

# Достижения в области квантовых каскадных лазеров (ККЛ) и их применений

ДЛС\_2006  
24-10-06

*И. И. Засавицкий*

*ОФТТ Физического института им. П.Н. Лебедева РАН*

## **1. Принцип действия ККЛ**

**1.1. Активная область с диагональными или вертикальными переходами, активная область на основе сверхрешеток**

## **1.2. Междузонный ККЛ**

**2. Конструкция ККЛ (выбор материала для ККЛ, волновод, инжектор)**

**3. Технология (МВЕ + МOCVD)**

## **4. Характеристики ККЛ**

**4.1. Пороговая плотность тока и ее зависимость от температуры. Рабочая температура**

**4.2. Вольт-амперная и ватт-амперная характеристики**

**4.3. Спектр и ширина линии излучения**

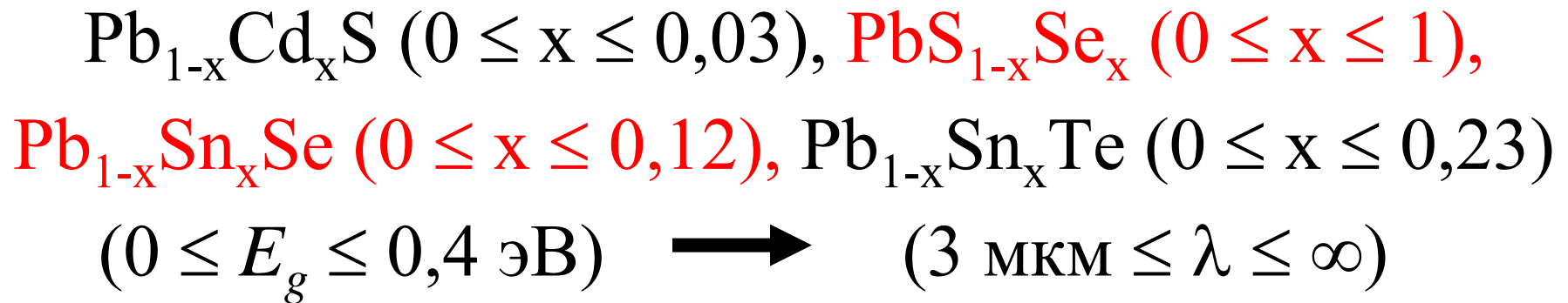
**4.4. Перестройка частоты излучения. Проблема расширения спектрального диапазона**

**4.5. Квантовая эффективность и к.п.д.**

**5. Терагерцовые ККЛ**

**6. Некоторые применения ККЛ (рынок сбыта, срок службы)**

## Перестраиваемые диодные лазеры и гетеролазеры на полупроводниках типа $A^4B^6$

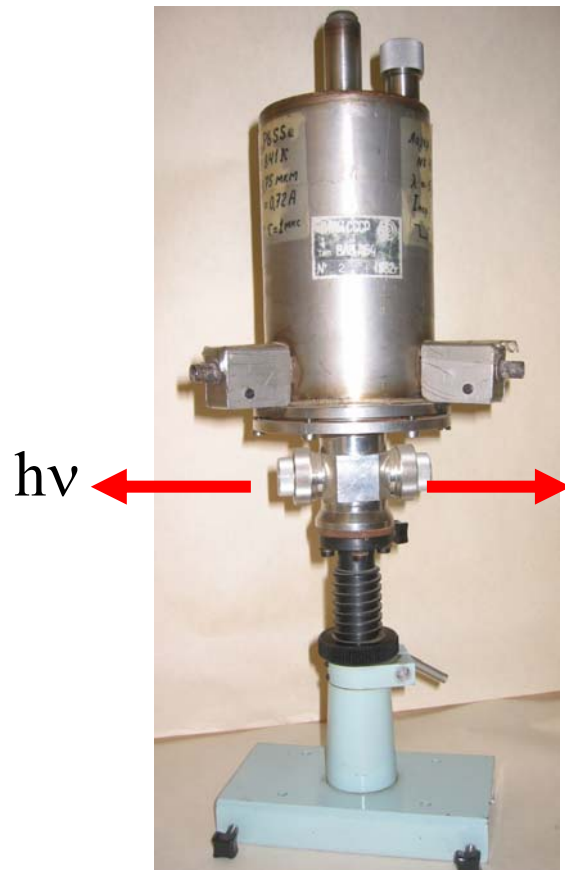


Реально созданы лазеры для области 3 – 40 мкм  
(состав, температура, давление, магнитное поле)

Однако:  $T_{\text{макс}} = 223 \text{ К}$  в непрерывном режиме  
 $\approx 300 \text{ К}$  в импульсном режиме

$P_{\text{макс}} (\lambda = 4-12 \text{ мкм}) = 1 - 100 \text{ мВт}$  при низких  $T$ !

# Азотный оптический криостат с 2 лазерами на основе полупроводников типа $A^4B^6$



Емкость криостата - 1 л

Время хранения жидкого азота  
без токовой нагрузки - 24 ч

Область спектра 0,2 – 12 мкм  
(окна  $BaF_2$ )

$\lambda_1 = 4,7$  мкм (для CO)

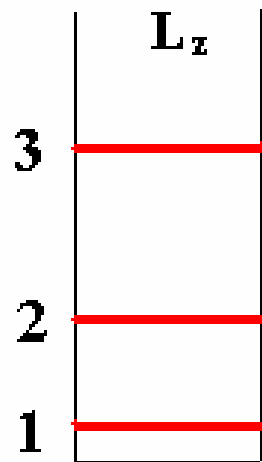
$\lambda_2 = 5,3$  мкм (для NO)

Ежегодное число публикаций, где упоминается комбинация слов “Quantum Cascade”(ISI Web of Science)

Полное число публикаций 969

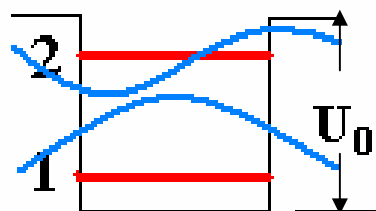


# Размерное квантование и туннельный эффект

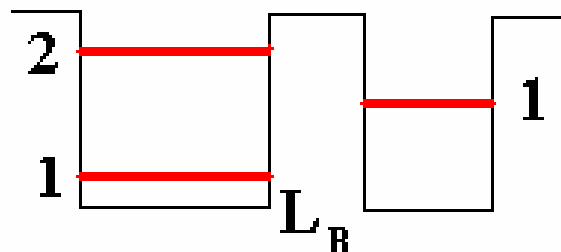


$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* L_z^2} n^2 = \frac{376n^2}{m^* L_z^2} \text{ мэВ} \quad (L_z \text{ в нм})$$

При  $m^* = 0,1m_0$  и  $L_z = 3\text{нм}$   $E_n \approx 0,4n^2 \text{ эВ}$



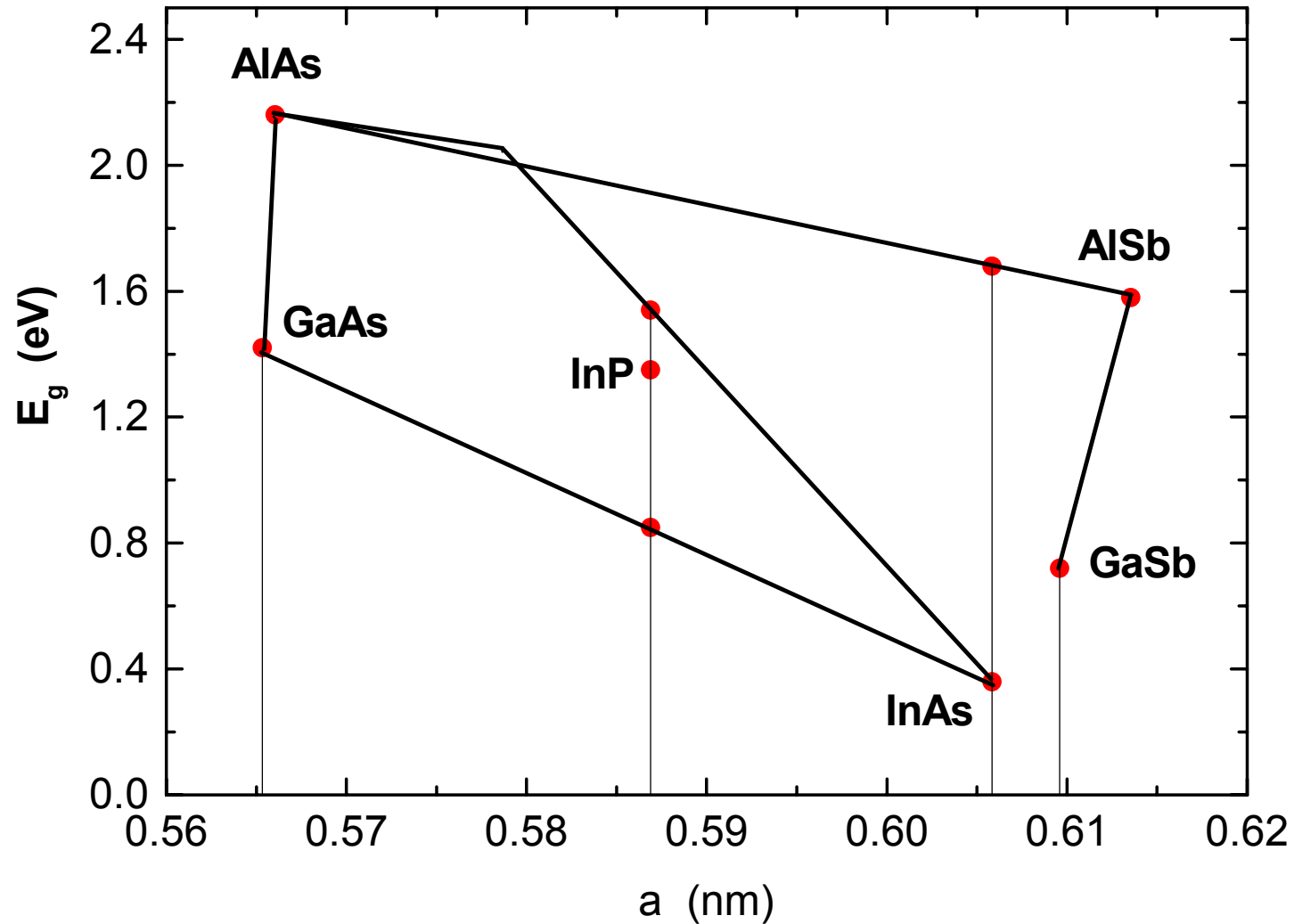
$$U_0 = \Delta E_c = (0,3 \div 1,5) \text{ эВ}$$



$$D \sim \exp[-0,325 L_B \sqrt{m^* (U_0 - E)}]$$

$D \sim 1$  при резонансном когерентном туннелировании

# Зависимость между шириной запрещенной зоны и постоянной решетки некоторых полупроводников типа $A^3B^5$



# Выбор гетеропары

GaAs/AlGaAs - GaAs

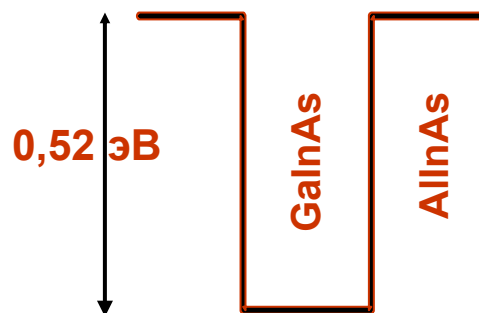


$$m_e = 0.067 m_0$$

GaAs/AlAs  $\sim 1$  эВ

Непрямой разрыв  
Г - Х только 0,2 эВ

AllnAs/GalnAs - InP

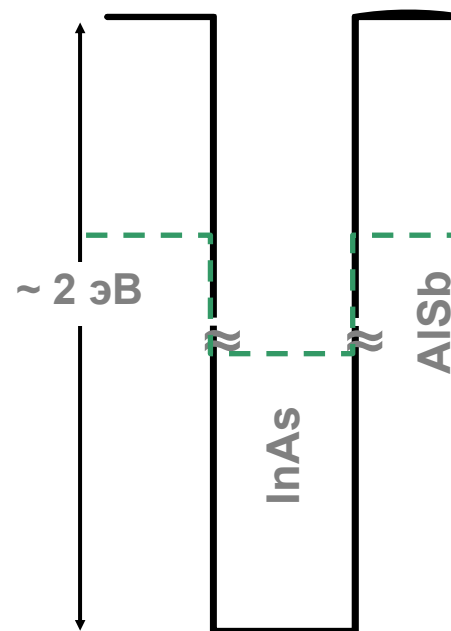


$$m_e = 0.043 m_0$$

AllnAs/GalnAs/InP  
 $\sim 0,6/0,7$  эВ

с компенсацией  
деформации,  
нет боковых долин

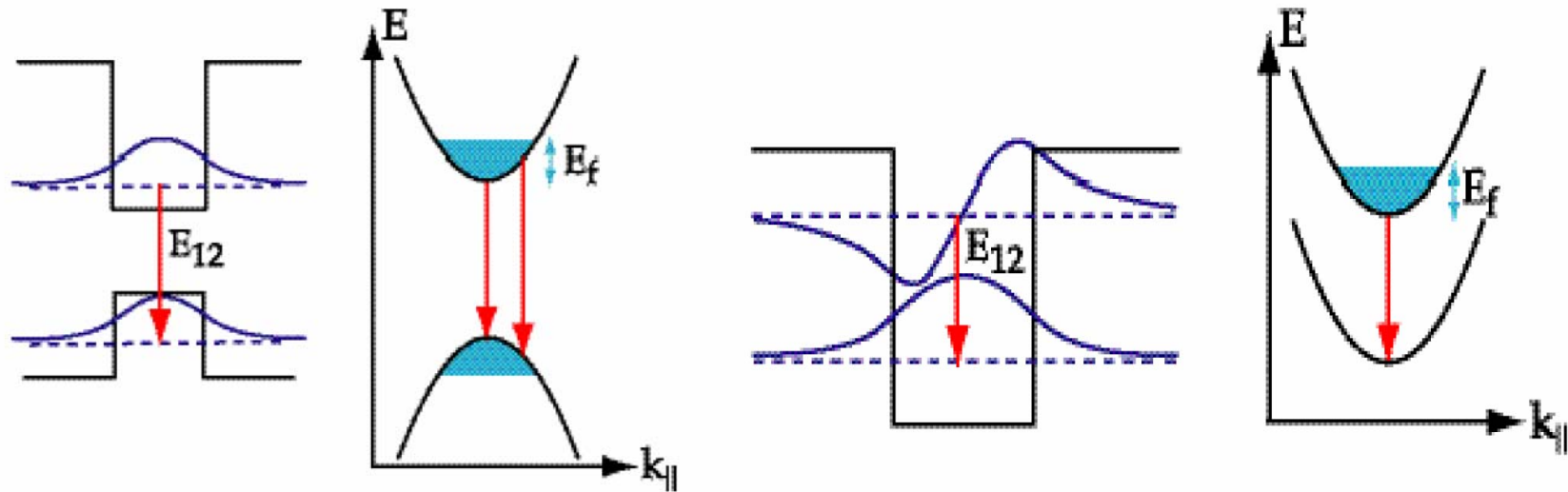
AlSb/InAs - InAs или GaSb  
InGaAs/AlAsSb - InP



$$m_e = 0.024 m_0$$

Положение бокового  
минимума требует  
уточнения

# Сравнение квантоворазмерных междузонных и межподзонных переходов



## Междузонный переход:

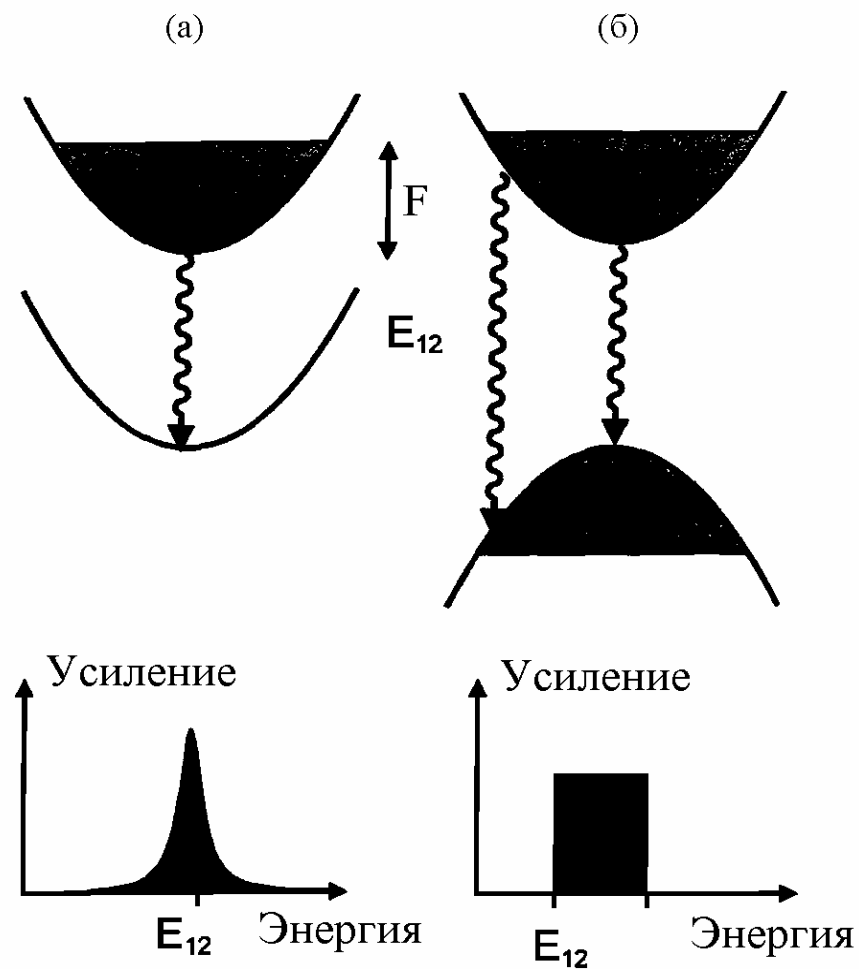
- биполярный прибор
- энергия фотона определяется  $E_g$  материала
- телекоммуникация, CD, DVD и т.д.

## Межподзонный переход:

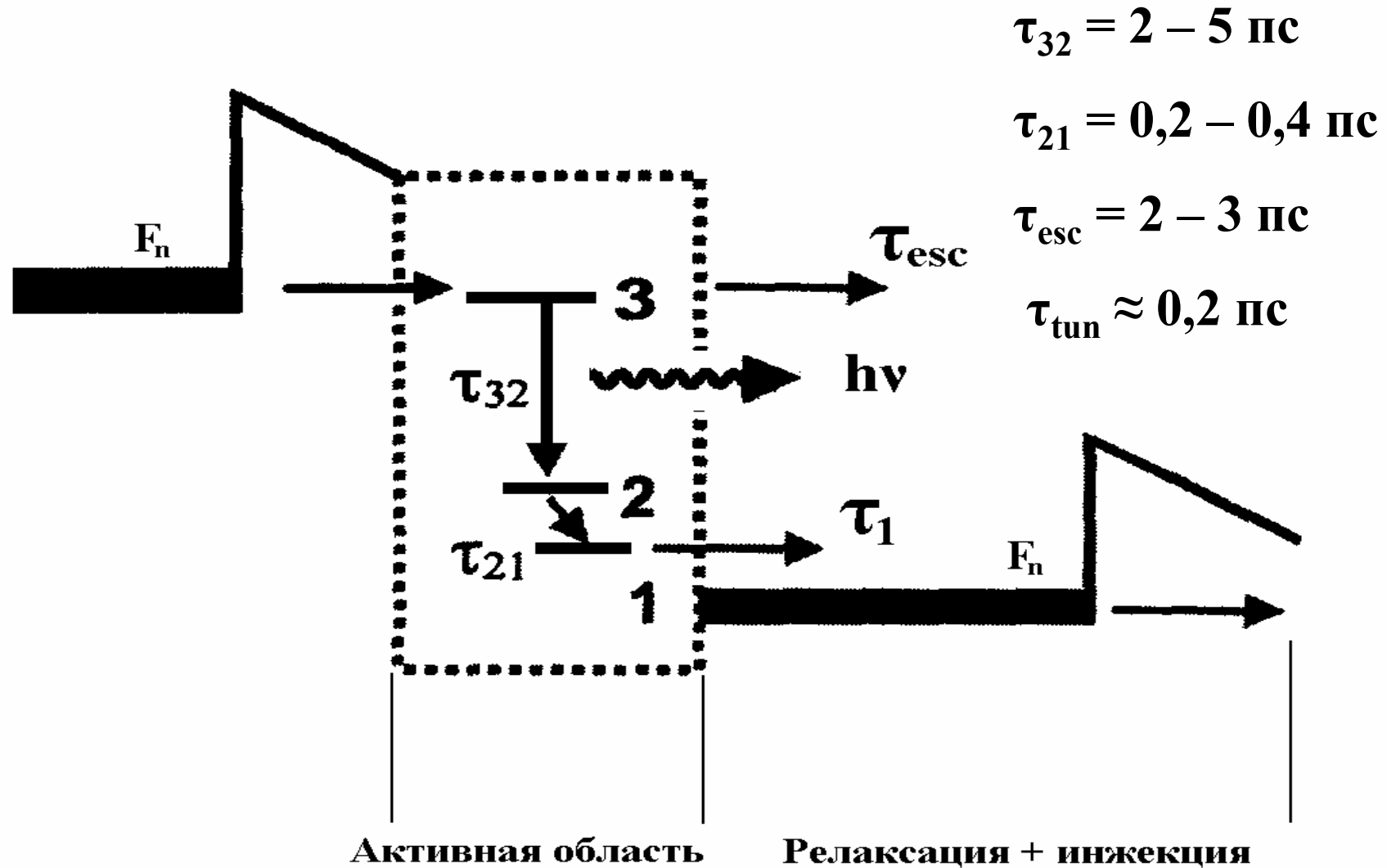
- униполярный прибор
- узкая полоса усиления
- энергия фотона определяется шириной ямы и может изменяться



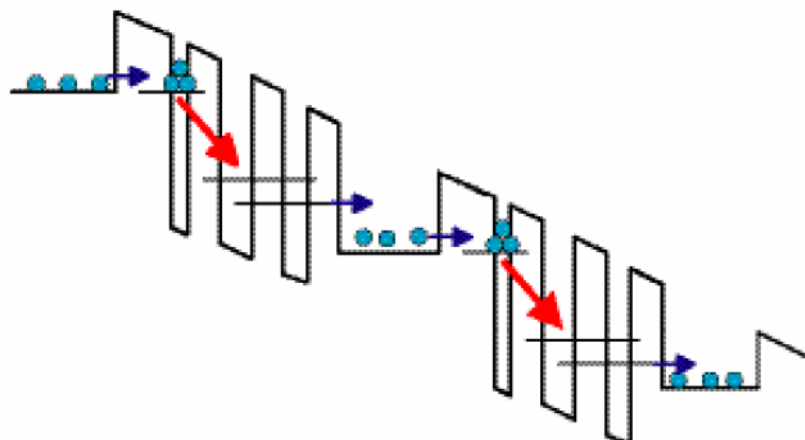
**Сравнительная схема межподзонных (а) и  
междузонных (б) переходов в квантовой яме.  
В обоих случаях показаны спектры усиления**



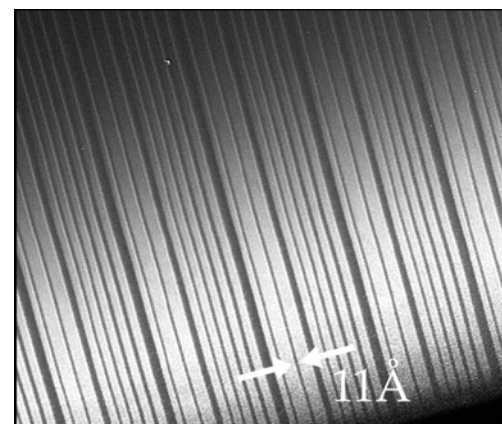
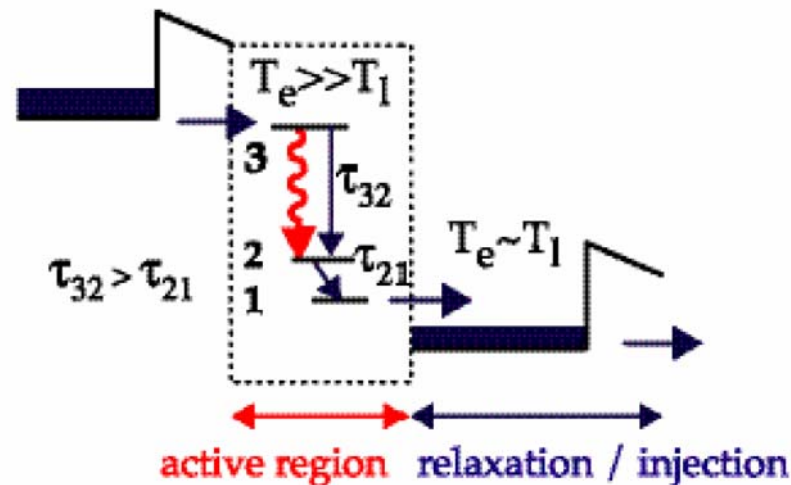
# Инжекция и релаксация электронов в активной области ККЛ с электрическим полем



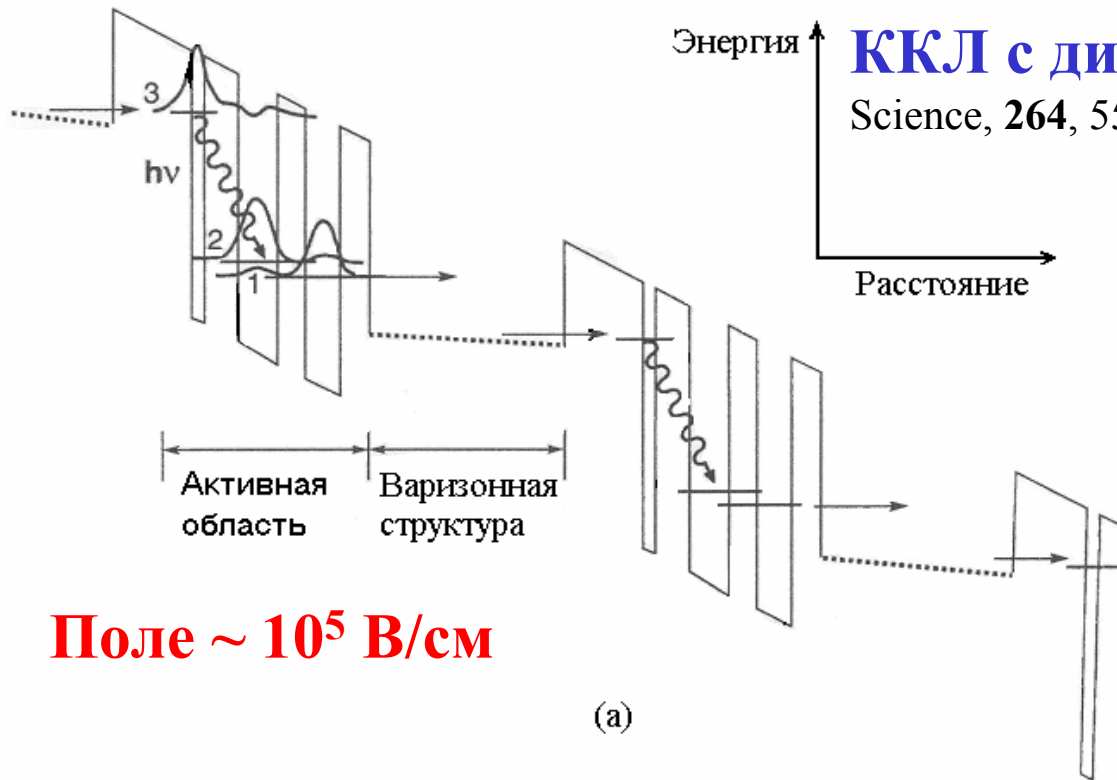
# Схема работы ККЛ



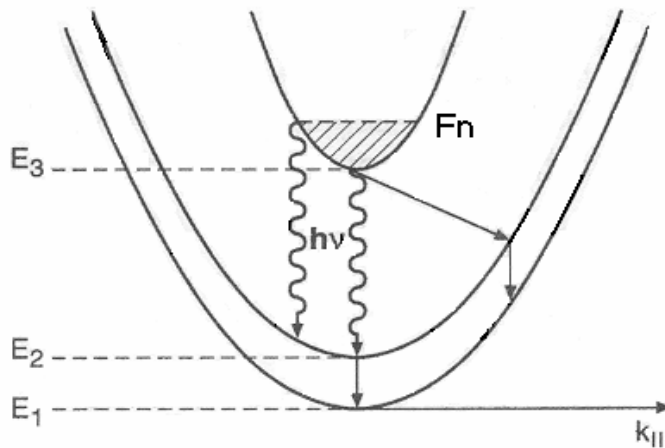
- Каскад - это каждый электрон излучает  $N_p$  фотонов ( $N_p$  – число каскадов)
- Для активной области проектируется схема переходов, приводящая к инверсии населенностей
- Инжектор исключает образование доменов электрического поля и служит для охлаждения носителей; при этом он не допускает сквозной инжекции, а сам настроен на верхний рабочий уровень



ККЛ, выращенный методом МЛЭ (1,1 нм)



(a)



(б)

Ямы  $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$

Барьеры  $\text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}$

**0,8/3,5/3,5/3,5/2,8/3 нм**

$\Delta E_c = 520$  мэВ

$E_3 - E_2 = 300$  мэВ

$E_2 - E_1 = h\nu_{LO} = 34$  мэВ

$F_n = 8$  мэВ

$\tau_R = 13$  нс     $\tau_{32} = 4,3$  пс

$\eta_i = 3 \times 10^{-4}$      $\tau_2 \sim 0,5$  пс

# ККЛ с вертикальными переходами

APL, 67, 3057 (2001)

Энергетическая диаграмма активной области ККЛ с вертикальными переходами.

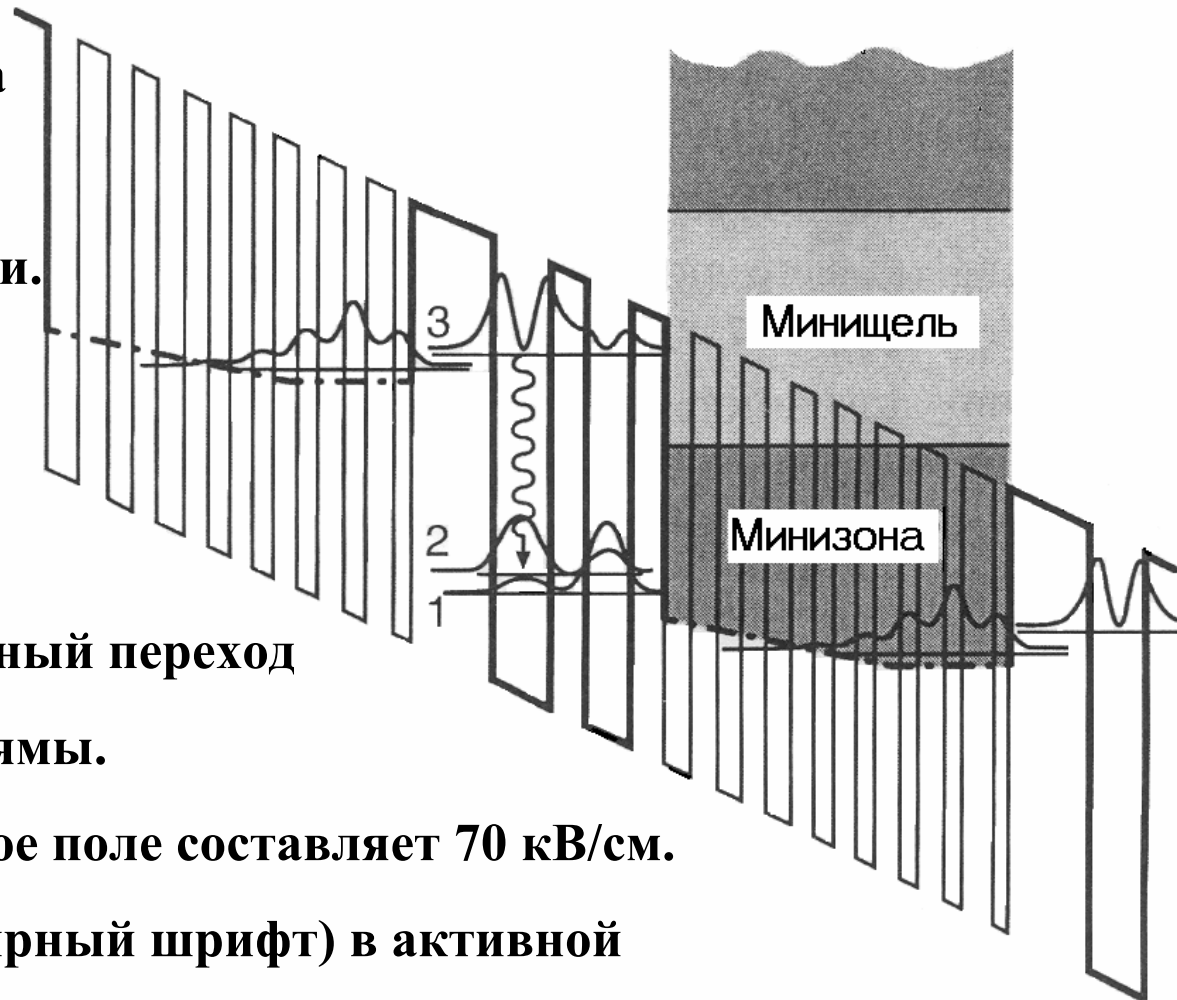
Верхний рабочий уровень заблокирован минищепом (минищелью) инжектора.

Вертикальный излучательный переход происходит внутри одной ямы.

Приложенное электрическое поле составляет 70 кВ/см.

Ширина барьеров и ям (жирный шрифт) в активной

области составляла слева направо: **6,8/4,8/2,8/3,9/2,7** нм.



# Схема межминизонного ККЛ [APL, 73, 2101(2001)]

GaInAs/AlInAs

$P \sim 1$  Вт при  $T \geq 300$  К

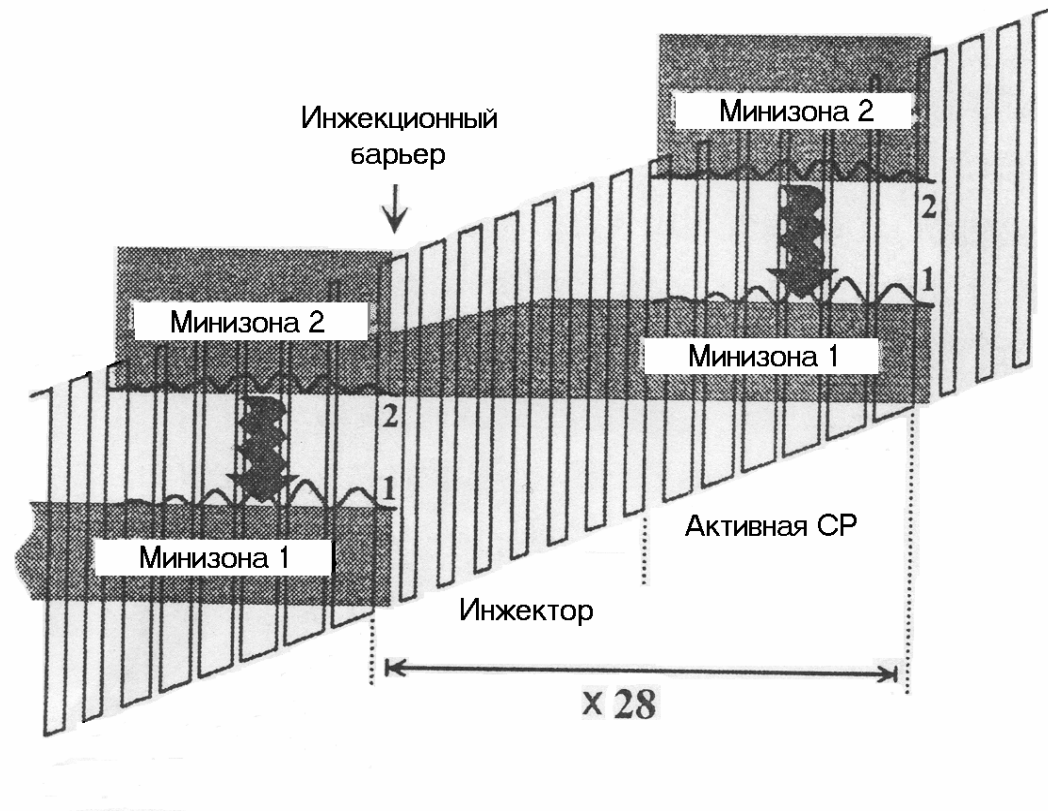
СР: 5,1/1,1/4,8/1,1/4,4/1,1/4,1/1,2/  
3,8 /1,3/3,5/2,5 нм

Инжектор: 2,3/2,5/2,3/2,5/2,2/2,6/  
2,0/2,6/1,9/2,7/1,9/2,9/1,8/3,5 нм

$N_d = 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$

Период СР как в активной области, так и в инжекторе слегка меняется таким образом, чтобы получить горизонтальное расположение минизон для приложенного электрического поля (45 кВ/см)

$\tau_{21} \sim 10$  пс      $\tau_1 < 1$  пс

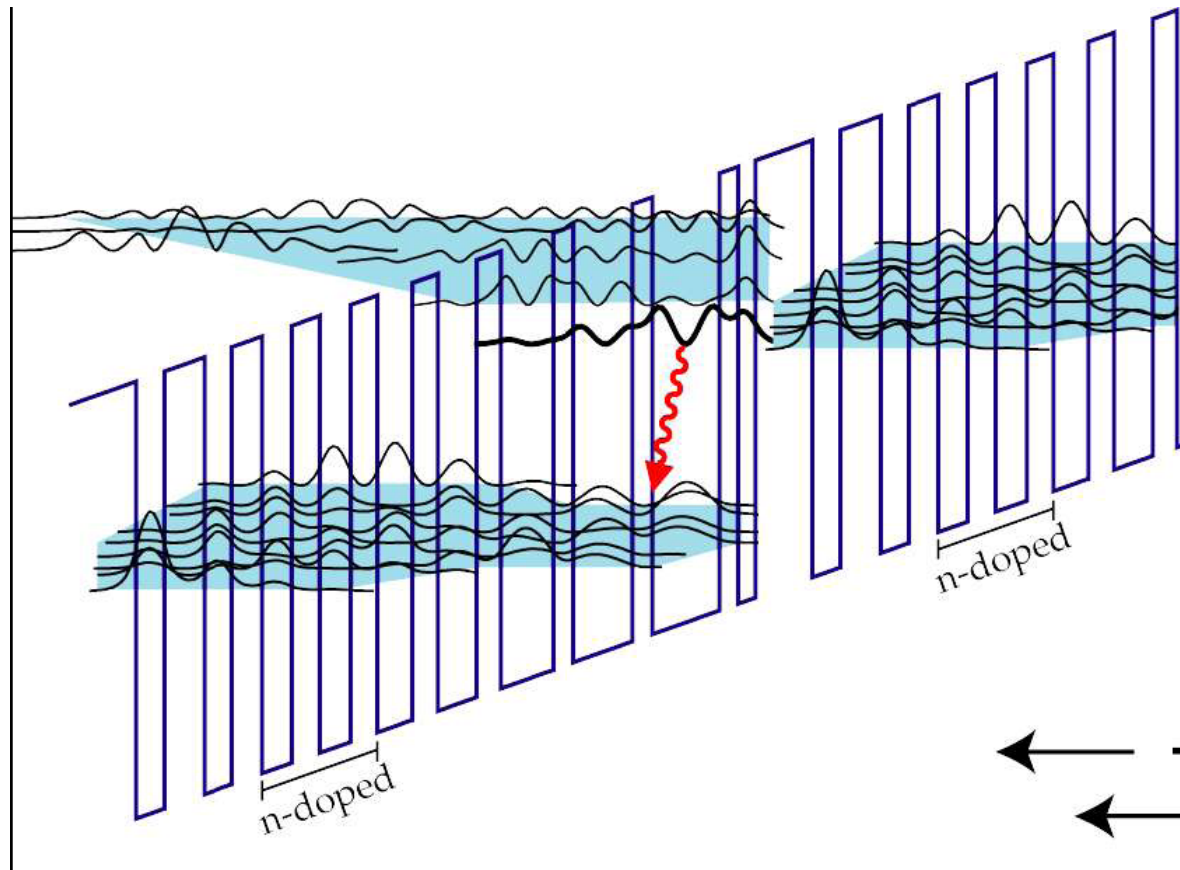


## Межминизонный лазер (или ККЛ на СР)

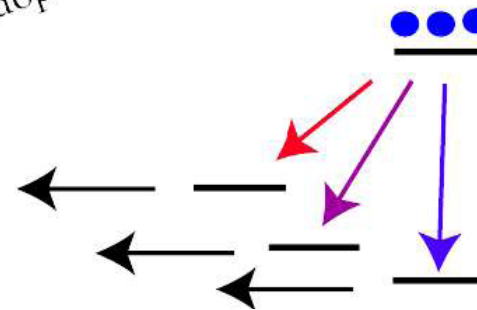
- 1. Высокое усиление, большая токнесущая способность  
слабая температурная зависимость порогового тока**
- 2. Однако они применимы при  $\lambda \geq 7$  мкм, т. к. более  
широкие минизоны ( $\sim 100$  мэВ при  $\Delta E_c = 0,52$  эВ,  $L_B = 1$   
нм,  $L_z = 4$  нм и 8 пар) занимают большую область  
энергий, чем простые подзоны**
- 3.  $F \sim 12$  мэВ, т.е. заняты лишь нижние состояния минизоны**
- 4. Релаксация электрона из одной минизоны требует  
большого импульса, поэтому время  $\tau_{21}$  велико ( $\sim 10$  пс); а  
релаксация внутри минизоны происходит с малым  
импульсом, поэтому время  $\tau_1$  мало ( $\sim 1$  пс)**
- 5. Большой дипольный матричный элемент  $z_{21} = 3,6$  нм**

# Переход из связанного состояния в континуум

Авторство компании Alpes  
Lasers [APL, 78, 147 (2001)]

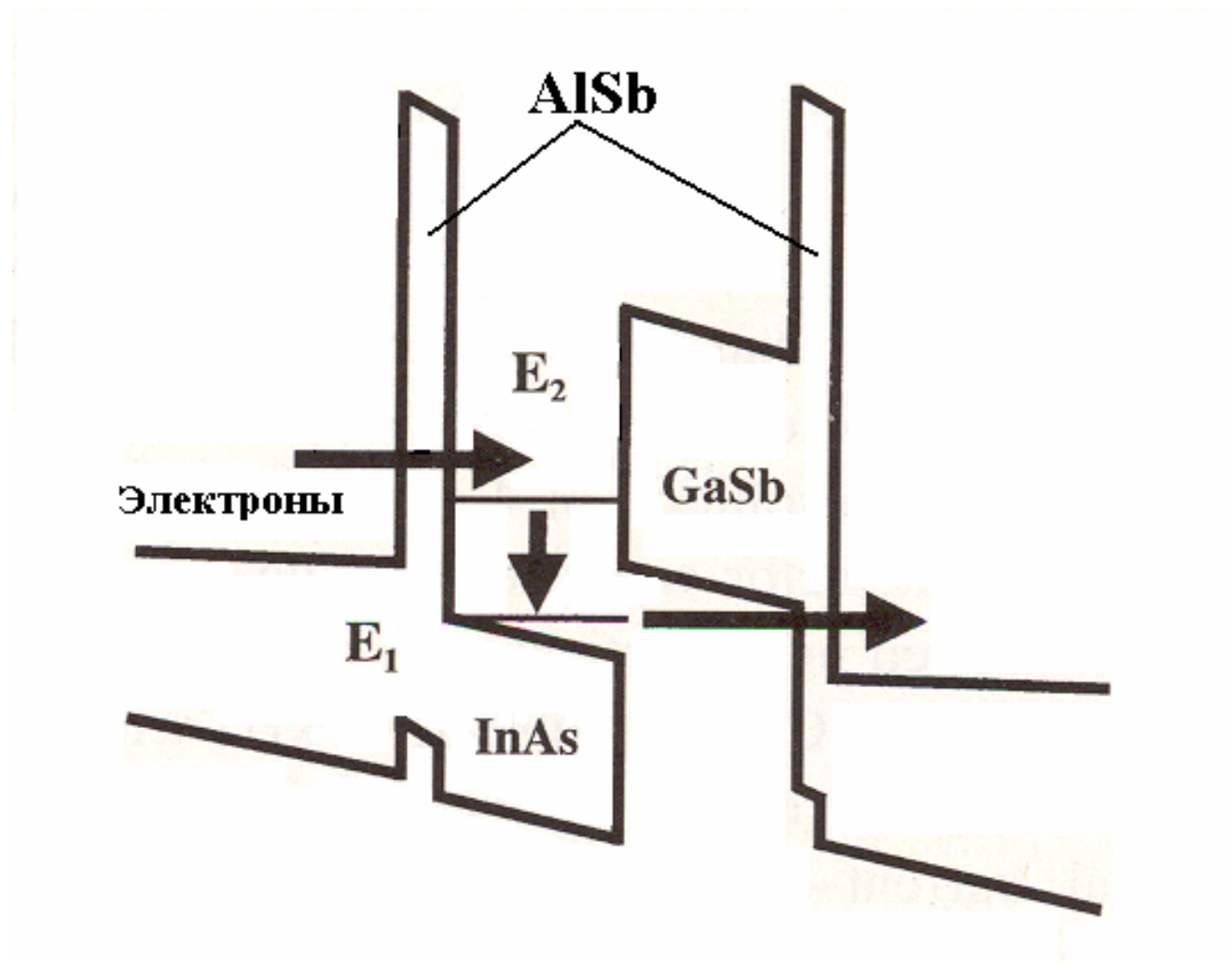


- переход из связанного состояния в минизону
- широкая минизона, распределенная сила осциллятора
- уширенный спектр усиления позволяет изготовление одночастотных лазеров в широкой области





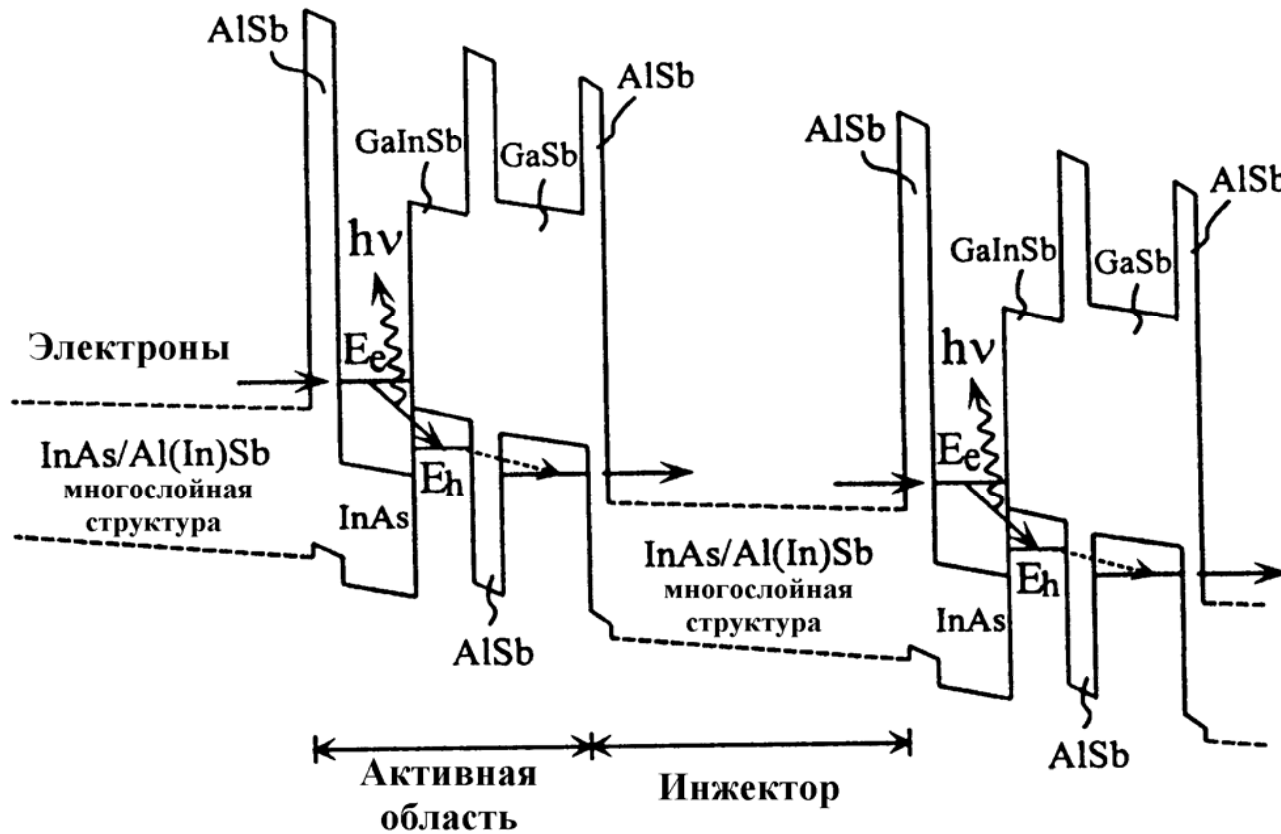
## Схема междузонного ККЛ



# Подробная схема междузонного ККЛ

Physica E, 7, 69(2000)

**P = 4 Вт с грани, T до 217 К**



1. Накачка облегчена, т.к. междузонные переходы замедлены по ср. с фоновой релаксацией

2. Подавлена Оже-рекомбинация

3. Однако имеются дефекты, низкий уровень технологии и не оптимизирована конструкция

## Структура диагонального ККЛ

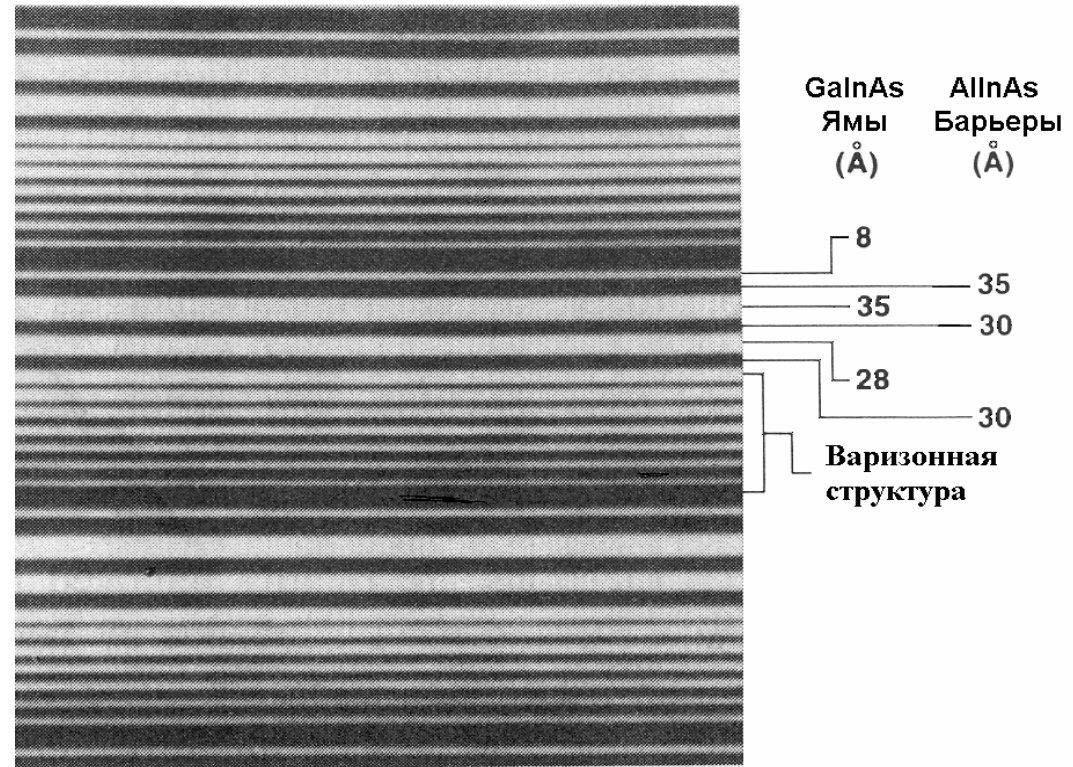
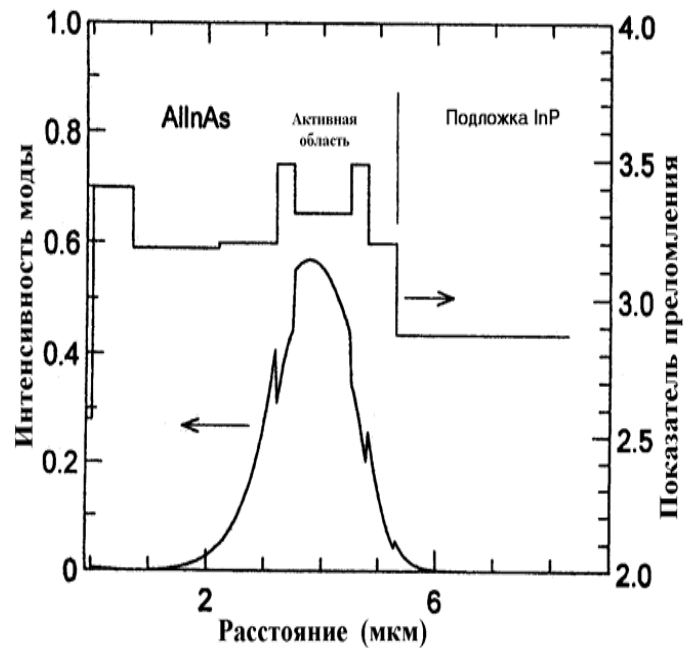
**25 раз**

Слои	Под-ложка	Обкла-дочн. слой	Волно-вод	<b>Актив-ная обл.</b>	<b>Инжек-тор</b>	Волно-вод	Обкла-дочн. слой	Контак-тный слой
Матер-иал	n <sup>+</sup> -InP:S	AlInAs	GaInAs	<b>GaInAs</b>	<b>AlInAs</b>	GaInAs	AlInAs	GaInAs
d, нм	~ 200 мкм	500	330	<b>21</b>	<b>19</b>	320	2500	700
Легир. (Si) см <sup>-3</sup>	7x10 <sup>18</sup>	1,5x10 <sup>17</sup>	1,5x10 <sup>17</sup>	<b>нет</b>	<b>1,5x10<sup>17</sup></b>	1,5x10 <sup>17</sup>	(1,5-5)10 <sup>17</sup>	1x10 <sup>18</sup> -2x10 <sup>20</sup>

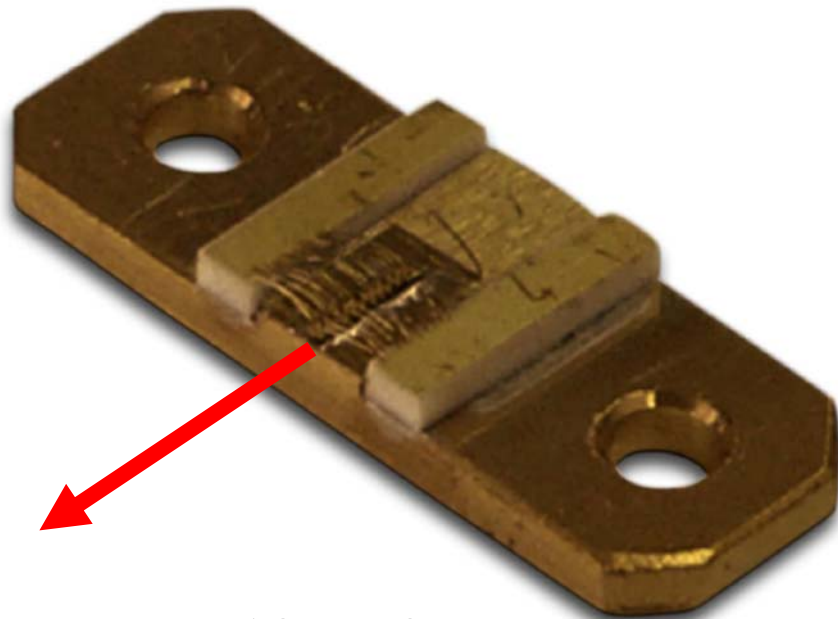
Общая толщина 5,4 мкм, число слоев ~ 600

# Профиль показателя преломления и распределение интенсивности моды. ТЕМ-изображение скола диагонального ККЛ

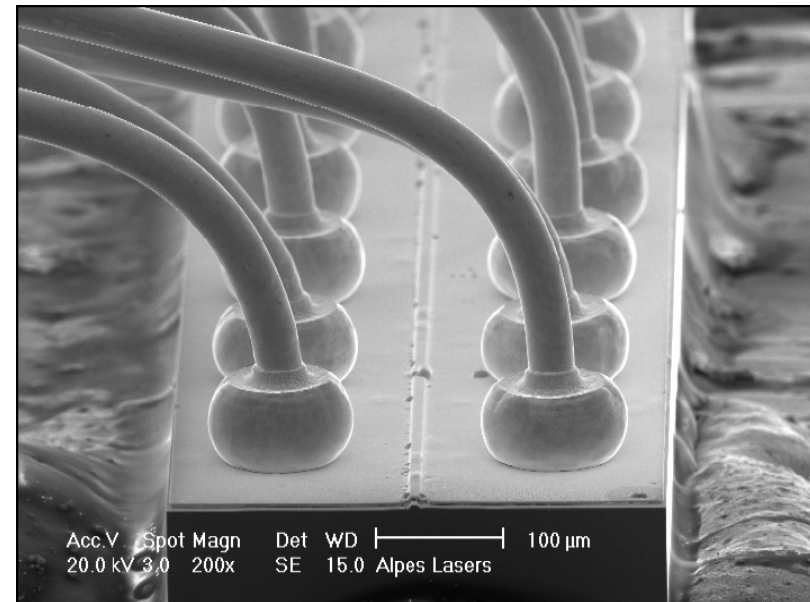
[S&S, 66, 1(2000); JMP, 37, 4775 (1996)]



# Внешний вид и разварка выводов (Фирма «Alpes Lasers»)



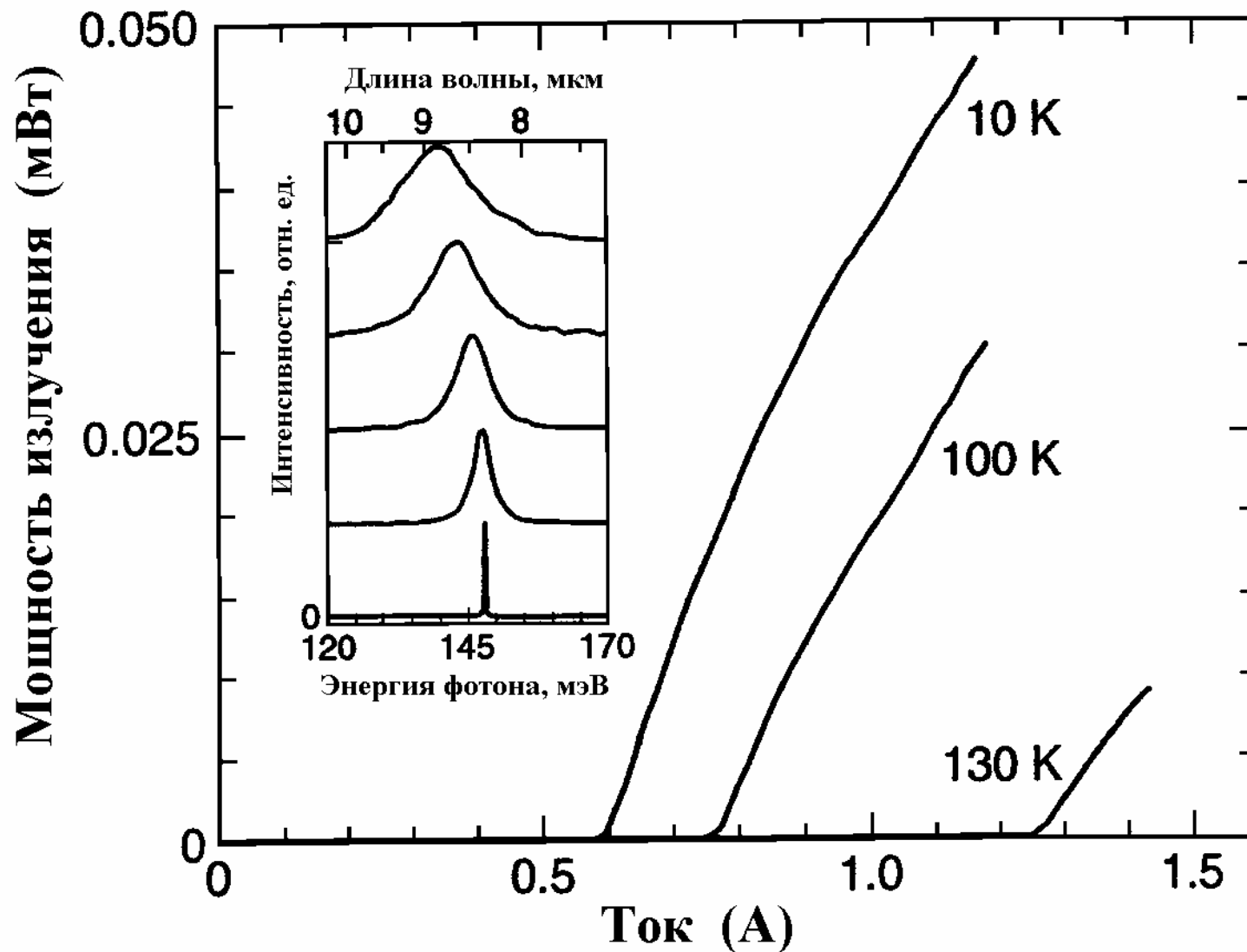
Размеры: 19x7x2 мм



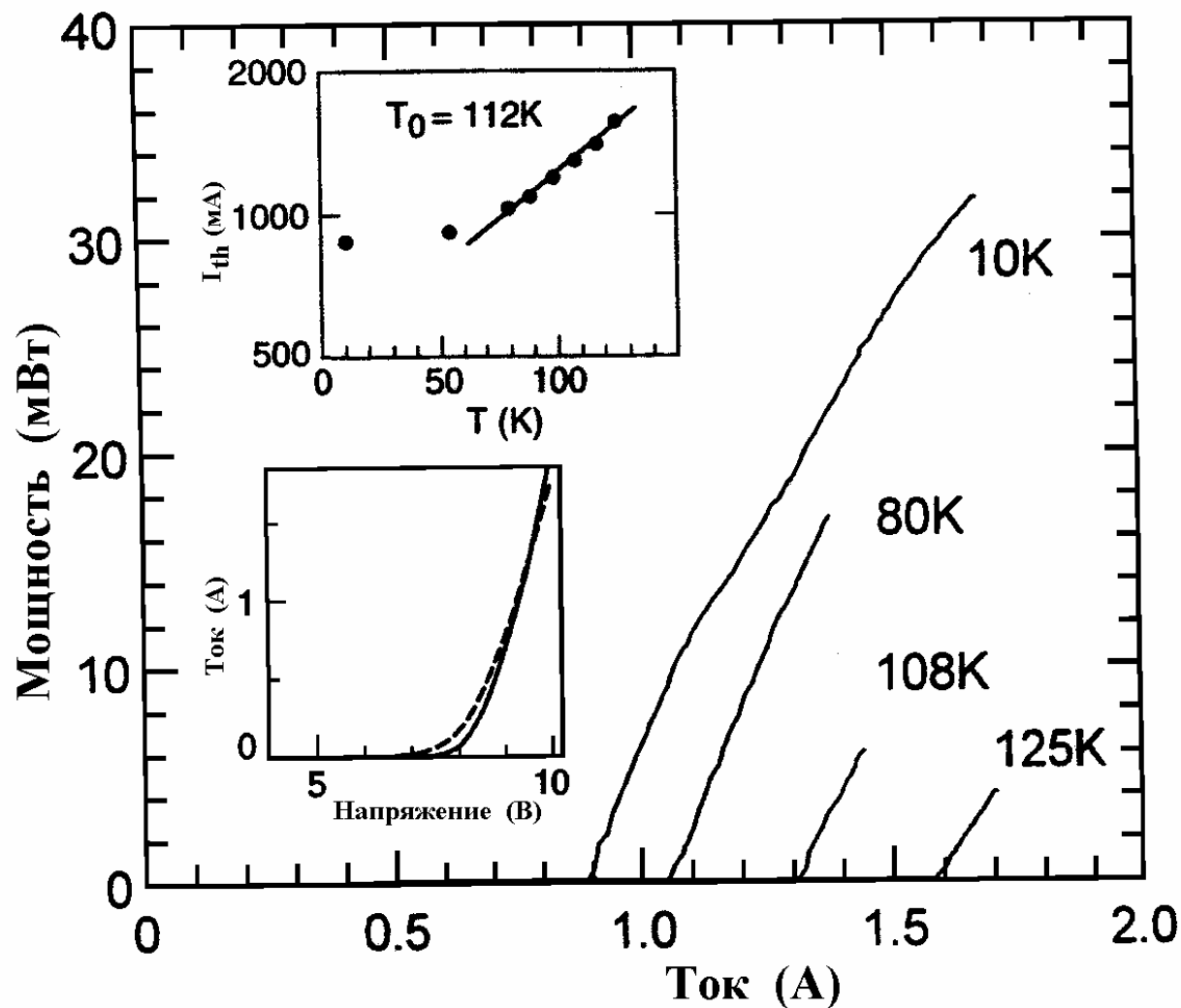
# Характеристики КЖЛ

(пока низких  $T$  и малых мощностях)

# Эволюция спектра излучения (0,2 – 0,8 А) и ватт-амперная характеристика ККЛ ( $\lambda = 8,4$ мкм) [S&S, 66, 1 (2000)]



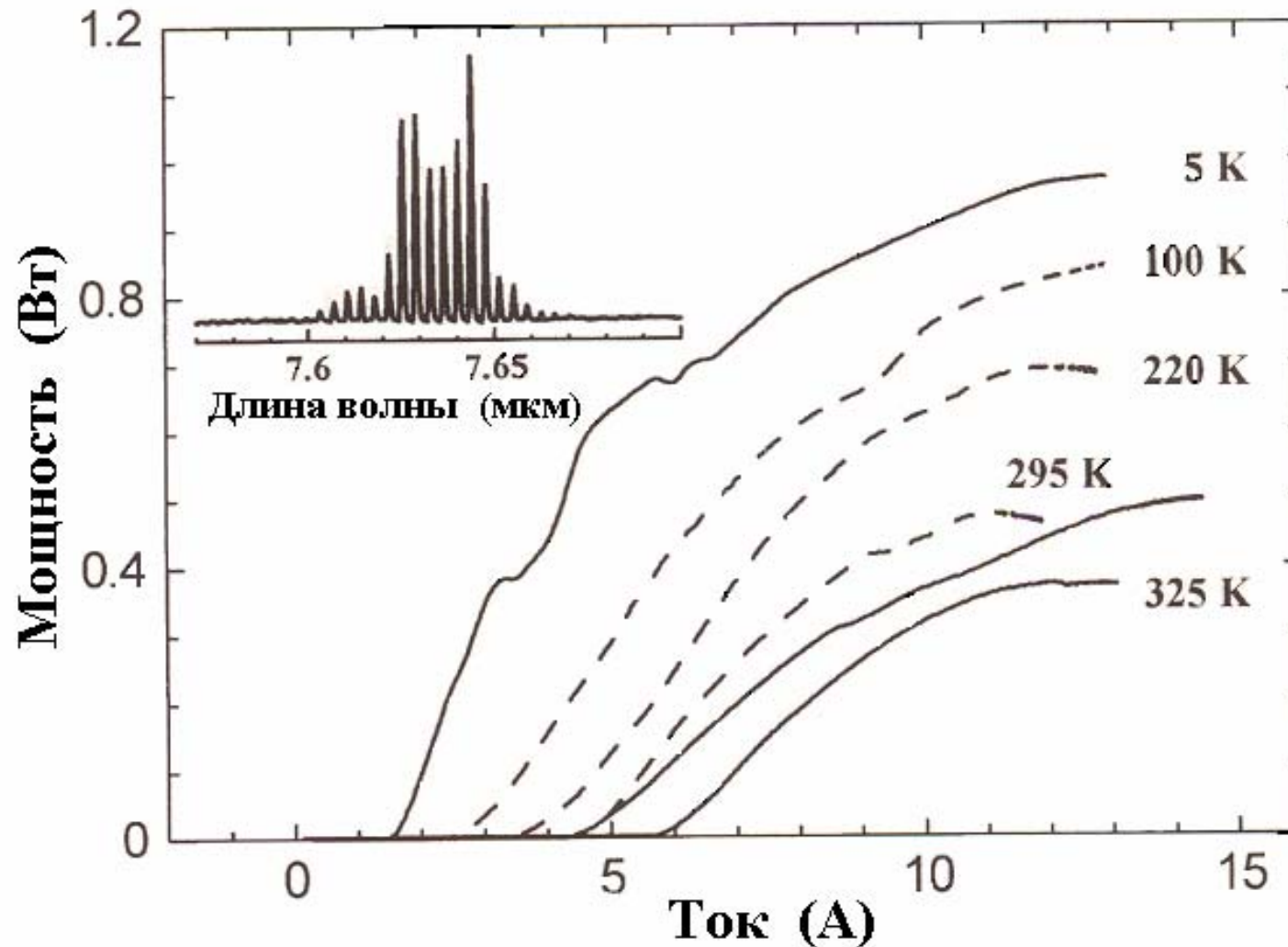
# Характеристики ККЛ с диагональными переходами ( $\lambda = 4,26$ мкм) [S&S, 66, 1 (2000)]





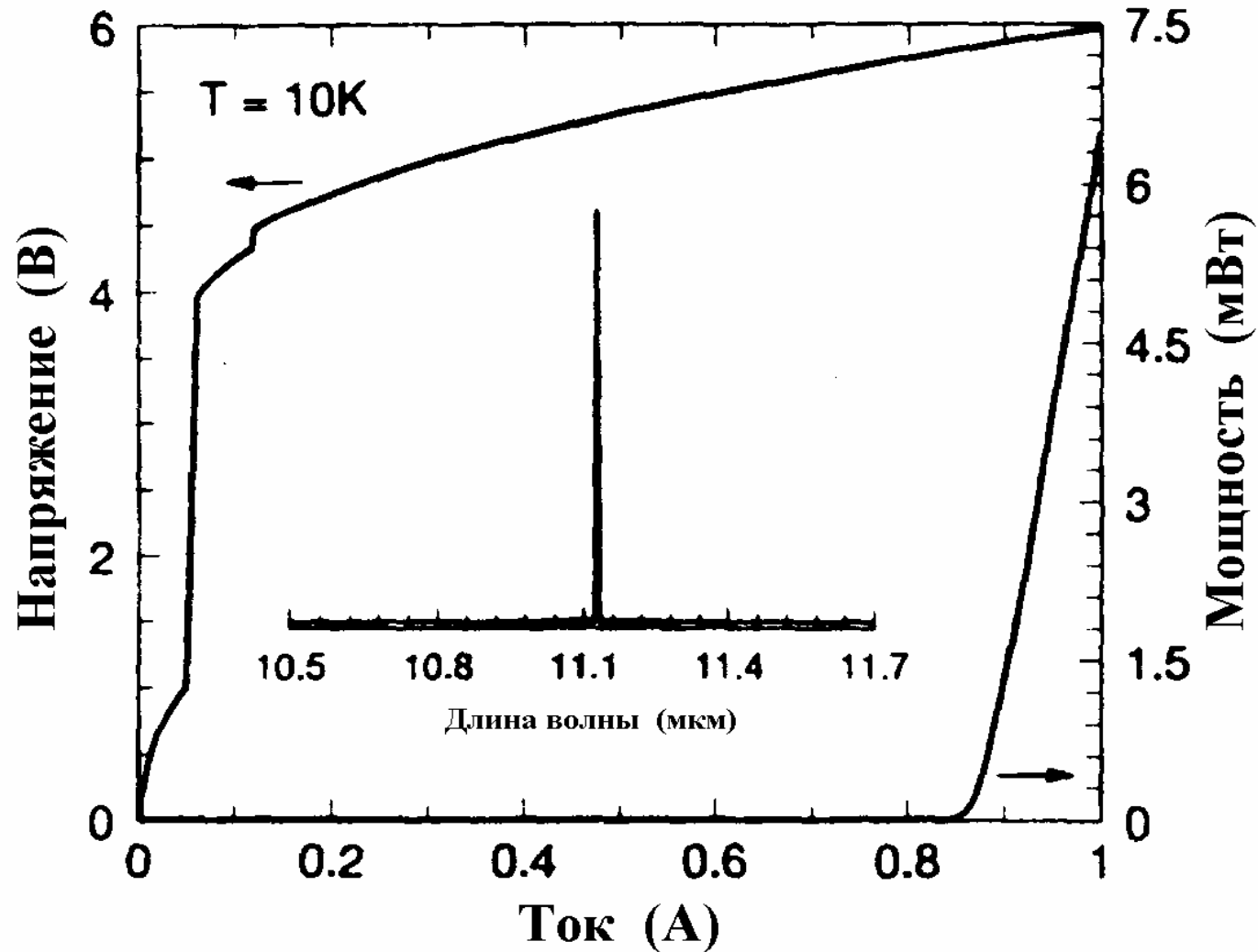
# Спектр излучения и ватт-амперная характеристика межминизонного ККЛ

[APL, 73, 2102 (2004)]

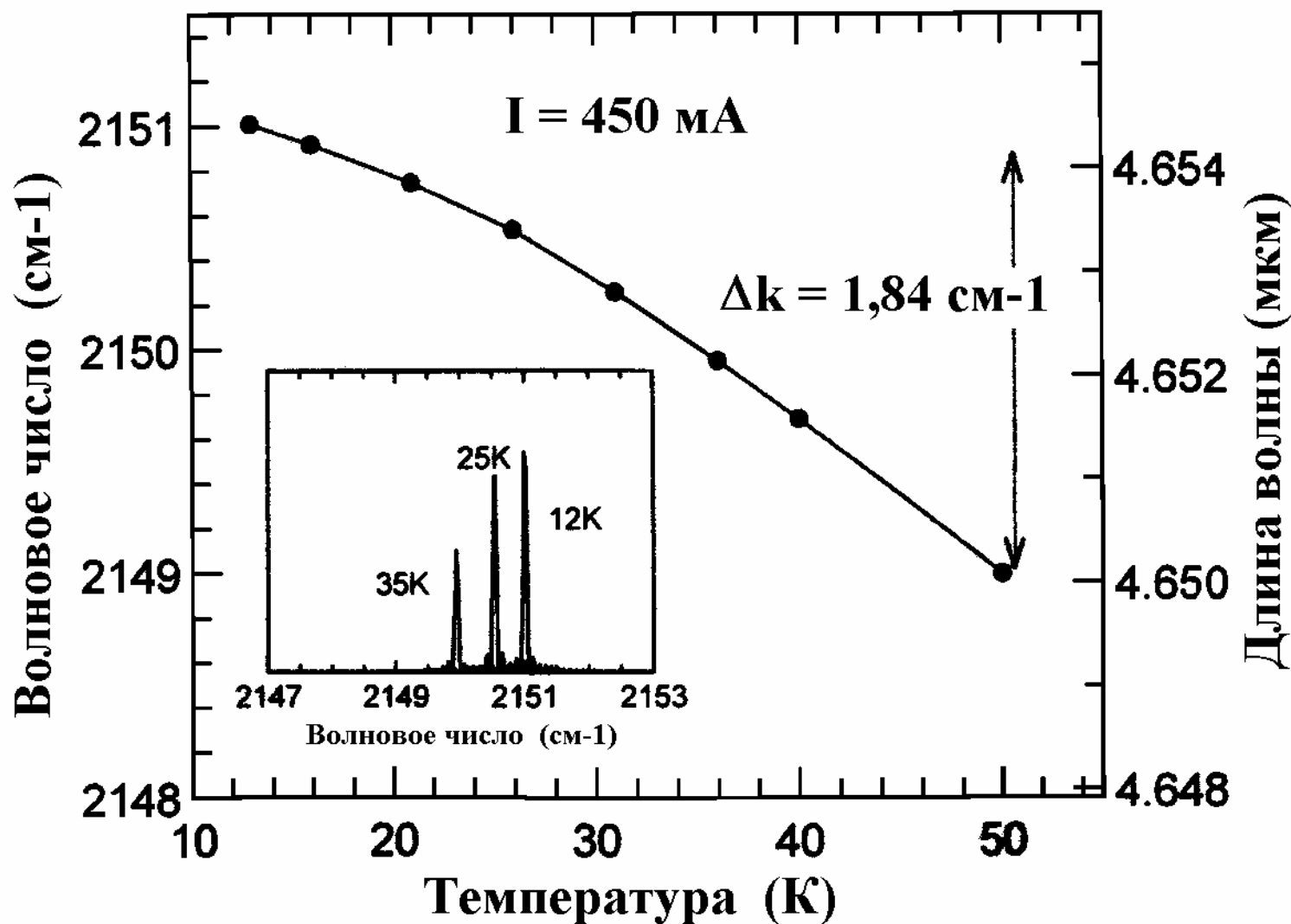


# ККЛ с вертикальными переходами при 10 К

[S&S, 66, 1 (2000)]

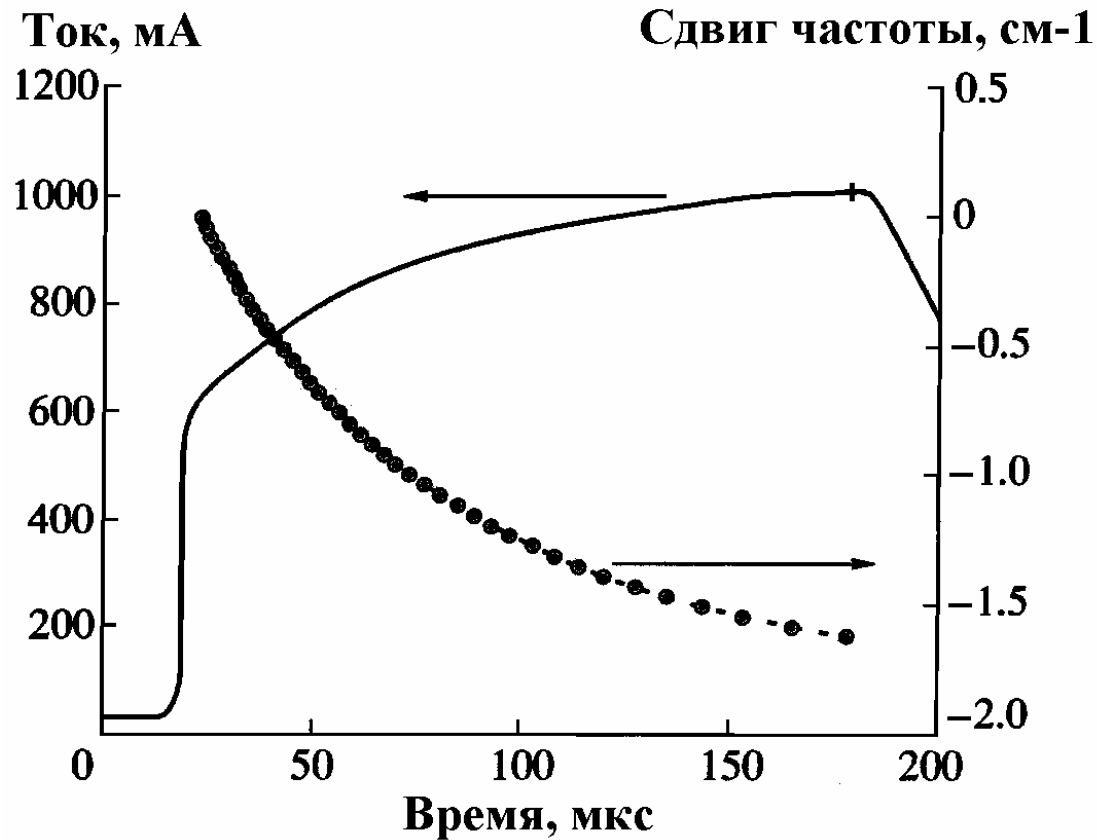


# Температурная перестройка длины волны излучения ККЛ ( $\lambda = 4,7$ мкм)



# Форма импульса тока и изменение частоты излучения со временем

[LP, 11, 41(2003)]



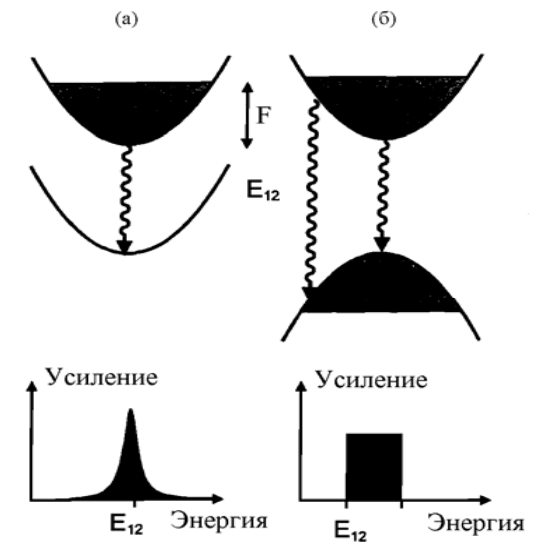
Точки соответствуют максимумам пропускания эталона Фабри-Перо

$$\frac{1}{\lambda} \cdot \frac{d\lambda}{dT} = \frac{\left[ \frac{1}{N} \left( \frac{\partial N}{\partial T} \right)_{\lambda} + \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \right] 2NL\Delta\lambda}{\lambda^2} \approx \frac{2L\Delta\lambda}{\lambda^2} \left( \frac{\partial N}{\partial T} \right)_{\lambda}$$

# Ширина линии излучения

JQE, 40, 1663(2004)

$$\delta\nu = \frac{ch\nu_0\alpha_{\text{потери}}}{2\pi NP} (1 + \alpha^2)$$



$\alpha$  отражает вариации  $N$  активной среды (флуктуации инверсии населенностей), что приводит к «дрожанию» частоты

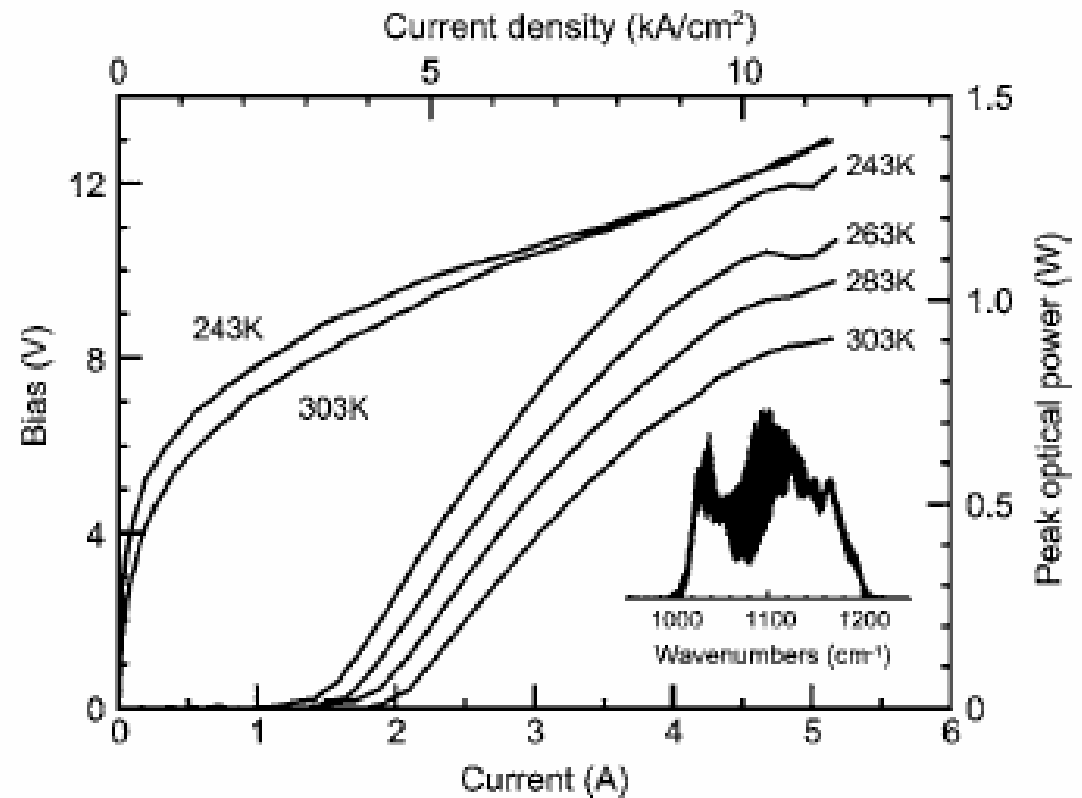
Обычно  $\alpha = 5-30$ , а для ККЛ  $\alpha \approx \pm 0,2$  (иногда  $0,5-2$ )

1. Свободная генерация,  $\lambda = 8,5$  мкм,  $\delta\nu = 150$  кГц ( $5 \times 10^{-6}$  см $^{-1}$ ), 15 мс
2. Со стабилизацией частоты,  $\lambda = 8,5$  мкм,  $\delta\nu = 12$  кГц ( $4 \times 10^{-7}$  см $^{-1}$ )
3. Гетеродинирование двух ККЛ  $\delta\nu = 2-5,6$  Гц ( $\sim 10^{-10}$  см $^{-1}$ ),  $\sim 1$  с

# ККЛ с внешним резонатором и большой областью перестройки

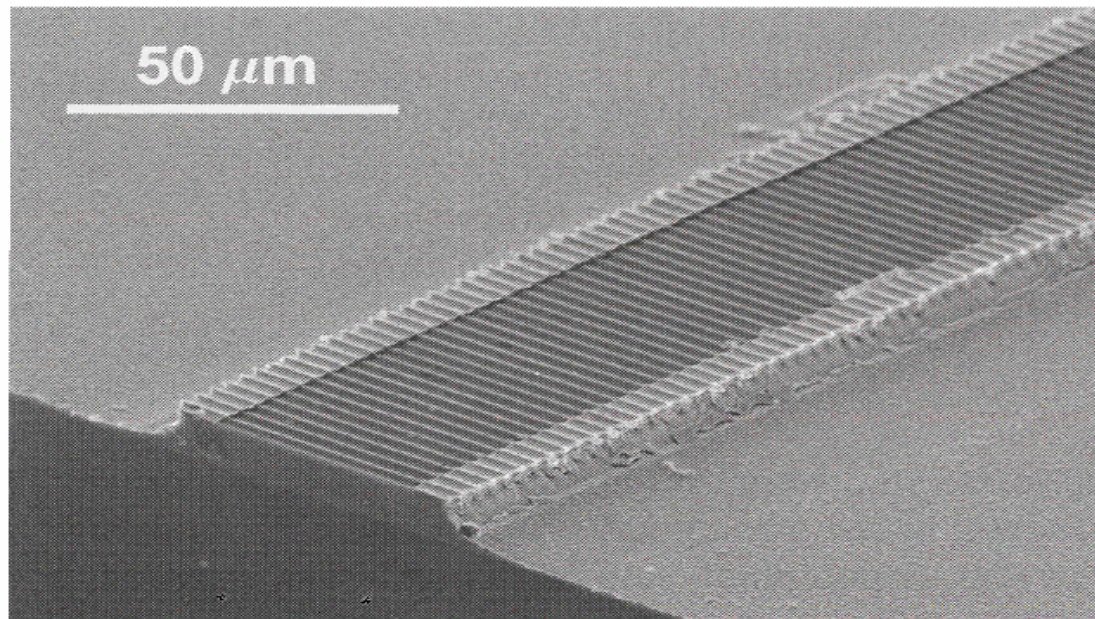
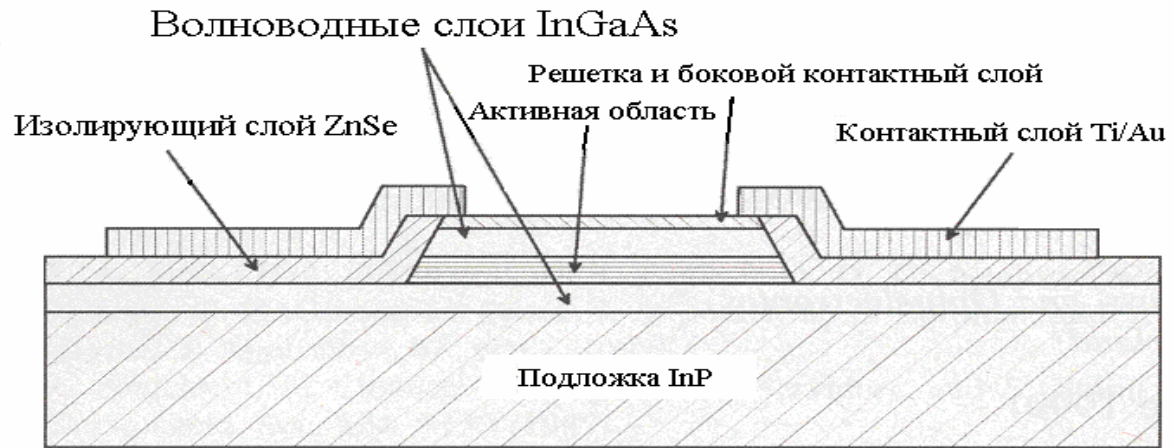
Обычно  $100 \text{ см}^{-1}$  при 300 К  
Для гетерогенных структур:  
 $\Delta\lambda = 8,2 - 10,4 \text{ мкм}$   
(более  $260 \text{ см}^{-1}$  или 24 % от  
центр. частоты)  
при ТЕ охлаждении

APL, 88 201113 (2006)



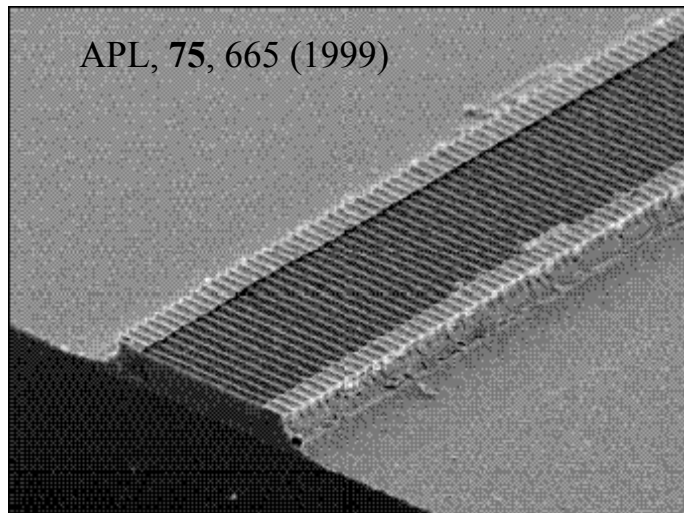
**РОС ККЛ**

# Конструкция РОС ККЛ



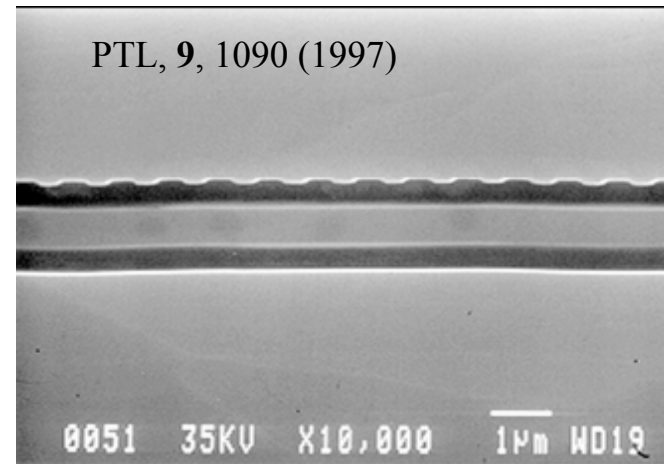


# Технология ККЛ с РОС



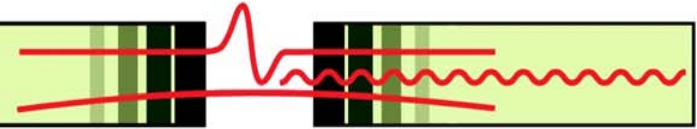
## Решетка на открытой поверхности (сверху):

- один цикл МЛЭ (нет МОСVD)
- высокая пиковая мощность (широкие полосы), но низкая средняя мощность
- оптические потери из-за металлизации

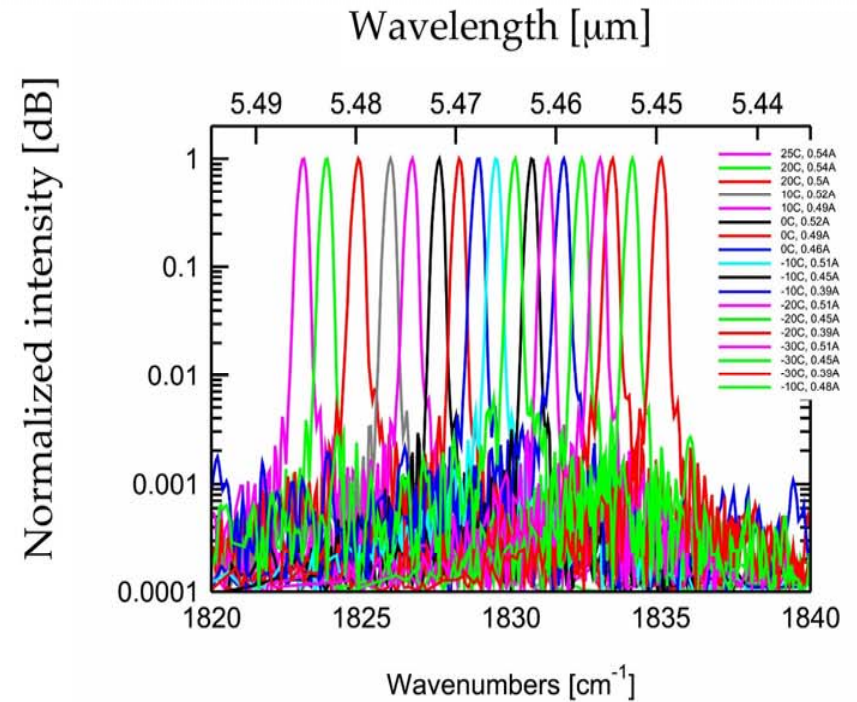
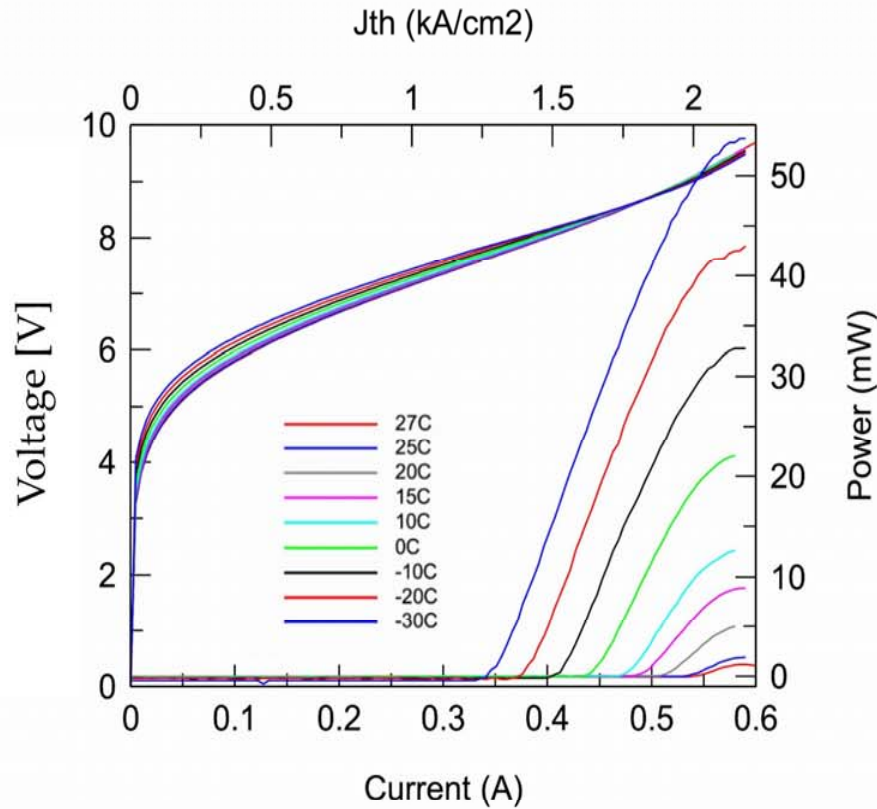


## Решетка расположена близко к активной области:

- ниже термосопротивление (высокая скважность/высокая температура)
- высокая средняя мощность
- сильнее перекрытие, ниже потери
- возможен монтаж активной областью к хладопроводу
- необходим дополнительный цикл роста МОСVD



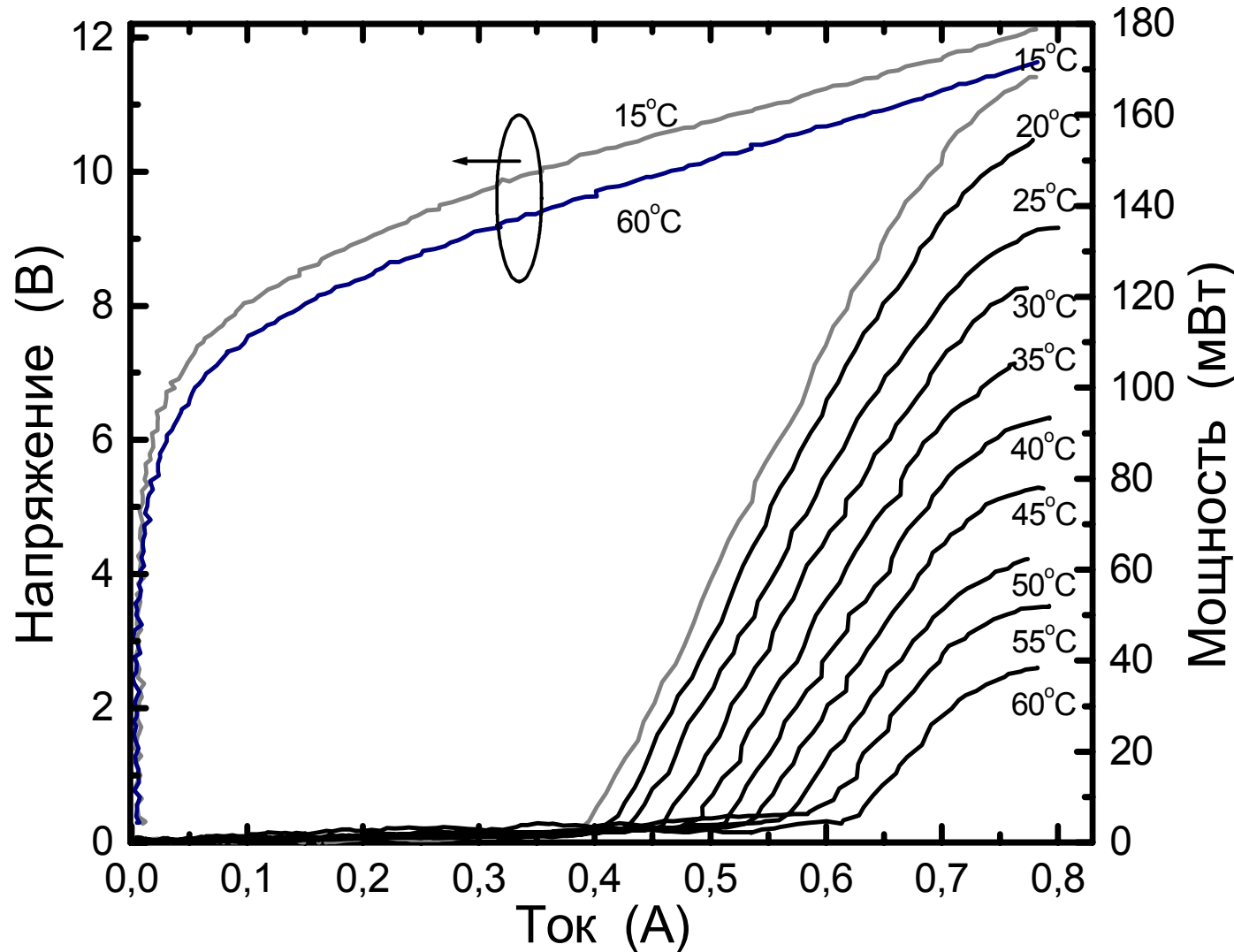
cw operation of dfb QC laser at  $5.4\mu\text{m}$  at RT



# Непрерывный РОС ККЛ $\lambda \sim 4,8$ мкм

$R_{\text{заднее}} = 100\%$     $W = 13$  мкм    $L = 3$  мм

$T_{\text{макс}}(\text{CW}) = 60^\circ\text{C}$



$P = 170$  мВт  $15^\circ\text{C}$

$P = 38$  мВт  $60^\circ\text{C}$

$J_{\text{пор}} = 0,9$  кА/см<sup>2</sup>

$J_{\text{пор}}(\text{CW}) = 1,1$

кА/см<sup>2</sup>

Подавление боковых мод  $> 30$  дБ

$\Delta k \sim 8,1$  см<sup>-1</sup>

$dk/dT = 0,18$  см<sup>-1</sup>/К

кпд = 1,5 %

APL, 87, 041104

(2005)

М. Razeghi, Ун-т в

Иллинойсе

# РОС ККЛ непрерывного действия при 300К

(AL + Illinois)

$\lambda$ , МКМ	Макс. т-ра, °С	P, мВт	ВН	epi	Толстый слой Au	R <sub>задн</sub> = 1
9,1	- 13	3 (- 30 <sup>0</sup> C)	X	Dn	-	X
5,4	+ 30	13 (- 30 <sup>0</sup> C)	-	Up	X	-
4,8	+ 60	155 (20 <sup>0</sup> C)	-	Up	X	X

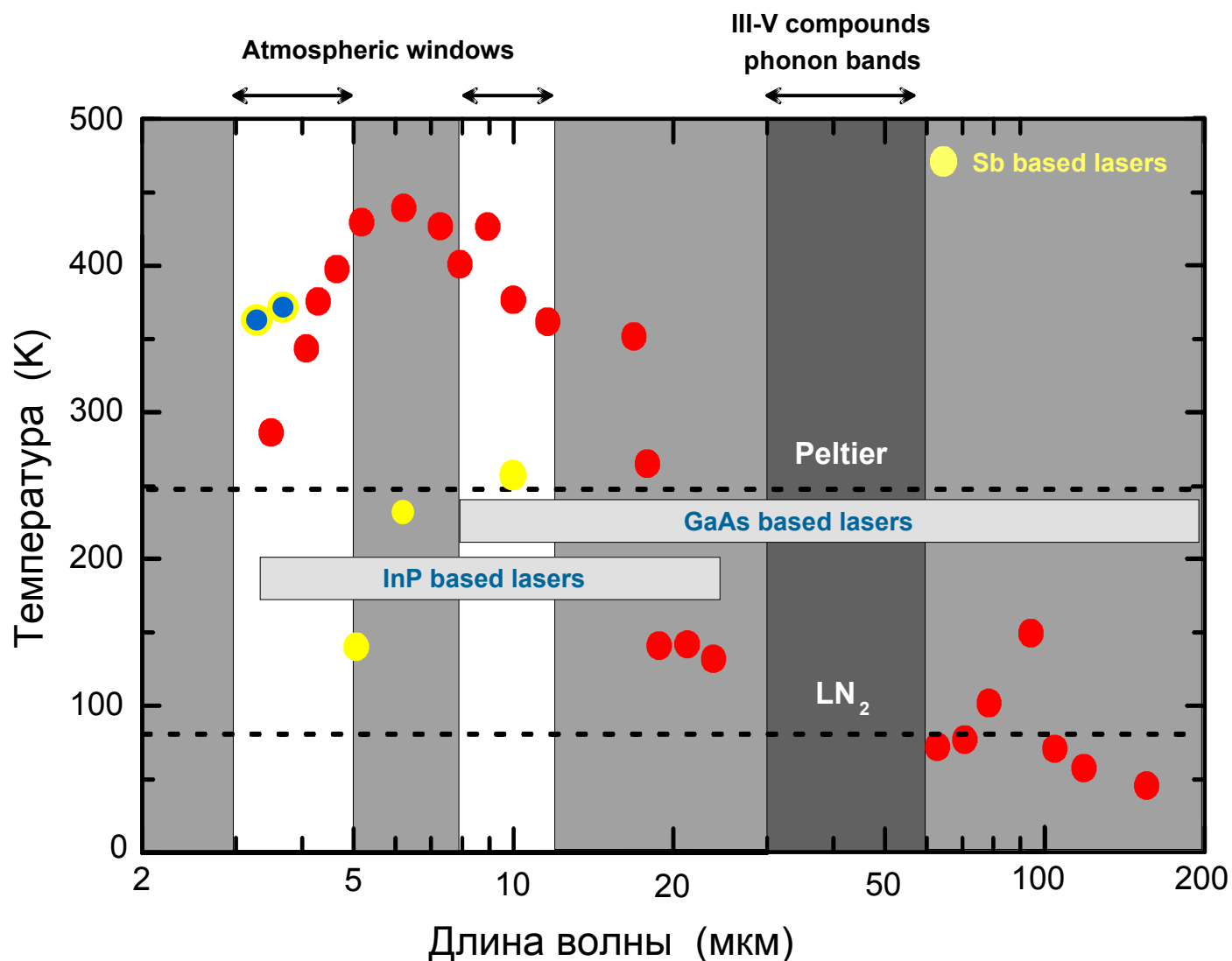
16,4    + 50                    100 (- 30<sup>0</sup> C)    импульсный режим

33 (+ 50<sup>0</sup> C)            band-to-continuum

# ККЛ непрерывного действия при 300 К с резонатором Фабри-Перо (AL + Illinois)

$\lambda$ , МКМ	Макс. т-ра, °С	Р, мВт	ВН	ері	Толстый слой Au	$R_{\text{задн}} = 1$
9,1	+ 39	17 (20 <sup>0</sup> С)	X	Dn	-	X
6,0	+ 60	446 (20 <sup>0</sup> С)	X	Up	X	X
4,8	+ 50	370 (20 <sup>0</sup> С)	-	Up	X	X
4,3	+ 40	166 (20 <sup>0</sup> С)	-	Up	X	X

# Зависимость максимальной рабочей температуры ККЛ от длины волны излучения



Область спектра:  
3,5 - 200 мкм  
или 80 – 1,5 ТГц

- Lucent
- Neuchatel
- THALES
- WSI
- Northwestern University
- AOI (Houston)
- TU Wien
- MIT
- Fraunhofer Freiburg

## Другие особенности ККЛ

1. Продемонстрирована высокочастотная модуляция (включая цифровую) вплоть до 100 ГГц
2. Короткие времена релаксации электронов и время жизни фотонов в резонаторе ( $\sim 1-3$  пс) позволяют генерировать короткие ( $\tau = 89$  пс,  $f = 100$  МГц) импульсы излучения
3. Оптическая связь в окнах 3-5 и 8-13 мкм (Рэлей  $\sim \lambda^{-4}$  и Ми падает при  $\lambda > 1$  мкм – атм. частицы). Даже в ясную погоду потери при  $\lambda = 10$  мкм в  $\sim 100$  раз меньше, чем при  $\lambda = 1$  мкм
4. Большая нелинейность приводит к самосинхронизации мод с частотой биений 13 ГГц
- 5.

## П/п терагерцовые источники излучения

Тип лазера и условия	Материал	T, К	$\lambda$ , мкм	f, ТГц	P, мВт
<b>ККЛ импульсный</b> $J_{th} = 0,1-0,6 \text{ кА/см}^2$	<b>GaAs/Al<sub>0,15</sub>Ga<sub>0,85</sub>As</b>	<b>164</b>	<b>67-200</b>	<b>1,5-4,2</b>	<b>8-56;</b> <b>248 (5К)!</b>
<b>ККЛ непрерывный</b> $J_{th} = 0,2-0,6 \text{ кА/см}^2$	<b>GaAs/Al<sub>0,15</sub>Ga<sub>0,85</sub>As</b>	<b>117</b>	<b>67-200</b>	<b>1,5-4,2</b>	<b>0,4-12;</b> <b>138 (5К)!</b>
<b>0,7 кВ/см; 0,42 Т</b>	<b>p-Ge:Ga</b>	<b>4-20</b>	<b>75-300</b>	<b>1-4</b>	<b>0,02-1,3</b>
<b>СО<sub>2</sub>-лазер; 30 кВт/см<sup>2</sup>; 0,1 мкс; 1Гц;</b>	<b>Si:P (Sb, Bi)</b>	<b>4</b>	<b>50-60</b>	<b>5 - 6</b>	<b>~ 10<sup>3</sup></b>
<b>ЭЛ; 100-150 нс; 413 Гц</b>	<b>Si:B; <math>\rho=1-10 \text{ Ом}\cdot\text{см}</math></b>	<b>4-150</b>	<b>37</b>	<b>8,1</b>	<b>0,03 (4К)</b>
<b>Nd-лазер + парам. генер.;</b> <b>~ 17 МВт/см<sup>2</sup>; 5 нс; 10 Гц</b>	<b>GaSe;</b> <b>толщина 15 мм</b>	<b>300</b>	<b>3 – 3540</b>	<b>0,1 - 110</b>	<b>2x10<sup>5</sup></b>
<b>1,2 Т; 1,56 мкм; 0,16 Вт;</b> <b>0,1 пс; 50 МГц</b>	<b>n-InSb, <math>4 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}</math></b>	<b>300</b>	<b>300 - 900</b>	<b>0,3 - 1</b>	<b>Max у</b> <b>0,5 ТГц</b>
<b>ЛОВ; 1,5 – 6 кВ</b>	<b>-</b>	<b>300</b>	<b>300</b>	<b>1</b>	<b>0,5 -3</b>



# Рекорды на сегодня

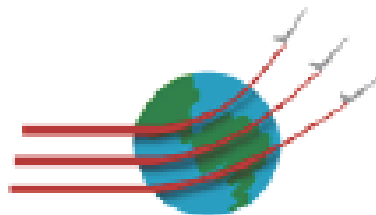
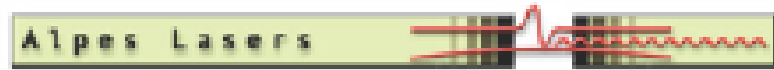


**The 2nd International Workshop on Quantum Cascade Lasers**  
 September 6-9, 2006 • Grand Hotel Rosa Marina • Marina di Ostuni, Brindisi, Italy

[ABOUT](#) / [SPEAKERS](#) / [PROGRAM](#) / [PARTICIPANTS](#) / [HOTEL](#) / [SPONSORS](#) / [CONTACT](#)

**QCL2006**

**SPONSORS**



# Рекордная мощность при $\lambda \sim 4,4$ мкм (Alpes Lasers)

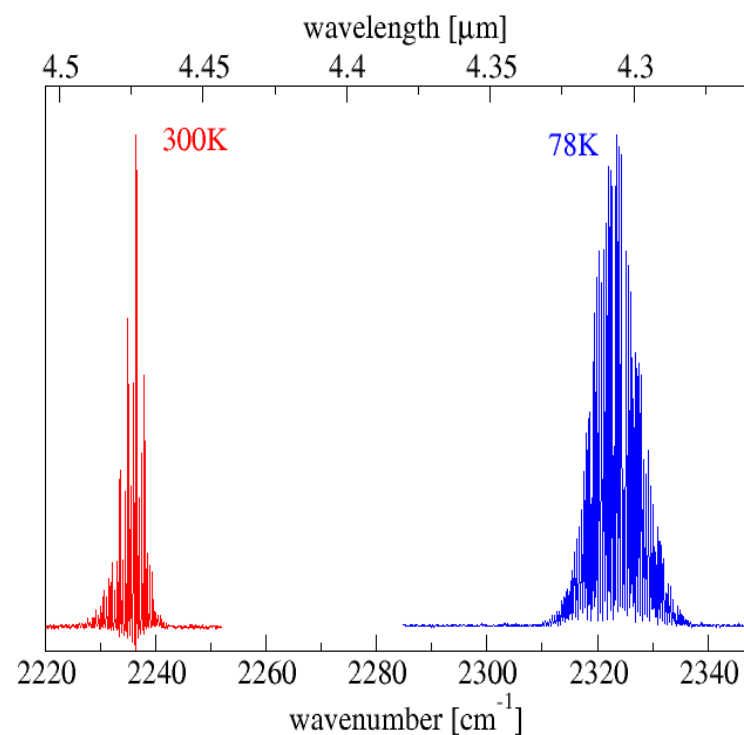
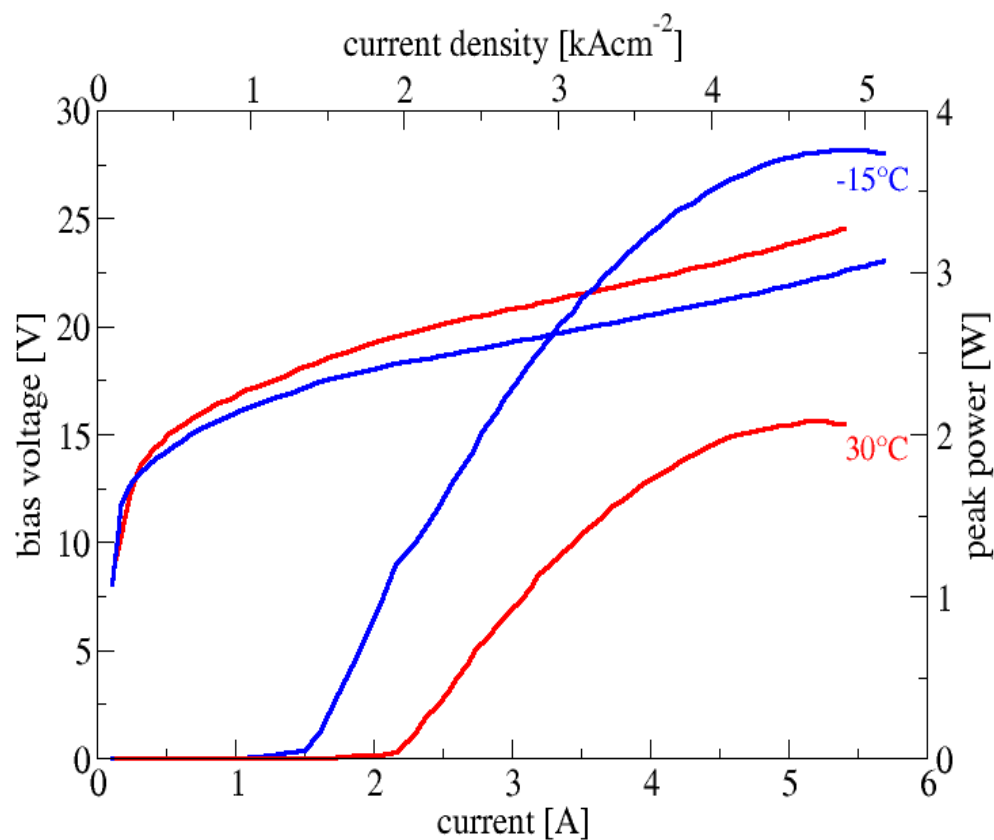
При  $R_{\text{зад}} = 1$  и  $T = 30$  °С:

$$J_{\text{пор}} = 1,94 \text{ кА/см}^2$$

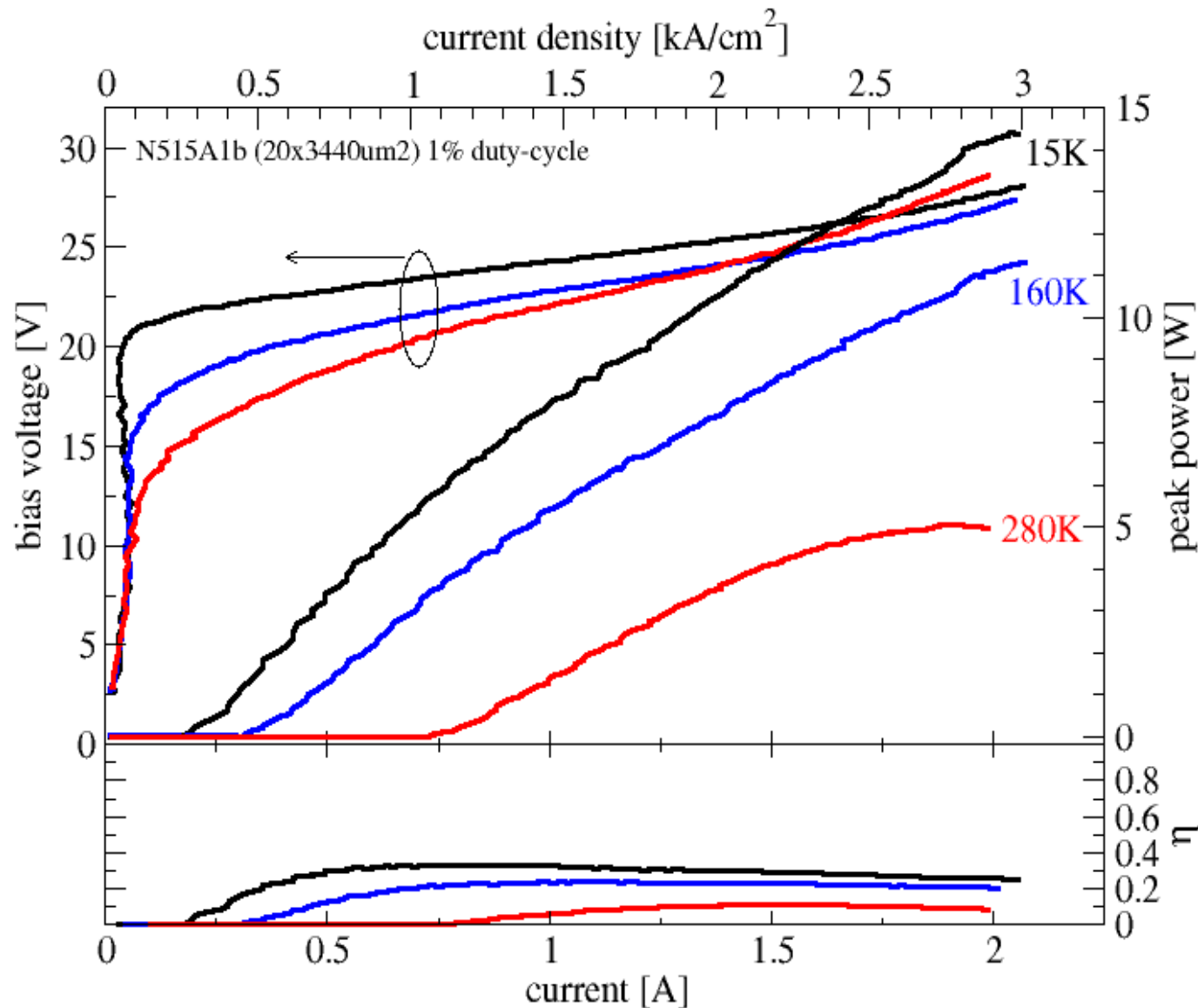
$$T_0 = 147 \text{ К}$$

$$P_{\text{реак}} = 2,1 \text{ Вт}$$

$$dP/dI = 1,1 \text{ Вт/А}$$



# Рекордная мощность при $\lambda = 5,2$ мкм (Alpes Lasers)



При  $R_{\text{зад}} = 1$  и  
 $T = 30$  °C:

$$J_{\text{пор}} = 1,26 \text{ кА/см}^2$$

$$T_0 = 190 \text{ К}$$

$$P_{\text{реак}} = 3,1 \text{ Вт}$$

$$dP/dI = 3,6 \text{ Вт/А}$$

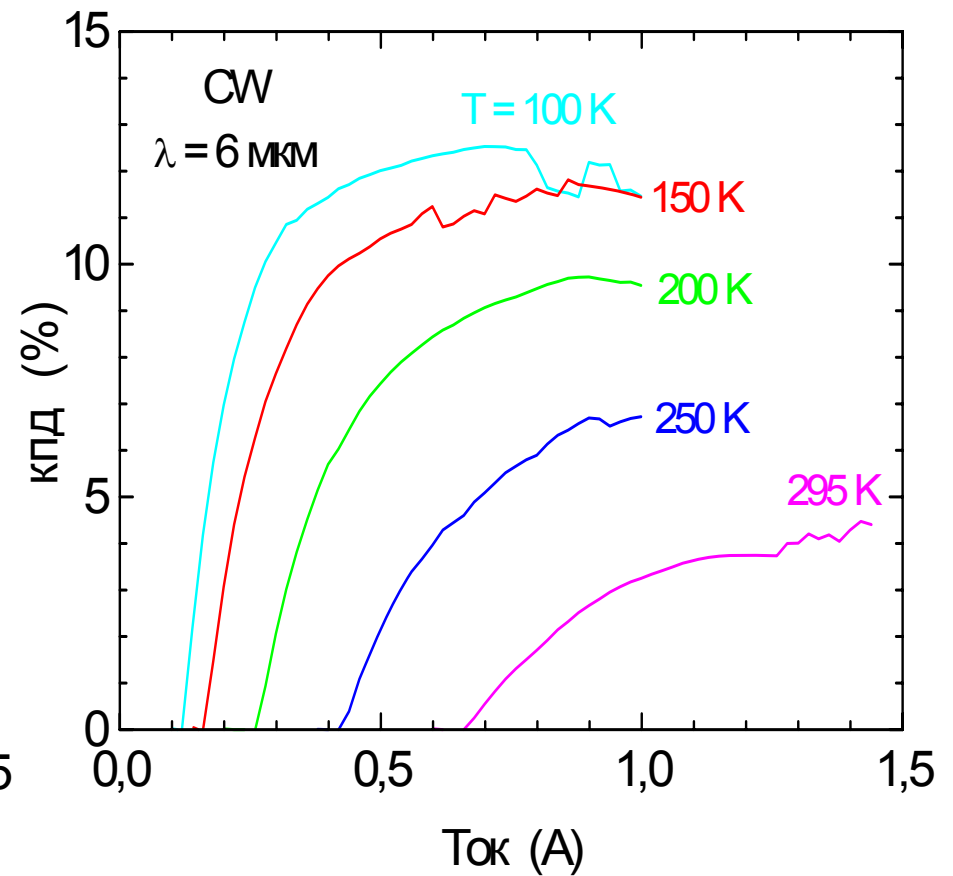
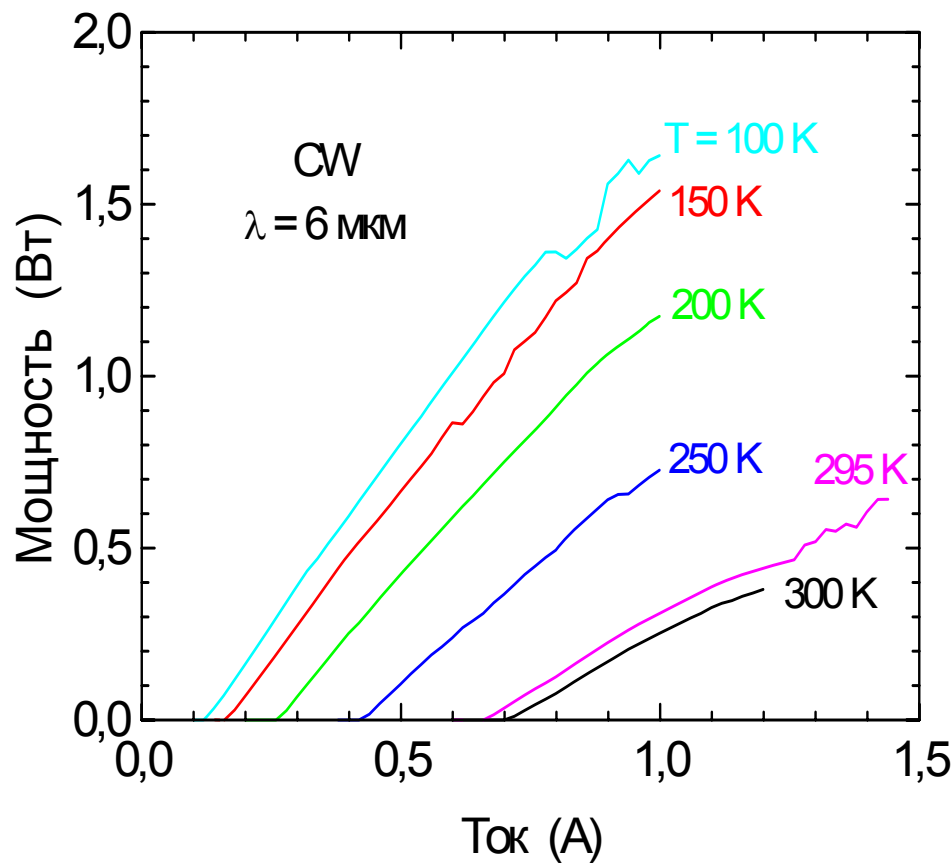
**Кпд до 33 %!**

# Рекордная мощность при 6 мкм (Illinois, M. Razeghi)

**Непрерывный режим:**

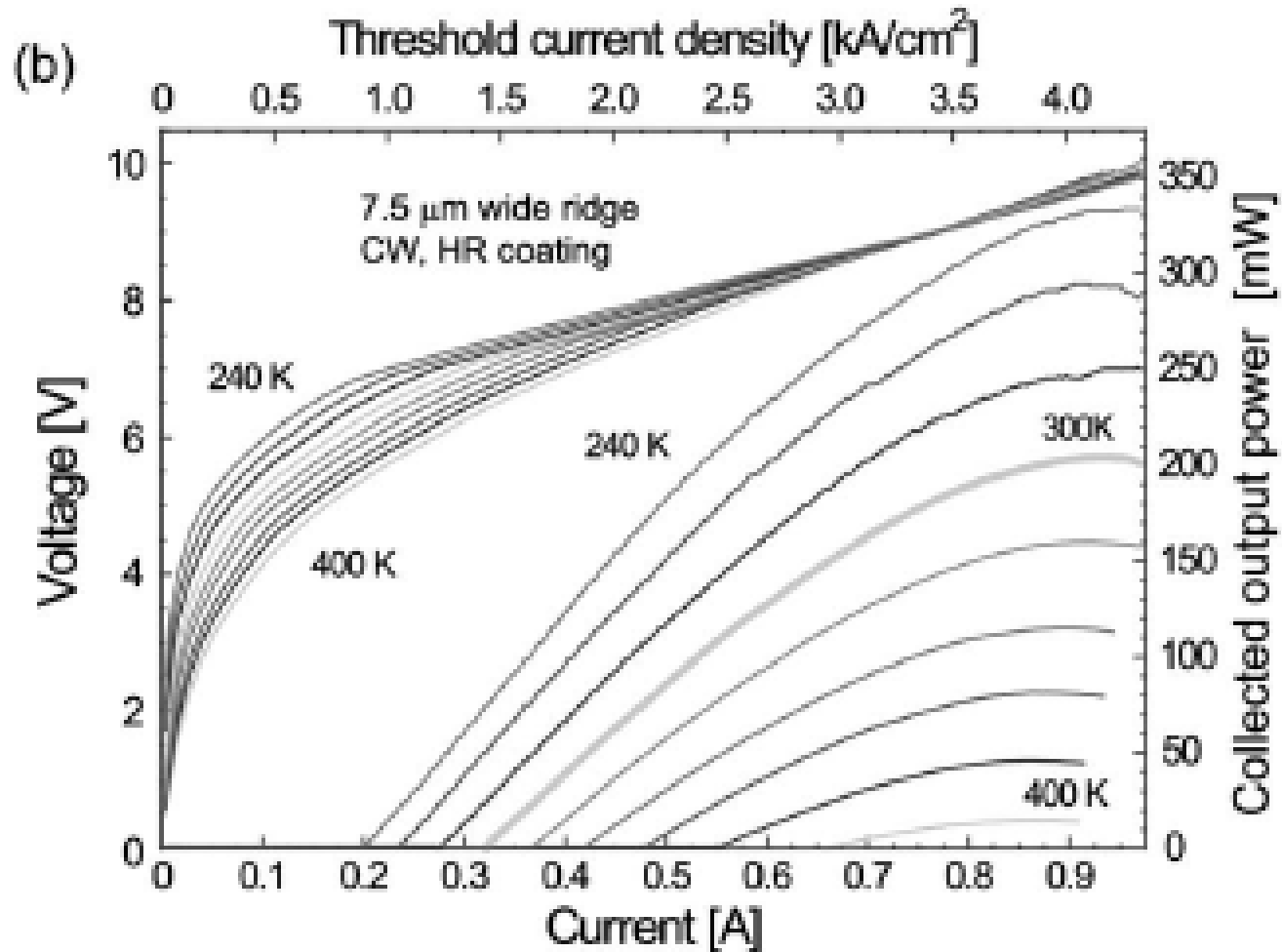
**$P > 1,1$  Вт  
 $P = 0,64$  Вт  
Кпд = 6,5 %**

**при 200 К  
при 295 К  
при 295 К**

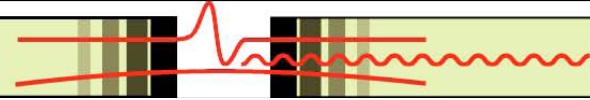


**РОС, 5-8 мкм, 170 мВт при 15° С!**

# MOVPE ККЛ (Harvard + Agilent Labs)



CW до 400 К,  $P(\lambda = 8,4 \text{ мкм}) = 204 \text{ мВт}$  при 300 К  
Capasso group, APL, **88**, 201115 (2006)



## О компании Alpes Lasers

- Основана в Нойшателе (Швейцария) в 1998 году (J. Faist et al)
- Первоначальный капитал составлял 100 kCHF (90 000 долларов)
- Имеет 13 работников
- Аккумулирует 30-летний опыт в конструировании и изготовлении ККЛ
- Владелец лицензии фирмы Lucent Technologies
- Сильная защита интеллектуальной собственности
- Имеется независимая разработка: переход из связанного состояния в сплошной спектр
- Наличие стандартных ККЛ и возможность заказа приборов с желаемыми характеристиками
- ККЛ поставляются с источниками питания, термохолодильниками и т.д.
- Товарооборот в 2004 г. составлял 1.6 MCHF (1,4 млн. долларов)
- Годовой рост с момента основания составляет 50-80 %

## Достижения Alpes Lasers (Blaser, ITQW-05)

1. Фирмой AL для спектроскопических приложений разработаны и продаются РОС-ККЛ с  $\lambda = 5,26$  и  $5,46$  мкм, работающие в непрерывном режиме при 300 К.
2. Гетеродинные измерения дали ширину линии излучения  $\sim 4$  МГц ( $\sim 10^{-4}$  см $^{-1}$ ) и позволили измерить фактор уширения линии при высокочастотной модуляции.
3. Мощные ККЛ с резонатором Фабри-Перо и  $\lambda \sim 4,5$  мкм, применяемые для радарных глушилок, имеют мощность в импульсе более 4 Вт при термоэлектрическом охлаждении ( $-30^{\circ}$  С) и более 12 Вт при 80 К.

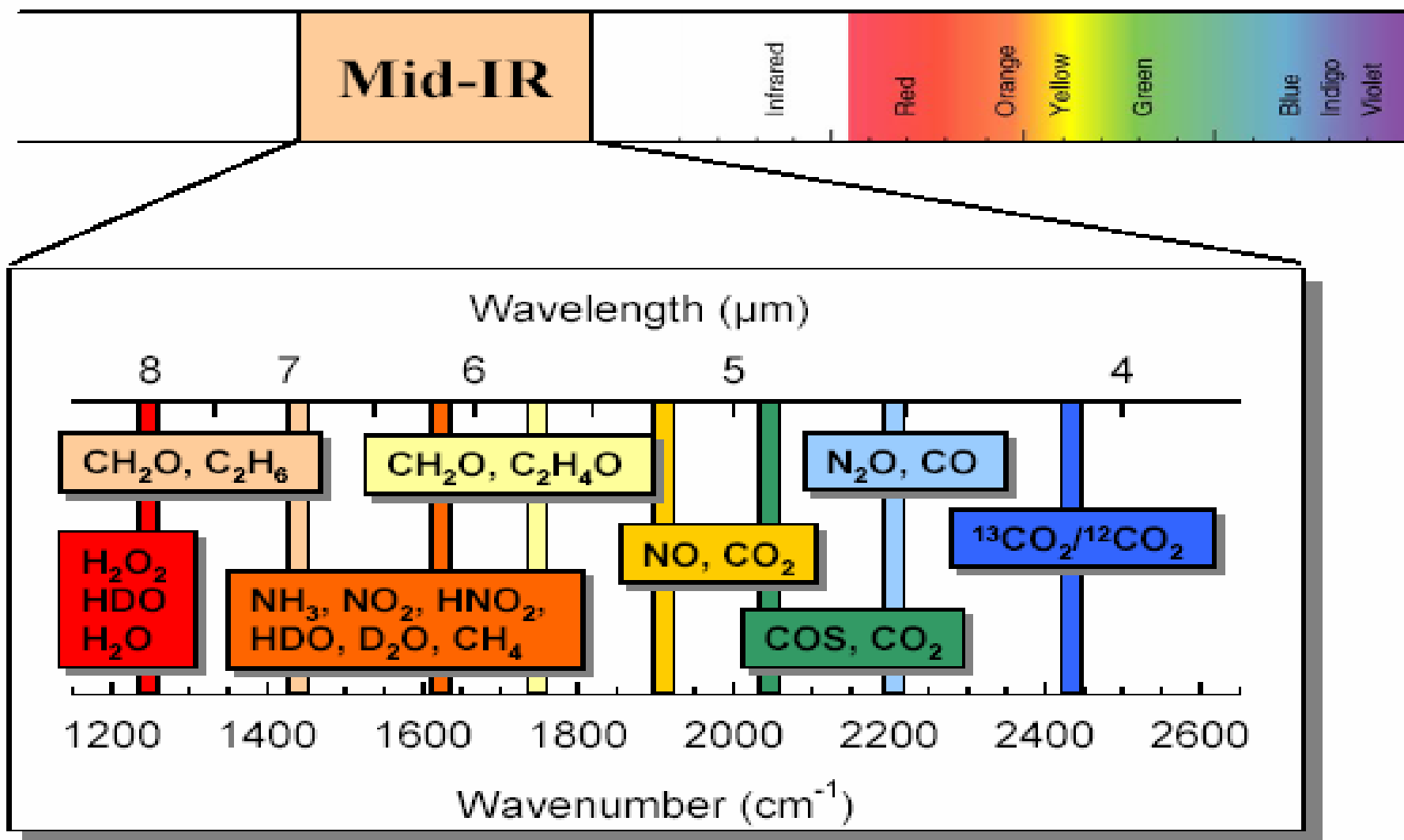


# Применения

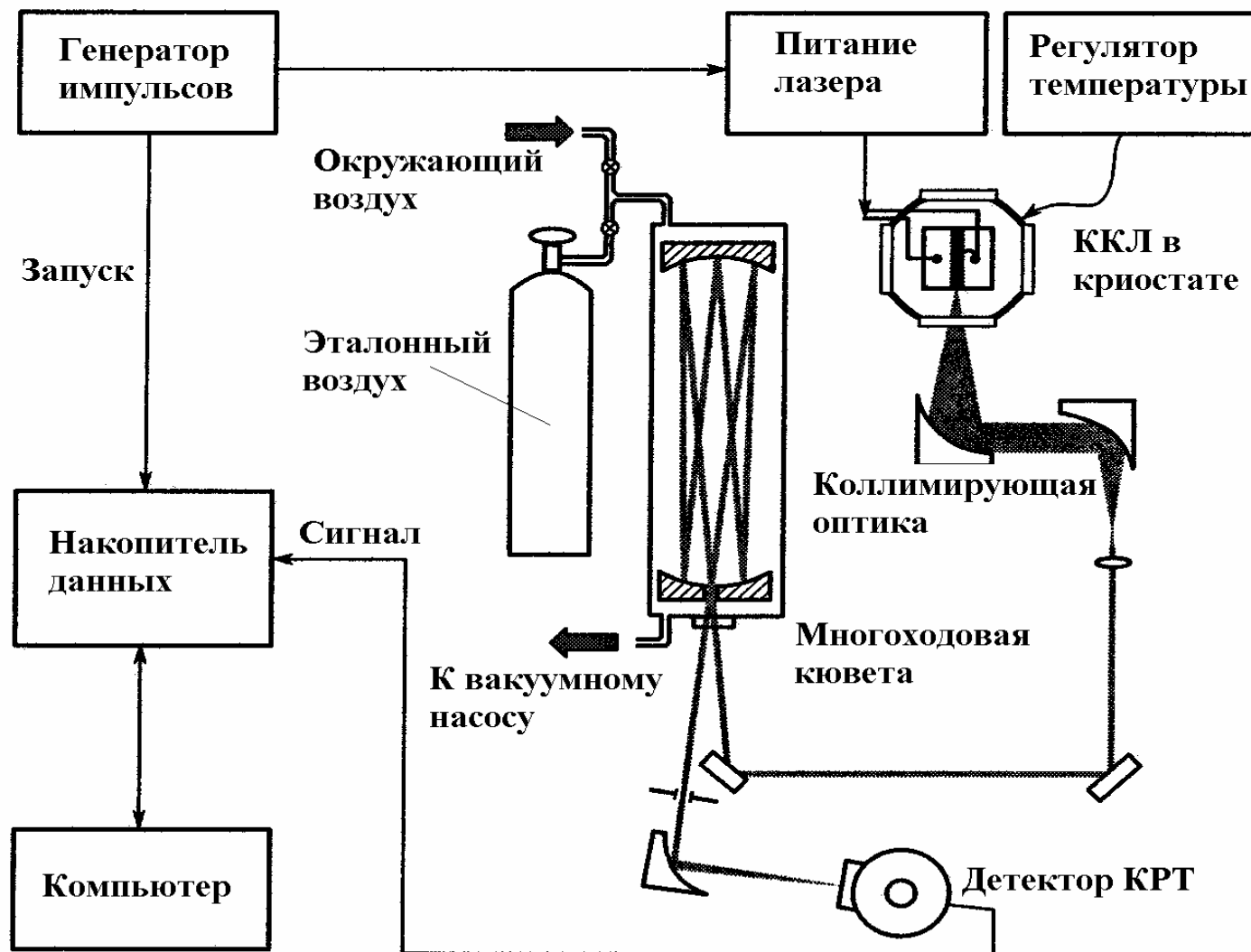
# Применения ИК (3 – 300 мкм) п/п лазеров

- Молекулярная спектроскопия высокого ( $\leq 10^{-4}$  см<sup>-1</sup>) разрешения
- Высокочувствительный ( $\sim 10^{-9}$ ) спектральный газоанализ
- Оптическое гетеродинирование в ИК (окна 3-5 и 8-12 мкм) области спектра
- **Контроль загрязнений окружающей среды:** контроль выбросов в атмосферу, дистанционный газоанализ, контроль быстропротекающих технологических процессов, вулканология, обнаружение следов веществ
- **Медицинская диагностика:** анализ выдыхаемого воздуха (50 тыс астматиков в США), контроль глюкозы (5,5 млн диабетиков в ЕС), бесконтактность
- **Оптическая и космическая связь**
- **Безопасность и оборона:** облучатели, глушилки для ракет, обнаружение наркотиков, взрывчатых и других химических веществ, биологических веществ, бесконтактная химическая томография, получение изображений оружия

# Полосы поглощения некоторых газов в средней ИК области спектра



# Схема лазерного газоанализатора на ККЛ



# Absorption Spectroscopy

DFB single-mode laser (TU Wien)

- $^{14}\text{NH}_3$  at  $1053\text{ cm}^{-1}$
- $^{15}\text{NH}_3$  at  $890\text{ cm}^{-1}$

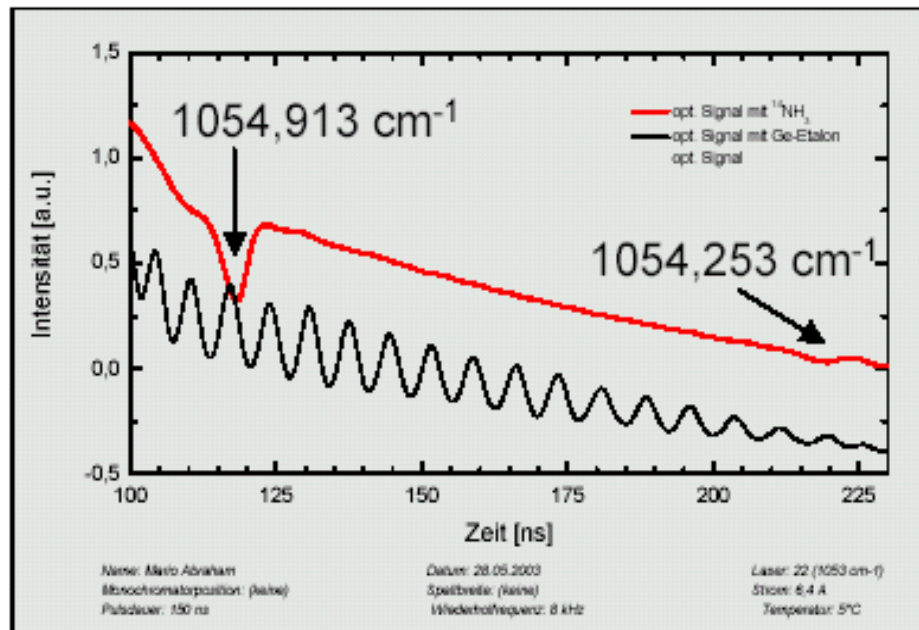


Figure 5: Detection of  $^{14}\text{NH}_3$

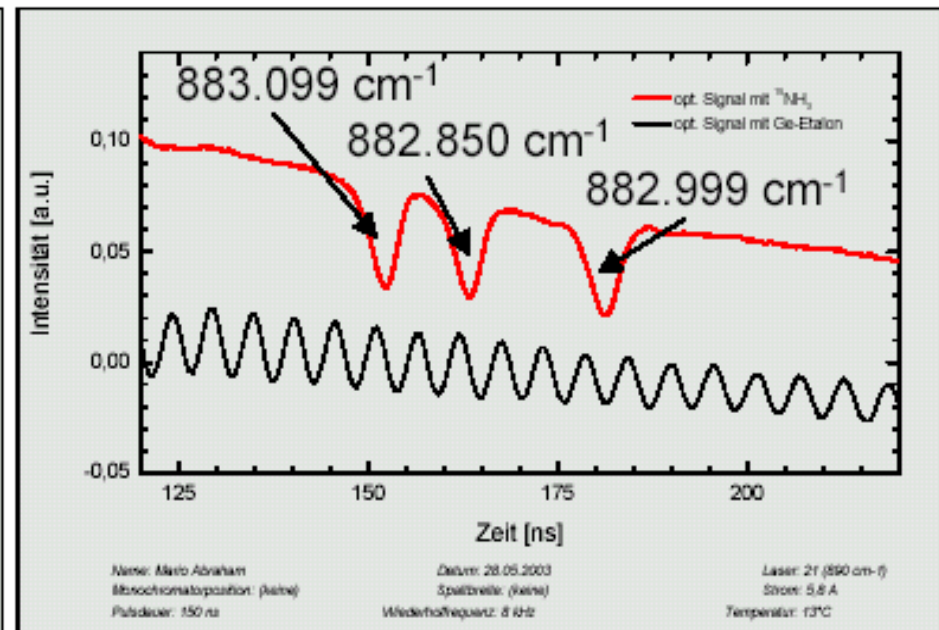


Figure 6: Detection of  $^{15}\text{NH}_3$

## Следы выдыхаемых газов и их средняя концентрация у здорового человека

Выдыхаемый газ	Сред. концентрация
Метан $\text{CH}_4$	2 – 10 ppm
Этан $\text{C}_2\text{H}_6$	0 – 10 ppb
Пентан $\text{C}_5\text{H}_{12}$	0 – 10 ppb
Окись азота NO	10 – 50 ppb
Окись углерода CO	1 – 10 ppm
Сульфид карбонила OCS	0 – 10 ppb
Закись азота $\text{N}_2\text{O}$	1 – 20 ppb
Изопрен $\text{C}_5\text{H}_8$	50 – 200 ppb
Аммиак $\text{NH}_3$	0 – 1 ppm
Ацетон $(\text{CH}_3)_2\text{CO}$	0 – 1 ppm

# Анализ выдыхаемого воздуха



**Ekids Technologies,  
Oklahoma, USA**

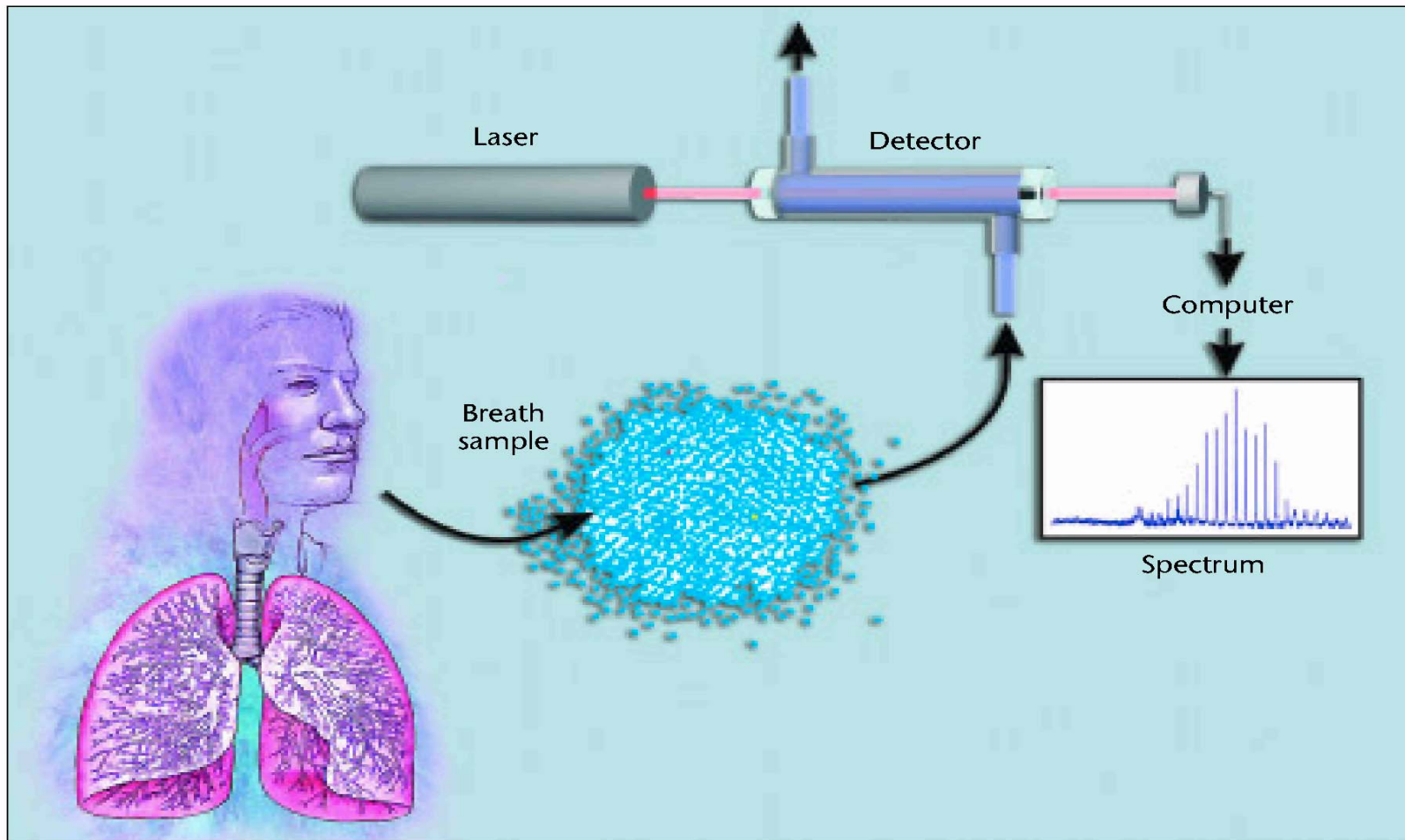
- Быстро
- Точно
- Бесконтактно
- Недорого

Молекула	Заболевание	$\lambda$ (мкм)
Окись азота NO	Астма	5,2
Отношение изотопов $^{13}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2$	Язва	4,3
Аммиак	Работа почек	6,0
Сульфид карбонила COS	Работа печени; экскременты	4,8
Алканы (пред. углево- дороды ряда $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ )	Рак молочной железы	3,3
Формальдегид $\text{CH}_2\text{O}$	Рак мол. железы	5,7
Ацетальдегид $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	Рак легких	5,7
Ацетон $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	Диабет	3,4
Сероуглерод $\text{CS}_2$	Шизофрения	6,7
Этан $\text{C}_2\text{H}_6$	Окислит. стресс	3,4

# Дыхательная диагностика

(Институт лазерной медицины при Университете в Дюссельдорфе)

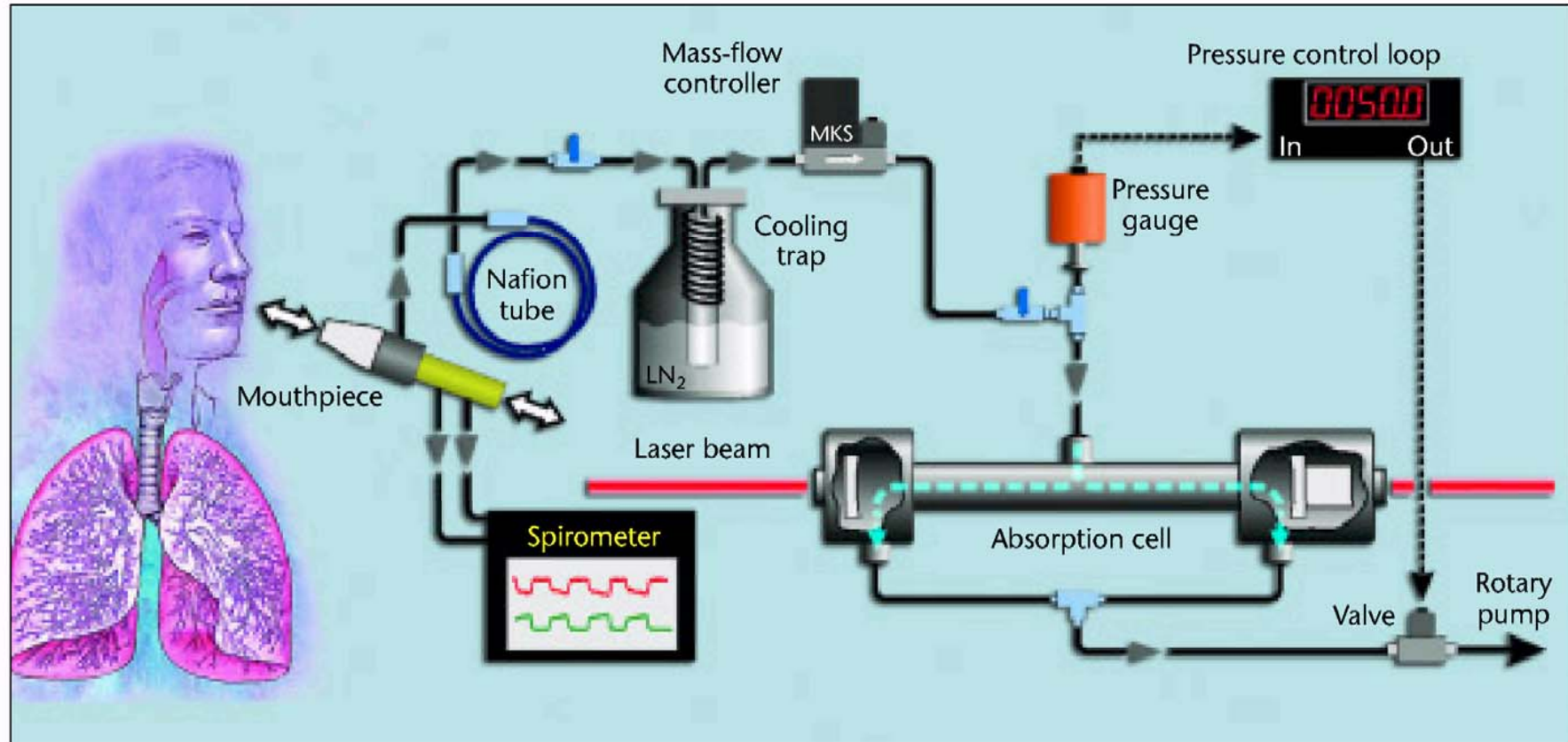
OPN, 16, 30 (2005)





# Дыхательная диагностика

(Институт лазерной медицины при Университете в Дюссельдорфе; OPN, 16, 30 (2005))

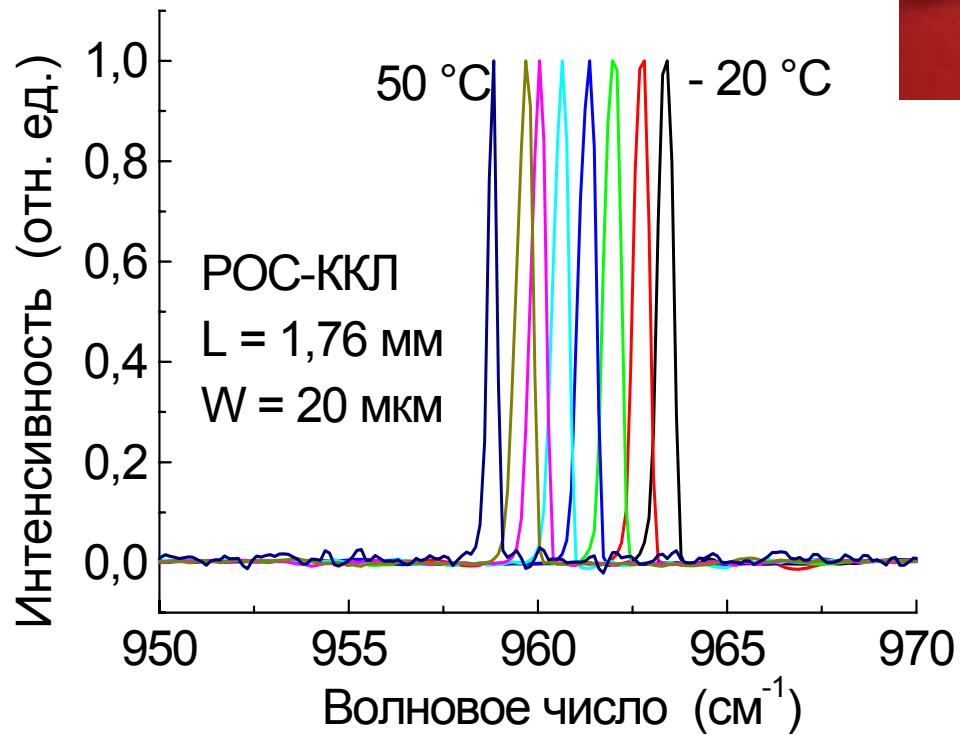


Длина волны 3 – 10 мкм

# Продаваемая газоанализаторная ККЛ-система на GaAs

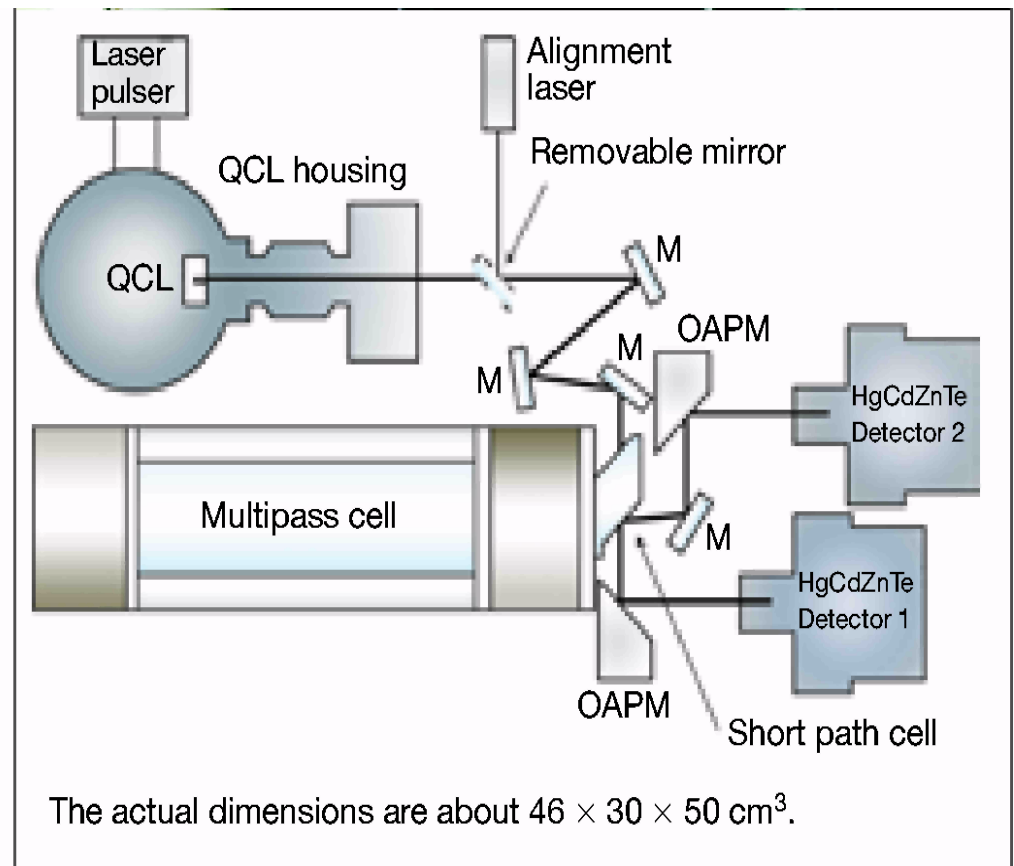
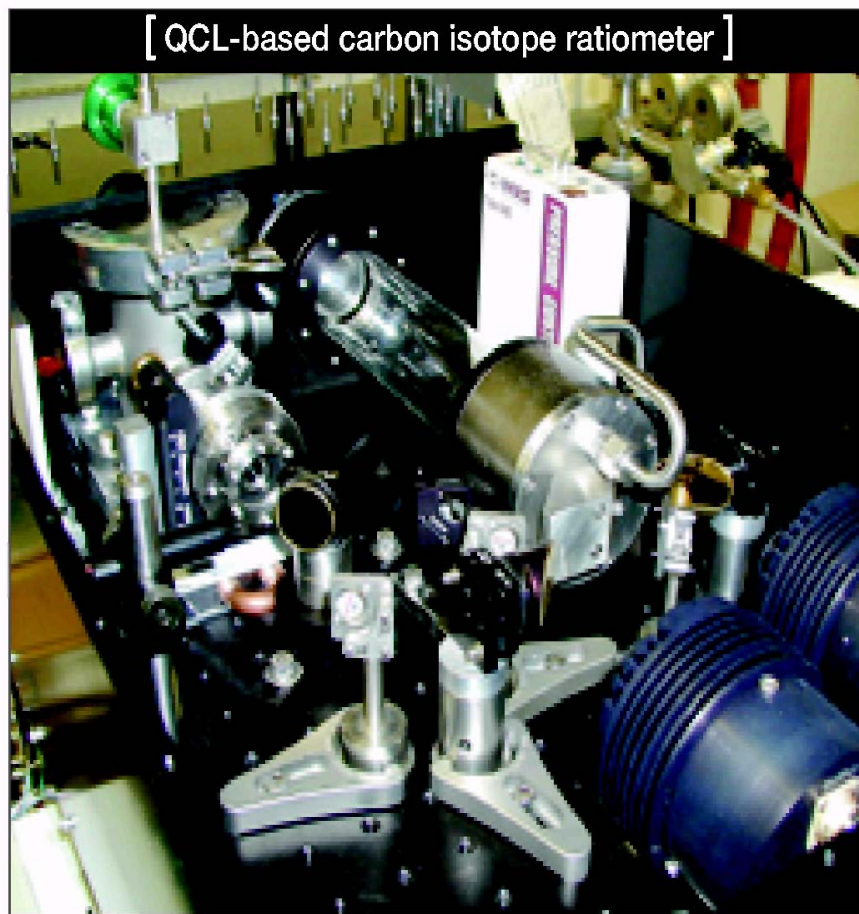
(Технический университет в Вене и фирма Laser Components)

$\lambda \sim 10 \text{ мкм}$      $T \sim 300 \text{ К}$



## Мониторинг вулканов


Измеритель отношения изотопов углерода  $^{13}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2$  ( $\sim 1/100$ ). Работает в области 4,3 мкм, точно, на месте и в реальном масштабе времени  
(Университет в Хьюстоне, Техас, OPN, 17, №5, 24 (2006))



# Мониторинг вулканов



Mt. Etna, Europe's largest volcano, with the Sicilian city of Catania in the foreground.

A photograph of Mount Etna, Italy, during an eruption. The volcano is shown in silhouette against a clear blue sky. A massive, dark grey plume of ash and gas rises from the summit, expanding as it goes higher. Several smaller vents are visible, each emitting a smaller plume of white steam or ash. The foreground shows the dark, sloping sides of the volcano.

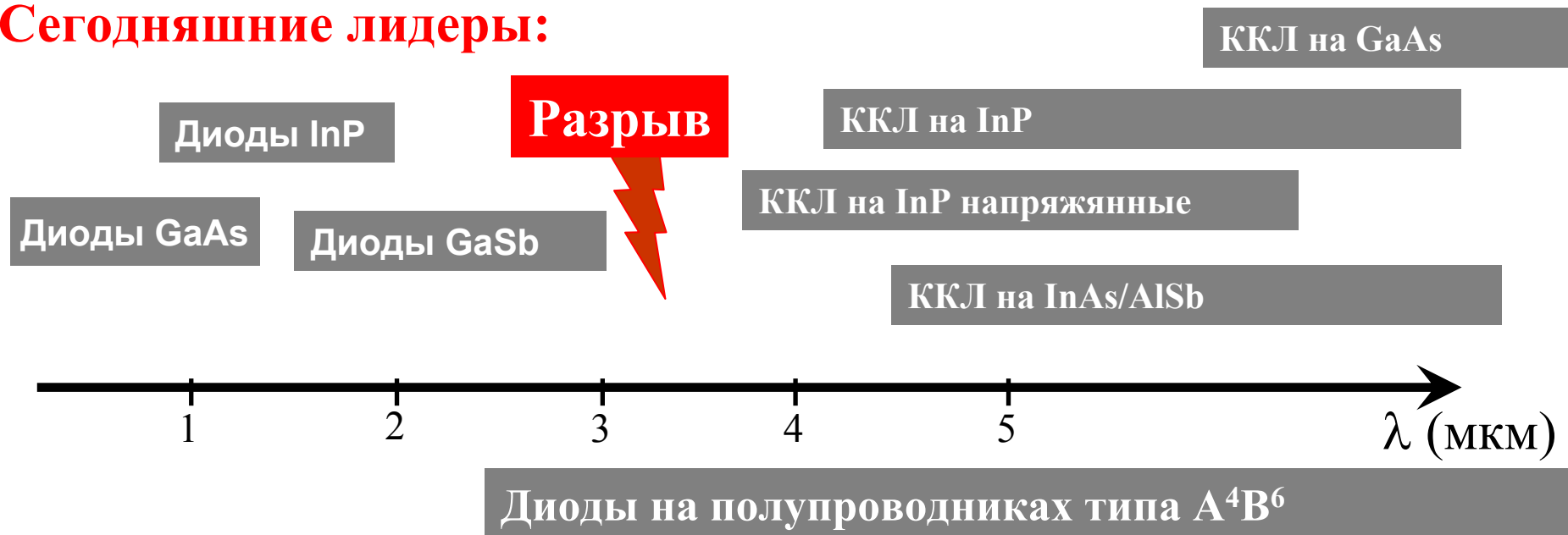
Mount Etna, Italy, emitting gases from its summit craters, and ash from the Laghetto cone, formed in 2001.

# Некоторые ключевые характеристики ККЛ

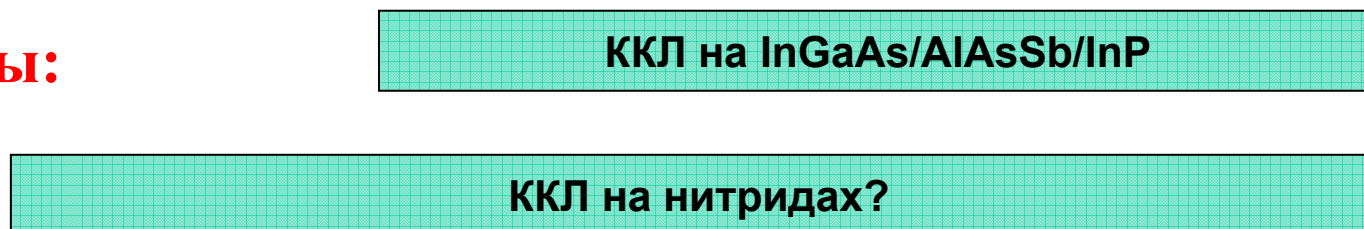
- Широкая спектральная ИК область  $3,4 - 24$  и  $67 - 200$  мкм (путем подбора размеров оказалось достаточно 2 гетеропар)
- Работа в непрерывном режиме при 300 К ( $5,4 - 9$  мкм)
- Импульсная мощность  $\sim 1$  Вт, средняя мощность  $\sim 100$  мВт
- Область плавной перестройки  $17$  см $^{-1}$  при  $\delta\nu \leq 1$  МГц
- Большая ширина полосы модуляции ( $60$  ГГц) благодаря высокоскоростной динамике ККЛ
- Имеющийся уровень технологии полупроводников  $A^3B^5$  позволяет массовое производство
- Малые массо- и весогабариты, жесткость (например, по ср. с параметрическим генератором)

# ИК полупроводниковые лазеры

Сегодняшние лидеры:



Кандидаты:



**Предсказания** (путем голосования участников 2-го Международного семинара по ККЛ, Италия, сентябрь 2006 г.)

1. **СW, 300 К, 4-10 мкм,  $P > 1$  Вт**
2. **Стимулированное излучение из ККЛ на КТ через 2 года**
3. **Перестройка более 10 % (реализовано)**
4. **СW, 300 К, с  $\lambda < 3$  мкм**
5. **Рынок более 10 млн. долларов в год**
6. **ТГц ККЛ при рабочей температуре более 240 К (темоэлектрическое охлаждение)**
7. **Коммерческие системы на основе ТГц ККЛ**



## Предложения компании “Alpes Lasers”

Тип	Рабочая температура	$\lambda$ , мкм	P, мВт	$\Delta\nu$ , МГц
RT-P-DFB	- 30 ÷ + 30 <sup>0</sup> C	4 - 12	> 1	300
LN2-CW-DFB	80 K ÷ 150 K	4 - 10	2 - 100	3
RT-P-FP	- 30 ÷ + 30 <sup>0</sup> C	4 - 20	100	0,5 мкм

**$I_p = 1 - 4 \text{ A}$        $I_{CW} = 0,3 - 2 \text{ A}$        $V = 8 - 10 \text{ B}$**

**Срок службы до 5 лет**

## Цены на ККЛ в тыс. Евро (см. <http://www.alpeslasers.ch>)

Тип	Режим	T (К)	P (мВт)	$\delta\nu$ (МГц)	$\Delta\nu$ (%)	На полке	На заказ
РОС	Имп.	300	> 5	< 330	0,4	13,5	35
РОС	CW	80	> 2	< 3,5	0,4	23,5	50
РОС	CW	300	> 2	< 3,5	0,3	23,5	60
ФП	Имп.	300	> 10	1- 4 %	Нет	6	От спроса
ФП	Имп.	80	>150	1- 4 %	Нет	20	От спроса
ФП	CW	300	> 5	1- 4 %	Нет	17	От спроса

## Авторы КЖЛ



**Академик Р. Сурис**



**R. Kazarinov**

## Авторы ККЛ



**Federico Cappasso**



**Alfred Cho**

## Авторы ККЛ



**Jerome Faist, University of Neuchatel, Switzerland**



**Carlo Sirtori, Thales R&T, Orsay, France (1997)**

## Лидеры в области ККЛ



**Paul Harrison, University of Leeds, UK (1995). Расчеты**



**John Cockburn, University of Sheffield, UK (2003), MOCVD**



## **Prof. Manijeh Razeghi**

**1980 – Парижский  
университет**

**1980-1991 – фирма  
Thomson-CSF (Франция)**

**1991 – проф. Северо-  
Западного университета  
в Иллинойсе**

**Адъюнкт-профессор в  
Оптическом центре  
Аризонского  
университета**