#### РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



Рекордные характеристики квантовых каскадных лазеров

И. И. Засавицкий



2. Тем-рная зависимость порогового тока

3. Проблема расширения спектрального диапазона. Перестройка.

- 4. Рекордные мощности излучения
- 5. О КПД от розетки (≥ 50 %)
- 6. Некоторые применения ККЛ
- 6. Выводы и перспективы

18-ый Общероссийский семинар по ДЛС, 31 октября 2012 года, Москва 1

### Квантоворазмерный и туннельный эффекты



$$U_0 = \Delta E_c = (0,3 \div 1,5) \Im B$$



 $\mathbf{D} \sim \exp[-0.325 \mathbf{L}_{B} \sqrt{\mathbf{m}^{*}(\mathbf{U}_{0} - \mathbf{E})}]$  $\mathbf{D} \sim 1$  При когерентном резонансном туннелировании



Сравнение квантоворазмерных междузонных и межподзонных переходов

Квантовый каскадный лазер:

- униполярный прибор
- $-h\nu = f(L_z)$
- Оже-рекомбинация подавлена
- узкая ширина линии усиления
   (б-образный профиль)

### Простейшая схема вертикальных переходов



Механизм образования инверсии населенностей в квантовой яме при межподзонном рассеянии с испусканием продольного оптического фонона

$$E = E_n + \frac{\hbar^2 k_{11}^2}{2m^*}$$

Т.к.  $(E_3 - E_2) > (E_2 - E_1),$ то  $q_{32} > q_{21}.$ Поскольку  $\tau \sim q^2$ , то  $\tau_{32} > \tau_{21}$ 

$$\tau_{if} \sim q_{if}^2$$

$$V(r) = \int E dr \sim \int e^{i(qr - \omega t)} dr \sim q^{-1}$$

$$\frac{1}{\tau_{if}} = \frac{2\pi}{\hbar} \left| \left\langle \psi_i \middle| V(r) \middle| \psi_f \right\rangle \right|^2 \delta(E_f - E_i + \hbar \omega_{LO})$$



### Схема ККЛ с вертикальными переходами и инжектор [Capasso et al., APL, 67, 3057 (2001)]

E = 70 кВ/см



Ширины ям и барьеров (жирные) слева направо: **6,8**/4,8/**2,8**/3,9/**2,7** нм

Вертикальные излучательные переходы происходят внутри одной квантовой ямы. Ширина линии мала (~10 мэВ). Инжектор- это слегка апериодическая и частично легированная СР. Его функции: 1. служит резервуаром для электронов и их охлаждения; 2. исключает образование доменов в электрическом поле; 3. формирует минищель (минигэп), которая блокирует переходы с верхнего лазерного уровня; 4. Разность между нижним лазерным уровнем и основным уровнем инжектора есть мера обратного заброса электронов

### Схема работы ККЛ. Инжекция и релаксация электронов в активной области ККЛ (4-уровневая схема). Роль LO-фонона.



### Ранняя эволюция рабочих схем ККЛ (от 2 до 5 ям)



### Оптимизация рабочей схемы

Она, как правило, заключается в следующем:

1. Эффективная туннельная инжекция на верхний лазерный уровень (иногда селективная)

2. Уменьшение тока утечки на верхние состояния и в континуум

3. Эффективная экстракция электронов с нижнего лазерного уровня

4. Уменьшение обратного заброса носителей заряда, который растет с увеличением температуры (снижение вольтового дефекта).

Процесс оптимизации зависит от конкретной задачи и схемы, требует компромиссного подхода. При симуляции варьируются параметры гетероструктуры (ширины ям и барьеров, высота барьеров, значение электрического поля и др.)

# Схематическая классификация оптических и безызлучательных переходов в различных ККЛ







Оптические переходы между верхними и нижними лазерными состояниями:

#### Внутризонные схемы:

- 1. Синглет-синглетные вертикальные в реальном пространстве
- 2. Синглет-синглетные диагональные в реальном пространстве
- 3. Синглет квазиконтинуум
- 4. Дублет синглет
- 5. Дублет-континуум
- 6. Межминизонные в сверхрешетках

*Междузонные схемы*: как правило, используют синглет-синглетные диагональные в реальном пространстве переходы (ГП второго типа). **Безызлучательные переходы с участием продольного LO-фонона**:

- 1. Однофононные резонансные переходы (как правило, антикроссинг)
- 2. Однофононные переходы «синглет континуум»
- 3. Последовательные резонансные переходы с участием 2 фононов
- 4. Последовательные резонансные переходы с участием 3 фононов
- 5. Однофононные резонансные переходы + переход «синглет»-континуум

## Конструкция полоскового ККЛ (внешние размеры, волновод, квантовые ямы и инжектор)



N = 3,1/3,2/3,5/3,35 для InP/AlInAs/GaInAs/AO 11

### Спектр излучения

## Спектры излучения в импульсном многомодовом и непрерывном одномодовом режимах при 300 К



### Температурная зависимость порогового тока

### Температурная зависимость пороговой плотности тока



### Характеристическая температура T<sub>0</sub> для InGaAs/InAlAs

### $J_{th}(T) = J_0 \exp(T/T_0)$

Рабочая схема	5	λ, мкм	<i>J<sub>th</sub></i> (300К) кА/см <sup>2</sup>	<i>Т<sub>0</sub></i> , К	Интер вал, К
Мелкая яма и слои AlAs в	3	5	1,43	383	298-
инжекторе для снижения утечек Razeghi et al., APL, <b>97</b> , 251104 (2010)					373
Дублетный верхний лазерный уровень ⇒ внизу континуум HamamPhotonics, OE, <b>19</b> , 2694 (2011)		8,7	2,6	510	300- 400
Диагональный переход с верхним промежут. состоянием+ 1 фонон HamamPhotonics, APL, <b>97</b> , 201109 (2010)		15	3,5	450	320- 380
Диагональный переход + 2 LO-фонона ⇒ континуум Gmachl et al., Princeton, OE, <b>19</b> , 8297 (2011)		14	2,0	306	240- 390
	$\Delta E = f(T) \checkmark$				16

### **Большая Т<sub>0</sub> для длинноволнового лазера** [Gmachl et al., OE, **19**, 8297 (2011)]



Рабочая схема: 6 КЯ; оптический диагон. переход + 2 LO-фонона ⇒ континуум

 $\lambda = 14$  мкм; 70 каскадов; L =2,8 мм; при 300 К: J<sub>th</sub> = 2 кA/см<sup>2</sup>, P = 336 мВт, 375 мВт/А; T<sub>0</sub> = 190 -310 К

### ККЛ с переходами «дублет ⇒ континуум»

[Hamamatsu Photonics, Yamanishi et al.,, APL, 97, 201109(2010); OE, 19, 2694 (2011)]

Согласованная пара InGaAs/InAlAs; MOVPE; 40 периодов



Сначала: **DAU/SS** (переход «дублет  $\Rightarrow$  синглет»), 4 КЯ,  $\lambda \sim 8,4$  мкм; 330 см<sup>-1</sup>; T<sub>0</sub> ~ 306 К  $\Delta E_{43} \sim 20$  мэВ;  $\Delta E_{54} \sim 60$  мэВ Переход «дублет  $\Rightarrow$  континуум», 5 КЯ; 40 каскадов  $\lambda \sim 8,7$  мкм;  $\Delta\lambda/\lambda_0 \sim 0,4$ ; 500 см<sup>-1</sup>;  $J_{th} = 2,6$  кА/см<sup>2</sup>; Ширина ЭЛ слабо зависит от Т и V при T > 300 К;  $T_0 \sim 510$  К;  $P_{\rm имп}(300$  К)  $\sim 1$  Вт;  $P_{\rm CW}(30\ ^0{\rm C}) \sim 0,1$  Вт на AlN; Slope  $\sim 0,5$  Вт/А

### Рекордные мощности излучения

### Вольтамперная и ваттамперная характеристики мощных ККЛ в импульсном и непрерывном режиме



Схема ККЛ с нерезонансной экстракцией электронов на основе напряженной ГС  $In_{0.73}Ga_{0.27}As/Al_{0.71}In_{0.29}As$ ( $\lambda = 4$  мкм) [Patel et al., PNAS, **107**, 18799 (2010); SPIE, **7953**1L(2011)]

Проблема при  $\lambda < 4,5$  мкм: утечка в непрямые X- и L-долины и термоионная эмиссия в континуум. Non-resonant extraction (NRE) дает больше свободы и позволяет увеличить расстояние  $E_{54}$ .  $E_{54}=60$  мэB;  $E_{C4}=280$  мэB MBE, BH, HR, AR, AlN, air-cooled, P = 2 BT с одного торца



# ВАХ, ВТАХ и КПД для ККЛ, работающего в непрерывном режиме при 300 К с $\lambda = 4,6$ мкм [Patel et al., SPIE, 73250L (2009)]



22

#### Мощные длинноволновые ККЛ на напряженных гетероструктурах с эффективностью инжекции 70 % [Patel et al., OE, 20, 24272 (2012)]



# Рекордная мощность излучения в непрерывном режиме при 300 К [Razeghi et al., APL, 97, 251104 (2010); 98, 181102 (2011)]



Согласованная мелкая яма (1,3 нм) снижает также шероховатость интерфейса, т.е. ширину линии. Легирование до 2х10<sup>16</sup> см<sup>-3</sup>. (AlAs, зазор 3-4, вольтовый дефект, шероховатость, диагональный)

### Shallow-well design

Мелкая асимметричная яма (пара Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As/Al<sub>0.48</sub>In<sub>0.52</sub>As), далее пара Ga<sub>0.31</sub>In<sub>0.69</sub>As/Al<sub>0.64</sub>In<sub>0.36</sub>As и слой AlAs в инжекторе для уменьшения утечек в континуум  $\Delta E_{43} \sim 100$  мэВ (вместо 80 мэВ)  $\Delta E_{54} = 70$  мэВ (вместо 83 мэВ)  $\Delta E_{g2} = 180$  мэВ (вместо 160 мэВ) GSMBE, 3 КЯ, 5 материалов, 40 периодов,  $\lambda = 4,9$  мкм BH, HR, AR, 5 MMX8 MKM  $P_{CW}$  (300 K) = 5,1 BT  $T_0 \sim 383 \text{ K} (298 - 373 \text{ K})$ КПД = 21 % и 27 % (для CW и импульсного режима)

Рекорды в импульсном и непрерывном режиме

 Импульсный режим, λ = 200 нс; T = 298 К; широкий лазер (400 мкм); L = 3 мм; ері-up/Cu; λ = 4,45 мкм; 120 Вт! [Razeghi et al., 95, 221104 (2009)]

2. Непрерывный режим при T = 80 K; BH, HR, 5 ммх12,5 мкм, λ = 4,6 мкм; P = 7,3 BT; КПД = 30 %; [OptEng, 49, 111105(2010)]
λ = 9 мкм; P = 2 BT (300 K) [Patel et. al., OE, 20, 24272(2012)]

3. Обычно РОС-лазеры дают ~ 0,1 Вт мономодового излучения. Рекорд получен на вертикальной схеме переходов с двухфононным опустошением. Эффективная связь с поверхностным плазмоном. BH, HR, AR, 5 ммх8 мкм;  $T = 298 \text{ K}; \lambda = 4,8 \text{ мкм}; P_{CW}$  (298 K) = 2,4 BT, 30 дБ, перестройка 2084-2088 см<sup>-1</sup> при токе 1-1,7 A, 1 лепесток. [Razeghi et al., 98, 181106 (2011)] О КПД от розетки

#### ККЛ излучает больше света, чем тепла: КПД > 50 % [NatPhot, 4, 95 (Gmachl et al.) и 99 (Razeghi et al.) (2010)]



Ультрасильная связь с инжектором, что снижает влияние интерфейса. Тогда при толщине инжекционного барьера ~ 1 нм связь (расщепление) составляет ~ 10 мэВ. 3-ямная АО; 2-фононное опустошение. Слегка диагональный переход из-за связи МОСVD; 43 периодов; 3 мм х 14 мкм  $\lambda \sim 4,5$  мкм; КПД = 40-50 % при T ≤ 160 К



3-ямная AO, однофононное опустошение и одноямный инжектор Слегка диагональный переход При низких T обратный заброс мал и можно снизить вольтовый дефект MBE; 80 периодов; 2 мм х 6 мкм λ ~ 5 мкм; КПД = 53 % при 40 К

# Расширение спектрального диапазона генерации

### Перестройка длины волны излучения ККЛ

Мечта спектроскописта: узкая линия излучения, перестраиваемая в широкой области спектра. Решения: РОС-лазеры (область перестройки 10-20 см<sup>-1</sup>)

Внешний дисперсионный резонатор (100-500 см<sup>-1</sup>)

Ширина полосы обеспечивается так:

- 1. Гетерогенная АО с разными λ (Faist). Получено Δk = 160 см<sup>-1</sup>. Трудно получать одномодовый режим из-за конкуренции мод.
- 2. Bound-to-continuum, 5 разных каскадов (Faist, Δk = 432 см<sup>-1</sup>). Линия ЭЛ асимметрична и ее ширина падает с ростом напряжения.
- 3. Continuum-to-continuum (Gmachl). Получено Δλ/λ<sub>0</sub> ~ 0,2. Однако, нужна селективная инжекция для каждого состояния, утечка носителей в высоколежащие состояния и неоднородное уширение.
- 4. Dual-upper-state to single-lower-state (Нататики Phot.). Верхняя пара уровней получена в результате антикроссинга. Далее нижними состояниями служил квазиконтинуум (multiple-lower-state).
  Получена очень широкая (Δk ~ 500 см<sup>-1</sup>, λ ~ 8,7 мкм, Δλ/λ<sub>0</sub> ~ 0,4), асимметричная линия ЭЛ и ее ширина слабо зависела от напряжения . Пороговая плотность тока очень слабо зависела от температуры (T<sub>0</sub> ~ 510 K).

# Основные проблемы при разработке длинноволновых лазеров (выше энергии LO-фонона)

- 1. При уменьшении энергии фотона труднее создать инверсию, т. к. время жизни верхнего лазерного уровня уменьшается из-за увеличения скорости рассеяния с участием LO-фонона.
- 2. Утечка носителей из инжектора непосредственно на нижний лазерный уровень аналогично становится больше.
- 3. Малая энергия фотона приводит к низкой вольтовой эффективности: отношение уменьшения энергии фотона к полному уменьшению энергии на всей структуре.
- 4. Волноводные потери растут как квадрат длины волны излучения.

**Нужна оптимизация**: повышение эффективности инжекции и экстракции электронов, снижение обратного заброса и утечек носителей

Для гетеропары GaInAs/AlInAs ( $\hbar \omega_{LO} = 34 \text{ мэB}$ )  $\lambda_{max} = 24 \text{ мкм}$ Дальше не пускает LO-фонон!

### Продвижение в коротковолновую область

### Проблемы:

1. Утечка в континуум из-за термической активации носителей

- 2. Междолинное рассеяние в Х- и L-долины (в III-V)
- 3. Резонансное перепоглощение внутри области экстракции
- 4. Сужение квантовых ям ужесточает требования к качеству интерфейса и контролю напряжений в процессе роста

5. Увеличивается рабочее напряжение, т.е. проблема тепловыделения

### Решения:

1. InAs/AlSb на InAs:  $\lambda = 2,6$  мкм; 5,5 кА/см<sup>2</sup> и 260 мВт при 80 К [Баранов и др., APL, 96, 141110(2010)]

2. Композитные ямы и барьеры  $In_{0.73}Ga_{0.27}As/AlAs(Sb)/InP: \lambda = 3,1$  мкм; 3,5 кA/см<sup>2</sup> и 120 мВт при 80 К [Masselink et al., SPIE, 688913 (2008)]

3.  $In_{0.7}Ga_{0.3}As/AlAs(Sb)/InP: \lambda = 3,3$  мкм; 3,5 кA/см<sup>2</sup> и 3,5 Вт при 300 К [Cockburn et al., 97, 031108 (2010))]

4. Без Sb, но с AlAs!  $In_{0.72}Ga_{0.28}As/In_{0.52}Al_{0.48}As$ -AlAs/InP; bound-enlarged continuum + split-injector barrier; L-долина на 30 мэВ выше Х-долины, и обе они выше верхнего лазерного уровня ):  $\lambda = 3,3$  мкм; 3,5 кА/см<sup>2</sup> и ~ 1 Вт при 300 К; до 350 К [Faist et al., 98, 191104 (2011)]

### Роль междолинного рассеяния для коротковолновых ККЛ на основе напряженной гетеропары InGaAs/AlInAs (NRE design) [Patel et al., SPIE, 73250L(2009); 79531L(2011); APL, 95, 1411113(2009)]

λ, мкм	Импульсный режим (т= 500 нс)		Непрерывный режим		Комментарий	
	Р, Вт	КПД, %	Р, Вт	КПД, %		
3,6	0,05 7 мм х 8 мкм		0,05 6 мм х 6 мкм		MBE; 35 каскадов; epi-down; AlN; BH; HR; 266 К; τ= 300 нс. L- и Х-долины уже ниже верхнего лазерного уровня	
4,0	2,18	10,5	0,75	5	MBE; 40 каскадов; epi-down; AlN; 3,65 ммх8,7 мкм; BH; HR; AR; 293 К L- и Х-долины совпадают и находятся на 45 мэВ выше верхнего лазерного уровня	
4,6	2 (AlN) 4,5 Алмаз	15,4	1,2 (AIN) 3 Алмаз	13	3 ммх9,5 мкм (AlN); 5 ммх15 мкм (Алмаз); BH; HR; AR; epi-down; 293 K L-долина на 30 мэВ выше Х-долины, и обе они выше верхнего лазерного уровня	

#### ККЛ с внешним дисперсионным резонатором Faist et al., SS&T, 25, 083001(2010)



# Область плавной перестройки частоты и мощность излучения лазера с внешним дисперсионным резонатором (CW, 950 мА, -30 °C) (Faist et al., AP, B92, 305(2008))



### ККЛ с внешним резонатором ( $\lambda = 7,6 - 11,4$ мкм)



[Faist et al., APL, **95**, 061103(2009)]: 5 активных областей, 76 каскадов, переходы «связанное состояние  $\Rightarrow$  континуум», область 7,6 – 11,4 мкм (432 см<sup>-1</sup>), схема Литтрова,  $\delta v = 0,12$  см<sup>-1</sup>,  $J_{th} = 6$  кА/см<sup>2</sup>,  $P_{_{\rm ИМП}} \sim 1$  Вт при 15 <sup>0</sup>С

### **Схемы ККЛ с переходами «дублет ⇒ континуум»** [Hamamatsu Photonics, Yamanishi et al., OE, **19**, 2694 (2011);APL, **98**, 231102 (2011)]



Согласованная пара InGaAs/InAlAs, MOVPE, 5 КЯ, 40 периодов, переход «дублет ⇒ континуум»

 $\lambda \sim 8,7$  мкм;  $\Delta \lambda / \lambda_0 \sim 0,4$ ;  $\Delta k = 500$  см<sup>-1</sup>;  $J_{th} = 2,6$  кА/см<sup>2</sup>; Ширина ЭЛ слабо зависит от Т и V при T > 300 К;  $T_0 \sim 510$  К;  $P_{\rm имп}(300$  К)  $\sim 1$  Вт;  $P_{\rm CW}(30~^0{\rm C}) \sim 0,1$  Вт на AlN;

Недавно:  $\lambda \sim 6,8$  мкм; T = 300 K; CW;  $\Delta\lambda/\lambda_0 \sim 0,4$ ;  $\Delta k \sim 600$  см<sup>-1</sup>;  $J_{th} = 1,5$  кA/см<sup>2</sup>;  $T_{max} = 100$  °C <sup>36</sup>
# Расширение области перестройки ККЛ с внешним резонатором



#### О деградации и сроке службы ККЛ

Такие испытания проводились в основном на системе AlInAs/GaInAs ( $\lambda = 4,6 - 4,8$  мкм). Она содержит много In, препятствующего такому доминирующему механизму деградации как образование и распространение дислокаций. 1. Лазер  $\lambda = 4,8$  мкм (strain-compensated); 11 мкмх3 мм; HRcoated; epi-up; In/Cu; CW; T = 298 K; I = 0,85 A (чуть выше порога); P = 0,2-0,3 BT; Нет изменений в течение 21000 ч (~ 2,4 года)! [Razeghi et al., NJP, **11**, 125017 (2009)]

 Лазер λ = 4,6 мкм (strain-compensated); 11 мкмх3 мм; HRcoated; epi-up; AuSn/AlN; CW; P = 2,1 BT; T = 298 K. Нет изменений в течение 3560 ч! [Patel et. al., OptEng, 49, 111105(2010)]
80 K: BH, HR, 5 ммх12,5 мкм, CW, P = 7,3 BT; КПД = 30 %; сотни часов [Patel et. al., OptEng, 49, 111105(2010)]

### Коммерциализация ККЛ за рубежом

Компания	Выращивание лазерных ГС	Разработка ККЛ	Системы на ККЛ
AdTech Optics Inc.	X	X	
Aerodyne Research			X
Alcatel-Thales III-V Lab		X	
Alpes Lasers		X	
Archcom Technology Inc.	X		
<b>Cascade Technologies</b>		X	X
<b>Daylight Solutions Inc.</b>			X
Hamamatsu Photonics		X	
IQE	Χ		
Laser Components Inc.		X	
Maxion Technologies Inc./PSI	X	X	
Nanoplus Inc.		X	
Neoplas Control Inc.			X
nLIGHT Corporation	X		
Pranalytica Inc.		Χ	X
QuantaRed Technologies			X
Spire Corporation	X		

### Некоторые применения

Обобщенно:

- 1. Спектроскопия (разрешение ≤10<sup>-4</sup> см<sup>-1</sup>)
- 2. Газоанализ (чувствительность ppm ppb)
- 3. Медицина (дыхательная диагностика)
- 4. Гетеродинирование в ИК области спектра
- 5. Военные применения:

ИК подсветка, буи, маяки, секретная связь в свободном пространстве, мониторинг без риска быть обнаруженным, усилители света в ПНВ, опознавание «свой-чужой» и т.д.

#### Мощная и эффективная лазерная система на основе ККЛ для целей обороны и безопасности

Pranalytica, C.K.N. Patel, SPIE Proc., 7325OL(2009)

На чипе при T = 293 K, CW, P = 3 BT!  $\lambda = 4,6$  мкм (15 мкмх5 мм, алмаз) Система при T = 293 K, CW, P > 2 BT!  $\lambda = 4,6$  мкм кпд ~ 10 % Фонарик при T = 293 K, \_П\_, P > 100 мВт  $\lambda = 4,6$  мкм; срок службы ~ 10 ч P > 20 мВт  $\lambda = 9,6$  мкм; срок службы ~ 10 ч



Герметичный монтаж ККЛ

Лазерная система 1101-46-НР-4000 (блок питания, ТХ Пельтье и лазерная головка) Bec = 7,3+1,9 кГ

## Радарная система противодействия в средней ИК области спектра типа ICM100

Cascade Technologies, Scotland, UK





Применение – глушилка для тепловых ракет Длина волны излучения 4,6 мкм Ток до 20 А Длительность импульса 50 – 5 мкс Частота повторения < 5 МГц Средняя мощность 200 мВт при скважности 60% КПД (от розетки) > 5 % Качество пучка М<sup>2</sup> ~ 2 Область коллимирующей оптики 2 – 6 мкм Диаметр выходящего пучка 4 мм Расходимость в дальней зоне 1мрад Рабочая температура 5  $\div$  35 <sup>0</sup>С (воздушное охлаждение) Малые массогабариты

C. Subran, M. Radunsky, M. Henson Opton Laser Int.+ Daylight Solutions Photoniques, **55**, 52(2011)

> Необнаружимый ПНВ, ручной фонарик (длина волны излучения 4,8 мкм, 1,35 мВт, расстояние до цели до 225 м)





Скрытая, необнаружимая связь в свободном пространстве

## Военные применения: ИК помехи (контрмеры), освещение целей в ИК области спектра, ИК маяки (буи)









Летом 2009 DARPA выделила по контрактам: 3,3 млн долларов для Pranalytica 2,5 млн долларов для Princeton University 2,0 млн долларов для Northwestern University

Achmed and his boyfriend

## Выводы

Таким образом, дизайн в современных рабочих схемах ККЛ не исчерпан и прослеживаются следующие тенденции.

- Увеличивается энергетический зазор между верхним лазерным уровнем и ближайшими высоколежащими состояниями вплоть до континуума. При этом учитывается рассеяние в боковые долины.
- 2. Увеличивается вольтовый дефект для повышения рабочей температуры.
- 3. Для снижения токов утечки в качестве барьеров используется AlAs
- 4. Для коротковолновых ККЛ добавляется Sb вплоть до AlSb. Ведутся поиски других гетеропар.

Это позволило существенно улучшить характеристики ККЛ, достигнув таких рекордных значений как:

- 1. На основе гетеропары AlInAs/GaInAs получен диапазон излучения от 3,3 до 24 мкм, а с гетеропарой InAs/AlSb до 2,6 мкм.
- 2. Т<sub>0</sub> = 500 К (параллельность подзон и время, ограничено LO-фононом).
- 2. Мощность излучения до 7 и 120 Вт в непрерывном и импульсном режиме.
- 3. КПД от розетки более 50 % при низких температурах.
- 4. Ширина линии ЭЛ до 600 см<sup>-1</sup>  $\Rightarrow$  ККЛ с внешним дисперс. резонатором.

## Перспективы, проблемы

Дизайн лазеров еще большой и не исчерпан.

**Увеличение мощности и КПД**. Сейчас в среднем 1 Вт при  $\lambda = 4$  -10 мкм (с оптимизмом до 15 мкм). Прогнозируется ~ 10 и более 100 Вт в непрерывном и импульсном режиме при комнатной температуре. Высокие значения КПД лазеров в непрерывном режиме > 30 % (сейчас в группе Разеги до 25 %). Коротковолновая сторона: Будут улучшаться характеристики лазеров на антимонидах для области спектра 2-4 мкм. Для оптической связи (λ ~ 1,5 мкм) надо изучать новые гетеропары с большим  $\Delta E_c$  (нитриды, II-VI). Ликвидация пробела 20-70 мкм. Расширение полосы остаточных лучей: GaP/AlP (идеальное согласование) и InP/GaP (обе гетеропары удобны для МОС-гидридной эпитаксии), GaN/AlN (большой разрыв и большая  $\hbar \omega_{LO}$ ). ТГц-лазеры: Хотелось бы довести рабочую температуру до термохолодильников Пельтье и увеличить мощность для облучения целей и для пропускания сквозь частично поглощающую атмосферу. СозданиеККЛ на квантовых точках (Сурис и др.) с низкими значениями пороговой плотности тока (~  $10 \text{ A/см}^2$ ) и высокой  $T_0 \sim 400 \text{ K}$ .

## Благодарю за внимание!

# Немного о терагерцовых источниках излучения и ККЛ

### Терагерцовый ККЛ [Faist, Hu et al., OE\_13\_331(2005)]

GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As (x = 0,1-0,3); барьер тоньше для транспорта и толще для снижения паразитной связи с верхними уровнями; 4-ямная ГС; вертикальный переход; 1 фонон; плазмонный волновод или металлический (Cu,Au),  $\Gamma \sim 0,3$ ; L = 1 – 2 мм; 2 фонона не сильно улучшают



**5,4**/7,8/**2,4**/6,4/**3,8**/14,8/**2,4**/9,4 = 52,4 нм; <sup>x</sup>175 каскадов = 9,2 мкм  $N(Si) = 2x10^{16}$  см<sup>-3</sup> 49

## П/п терагерцовые источники излучения

Тип лазера и условия	Материал	Т, К	λ, мкм	f, ТГц	Р, мВт
ККЛ импульсный	GaAs/Al <sub>0,15</sub> Ga <sub>0,85</sub> As	5-200	60-250;	1,2-5;	8-56;
J <sub>th</sub> = 0,1-0,6 кА/см <sup>2</sup>		(3 ТГц)	70	4,7	<b>248</b> (5K)!
ККЛ непрерывный	GaAs/Al <sub>0,15</sub> Ga <sub>0,85</sub> As	5-117	60-250;	1,2-5	0,4-12;
$J_{th} = 0,2-0,6 \ \kappa A/cm^2$		(3 ТГц)	70	4,7	<b>135</b> (5K)!
0,7 кВ/см; 0,42 Т	p-Ge:Ga	4-20	75-300	1-4	0,02-1,3
СО <sub>2</sub> -лазер; 30 кВт/см <sup>2</sup> ; 0,1 мкс; 1Гц;	Si:P (Sb, Bi)	4	50-60	5 - 6	~ <b>10</b> <sup>3</sup>
ЭЛ; 100-150 нс; 413 Гц	Si:B; р=1-10 Ом·см	4-150	37	8,1	<b>0,03</b> (4K)
Nd-лазер + парам. генер.; ~ 17 МВт/см <sup>2</sup> ; 5 нс; 10 Гц	GaSe; толщина 15 мм	300	3 - 3540	0,1 - 110	2x10 <sup>5</sup>
1,2 Т; 1,56 мкм; 0,16 Вт; 0,1 пс; 50 МГц	n-InSb, 4х10 <sup>14</sup> см <sup>-3</sup>	300	300 - 900	0,3 - 1	Мах у 0,5 Тгц
ЛОВ; 1,5 – 6 кВ	-	300	300	1	0,5 -3



# Терагерцовые ККЛ на основном состоянии (~ 5 ТГц)

Hu&Reno, APL, 101, 151108(2012) Транспорт и генерация идут только (!) по основным состояниям КЯ



#### Зависимость максимальной рабочей температуры от длины волны излучения ТГц ККЛ [Faist et al., EL, 46, S46 (2010)]



52

### Параметрическая (безинверсная) генерация: вторая гармоника, суммарная и разностная частота

Ограничения для продвижения в ТГц область: короткое время жизни верхнего, возбужденного состояния, Друдевское поглощение, толстые слои. Решеточная нелинейность в полупроводниках GaAs и InAs на 2-3 порядка выше, чем у нелинейных кристаллов, а для квантоворазмерных структур в области резонанса ожидается еще на пару порядков выше.

Пусть имеем:  $\omega_1$  и  $\omega_2 \Rightarrow 2\omega_1, 2\omega_2, \omega_1 + \omega_2, \omega_1 - \omega_2$ 

Известен гигантский нелинейный отклик для резонансных межподзонных переходов в связанных КЯ. Для того, чтобы наблюдать его, надо решать задачу накачки и фазового синхронизма на нужной частоте. Проводятся расчеты и испытываются различные схемы. Рекорд на второй гармонике получен P = 2 мВт при  $\lambda$  = 4,45 мкм (A. Belyanin, C. Gmachl et al., EL, **40**, 1586 (2004)). Недавно получена вторая гармоника P = 35 мкВт при  $\lambda$  = 2,95 мкм и 300 К (Belkin et al., EL, **47**, 667 (2011)). При  $\lambda$  = 2,6 мкм получены мкВт.

 $E(B/cM) = 27,5 \frac{\sqrt{P(Bm/cM^2)}}{N}$  При Р ~ 1 Вт и S = 2x10 мкм<sup>2</sup> = 2x10<sup>-7</sup> см<sup>2</sup> E = 27,5  $\sqrt{2x10^{-7}/3},3 = 37,3x10^4 = 3,7x10^5$  В/см

### Схема междузонного ККЛ на основе гетероперехода II типа AlSb/InAs/GaInSb/GaSb [Meyer et al., APL, 72, 2370 (1998)]

 $\Delta E_{c} \sim 2$  эВ; m(InAs) = 0,024m<sub>0</sub> Инжектор InAs/Al(In)Sb



1. Интересная область 3 – 4,2 мкм

2. Облегчена накачка, т.к. междузонные переходы медленнее времени рассеяния на фононах

3. Униполярен, хотя включена валентная зона. Нет оптических потерь в обкладочных слоях р-типа

4. Однако технология этих материалов сложнее

Physica, **E7**, 69 (2000):

Р<sub>имп</sub> = **4** W с одной грани, Т<sub>max</sub> = **217** K APL, **88**, 161103 (2006):

 $\lambda = 3.3 - 3.6$  мкм,

Р (CW, 78 K) = 1.1 Вт, КПД = 21 %

OptEng, **49**, 111101 (2010):

```
Р(СW, >300 К) > 10 мВт
```

### **Мощные междузонные ККЛ, работающие в непрерывном режиме при** > **300 К** [Meyer et al., OE, **20,** 20894 (2012)]



P = 0,29 Вт при 300 К в непрерывном режиме  $\eta(WPE) = 15$  % при 300 К в непрерывном режиме

#### ККЛ на основе InAs/AlSb с длиной волны излучения около 2,6 мкм [Баранов и др., APL, 96, 141110 (2010)]



3 ямы; e<sub>3</sub> − e<sub>2</sub> ≈ 0,47 эВ 2,6/4,2/1,7/3,7/1,7/3,3/1,4/2,8 .... **InAs/AlSb**  $\Delta E_c = 2,1$  эВ; Растояние между Г-L минимумами в InAs составляет 0,73 эВ. При квантовании уровни в боковых долинах движутся вверх медленне из-за большей m<sup>\*</sup>. Фиксируем верхний (ниже L-минимума) и понижаем нижний Г-уровень. Для этого ослабляется связь между активными квантовыми ямами InAs. Барьер до 1,7 нм, а яму поуже для заданной энергии. Таким образом снижается утечка носителей в L– долину.

GSMBE; n-InAs(100); 30 каскадов HR;  $\lambda = 2,63-2,65$  мкм; до 175 К,  $P_{\text{имп}} = 260$  мВт (80 К;  $\tau = 100$  нс; f = 10 кГц)

#### Связь между шириной запрещенной зоны и постоянной решетки для некоторых изопериодических полупроводников типа III-V



# **ДЛС в импульсном режиме** (На примере этилена $C_2H_4$ при $\lambda = 11,4$ мкм)



Быстропротекающие процессы в химии, технологии и др.

## Схема лазерного газоанализатора на ККЛ



# Сенсор следов газа на основе обычного ККЛ или междузонного ККЛ



### Дыхательная диагностика

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



Длина волны 3 – 10 мкм

### Следы выдыхаемых газов и их средняя

#### концентрация у здорового человека

Выдыхаемый газ	Сред. концентрация
Метан СН <sub>4</sub>	2 – 10 ppm
Этан С <sub>2</sub> Н <sub>6</sub>	0 – 10 ppb
Пентан $C_5H_{12}$	0 – 10 ppb
Окись азота NO	10 – 50 ppb
Окись углерода СО	1 – 10 ppm
Сульфид карбонила OCS	0 – 10 ppb
Закись азота N <sub>2</sub> O	1 – 20 ppb
Изопрен С <sub>5</sub> Н <sub>8</sub>	50 – 200 ppb
Аммиак NH <sub>3</sub>	0 – 1 ppm
Ацетон (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO	0 – 1 ppm

## Анализ выдыхаемого воздуха



- Быстро
- Точно
- Бесконтактно
- Недорого

Молекула	Заболевание	λ, 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 С <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub> )	Рак молочной железы	3,3
Формальдегид CH <sub>2</sub> O	Рак мол. железы	5,7
Ацетальдегид $C_2H_4O$	Рак легких	5,7
Ацетон $C_3H_6O$	Диабет	3,4
Сероуглерод $CS_2$	Шизофрения	6,7
Этан С <sub>2</sub> Н <sub>6</sub>	Окисл. стресс	3,4

#### Измерения следов газа в стратосфере и тропосфере

Аегодупе Research Inc.  $\lambda = 4,5 - 10,5$  мкм P (CW) = 1 - 10 мВт  $\delta v < 0,01$  см<sup>-1</sup> Многоходовая кювета (76 м)



Газ	Частота, см <sup>-1</sup>	ррв (76 м; 1 с)	ppb (100 c)
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	960	1	0,5
NH <sub>3</sub>	967	0,2	0,06
<b>O</b> <sub>3</sub>	1050	1,5	0,6
CH <sub>4</sub>	1270	1	0,4
N <sub>2</sub> O	1270	0,4	0,2
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1267	3	1
SO <sub>2</sub>	1370	1	0,5
NO <sub>2</sub>	1600	0,2	0,1
HONO	1700	0,6	0,3
HNO <sub>3</sub>	1723	0,6	0,3
НСНО	1765	0,3	0,15
НСООН	1765	0,3	0,15
NO	1900	0,6	0,3
OCS	2071	0,06	0,03
СО	2190	0,4	0,2
N <sub>2</sub> O	2240	0,2	0,1
<sup>13</sup> CO <sub>2</sub> / <sup>12</sup> CO <sub>2</sub>	2311	0,5 %	0,1 %





Фактор α отражает вариации N активной среды (флуктуации инверсии населенностей), что приводит к «дрожанию» частоты

Обычно α = 5-30, а для ККЛ α ≈ 0 (реально α = 0,5-2)

- 1. Свободная генерация,  $\lambda = 8,5$  мкм,  $\delta v = 150$  кГц (5х10<sup>-6</sup> см<sup>-1</sup>), 15 мс
- 2. Со стабилизацией частоты,  $\lambda = 8,5$  мкм,  $\delta v = 12$  кГц (4x10<sup>-7</sup> см<sup>-1</sup>)
- 3. Гетеродинирование двух ККЛ  $\delta v = 2-5,6 \Gamma \mu$  (~ 10<sup>-10</sup> см<sup>-1</sup>), ~1 с

### Зависимость максимальной рабочей температуры от длины волны излучения ТГц ККЛ [Faist et al., EL, 46, S46 (2010)]



#### Температурная перестройка РОС-лазеров в окнах прозрачности атмосферы, где распространенные газы имеют линии поглощения [Capasso et al., RPP, 64, 1533 (2001); CPL, 487, 1 (2010)]

Брэгговская решетка с шагом  $\Lambda = \lambda/2N$  расположена над активной областью ККЛ и в первом порядке выделяет одну моду



Wavelength (µm)

## Index refraction profile and mode intensity distribution

TEM image of diagonal QCL

[Capasso et al., S&S, **66**, 1(2000)]





## Итоги и перспективы

#### Важнейшие итоги в области ККЛ

1. Длина волны излучения лазеров изменяется в широкой ИК области спектра: 3,4 – 24 мкм (AlInAs/GaInAs) и 60-250 мкм (AlGaAs/GaAs). При этом путем подбора размеров ям и барьеров оказалось достаточно 2 гетеропар. Самая короткая длина волны 2,6 мкм получена с использованием антимонидов, а самая большая длина волны 440 мкм получена с помощью квантующего магнитного поля (25 T).

2. Разработаны перестраиваемые одномодовые лазеры: РОС-лазеры с областью плавной перестройки 10-20 см<sup>-1</sup>; ККЛ с внешним резонатором дают до 170 см<sup>-1</sup> при  $\delta v \leq 1$  МГц (3х10<sup>-5</sup> см<sup>-1</sup>). Ее можно увеличить (до 500 см<sup>-1</sup>) в гетерогенных ККЛ и в схемах с уширением уровней.

3. Измерена узкая ширина линии излучения: < 100 кГц в режиме свободной генерации и <10 кГц (3х10<sup>-7</sup> см<sup>-1</sup>) при стабилизации. Сейчас уже 1< кГц. Миним. ширина линии идеально описывается формулой Шавлова-Таунса.

4. Униполярная природа и эффект каскадирования приводит к высокой мощности излучения при 300 К: более ватта (до 3-5 Вт) в непрерывном режиме и десятки ватт (широкий 400 мкм,  $\lambda = 4,45$  мкм; 120 Вт) в импульсном режиме; для  $\lambda = 10$  мкм P= 0,6 и 25 Вт; КПД составляет десятки процентов. Работа в непрерывном режиме при 300 К (3,7 – 10 мкм) с Р ~ 1Вт.

### Важнейшие итоги в области ККЛ

5. Высокая рабочая температура (большое T<sub>0</sub>) обусловлена параллельными подзонами и временем жизни, ограниченным оптическим фононом. Межподзонные переходы; уширение не чувствительно к T (T<sub>0</sub> составляет несколько сот градусов)

6. Благодаря высокоскоростной динамики ККЛ продемонстрирована высокочастотная модуляция (включая цифровую) вплоть до 100 ГГц.

 Короткие времена релаксации электронов и времени жизни фотонов в резонаторе (~ 1-3 пс) позволяют генерировать короткие (τ = 89 пс, f = 100 МГц) импульсы излучения. Ультракороткое время жизни (мньше времени жизни фотона в резонаторе), поэтому нет релаксационных колебаний.
Благодаря высокой мощности излучения в активной области (> 10<sup>5</sup> B/см) и большой нелинейной восприимчивости наблюдались когерентные явления при 300 К (удвоение частот, разностная частота), что важно для создания новых источников излучения. Большая нелинейность приводит также к самосинхронизации мод с частотой биений 13 ГГц.

9. Усиления хватает, чтобы получать генерацию «без инжектора» (до 350 К).

10. Срок службы некоторых лазеров доведен до 2,5 лет (λ = 4,8 мкм). Наступает период коммерциализация ККЛ.
## Выводы

Такие уникальные характеристики ККЛ получены благодаря тому, что совершенствуются старые и создаются новые рабочие схемы ККЛ, развивается технология как молекулярно-лучевой, так и МОСгидридной эпитаксии, а также технология постростовой обработки и монтажа лазеров. Методом МОС-гидридной эпитаксии созданы ККЛ, излучающие в зависимости от параметров активной области и температуры в области спектра 5 – 12 мкм. Характеристики лазеров уже близки к значениям, достигнутым методом МЛЭ.

Имеющийся уровень технологии полупроводников А<sup>3</sup>В<sup>5</sup> позволяет массовое производство для некоторых областей ИК спектра.

Преимуществами ККЛ остаются малые массо- и весогабариты, жесткость (например, по ср. с параметрическим генератором). С учетом надежности, воспроизводимости и долговременной стабильности ККЛ находят применение в различных областях, както: газоанализ, мониторинг окружающей среды, медицина, военные применения (ИК-подсветка, глушилки, связь).

# Перспективы, проблемы

Дизайн лазеров еще большой и не исчерпан.

**Увеличение мощности и КПД**. Сейчас в среднем 1 Вт при  $\lambda = 4$  -10 мкм (с оптимизмом до 15 мкм). Прогнозируется ~ 10 и более 100 Вт в непрерывном и импульсном режиме при комнатной температуре. Высокие значения КПД лазеров в непрерывном режиме > 30 % (сейчас в группе Разеги до 25 %). Коротковолновая сторона: Будут улучшаться характеристики лазеров на антимонидах для области спектра 2-4 мкм. Для оптической связи (λ ~ 1,5 мкм) надо изучать новые гетеропары с большим  $\Delta E_c$  (нитриды, II-VI). Ликвидация пробела 20-70 мкм. Расширение полосы остаточных лучей: GaP/AlP (идеальное согласование) и InP/GaP (обе гетеропары удобны для МОС-гидридной эпитаксии), GaN/AlN (большой разрыв и большая  $\hbar \omega_{IO}$ ). ТГц-лазеры: Хотелось бы довести рабочую температуру до термохолодильников Пельтье и увеличить мощность для облучения целей и для пропускания сквозь частично поглощающую атмосферу. Большая характеристическая температура ( $T_0 = 1000$  K).

Качество пучка: будет оптимизировано.

СозданиеККЛ на квантовых точках (Сурис и др.) с низкими значениями пороговой плотности тока (~ 10 A/см<sup>2</sup>) и высокой T<sub>0</sub> ~ 400 K.

### Интересные молекулы, доступные для изучения в средней ИК области спектра



7**-1**0 µm

Leak detection

- Ambient air quality
- Stack emissions

13

### Тезисы

К настоящему времени разработаны квантовые каскадные лазеры (ККЛ) с рекордными значениями таких их характеристик как рабочая и характеристическая температура, область спектра генерации, мощность излучения, одномодовый спектр излучения и коэффициент полезного действия (КПД). Это оказалось возможным благодаря как оптимизации дизайна активной области, так и развитию методов постростовой обработки лазерной наногетероструктуры. Оптимизация рабочей схемы заключается в достижении эффективной инжекции и экстракции электронов, а также в уменьшении токов утечки и термического обратного заброса носителей заряда. Диапазон спектра генерации составляет от 3 до 24 мкм в средней ИК области и от 70 до 250 мкм в далекой (терагерцовой) ИК области спектра. Рабочая температура коротковолновых (4-12 мкм) ККЛ заметно превышает комнатную (до 400 К). Характеристическая температура  $T_0$  достигает значений 500 К, т.е. имеет место очень слабая температурная зависимость порогового тока от температуры. Особенно большая мощность излучения получена в области спектра 4-5 мкм: до 5 Вт в непрерывном и 120 Вт в импульсном режиме при 300 К. Для одномодовых лазеров типичная мощность излучения составляет около 0,1 Вт, хотя в отдельных случаях она на порядок величины больше. На ККЛ с большим числом каскадов при низких температурах продемонстрирован КПД от розетки более 50 %.