

#### Тема семинара:

## «Полупроводниковые лазеры на основе гетероструктур с квантовыми ямами для диапазона длин волн 3-5 мкм»

Аспирантка 1 года обучения Янцер Арина Андреевна

13.02.2025





Введение



#### Полупроводниковые лазеры

#### Преимущества полупроводниковых лазеров:

- Большой КПД (до 70 %), обусловленный высокой эффективностью преобразования подводимой электрической энергии в лазерное излучение;
- Компактность;
- Простое устройство, низковольтное питание, совместимость с интегральными микросхемами;
- Возможность плавной перестройки длины волны в широком диапазоне.

![](_page_2_Figure_7.jpeg)

![](_page_3_Picture_0.jpeg)

### История развития полупроводниковых лазеров

![](_page_3_Figure_2.jpeg)

\*Алфёров Ж. И., Крёмер Г., Килби Дж. С. "Нобелевские лекции по физике — 2000" УФН **172** 1067 (2002)

![](_page_4_Picture_0.jpeg)

### Полупроводниковые лазеры

История полупроводниковых лазеров:

- Лазеры на гомопереходе
- Лазер с одинарной и двойной гетероструктурой
- Лазер с квантовыми ямами (с раздельным ограничением)
- Лазеры на квантовых точках

![](_page_5_Picture_0.jpeg)

### Полупроводниковые лазеры

История полупроводниковых лазеров:

- Лазеры на гомопереходе
- Лазер с одинарной и двойной гетероструктурой
- Лазер с квантовыми ямами (с раздельным ограничением)
- Лазеры на квантовых точках

Лазер с квантовыми ямами (с раздельным ограничением)

![](_page_6_Picture_0.jpeg)

### Виды гетеропереходов

![](_page_6_Figure_2.jpeg)

7

![](_page_7_Picture_0.jpeg)

### Гетеропереходы в материалах типа A<sub>III</sub>B<sub>V</sub>

Максимально допустимое рассогласование постоянных решёток ~5%

Основными материалами для полупроводниковых лазеров являются:

•GaAs

•GaSb

•AlGaAs

•GaP

•InGaP

•GaN

•InGaAs

•GalnNAs

•InP

•GalnP

\*I. Vurgaftman, J.R. Meyer, L.R. Ram-Mohan, Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys, J. Appl. Phys. 89 (11 I) (2001) 5815– 5875.

![](_page_7_Figure_15.jpeg)

(А) Энергии Г-точки валентной зоны и зоны проводимости для ряда ненапряженных двойных сплавов III-V при 300К ; (В) График энергетического зазора прямой Г-зоны как функция постоянной решетки (AIAs и AISb - непрямозонные полупроводники)

![](_page_8_Picture_0.jpeg)

### Квантовые ямы на основе материалов A<sub>III</sub>B<sub>V</sub>

![](_page_8_Figure_2.jpeg)

![](_page_9_Picture_0.jpeg)

### Полупроводниковые лазеры в диапазоне длин волн

3-5 мкм

![](_page_9_Figure_3.jpeg)

![](_page_10_Picture_0.jpeg)

## МЕЖЗОННЫЙ ЛАЗЕР НА КВАНТОВЫХ ЯМАХ

![](_page_11_Picture_0.jpeg)

### Межзонный лазер на квантовых ямах

![](_page_11_Figure_2.jpeg)

![](_page_12_Picture_0.jpeg)

### Межзонный лазер на квантовых ямах

![](_page_12_Figure_2.jpeg)

![](_page_13_Picture_0.jpeg)

#### Межзонные лазеры с КЯ GalnAsSb/AlGaAsSb в диапазоне 3-5 мкм

#### Проблема:

- 1. Электронные состояния становятся очень глубокими, что приводит к неоднородному распределению электронов;
- 2. За счёт изменения гетероперехода на λ>2.8 мкм происходит снижение характеристик лазерных диодов с КЯ на основе AlGaAsSb/GalnAsSb

![](_page_13_Figure_5.jpeg)

![](_page_14_Picture_0.jpeg)

### Межзонный лазер на КЯ в диапазоне длин волн 3-5 мкм Пороговая оже-рекомбинация

![](_page_14_Figure_2.jpeg)

Законы сохранения энергии и

квазиимпульса:

 $\vec{k}_f - \vec{k}_i = \vec{k}_e - \vec{k}_h$  $E_f - E_i = E_e - E_h$ 

 $W \propto n^3$ 

![](_page_14_Figure_7.jpeg)

![](_page_14_Picture_8.jpeg)

![](_page_15_Picture_0.jpeg)

### Межзонный лазер с активной областью «W»

![](_page_15_Figure_2.jpeg)

Схема взаимного расположения краев зон в тройной КЯ InAs/GaSb/InAs, окруженной барьерами из AISb. Серым цветом выделена запрещенная зона в объемных слоях InAs, GaSb и AISb

![](_page_16_Picture_0.jpeg)

Вблизи

0°C

#### Room-temperature vertical-cavity surface-emitting lasers at 4 $\mu$ m with GaSb-based type-II quantum wells

G. K. Veerabathran,<sup>a)</sup> S. Sprengel, A. Andrejew, and M.-C. Amann Walter Schottky Institut, Technische Universität München, Am Coulombwall 4, 85748 Garching, Germany

![](_page_16_Figure_4.jpeg)

FIG. 1. Band diagram of the active region with type-II QWs. Directions of injection of electrons and holes are indicated.

![](_page_16_Figure_6.jpeg)

FIG. 4. Temperature variation of threshold current densities (a) and maximum optical output powers (b) of batch-1 VCSELs with  $D_{BTI} = 8 \,\mu m$ (black), 12 µm (red), and 15 µm (blue) in CW (solid squares) and pulsed (open triangles) operation.

![](_page_17_Picture_0.jpeg)

## МЕЖЗОННЫЙ КАСКАДНЫЙ ЛАЗЕР

![](_page_18_Picture_0.jpeg)

### Межзонный каскадный лазер в диапазоне 3-5 мкм

![](_page_18_Figure_2.jpeg)

\*Vurgaftman, I. et al. Rebalancing of internally generated carriers for mid-infrared interband cascade lasers with very low power consumption. *Nat. Commun.* **2011**, *2*, 585.

19

![](_page_19_Picture_0.jpeg)

### Устройство инжектора

![](_page_19_Figure_2.jpeg)

interband cascade lasers with very low power consumption. Nat. Commun. 2011, 2, 585.

![](_page_20_Picture_0.jpeg)

### Межзонный каскадный лазер в диапазоне 3-5 мкм

![](_page_20_Figure_2.jpeg)

![](_page_21_Picture_0.jpeg)

### КВАНТОВО-КАСКАДНЫЙ ЛАЗЕР

![](_page_22_Picture_0.jpeg)

### Квантово-каскадный лазер

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

![](_page_22_Figure_3.jpeg)

Схематичный принцип работы квантово-каскадного лазера

![](_page_23_Picture_0.jpeg)

### Первый ККЛ

Al<sub>0.48</sub>In<sub>0.52</sub>As/Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As/InP

![](_page_23_Figure_3.jpeg)

\*J.Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson, A. Y. Cho, Science 264, 533 (1994)

![](_page_23_Figure_5.jpeg)

**Fig. 3.** Emission spectrum of the laser at various drive currents. The strong line narrowing and large increase of the optical power above *I* = 850 mA demonstrates laser action. The spontaneous emission and the laser radiation are polarized normal to the layers. The emission wavelength,  $\lambda = 4.26 \,\mu$ m, is in excellent agreement with the calculated one for the *n* = 3 to *n* = 2 transition (Fig. 1A). The temperature is 10 K.

![](_page_24_Picture_0.jpeg)

### Квантово-каскадный лазер

![](_page_24_Figure_2.jpeg)

![](_page_25_Picture_0.jpeg)

### Квантово-каскадный лазер

![](_page_25_Figure_2.jpeg)

(А) Энергии Г-точки валентной зоны и зоны проводимости для ряда ненапряженных двойных сплавов III-V при 300К; (В) График энергетического зазора прямой Г-зоны как функция постоянной решетки (AlAs и AlSb - непрямозонные полупроводники)

![](_page_26_Picture_0.jpeg)

APPLIED PHYSICS LETTERS 91, 251102 (2007)

#### InAs/AISb quantum cascade lasers emitting at 2.75–2.97 $\mu$ m

J. Devenson, O. Cathabard, R. Teissier, and A. N. Baranov<sup>a)</sup> Institut d'Électronique du Sud, UMR5214 CNRS/Université Montpellier 2, 34095 Montpellier, France

1.0 Energy (eV) 5.0 **e**<sub>2</sub> F = 130 kV/cm 0.0 200 600 400 (a) Distance (A)

Возможен междолинный переход

FIG. 1.Conduction band diagram of the active region of the D391 laser at 80 K. Solid curves represent the moduli squared of the relevant electron wave functions. Dotted lines correspond to levels  $e_{L}$  associated with the *L* valley (*L*) calculated using a  $\Gamma$ -*L* separation value of 0.73 eV.

![](_page_27_Picture_0.jpeg)

### РЕЗЮМЕ

![](_page_28_Picture_0.jpeg)

### Зависимость пороговой плотности тока от длины

![](_page_28_Figure_2.jpeg)

Пороговые плотности тока диодных лазеров, МКЛ І типа, МКЛ ІІ типа и ККЛ, измеренные при комнатной температуре (около 290-300 К) в MIR спектральном диапазоне. Сплошные линии являются ориентиром для глаза

ERIC TOURNIÉ AND LAURENT CERUT

![](_page_29_Picture_0.jpeg)

Сравнительные характеристики ККЛ, МКЛ и

#### межзонных лазеров

	Плюсы	Минусы
МКЛ	<ul> <li>✓ У каждой квантовой ямы свои инжекторы;</li> <li>✓ Низкая пороговая плотность мощности и тока;</li> <li>✓ Непрерывная работа при комнатной температуре;</li> <li>✓ Подавление пороговой оже-рекомбинации в МКЛ II-типа;</li> <li>✓ Покрытие диапазона длин волн 3–7 мкм.</li> </ul>	<ul> <li>Сложность производства;</li> <li>Высокая стоимость;</li> <li>Относительно малая возможность перестройки по сравнению с межзонными полупроводниковыми лазерами;</li> <li>Высокая концентрация дефектов в используемых материалах, которые имеют сильную поверхностную рекомбинацию.</li> </ul>
ККЛ	<ul> <li>✓ Один электрон может генерировать несколько фотонов, что повышает эффективность лазера;</li> <li>✓ Отработанная технология роста соединений А<sub>Ш</sub>В<sub>∨</sub>;</li> <li>✓ Отсутствие оже-рекомбинации;</li> <li>✓ Высокая мощность.</li> </ul>	<ul> <li>Малое усиление;</li> <li>Из-за перекрытия волновых функций различных уровней квантования темп безызлучательных переходов на порядки превосходит темп переходов излучательных;</li> <li>Высокий пороговый ток лазера;</li> <li>Сложность создания ККЛ в коротковолновой области среднего ИК-диапазона;</li> <li>Сложность производства.</li> </ul>
Межзонные на А <sub>Ш</sub> В <sub>V</sub>	<ul> <li>✓ Низкие пороговые токи в коротковолновой области среднего ИК-диапазона;</li> <li>✓ Сильное перекрытие волновых функций электронных и дырочных состояний и, как следствие, эффективная излучательная рекомбинация;</li> <li>✓ Возможность частотной перестройки за счёт температуры;</li> <li>✓ Дизайн таких структур менее сложный.</li> </ul>	<ul> <li>Оже-рекомбинация;</li> <li>Рост внутренних оптических потерь и токовых утечек в волноводных слоях структуры при увеличении потока носителей заряда;</li> <li>Ограничение мощности излучения;</li> <li>Ограничен выбор материалов с подходящей шириной запрещенной зоной;</li> <li>Термический выброс дырки из валентной зоны в континуум.</li> </ul>

![](_page_30_Picture_0.jpeg)

### ИЗЛУЧАТЕЛИ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ЯМ Hg(Cd)Te/CdHgTe

![](_page_31_Figure_0.jpeg)

### Структура HgCdTe

![](_page_31_Figure_2.jpeg)

![](_page_32_Picture_0.jpeg)

# Беспороговая оже-рекомбинация в гетероструктурах на основе КЯ Hg(Cd)Te/CdHgTe

![](_page_32_Figure_2.jpeg)

![](_page_33_Picture_0.jpeg)

### Исследуемые образцы

Структура	75%	81%	85%	92%
Содержание Сd в барьере, %	75	81	85	92
Содержание Со в КЯ, %	6.5	8.2	11	12
Толщина КЯ, нм	2.7	2.9	3.5	3.7
Волноводный слой HgCdTe, нм	690	760	950	1200
Порог оже-рекомбинации, мэВ	56	57	58	60

![](_page_33_Figure_3.jpeg)

Зависимость Е<sub>д</sub> и энергий локализации дырок от температуры

![](_page_33_Figure_5.jpeg)

![](_page_33_Figure_6.jpeg)

![](_page_34_Picture_0.jpeg)

# Беспороговая оже-рекомбинация в гетероструктурах на основе КЯ Hg(Cd)Te/CdHgTe

![](_page_34_Figure_2.jpeg)

Матричный элемент перехода волновыми ф-ями между локализованных и нелокализованных дырок С ростом температуры уменьшается, поэтому вероятность перехода дырки с уровня в Е, на резонансное состояние в континууме уменьшается.

Схема протекания процесса беспороговой оже-рекомбинации в гетероструктурах с квантовыми ямами на основе Hg(Cd)Te/CdHgTe с ростом температуры

![](_page_35_Picture_0.jpeg)

### Коэффициенты оже-рекомбинации

![](_page_35_Figure_2.jpeg)

![](_page_35_Figure_3.jpeg)

![](_page_36_Picture_0.jpeg)

### Коэффициенты оже-рекомбинации

![](_page_36_Figure_2.jpeg)

Скорость оже-рекомбинации:  $R_{Aug} = C_A n^3$ 

Температурная зависимость коэффициента оже-рекомбинации для структуры с разным содержанием Cd в барьерных слоях

\*«Quantifying non-threshold Auger-recombination processes in mid-wavelength infrared range HgCdTe quantum wells» K. E. Kudryavtsev et al. Applied Physics Letters, 2023.

![](_page_37_Picture_0.jpeg)

# Развитие излучателей среднего ИК-диапазона на основе HgCdTe

![](_page_37_Figure_2.jpeg)

Зависимость максимальной рабочей температуры лазерных структур с квантовыми ямами (КЯ) Hg(Cd)Te/CdHgTe от энергии фотона/ длины волны

![](_page_38_Picture_0.jpeg)

### Излучатели среднего ИК-диапазона на основе HgCdTe

![](_page_38_Figure_2.jpeg)

Микродисковый резонаторна основе гетероструктуры КЯ Hg(Cd)Te/CdHgTe с лазерной генерацией с перестройкой по длине волны в диапазоне от 3 до 5 мкм

![](_page_39_Picture_0.jpeg)

Межзонные лазеры на А <sub>Ш</sub> В <sub>V</sub>	<ul> <li>✓ Низкие пороговые токи в коротковолновой области среднего ИК-диапазона;</li> <li>✓ Сильное перекрытие волновых функций электронных и дырочных состояний и, как следствие, сильная излучательная рекомбинация;</li> <li>✓ Возможность частотной перестройки за счёт температуры;</li> <li>✓ Дизайн таких структур менее сложный.</li> </ul>	<ul> <li>Оже-рекомбинация;</li> <li>Рост внутренних оптических потерь и токовых утечек в волноводных слоях структуры при увеличении потока носителей заряда;</li> <li>Ограничение мощности излучения при больших токах накачки;</li> <li>Ограничен выбор материалов с подходящей шириной запрещенной зоной;</li> <li>Термический выброс дырки из валентной зоны в континуум;</li> <li>Поглощение на межподзонных переходах в валентной зоне.</li> </ul>
Межзонные излучатели на HgCdTe	<ul> <li>✓ Ед варьируется в диапазоне от 0 до 1.6 эВ;</li> <li>✓ Пороговая Оже-рекомбинация подавлена;</li> <li>✓ Исключение термического выброса дырок из валентной зоны в континуум из-за разрыва валентной зоны 0.3 эВ;</li> <li>✓ Хорошая перестройка длины волны от температуры;</li> <li>✓ Большой скачок показателя преломления в зависимости от состава – легко сделать волновод.</li> </ul>	<ul> <li>Слабые химические связи;</li> <li>Проблемы с токовой накачкой.</li> </ul>

![](_page_40_Picture_0.jpeg)

### СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!