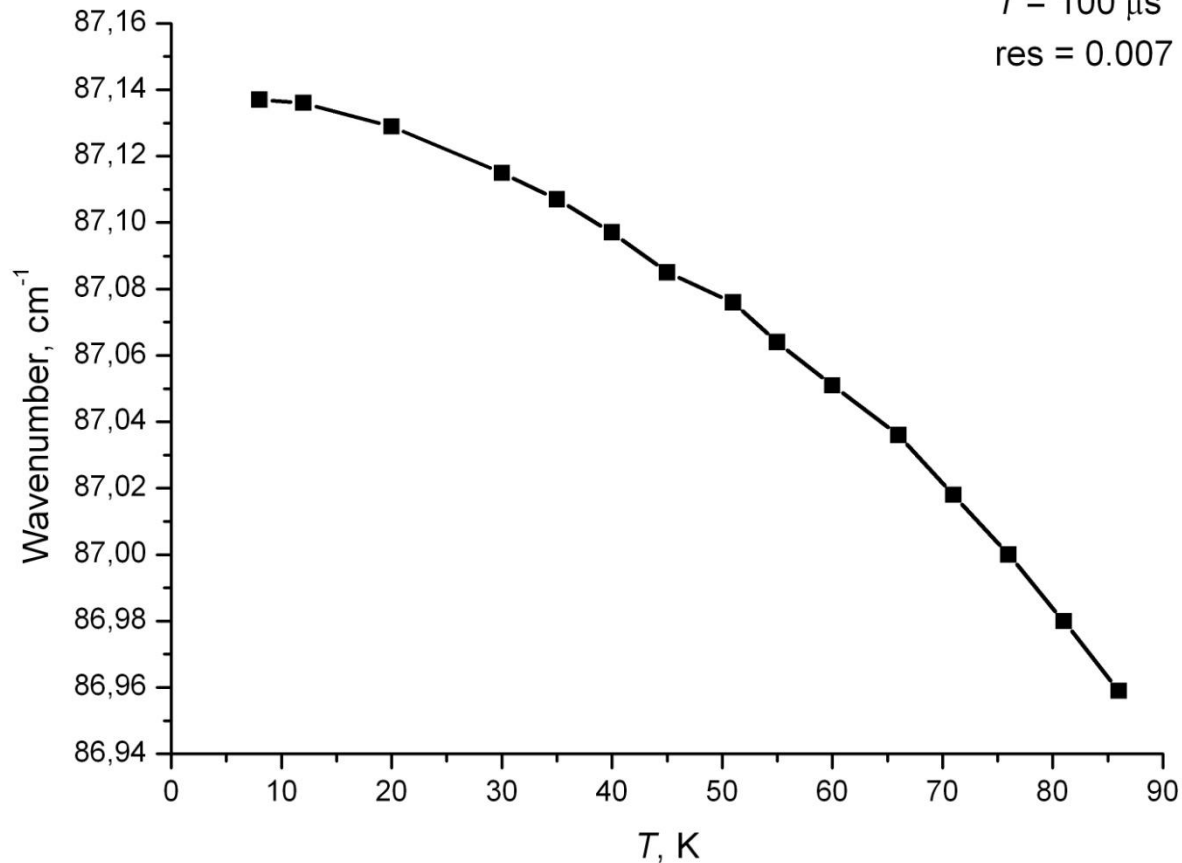
Зависимость частоты излучения от температуры

08.04.10. QCL 0909002_2. $f(T)$ dependence

$\tau = 3 \mu\text{s}$

$T = 100 \mu\text{s}$

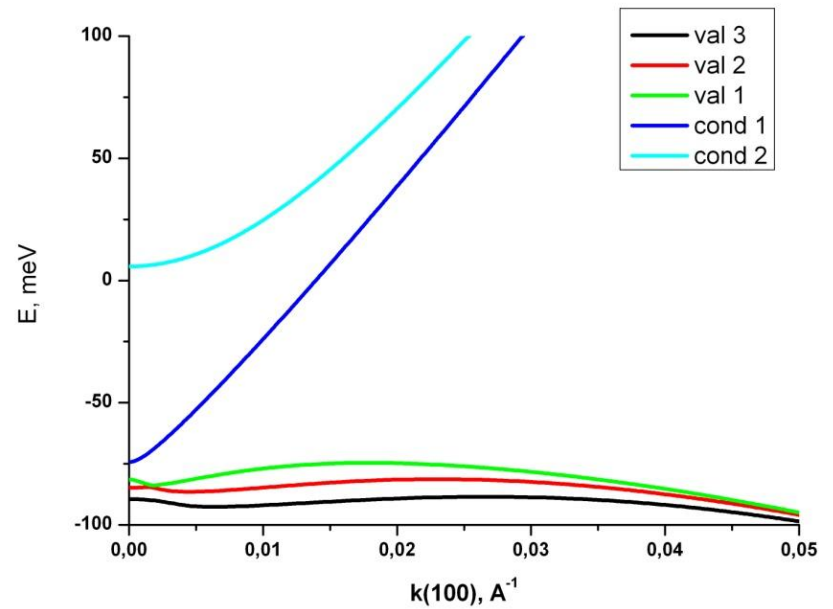
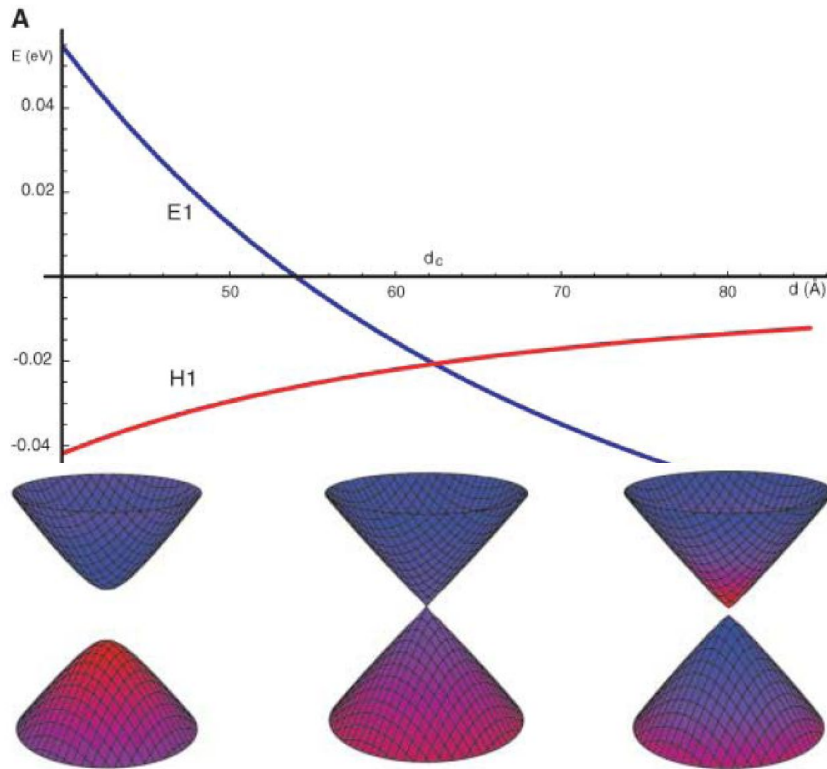
res = 0.007 cm^{-1}



1. A.L. Betz, R. T. Boreiko *et al.* / Optics Letters, **30**, 1837 (2005).

2. D. Rabanus, U.U. Graf *et al.* / Optics Express, **17**, 1159 (2009).

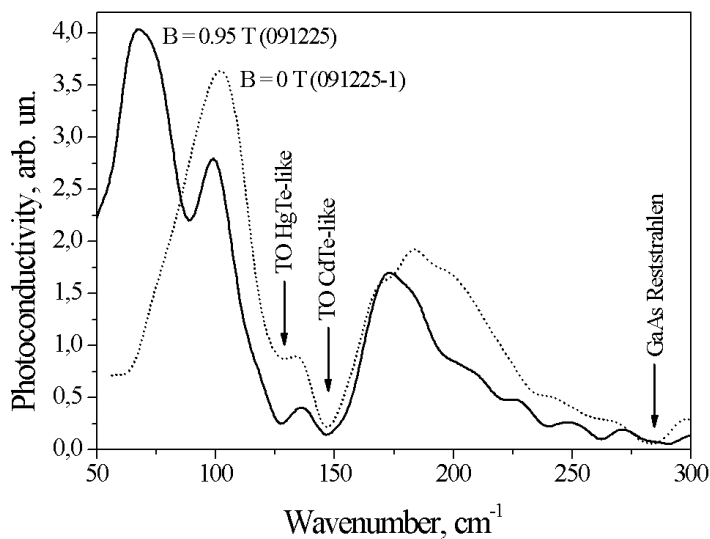
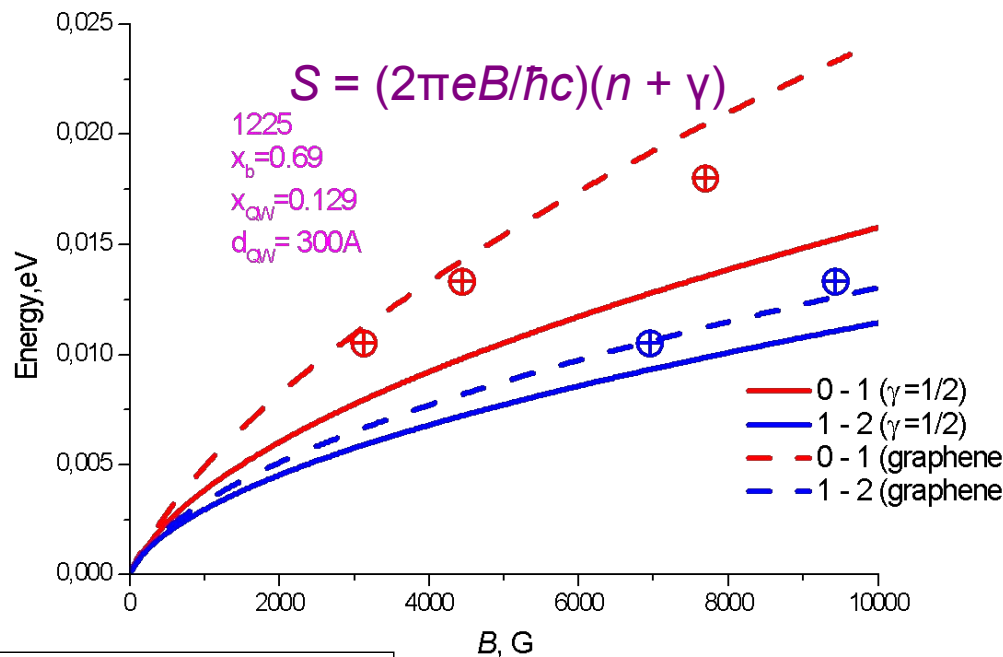
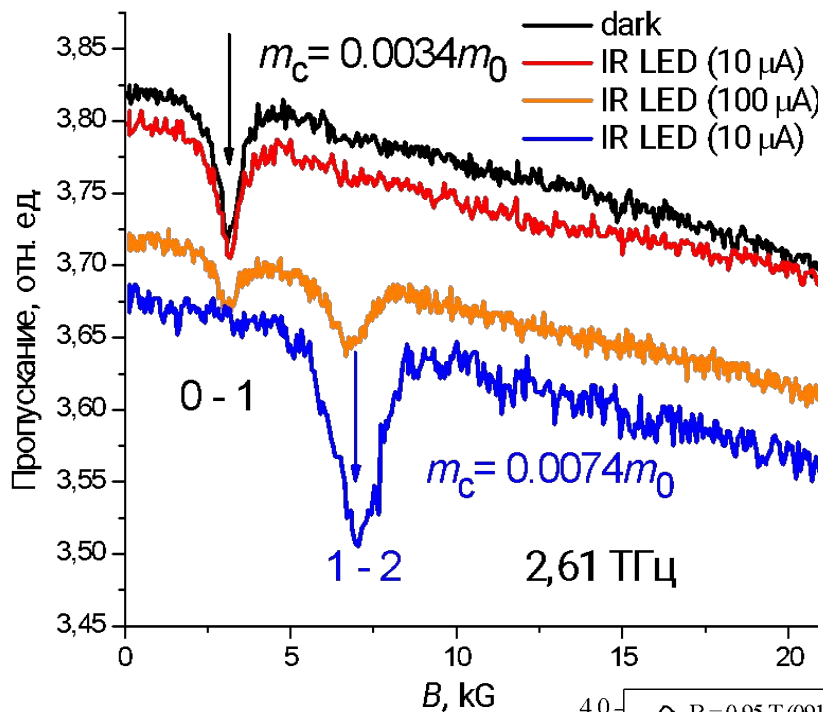
Гетероструктуры на основе HgCdTe с квантовыми ямами



Quantum Spin Hall Effect and Topological Phase Transition in HgTe Quantum Wells

B. Andrei Bernevig, *et al.*
Science **314**, 1757 (2006);

ЦР в квантовых ямах HgCdTe



Основные тезисы

1. ККЛ – униполярный прибор.
2. Излучение фотонов при межподзонные переходах.
3. Частота излучения лазера зависит от толщин слоев и от смещения.
4. Один электрон, проходя через каскадную структуру, рождает много фотонов
5. ККЛ излучают в среднем ИК и в дальнем ИК (терагерцовом) диапазонах, но между ними существует область остаточных лучей в которой лазеры не работают.
6. Используются три типа волноводов: двойной металлический (для дальнего ИК), диэлектрический и плазменный (для среднего ИК).
7. Частота излучения лазера определяется модами резонатора Фабри-Перро.
8. Частоту лазера можно перестраивать варьируя питающее напряжение, температуру, а также создавая механические напряжения в структуре.
9. Основное приложение ККЛ в нашем институте – спектроскопия узкозонных полупроводниковых наноструктур.