

Квантовые каскадные лазеры: особенности и перспективы применения

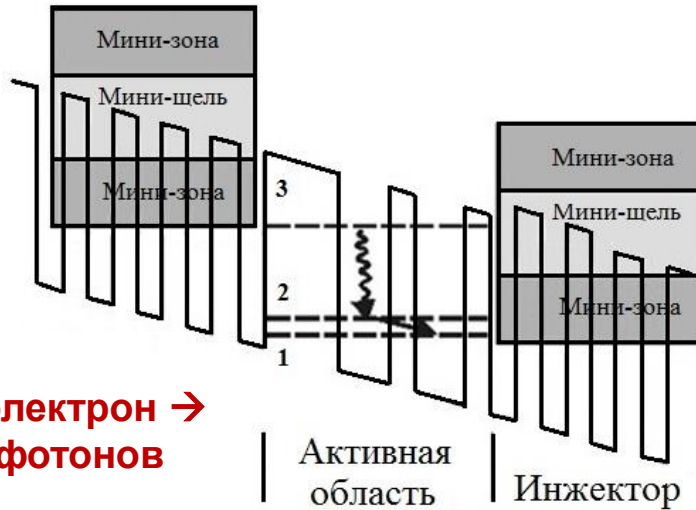


АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»

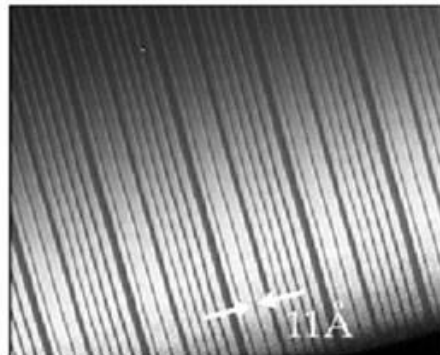


Принцип работы квантовых каскадных лазеров

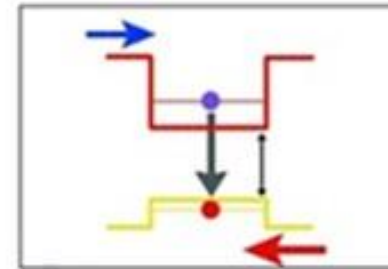
Квантово-каскадный лазер



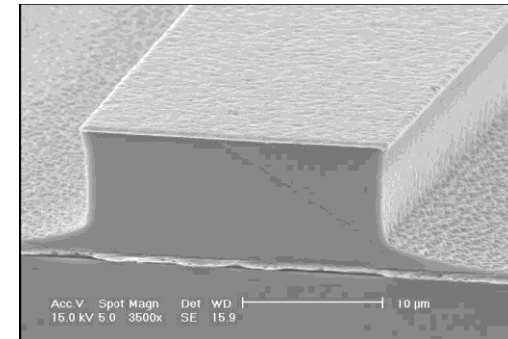
Один электрон →
много фотонов



Диодный лазер



Один электрон →
один фотон



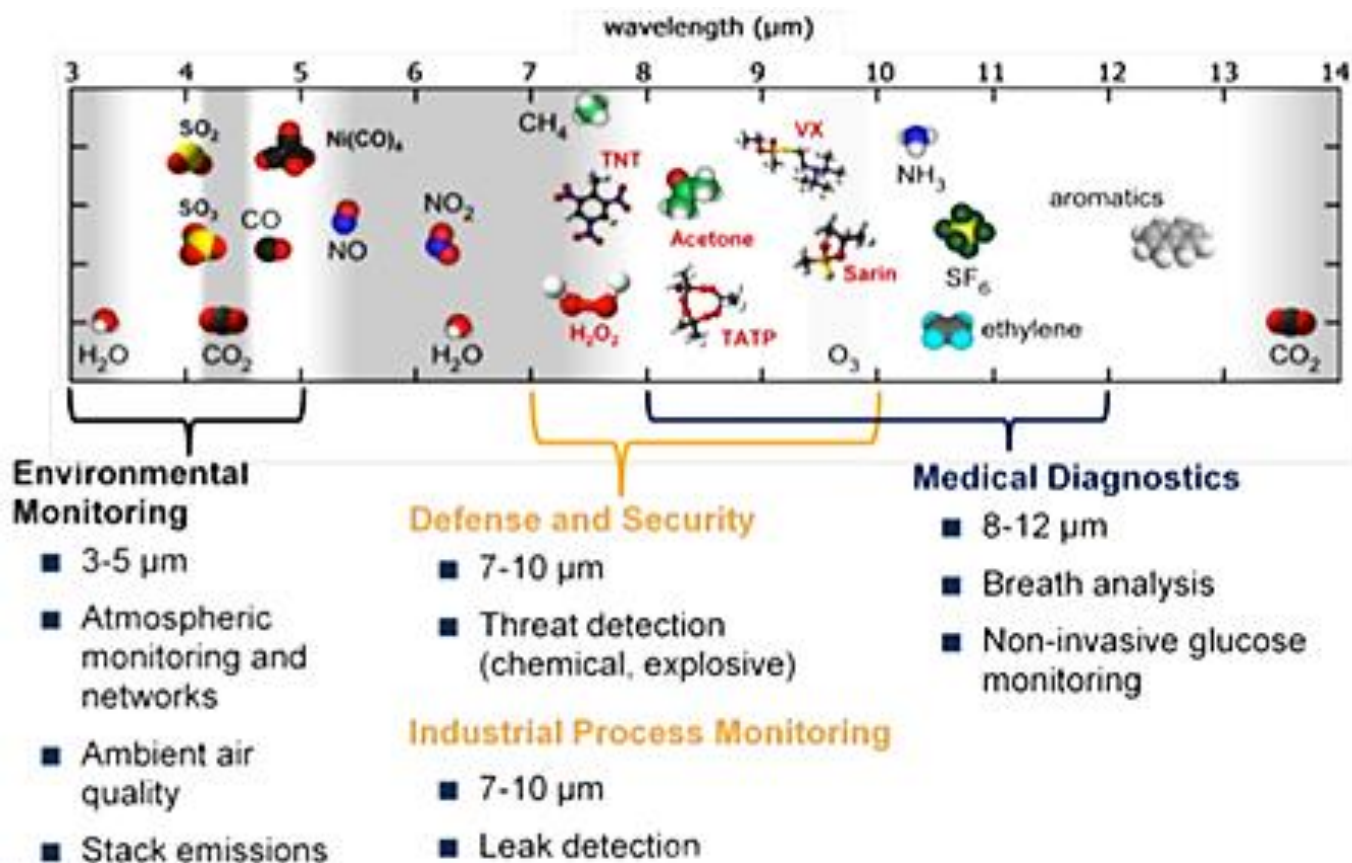
Основные преимущества квантовых каскадных лазеров

- Возможность одновременной работы в окнах 3-5 и 8-12 мкм;
- Возможность работы в импульсном и непрерывном режиме;
- Высокий коэффициент полезного действия, достигающий 10% и выше;
- Средняя мощность разрабатываемых систем на основе квантово-каскадных лазеров уже сейчас превышает 20 Вт;
- Потребляемая мощность в рабочем режиме 20-150 Вт;
- Малая масса;
- Высокая стабильность и надежность в работе;
- Высокая воспроизводимость параметров квантово-каскадных лазеров

Основные свойства квантовых каскадных лазеров

- Униполярные лазеры с каскадным характером излучения фотонов;
- Длина волны генерации в первую очередь определяется геометрией квантовых ям, а не составом материалов гетеропары, как в диодных лазерах;
- Работают, как в средней ИК-области (3 – 25 мкм), так и в терагерцовой (ТГц) области спектра (1 – 5 ТГц, 60 – 300 мкм);
- В среднем ИК-диапазоне обладают высокой мощностью излучения: в импульсном режиме пиковая мощность – 10 Вт, в непрерывном режиме мощность излучения превышает 1 Вт при комнатной температуре;
- В среднем ИК диапазон перестройки может составлять более 800 см^{-1} ;
- Излучение среднего ИК-диапазона и терагерцовое излучение неинвазивно, оно не является ионизирующим излучением и при умеренных интенсивностях не представляет опасности для здоровья человека;
- Терагерцовое излучение существенно меньше подвержено рассеянию ($1/\lambda^4$), чем видимое или инфракрасное излучение ближнего диапазона спектра. Поэтому такие объекты как сухие ткани, дерево, бумага, пластмассы, керамика, краски, окрашенное стекло прозрачны в терагерцовом диапазоне спектра (за исключением металлов и веществ, состоящих из полярных молекул, например, воды).
- В окнах прозрачности атмосферы излучение среднего ИК и ТГц излучение распространяется сквозь туман, дымку, дождь и снег с минимальными потерями.

Спектры поглощения молекул в средней ИК области



Дистанционное детектирование опасных веществ



Дистанционный досмотр в ИК и ТГц области спектра



Двухканальная мультиспектральная система формирования изображения с применением ТГц и VIS камер (M. Życzkowski, etc. WIT Transactions on The Built Environment, Vol 134, 285, 2013).

Самодельное взрывное устройство (ВУ)



Закрепление ВУ на теле



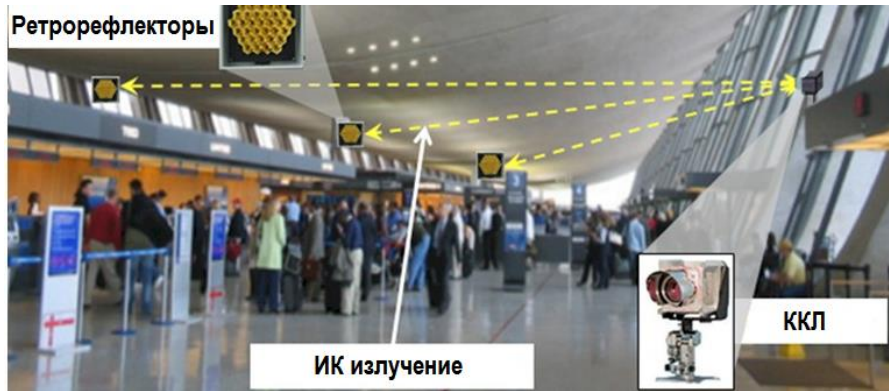
ВУ скрыто под курткой



Изображение скрытого ВУ в ТГц диапазоне



Примеры применения трассового ККЛ лидара



а) Сканирование воздушного пространства в помещении транспортного терминала с целью защиты пассажиров от потенциальных угроз с применением ОВ

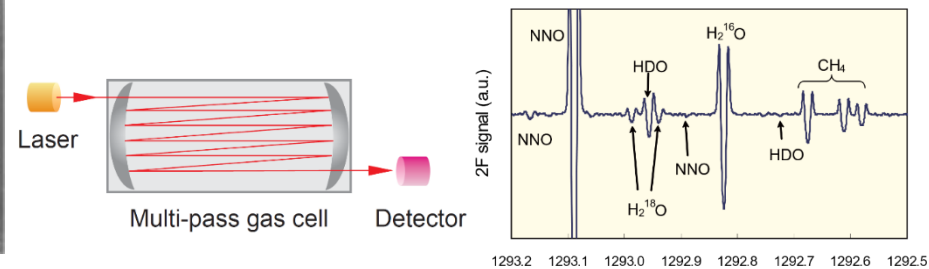
б) Защита открытого объекта от террористических атак или случайных химических выбросов

в) непрерывный мониторинг производственных помещений для защиты от случайных химических выбросов и утечек токсичных газов

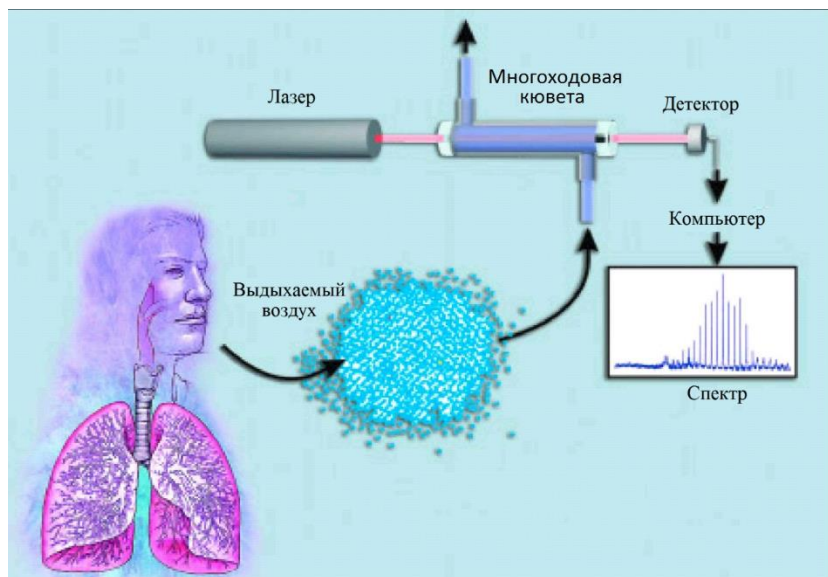
Системы лидарного типа для дистанционного обнаружения утечек из трубопроводов



ALMA (Aerial Laser Methane Assessment) – Дистанционный лазерный детектор метана и других промышленных газов предназначен для установки на беспилотные самолеты и вертолеты с целью обнаружения утечек газов с воздуха.



Неинвазивная диагностика заболеваний на ранней стадии развития путем высокочувствительного газового анализа выдыхаемого воздуха



Объектами анализа следов газообразных соединений в выдыхаемом воздухе являются молекулы-биомаркеры, закономерности образования и выделения которых достаточно четко связаны с нормальными и патологическими процессами, протекающими в организме.

Применения ККЛ для обнаружения следов газов в атмосфере и для изотопического мониторинга методом спектроскопии поглощения

Анализ выдыхаемого воздуха (3 - 7 мкм)

TRACE GAS ambient air	cm ⁻¹	1 s std dev [ppt] 210 m 76 m	
NH ₃	967	20	50
CH ₄	1275	100	300
¹³ CH ₄ /CH ₄	1294	1.5‰	
SO ₂	1353	80	
NO ₂	1600	10	
HOONO	1669	120	
HNO ₃	1720	50	
HCHO	1765	50	
NO	1900	40	
OCS	2050	2	5
CO	2199		40
N ₂ O	2199		20
¹⁵ N ¹⁴ NO, ¹⁴ N ¹⁵ NO	2188	3‰	
¹³ CO ₂ C ¹⁸ O ¹⁸ O	2311		0.06‰

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

Высокоскоростные помехоустойчивые открытые линии связи

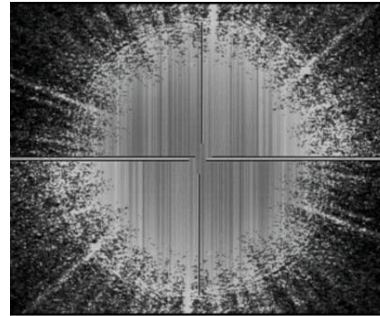


1. Малое поглощение, так как длина волны излучения ТГц (и ИК) ККЛ находится в окнах прозрачности атмосферы
2. Слабое влияние турбулентности атмосферы в силу большой длины волны по сравнению с оптическим диапазоном
3. На связь не оказывают влияние наличие облачности и состояние погодных условий
4. Возможность плавной перестройки по частоте

Специальные применения (оборонеспособность)

А. Подавление тепловизионных средств наблюдения, разведки и прицеливания

Пример, иллюстрирующий эффект «ослепления» тепловизионных средств при лазерном воздействии (Schleijpen R.(H.)M.A. etc. "Laser dazzling of focal plane array cameras," Proc. SPIE 6738, 67380O (2007)).



Б. Противодействие ПЗРК с инфракрасными головками самонаведения (ИК-ГСН)



Системы защиты для самолетов гражданской авиации



Лазерная система опто-электронного подавления, входящая в систему БКО «Президент-С» на базе параметрического генератора света (масса 64 кг)

Система активной защиты вертолетов SOLARIS подавления ИК-ГСН на базе квантово-каскадных лазеров (масса 15 кг)

Предложение по разработке технологии ККЛ

ОКР «Разработка технологии изготовления квантово-каскадных лазеров (ККЛ) спектрального диапазона 4-12 мкм для перспективных лазерно-информационных систем», шифр «Каскад»

Срок выполнения: 3 года

Промышленная технология создания ККЛ в РФ отсутствует. Разрабатываемая технология является опережающей. В ходе выполнения работы на основе технологического сочетания молекулярно-лучевой и МОС-гидридной эпитаксии наногетероструктур для ККЛ спектрального диапазона излучений 4-12 мкм для различных вышеуказанных гражданских применений должны быть разработаны:

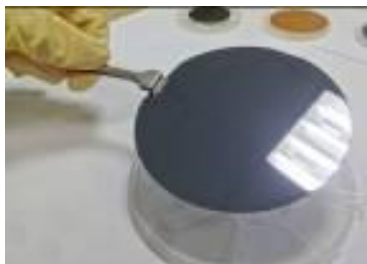
- технологии формирования полупроводниковых наногетероструктур АЗВ5 для квантово-каскадных лазеров 1 и 2 типа;
- технологии изготовления активных элементов лазеров;
- контрольные образцы квантово-каскадных лазеров 1 и 2 типа с использованием новых технологических процессов;
- методики измерений основных параметров квантово-каскадных лазеров спектрального диапазона излучения 4-12 мкм.

В результате выполнения настоящей работы будет разработан инновационный продукт, отсутствующий на отечественном рынке и имеющий стратегическое значение.

Имеющиеся в АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» ресурсы в части разработки и будущего выпуска ККЛ

Технологическая цепочка изготовления полупроводниковых лазеров

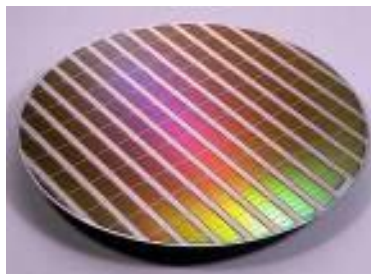
Эпитаксия



Лазерная гетероструктура

МОС-гидридная эпитаксия

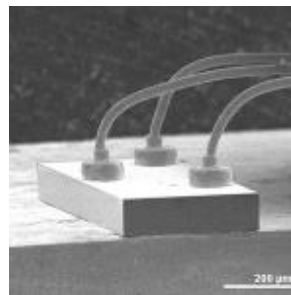
Планарная обработка



Пластина с активными элементами

Фотолитография.
Травление.
Нанесение диэлектрических покрытий.
Нанесение металлических покрытий.

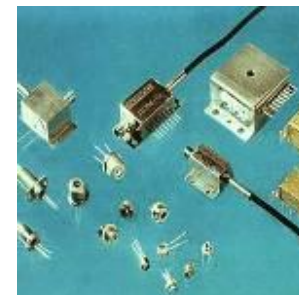
Разделение на чипы



Лазерный чип

Скрайбирование.
Скальвание.
Формирование отражающих и просветляющих покрытий на гранях лазерного резонатора.

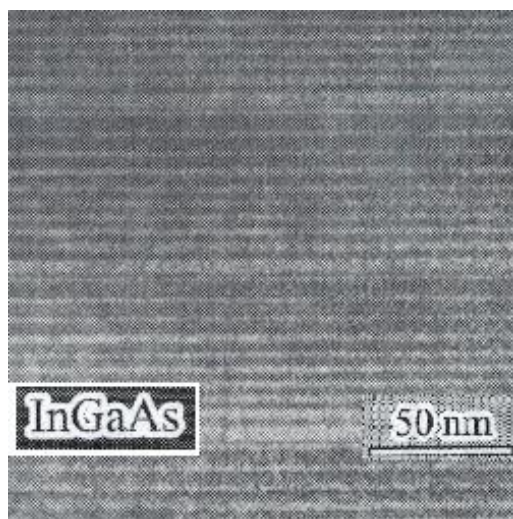
Сборка



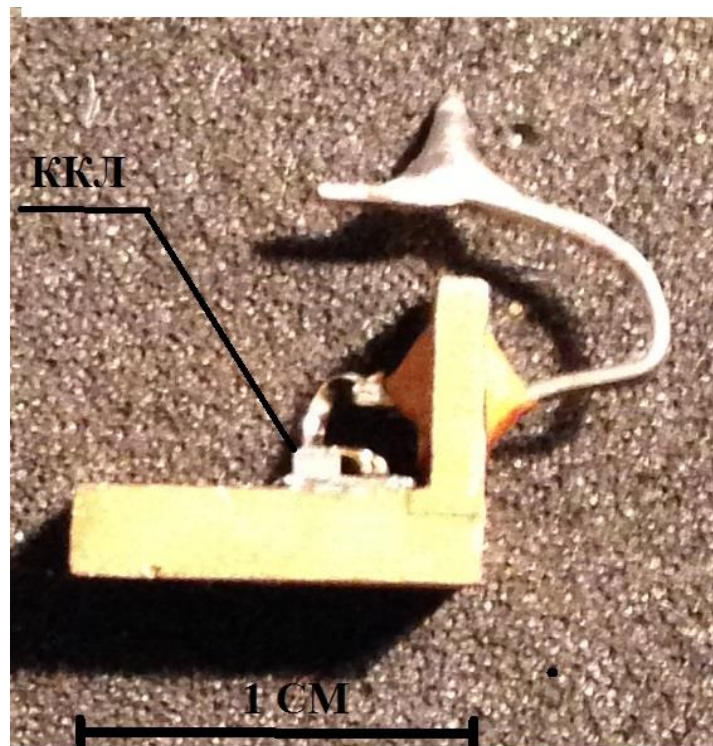
Полупроводниковый лазер

Пайка кристаллов.
Разварка выводов.
Посадка в корпус.
Герметизация корпуса.
Стыковка с волокном.

Квантовые каскадные лазеры в НИИ «Полюс» (научно-техн. задел)

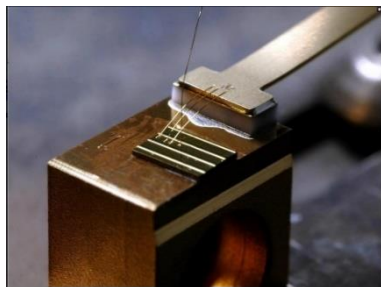
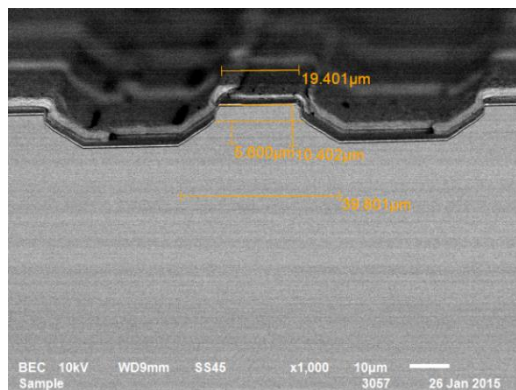


Первый в России квантовый каскадный лазер (длина волны генерации – 8 мкм, пиковая имп. мощность – 45 мВт, температура – 77 К), созданный на основе наногетероструктуры с минимальной толщиной слоя ~ 10 нм, полученной с помощью МОС-гидридной технологии

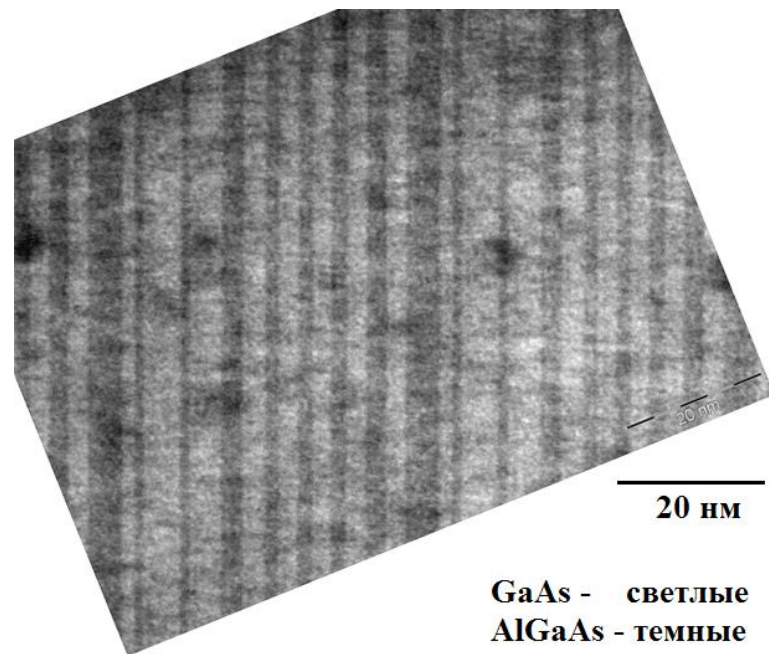


1. Засавицкий И.И., Мармалюк А.А., Микаелян Г.Т. и др.
// Квантовая электроника. 40, 95 (2010)

Квантовые каскадные лазеры в НИИ «Полюс» (научно-техн. задел)



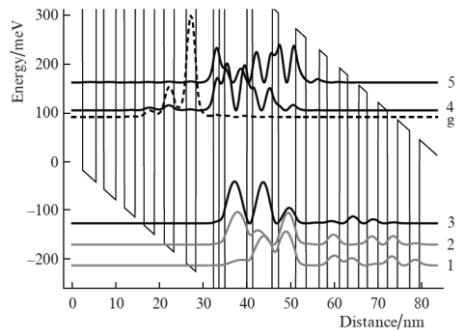
Длина волны генерации – 9,6 мкм,
пиковая имп. мощность – 200 мВт,
температура – 77 К



1. Засавицкий И.И., Мармалюк А.А., Ладугин М.А. и др. // Квантовая электроника, 46, 447 (2016)
2. Мармалюк А.А., Ладугин М.А., Симаков В.А. и др. // Неорганические материалы, 53, 909 (2017)

ККЛ среднего ИК-диапазона совместно с ФТИ Иоффе (научно-техн. задел)

Моделирование ККЛ

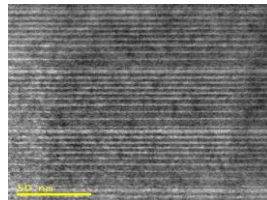


- Активная область
- Лазерный резонатор
- Распределение тепла
- Моделирование ККЛ

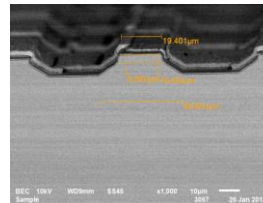
- С- или F-крепление
- Ширина полосы от 20 до 60 мкм
- Длина полости от 3 до 4 мм

Изготовление ККЛ

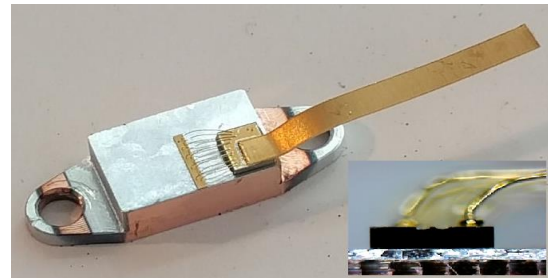
МЛЭ и МОС-гибридная
эпитаксия



После выращивания



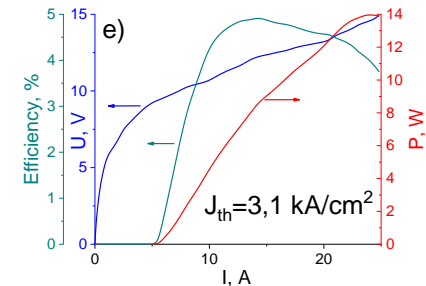
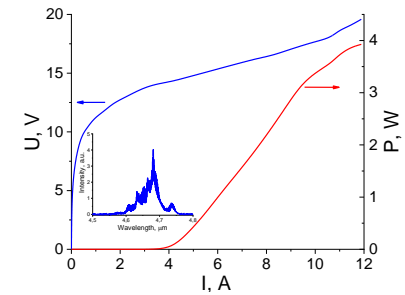
Монтаж



► $\lambda = 4 \dots 5$ мкм

- Импульсный режим
- Ширина импульса от 100 до 200 нс
- Частота генерации от 5 до 10 кГц
- Выходная мощность до 10 Вт

Обычные значения ККЛ

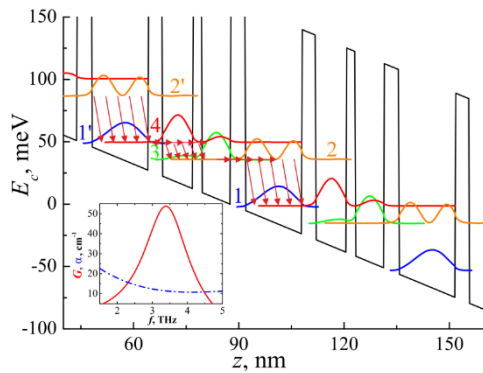


► $\lambda = 8 \dots 10$ мкм

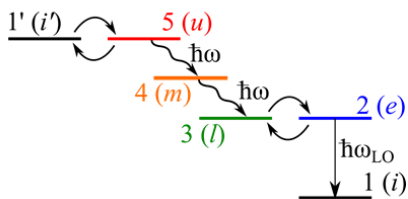
- Импульсный режим
- Ширина импульса от 100 до 200 нс
- Частота генерации от 5 до 10 кГц
- Выходная мощность до 14 Вт

ККЛ ТГц-диапазона совместно с ИСВЧПЭ РАН (научно-техн. задел)

Оригинальные схемы диапазонов



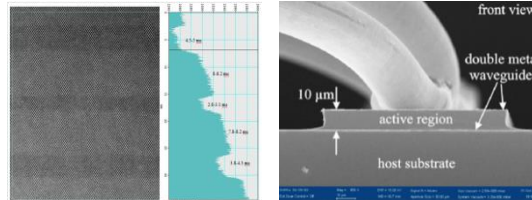
Новые лазерные схемы two-photon design



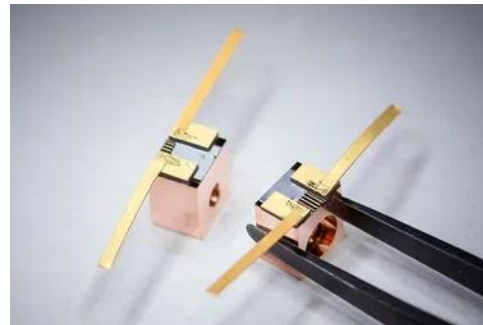
- Оригинальные схемы для высокотемпературных ТГц ККЛ (более 200 К) и ТГц ККЛ высокой мощности

Изготовление ТГц ККЛ

МЛ эпитаксия После выращивания



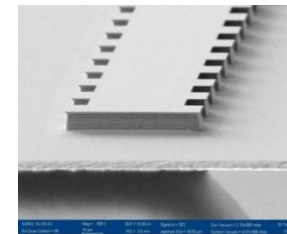
Монтаж



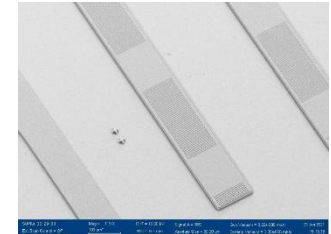
- Частота генерации – от 2,3 до 4,5 ТГц
- Ширина полосы генерации – от 100 до 800 ГГц
- Рабочий диапазон температур – 50-120 К
- Выходная мощность – > 1 мВт

Модели ТГц ККЛ

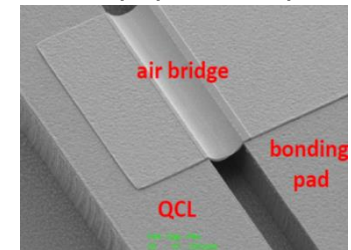
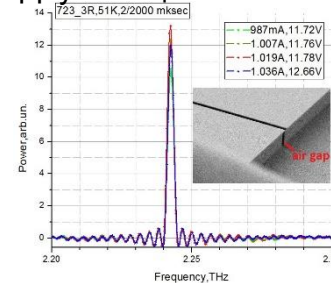
РОС ККЛ (index coupling)



РОС ККЛ (gain coupling)



Двух-секционные ККЛ ККЛ непрерывного режима



- Генерация на одной частоте с подавлением боковых мод более 25 дБ
- Формирование направленных гауссовских лучей при помощи гиперполусферических линз
- Демонстрация применения ТГц ККЛ в Гильбертова спектроскопия на основе джозефсоновских контактов