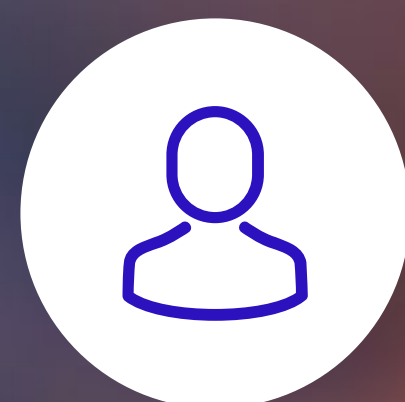
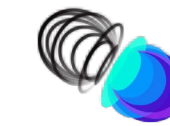


Подходы и технологии создания компонентной базы на основе полупроводниковых гетероструктур для лазерных дальномеров и ЛИДАРОВ

24, 25 Июня 2025 г.



Слипченко Сергей Олегович
Заведующий лаборатории полупроводниковых лазерных диодов,
ФТИ им. А.Ф. Иоффе



Основная деятельность ФТИ им. А.Ф. Иоффе в области технологий оптоэлектроники и фотоники

Разработка эпитаксиальных технологий роста полупроводниковых гетероструктур (MOCVD и MBE) InAs, InP, GaAs, GaN

Разработка постростовых технологий создания компонентной базы на основе полупроводниковых гетероструктур (травление, травление, пассивация, напыление)

Теоретический поиск и сопровождение процесса разработки конструкций компонентной базы фотоники

Ключевые изделия фотоники, производимые (разрабатываемые) ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Лазеры на основе полупроводниковых гетероструктур:

- Торцевые Фабри-Перо
- Вертикально излучающие
- Квантово-каскадные

Фотопреобразователи:

- Быстродействующие фотоприемники на основе Si
- Фотопреобразователи мощного лазерного излучения
- Фотодетекторы УФ (<350нм)
- Фотодетекторы ИК (2000-4000нм)

Модуляторы:
СВЧ модуляторы на основе ниобата лития (до 40ГГц)

Приоритетные проблемные вопросы фотоники в РФ

Разработка **отечественной линейки технологического оборудования** создания компонентной базы фотоники на основе полупроводниковых гетероструктур:

- эпитаксиального
- литографического
- постростовой подготовки

Разработка **отечественной линейки СВЧ фотодетекторов:**

- Высокочувствительных (лавинные, Гейгеровские)
- СВЧ в спектральном диапазоне 1300-1600нм

Разработка **отечественной линейки спектрально стабилизированных источников лазерного излучения:**

- фиксированная длина волны
- перестраиваемые источники
- интегрированных с ФИС

Разработка **отечественной линейки СВЧ полупроводниковых лазеров:**

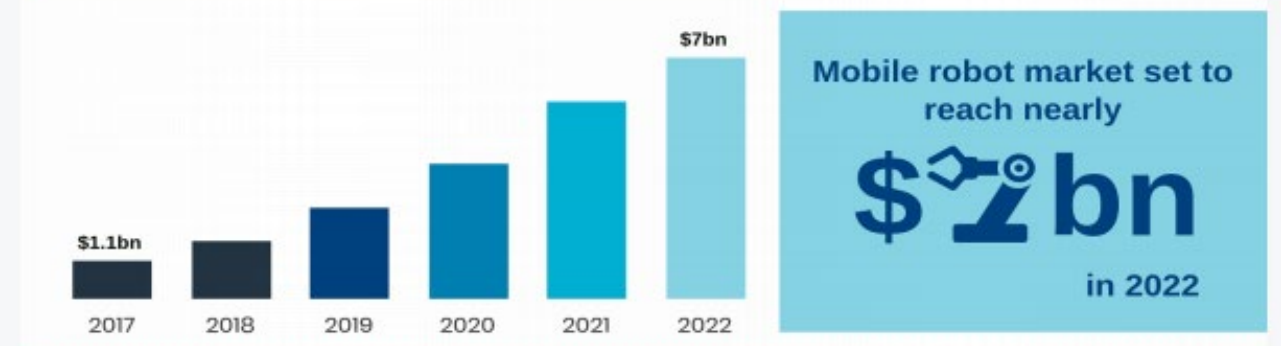
- Вертикально излучающих
- Мощных Фабри-Перо

Разработка **отечественной линейки модуляторов лазерного излучения** на основе полупроводниковых гетероструктур и ФИС:

- Электроабсорбционных
- Интерференционных
- На основе ФИС

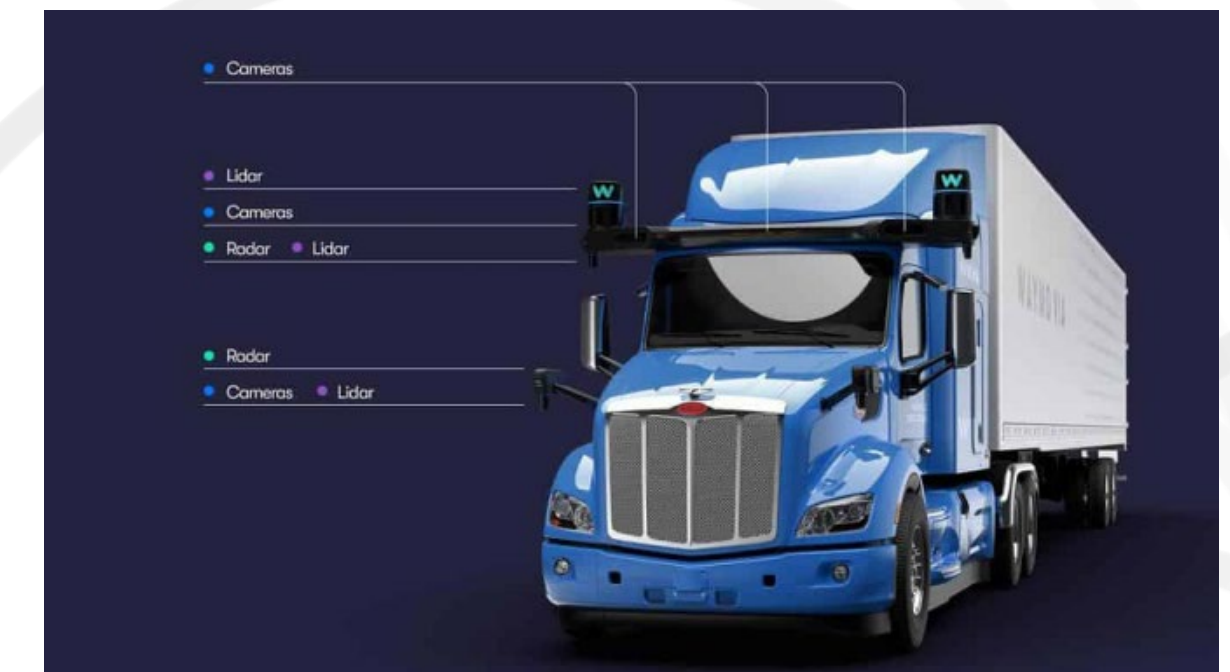
Актуальность и практическая значимость разработки и создания лазерных ЛИДАРОВ

The Global Mobile Robot Market in 2022



AGV's vs AMR's

2020	AGV's	1.1 B	AMR's	500 M
2024	AGV's	4.0 B	AMR's	3.5 B



autonomous mobile robots (AMRs) – автономные мобильные роботы
 automated guided vehicles (AGVs) – автоматизированные управляемые транспортные средства

Система автономного управления автомобилем

Типы

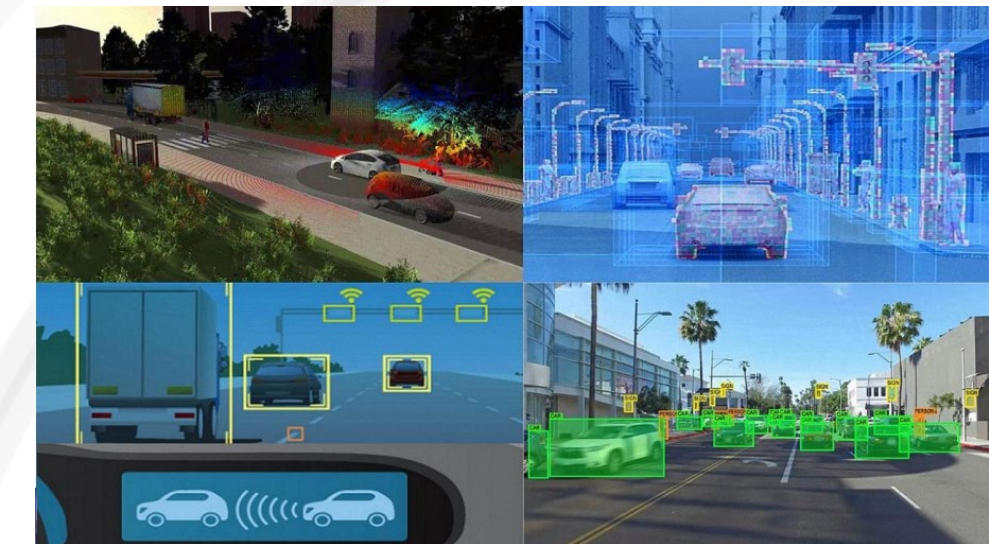
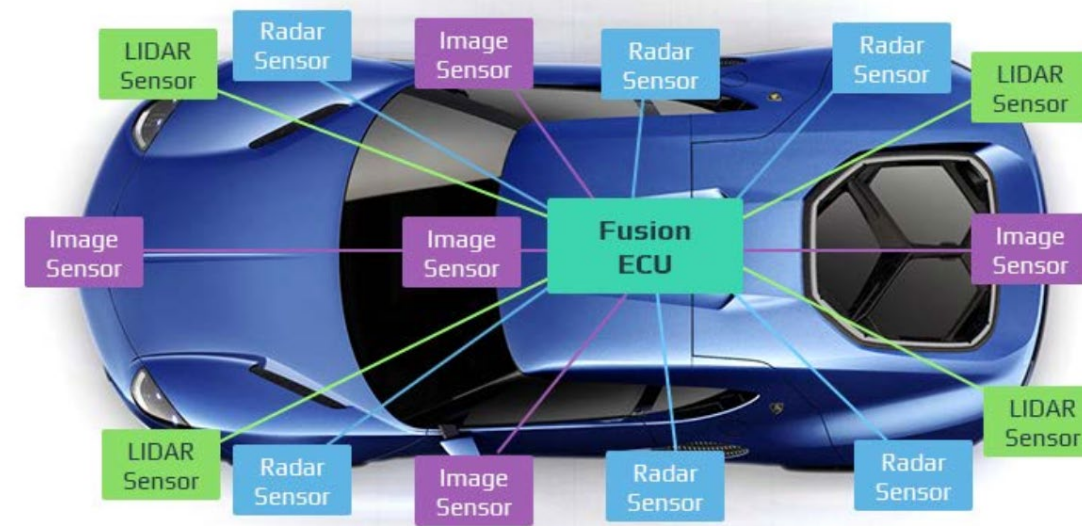
- Радар – дешевый, но нет достаточного 3D разрешения
- ЛИДАР – высокое разрешение, высокая стоимость
- Тепловые камеры – плохая видимость при тумане/дожде, высокая стоимость
- 3D, 2D камеры - плохая видимость при тумане/дожде

Требования

- Скорость
- Дальность
- Распознаваемость объектов
- Пространственное разрешение



Camera Image



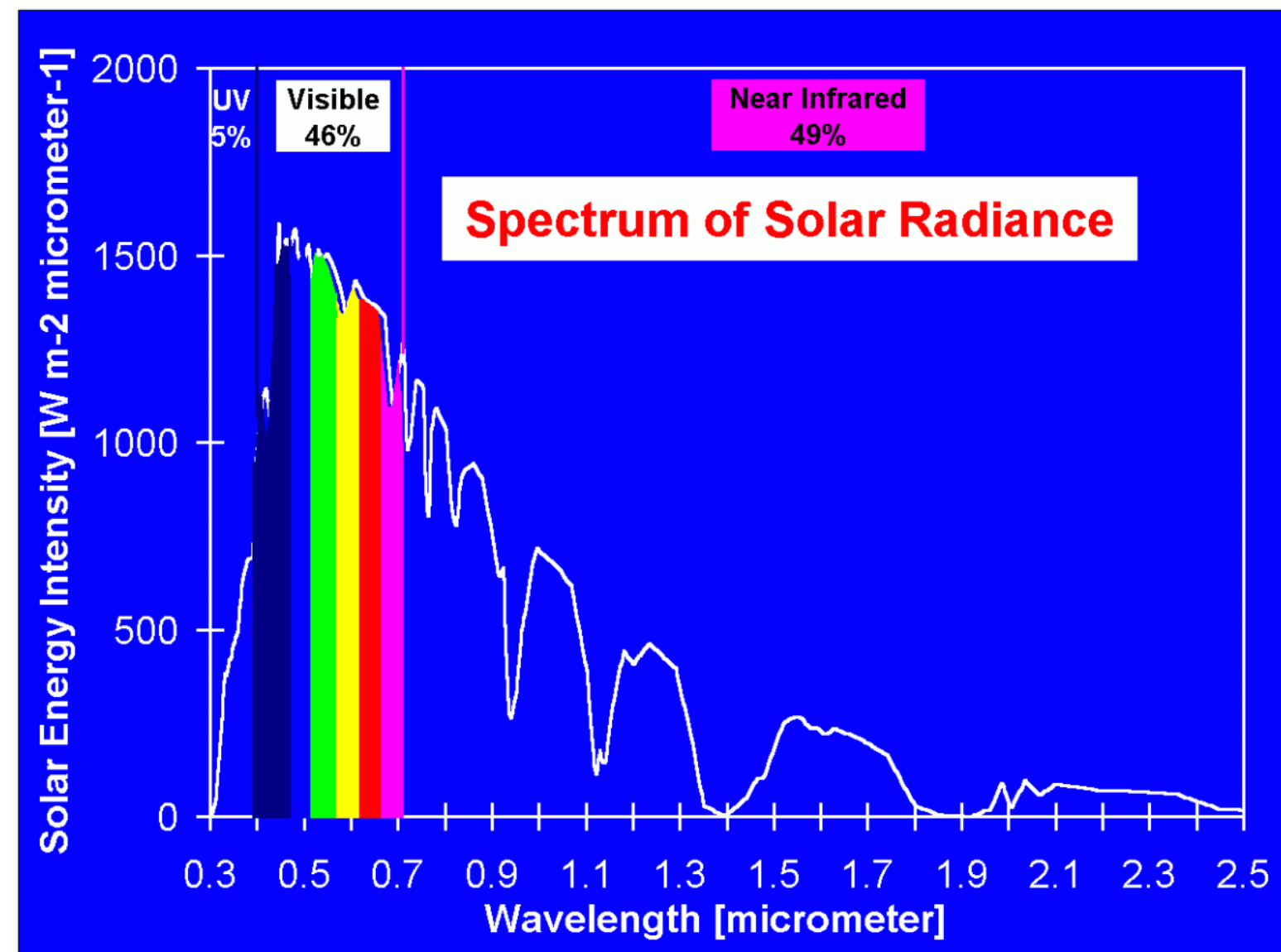
Traditional LiDAR – Low Resolution (0.2 x 0.2 deg)
Objects difficult to distinguish



Insight LiDAR – Ultra High Res (0.025 x 0.025 deg)
Bricks in the road and pedestrians clearly visible

Требования к основным элементам 3D ЛИДАРОВ

Длина волны источника лазерного излучения



Спектральные области с минимальной фоновой засветкой солнечного излучения:

1900нм, 1400нм, 1100нм, 900нм

Чувствительность приемника лазерного излучения

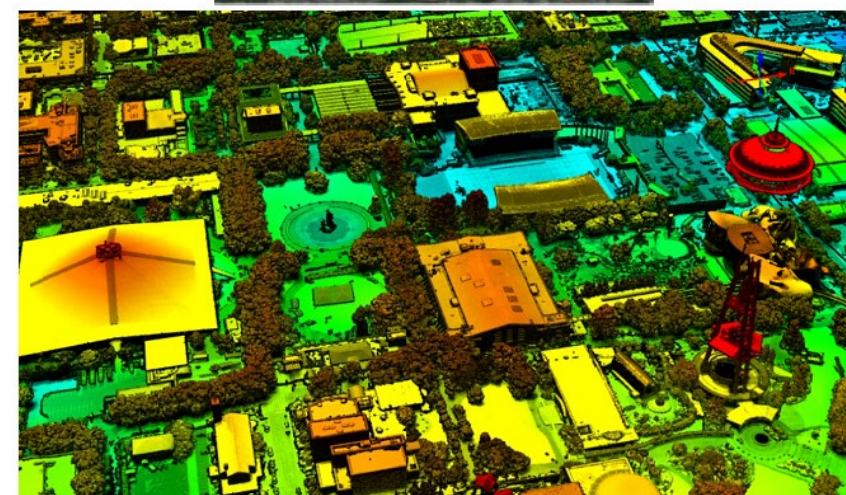
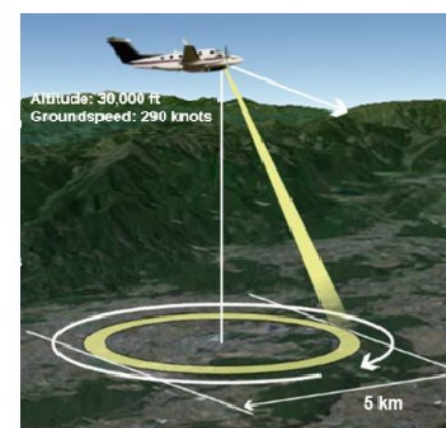
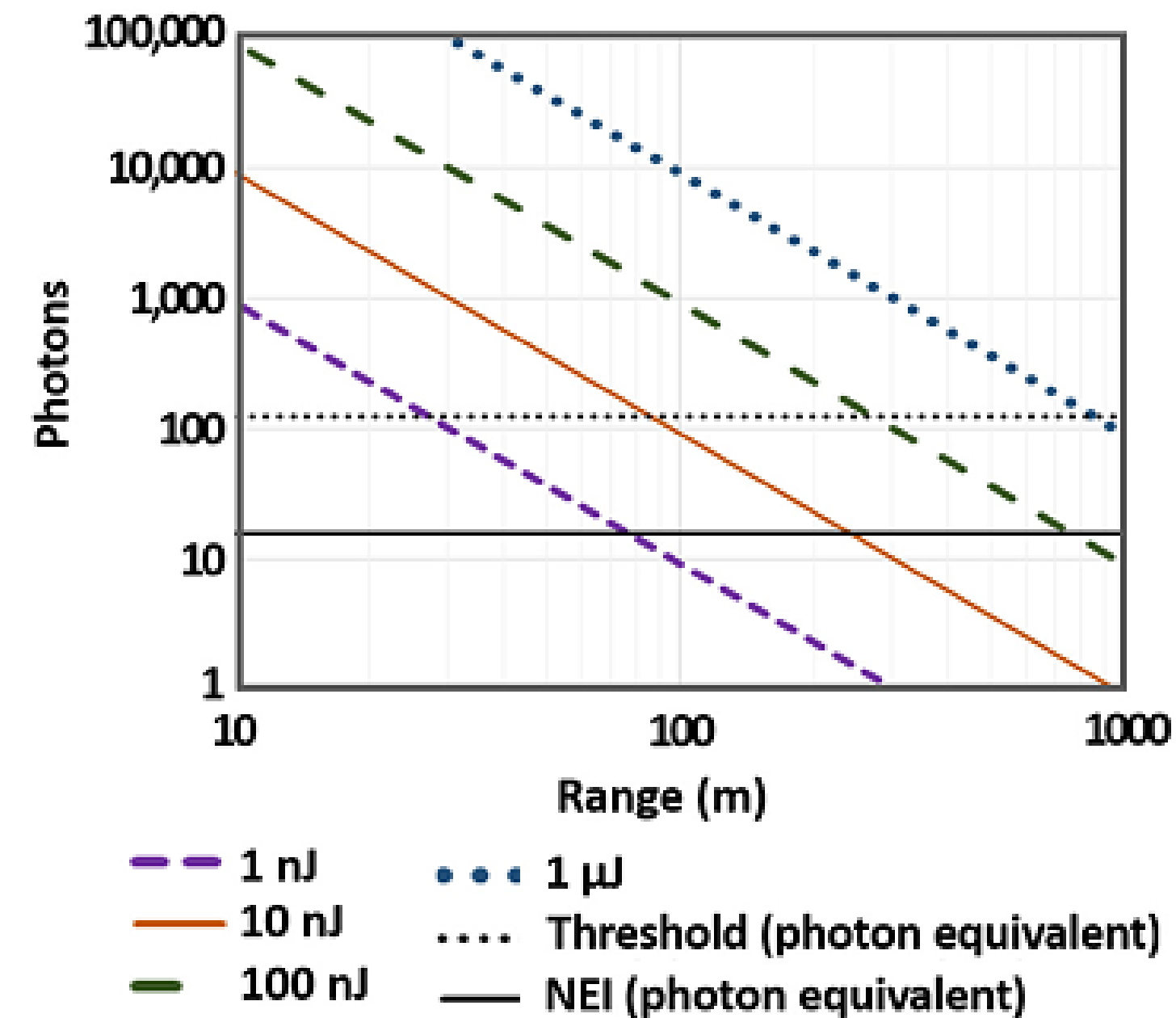
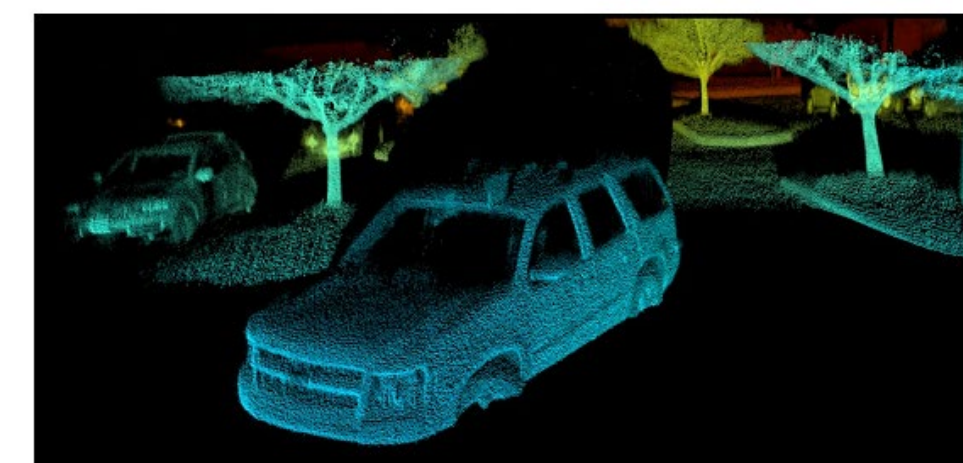
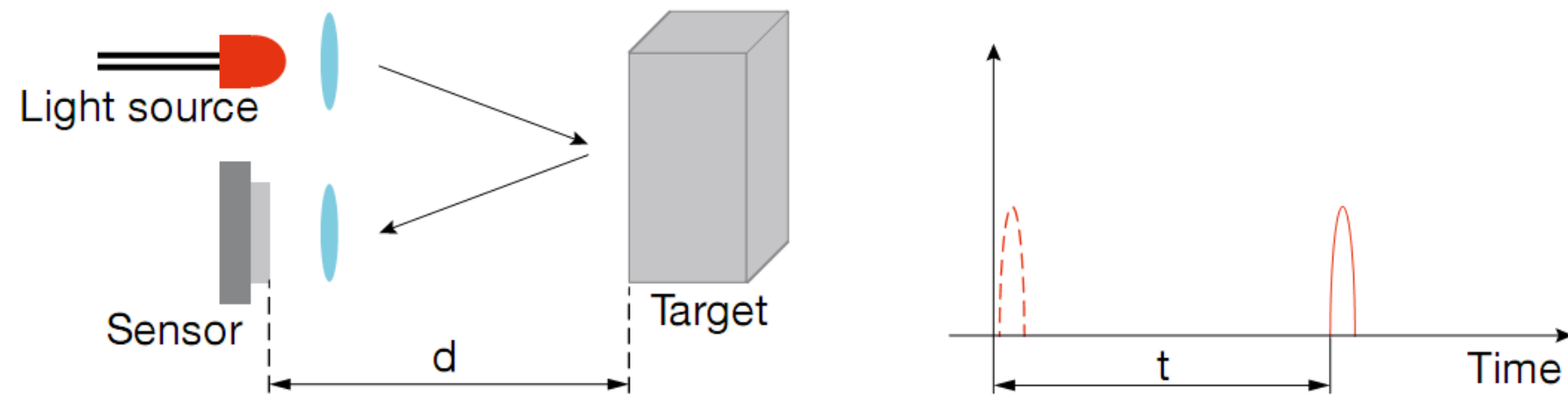


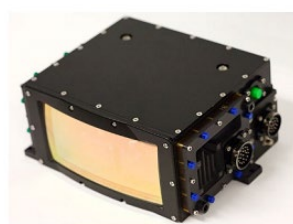
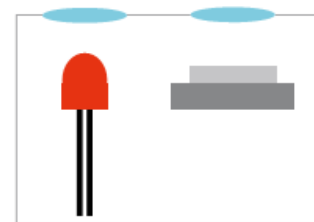
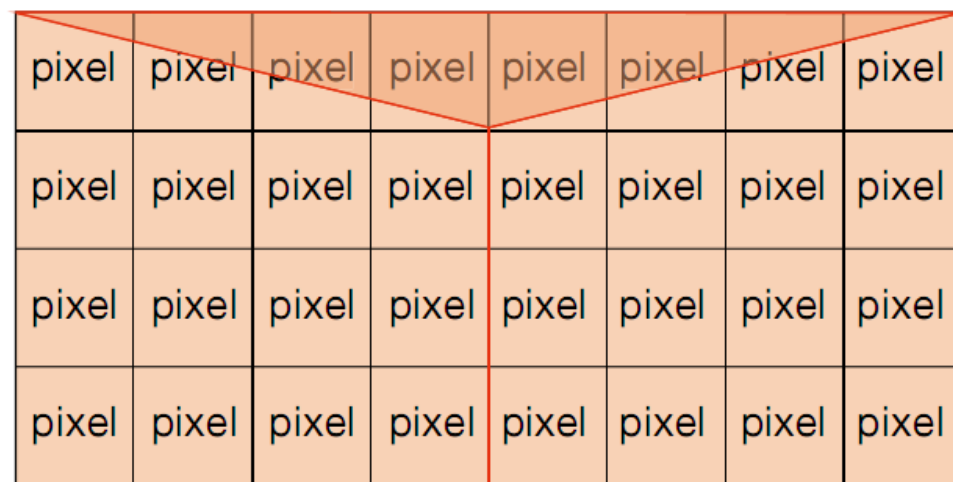
Figure 8. (Top) Illustration of the scan pattern of Harris IntelliEarth™ Geospatial Solutions Geiger-mode LiDAR system [31]; (Bottom) High-resolution elevation data across downtown Seattle, Washington area collected by Harris IntelliEarth™ Geospatial Solutions Geiger-mode LiDAR system [31].



Базовые принципы реализации 3D ЛИДАРов. Времяпролетные схемы (ToF).



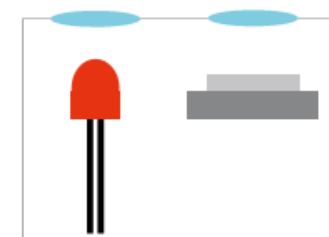
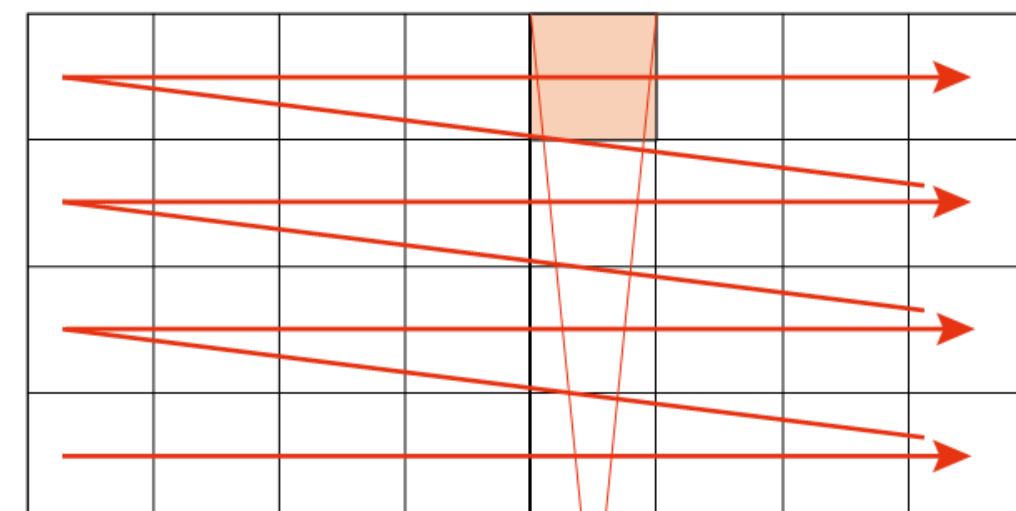
Сложность реализации, высокая стоимость
Высокая скорость формирования 3D картины
Максимальное расстояние ограничено чувствительностью
Flash (“импульсные”)



Требуется высокая пиковая мощность (кВт)

Решетки SPAD детекторов

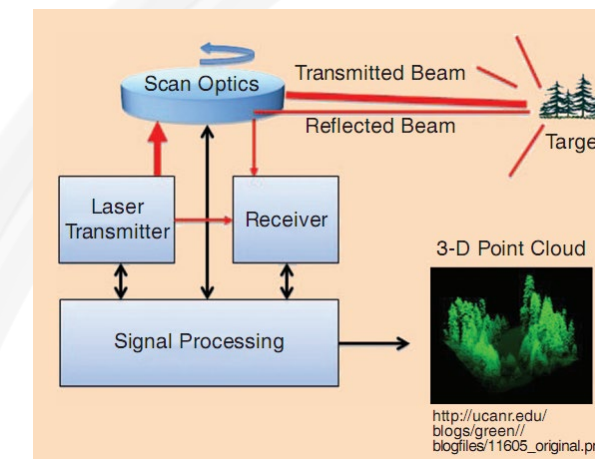
Scanning (“сканирующие”)



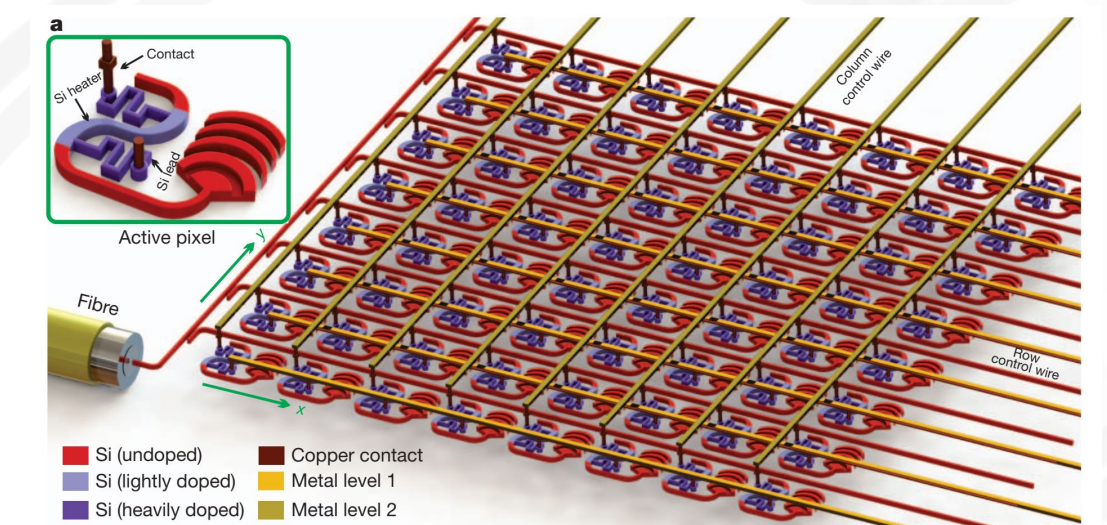
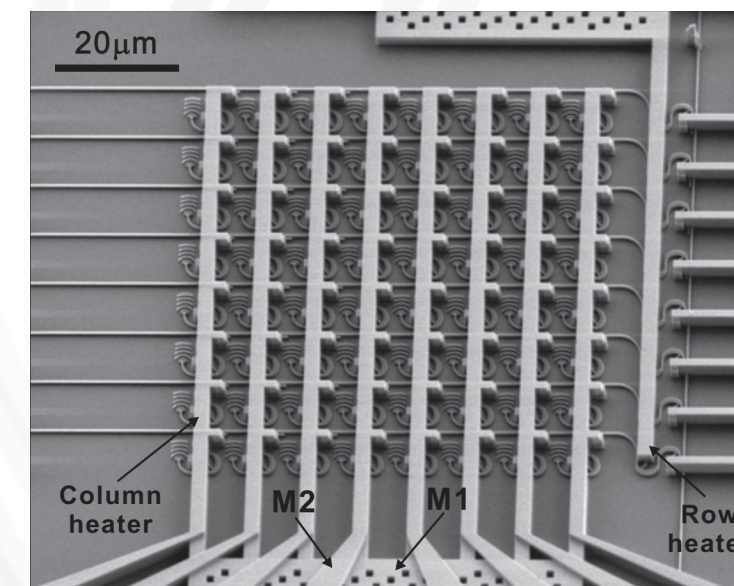
Требуется пиковая мощность десятки Вт

Одиночные лавинные детекторы

Механическое сканирование

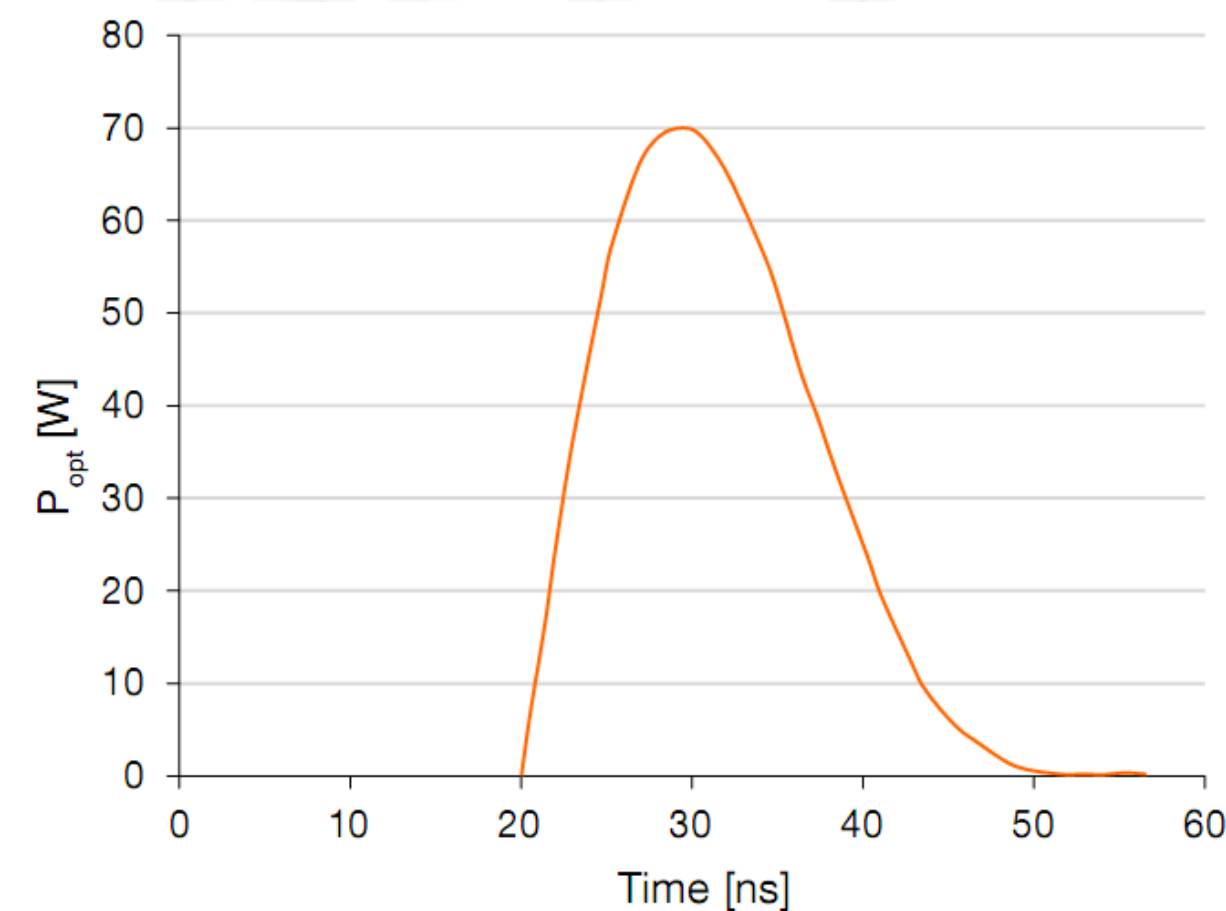
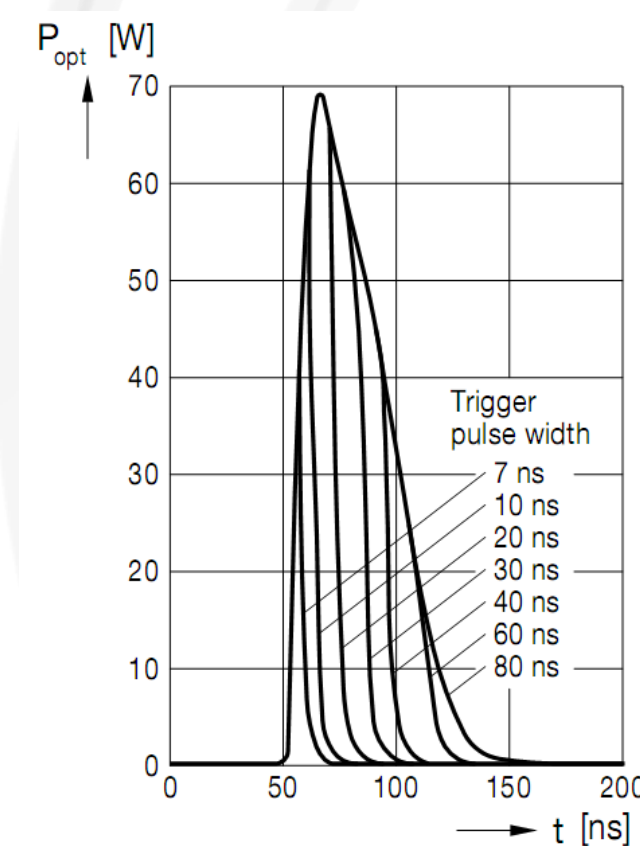
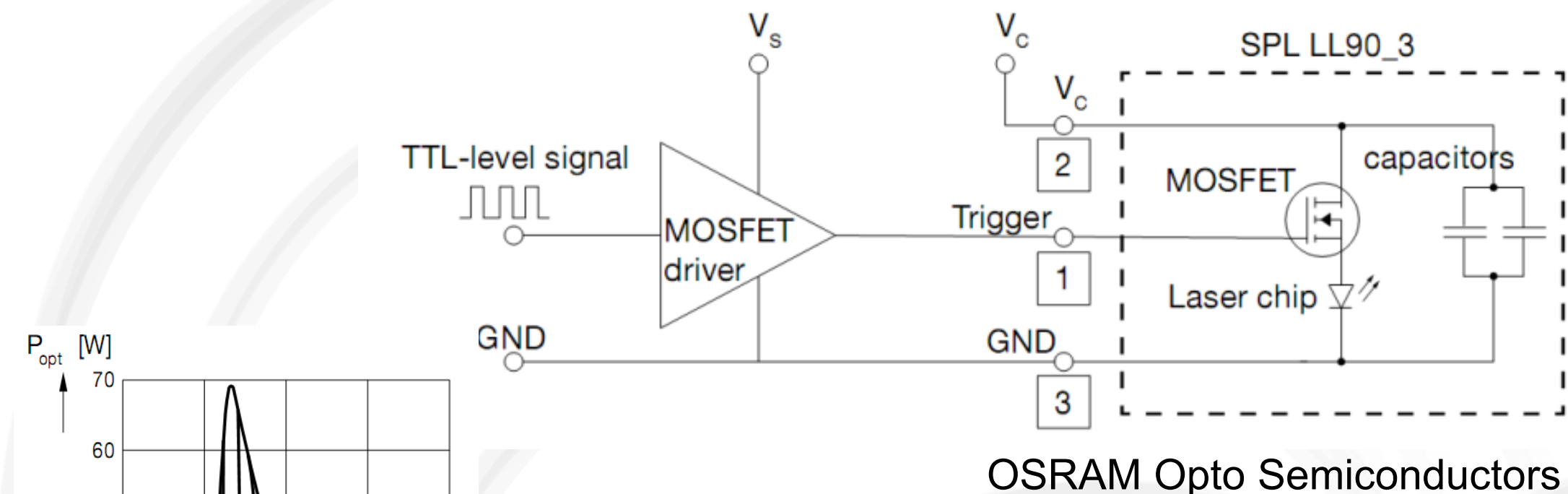
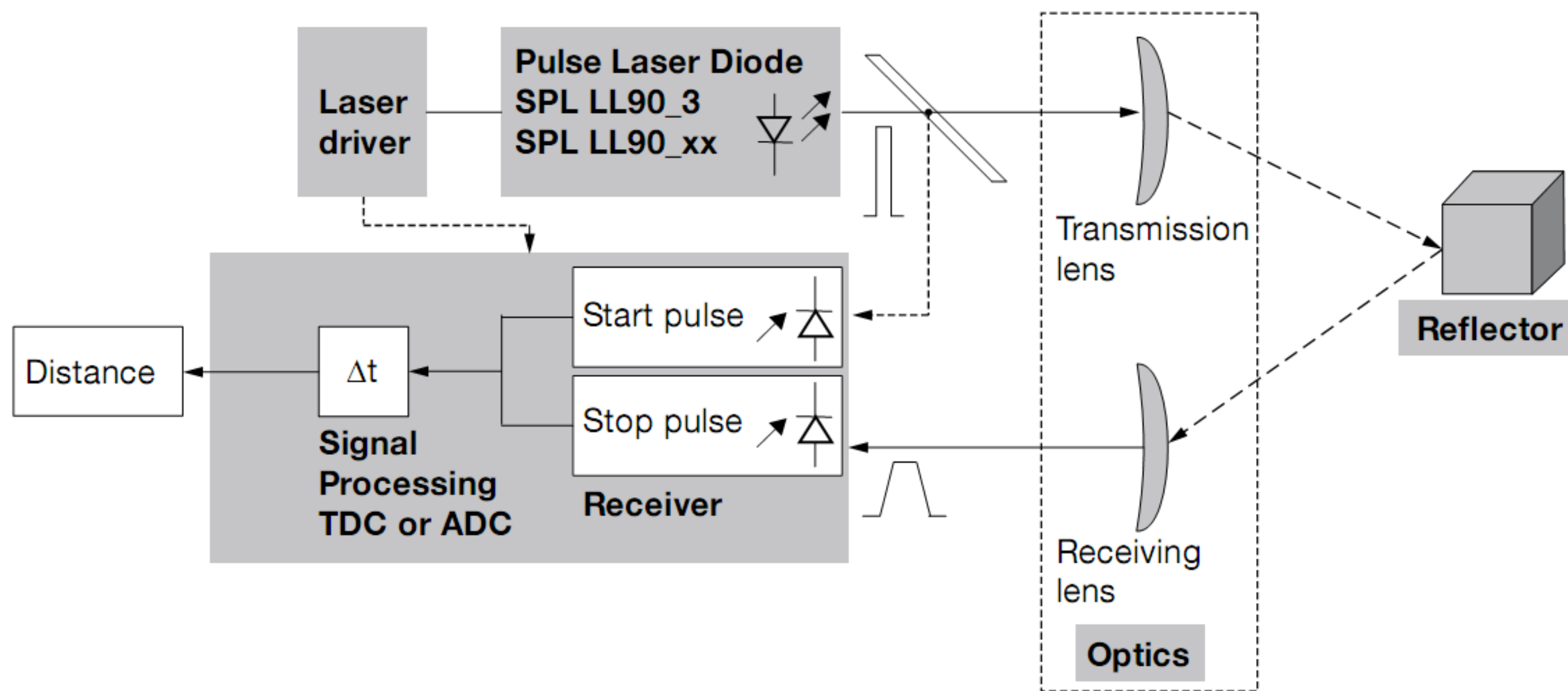


Оптические фазированные решетки

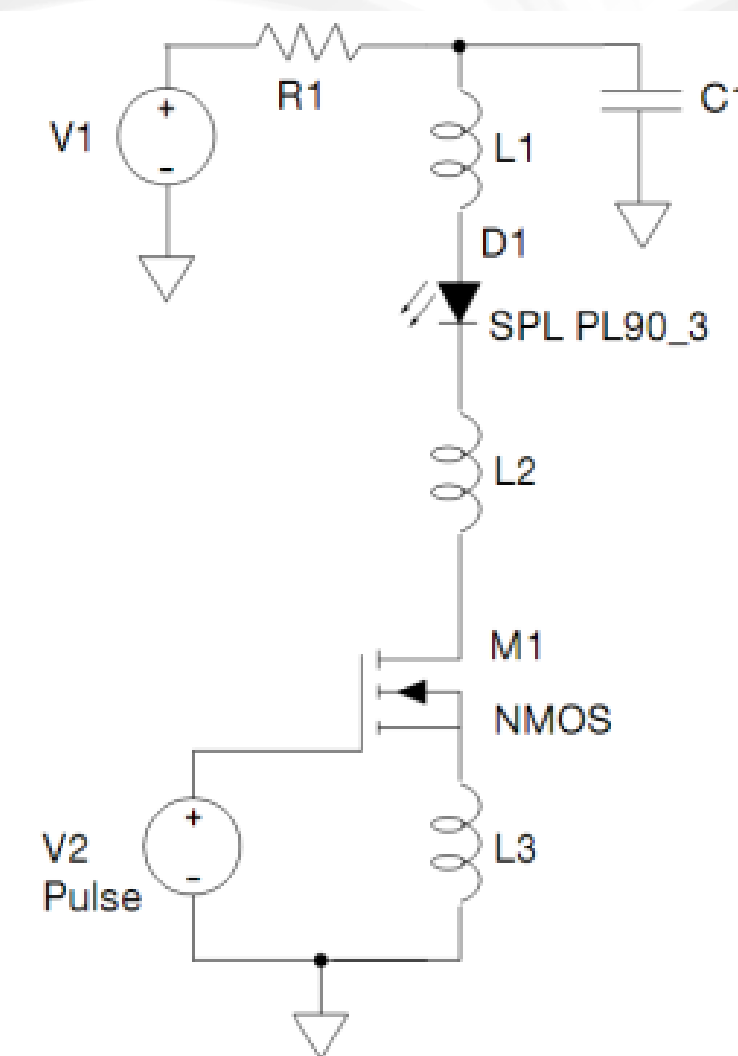


Требуется высокий уровень КНИ технологии, точность управления фазой

Принципы реализации времяпролетного ЛИДАРА



OSRAM Opto Semiconductors



OSRAM and Directed Energy Inc

Критические технологии

Мощный полупроводниковый импульсный лазер
Электрическая схема накачки импульсами тока полупроводниковых лазеров

Чувствительный детектор (лавинный ФП (APD), Гейгеровский ФП (SPAPD))
Электрическая схема обработки и анализа сигналов

Оптическая система фокусировки и сбора излучения

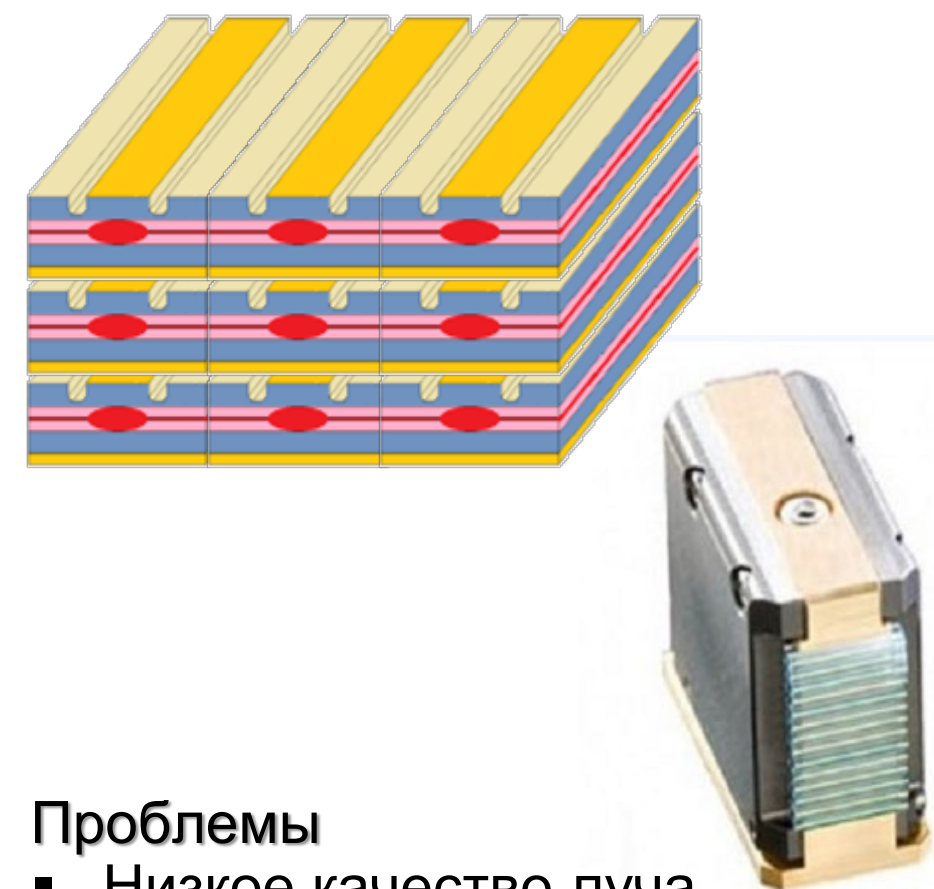
Времяпролетные ЛИДАРы. Критические технологии

Критические технологии

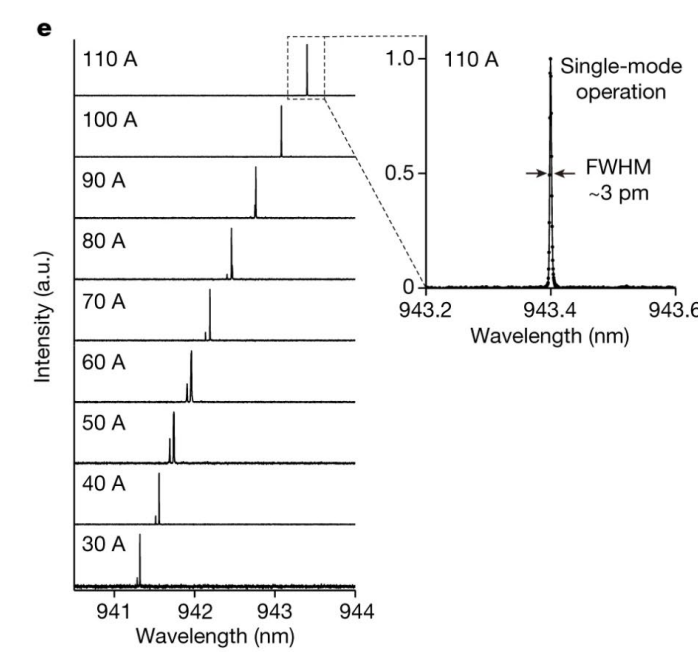
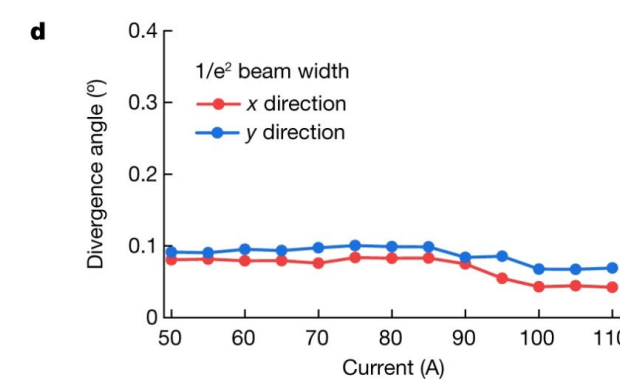
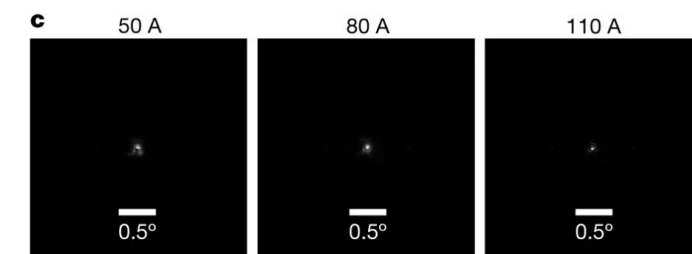
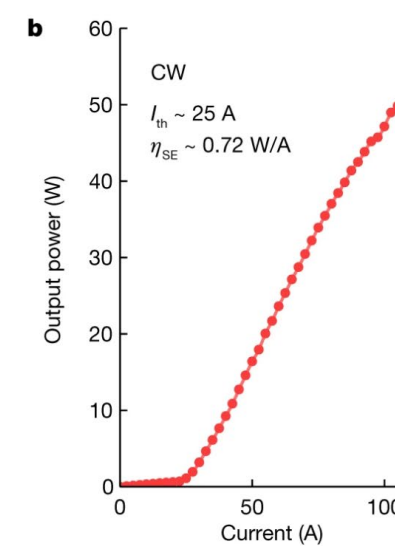
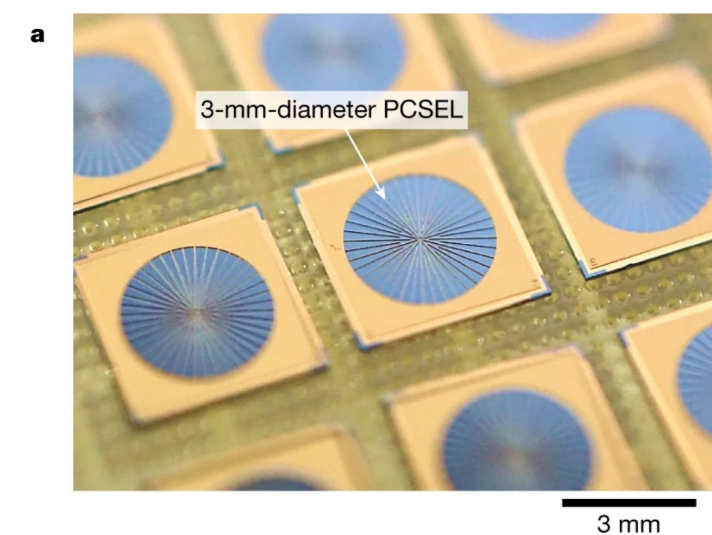
- Технологии создания эпитаксиальноинтегрированных структур
- Технологии формирования элементов спектральной селекции мощного лазерного излучения
- Технологии модовой селекции и оптических схем фокусировки и сбора излучения на основе 2D и 3D фотонных кристаллов в АЗВ5 гетероструктурах
- Технологии компонентной базы электрических схем накачки импульсами тока
- Чувствительный детектор (лавинный ФП (APD), Гейгеровский ФП (SPAPD))
- Электрическая схема обработки и анализа сигналов

Гибридные вертикальные стеки на основе линеек мощных полупроводниковых лазеров

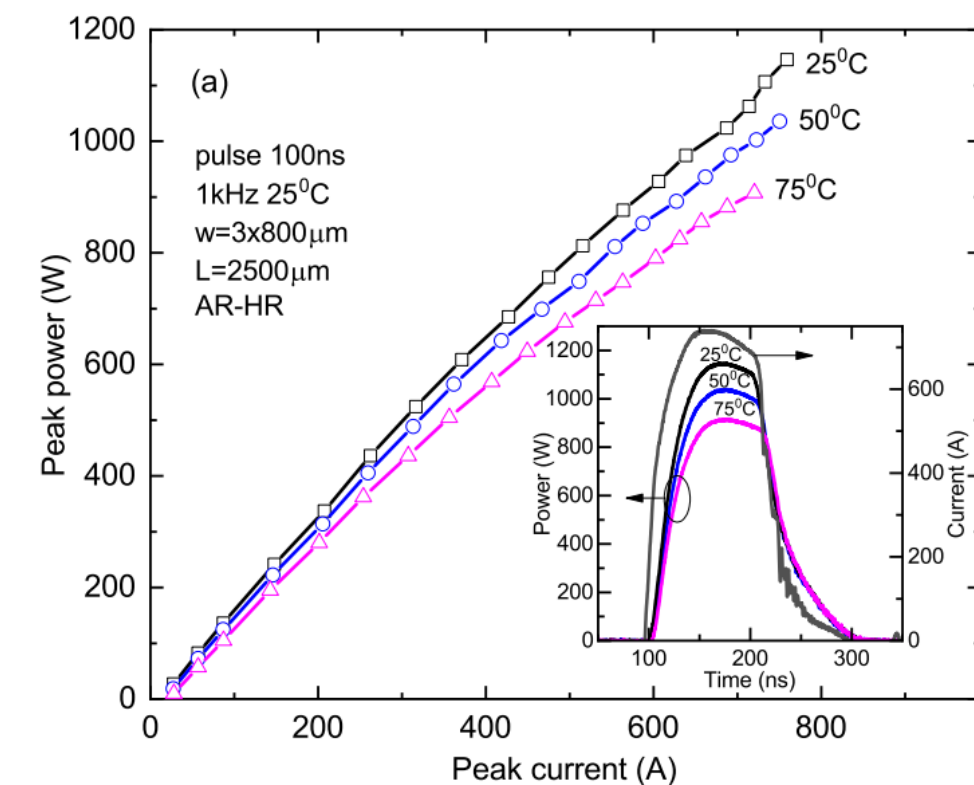
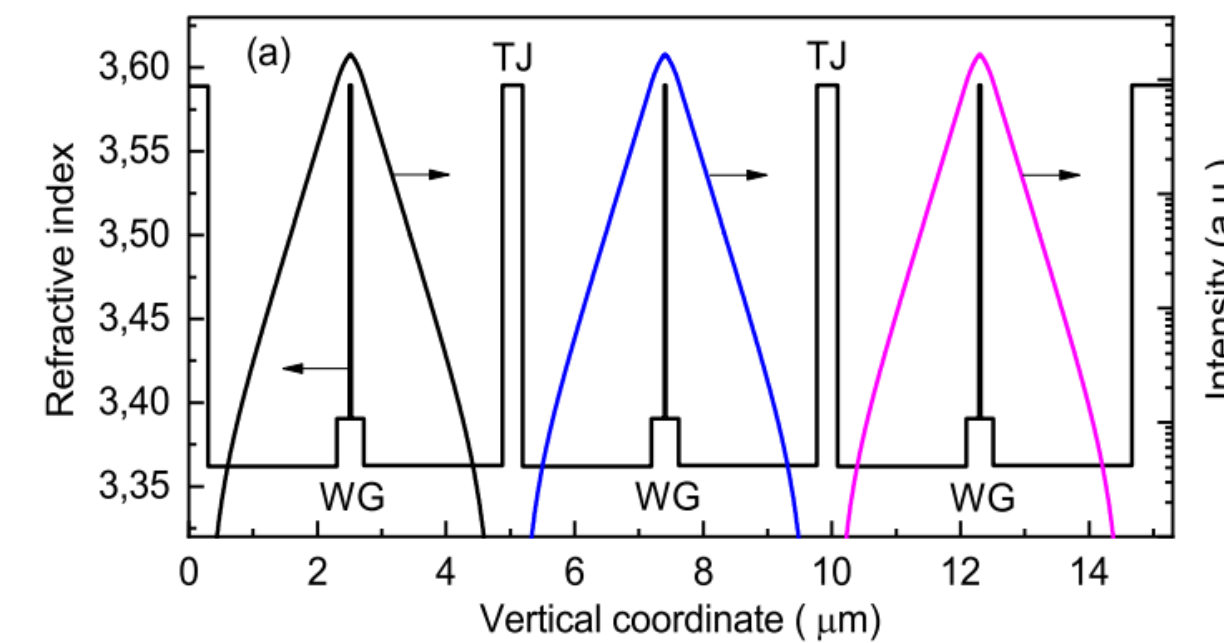
Пиковые мощности >1кВт



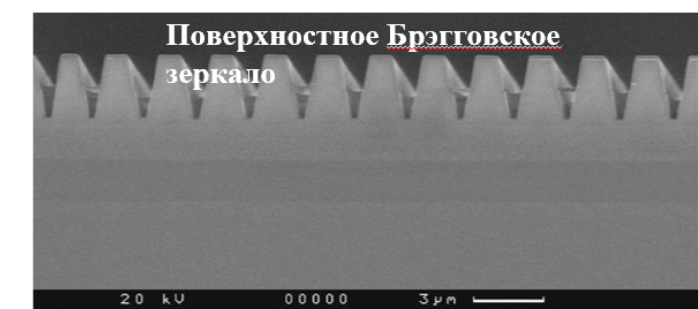
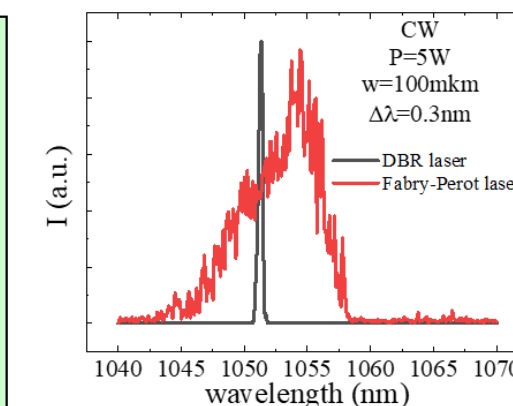
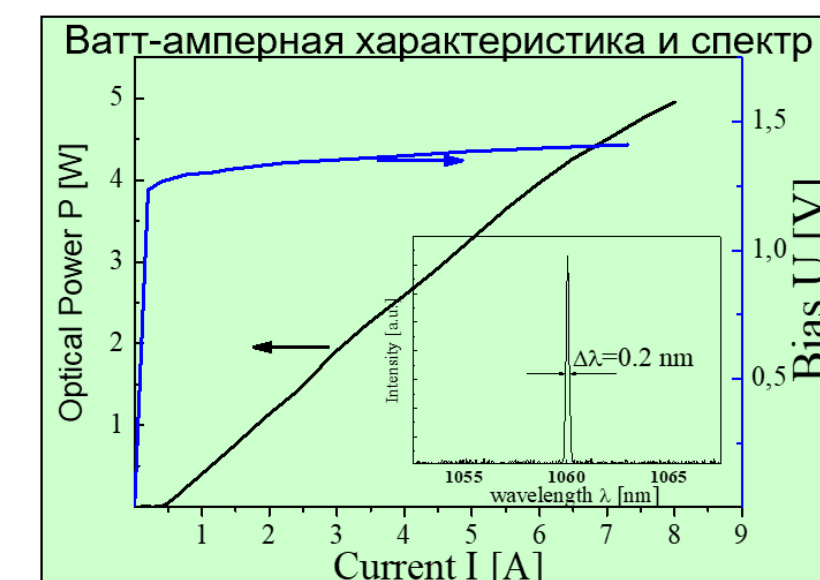
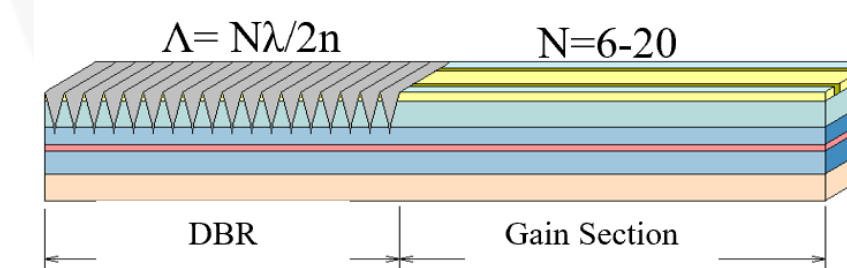
Модовая стабилизация мощного лазерного излучения



Эпитаксиально-интегрированные лазерные гетероструктуры



Спектральная стабилизация мощного лазерного излучения



- Photolithography
- Reactive Ion Etching
- High power $W = 100\mu\text{m}$
- $P = 5\text{ W}$
- $\Delta\lambda \leq 0.3\text{ nm}$
- CW

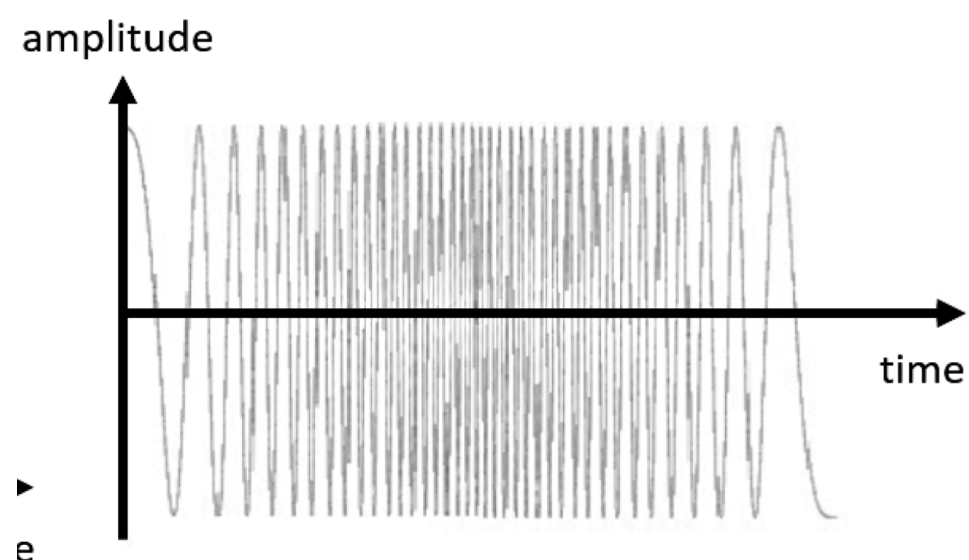
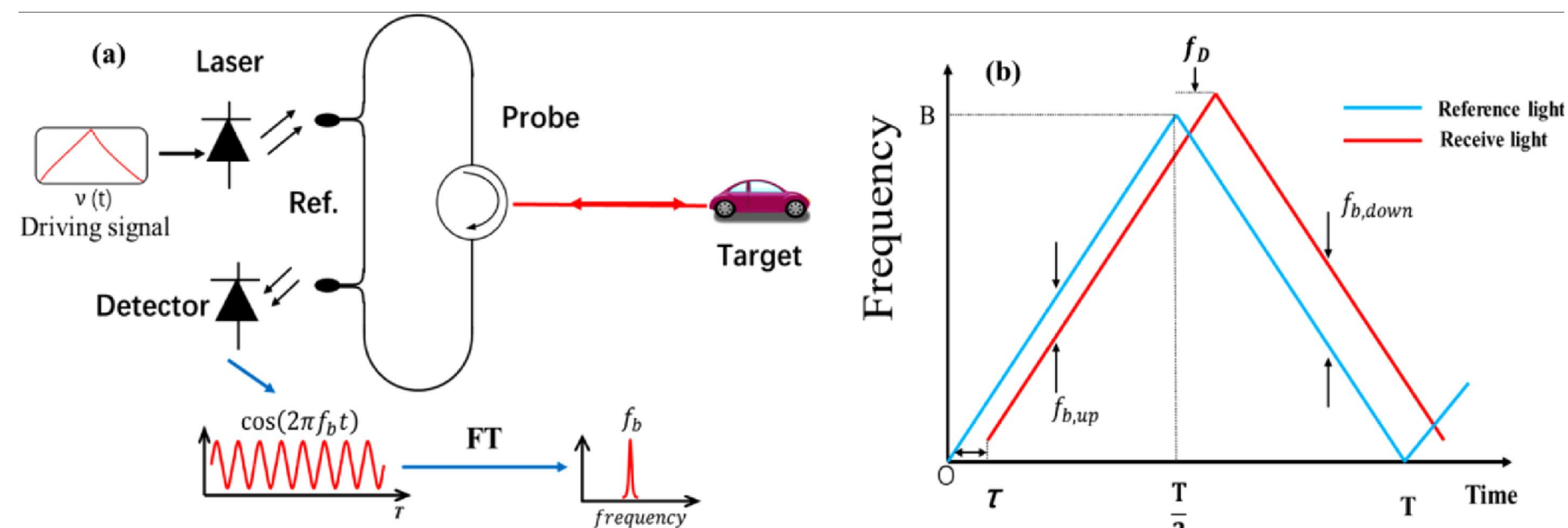
V V Zolotarev et al *Semicond. Sci. Technol.* 35 015009, 2020

Проблемы

- Низкое качество луча
- Спектральная стабилизация

Базовые принципы реализации 3D ЛИДАРОВ. Фазовые схемы.

Частотная модуляция (FMCW)

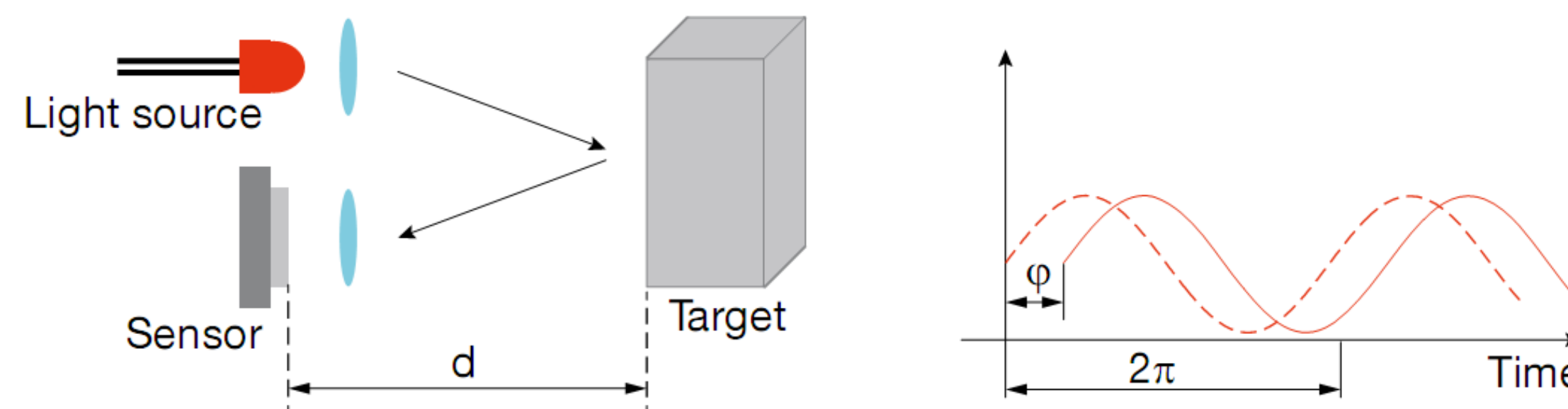


$$R = \frac{cT}{4B} (f^+ + f^-),$$

$$v_r = \frac{\lambda}{2} f_d = \frac{\lambda}{4} (f^+ - f^-),$$

Требуются непрерывные перестраиваемые лазеры с высокой мощностью

Амплитудная модуляция (AMCW)



$$R = \frac{c}{2} \frac{\Delta\Phi}{2\pi f_M'}$$

Низкая скорость формирования 3D картины

Дальность-разрешение

Фазовые 3D ЛИДАРЫ. Критические технологии

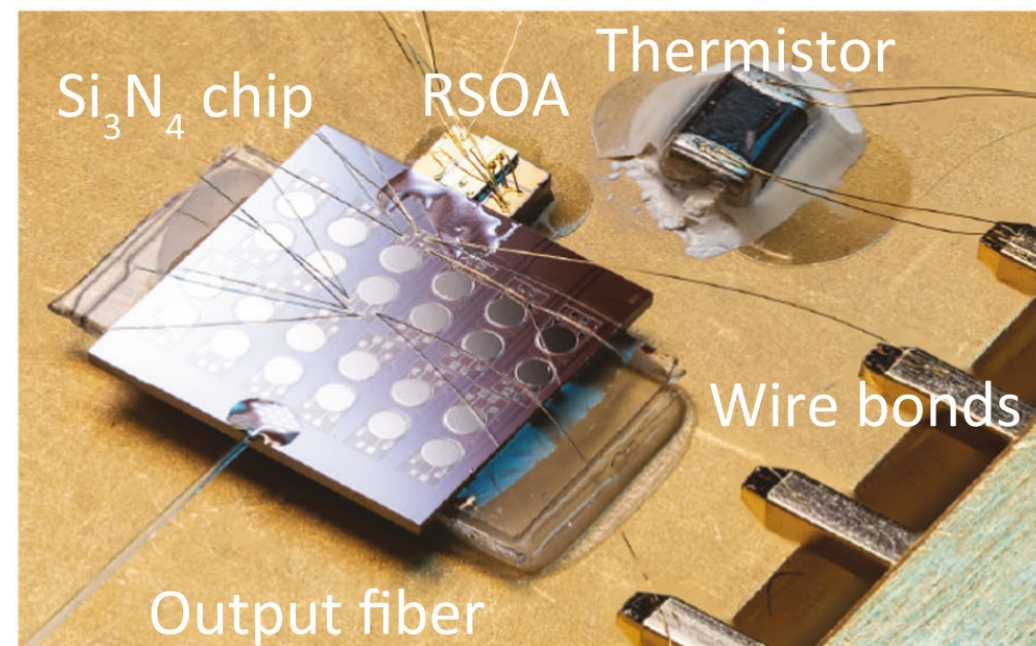
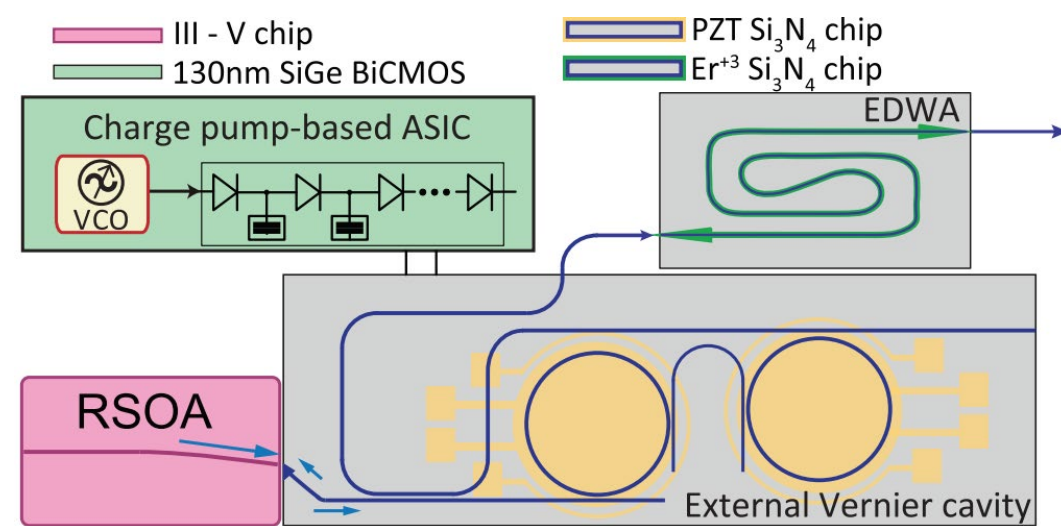
Критические технологии

- Эпитаксиальная технология многостадийного роста гетероструктур
- Технология создания РОС и РБЗ конструкций в АЗВ5 для одночастотных одиночных и многоволновых источников
- Технология создания ФИС для спектральной селекции одночастотных одиночных и многоволновых источников
- Технология создания (модулей) перестраиваемых источников лазерного излучения

Перестраиваемые лазеры на основе ФИС.

Ключевые элементы:

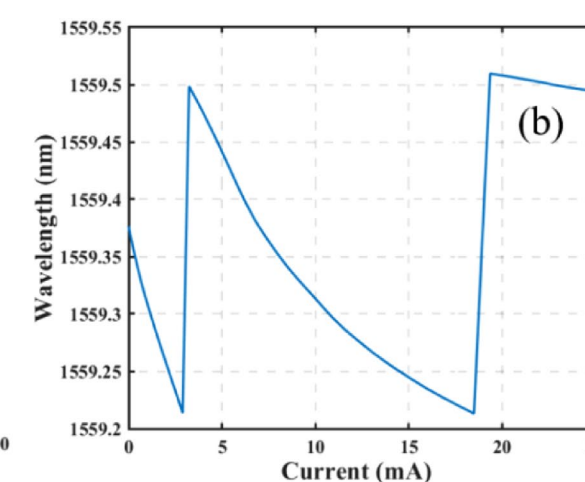
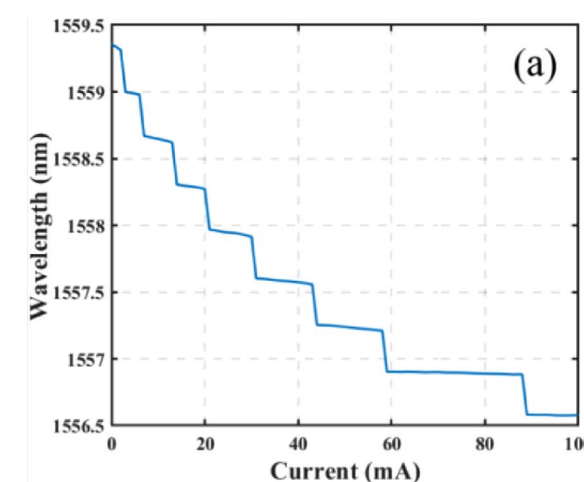
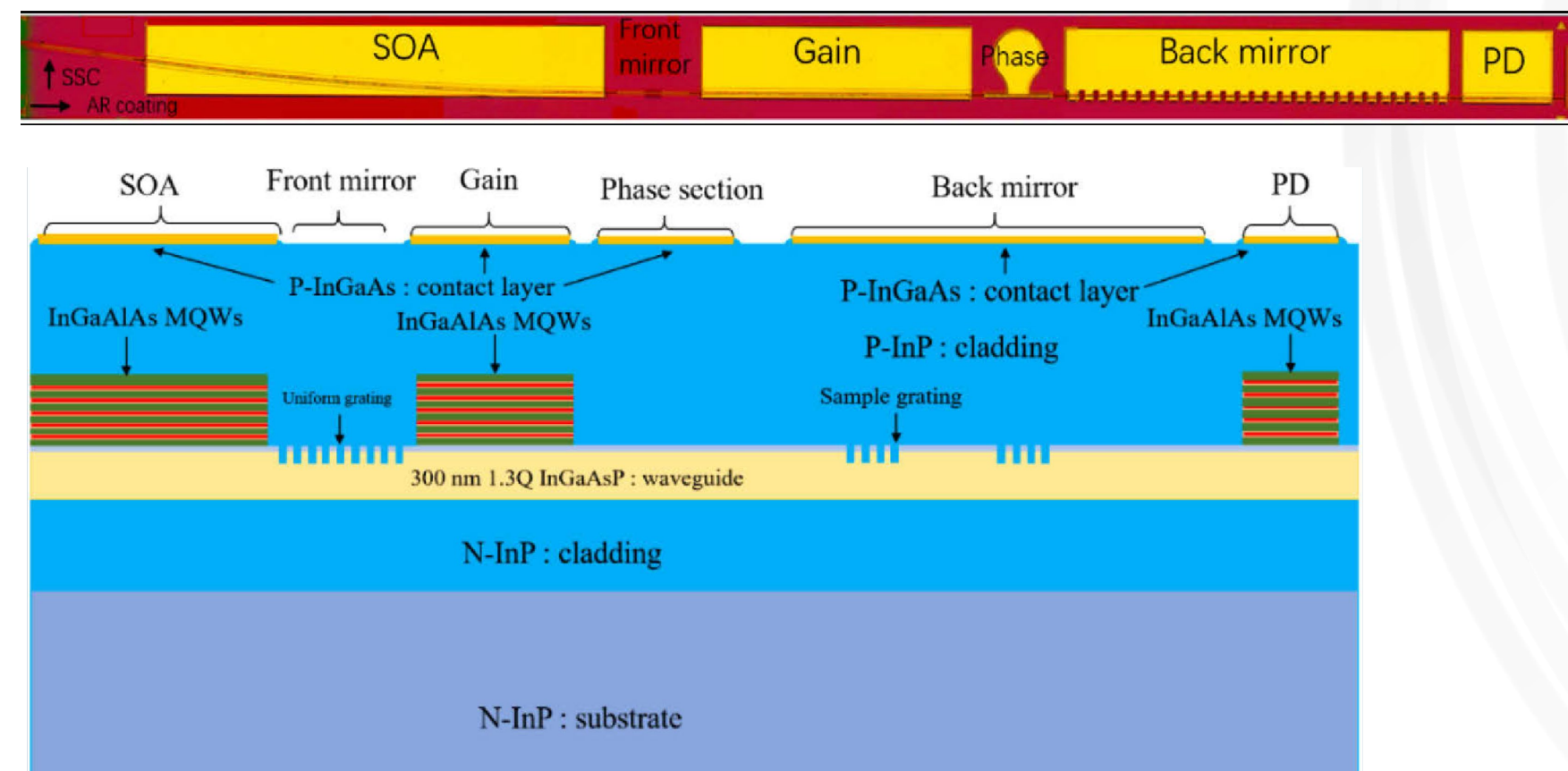
- АЗВ5 усилитель
- Управляемый спектральный фильтр на основе ФИС
- Управляющая электроника



Перестраиваемые лазеры на основе АЗВ5.

Ключевые элементы:

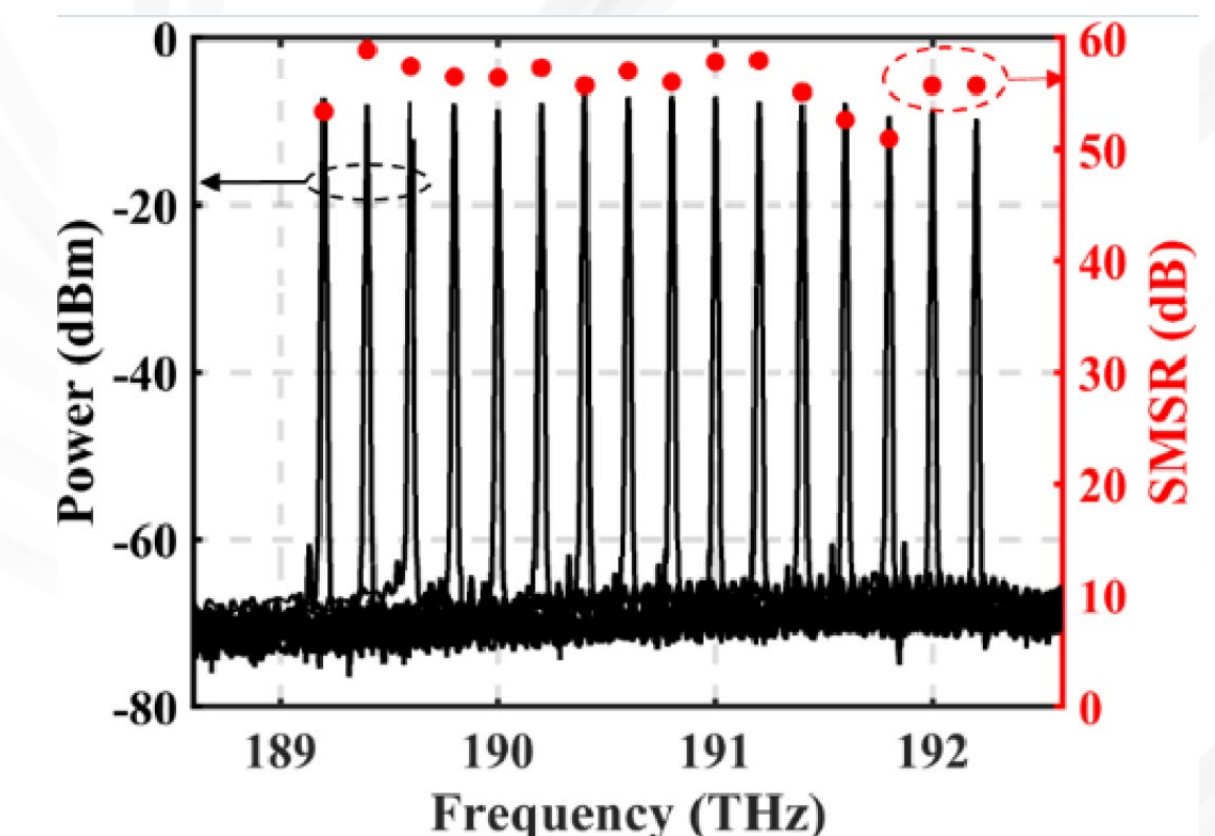
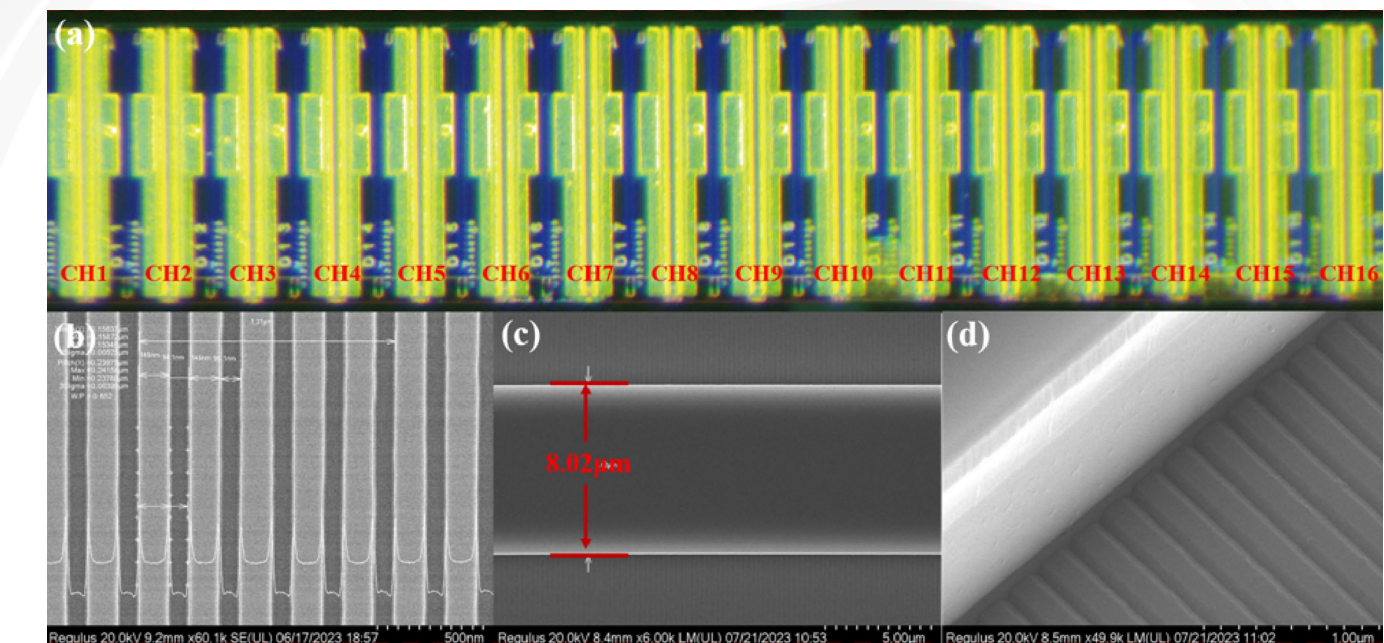
- Многостадийная MOCVD эпитаксия
- РБЗ элементы спектральной селекции
- Многосекционная конструкция
- Управляющая электроника



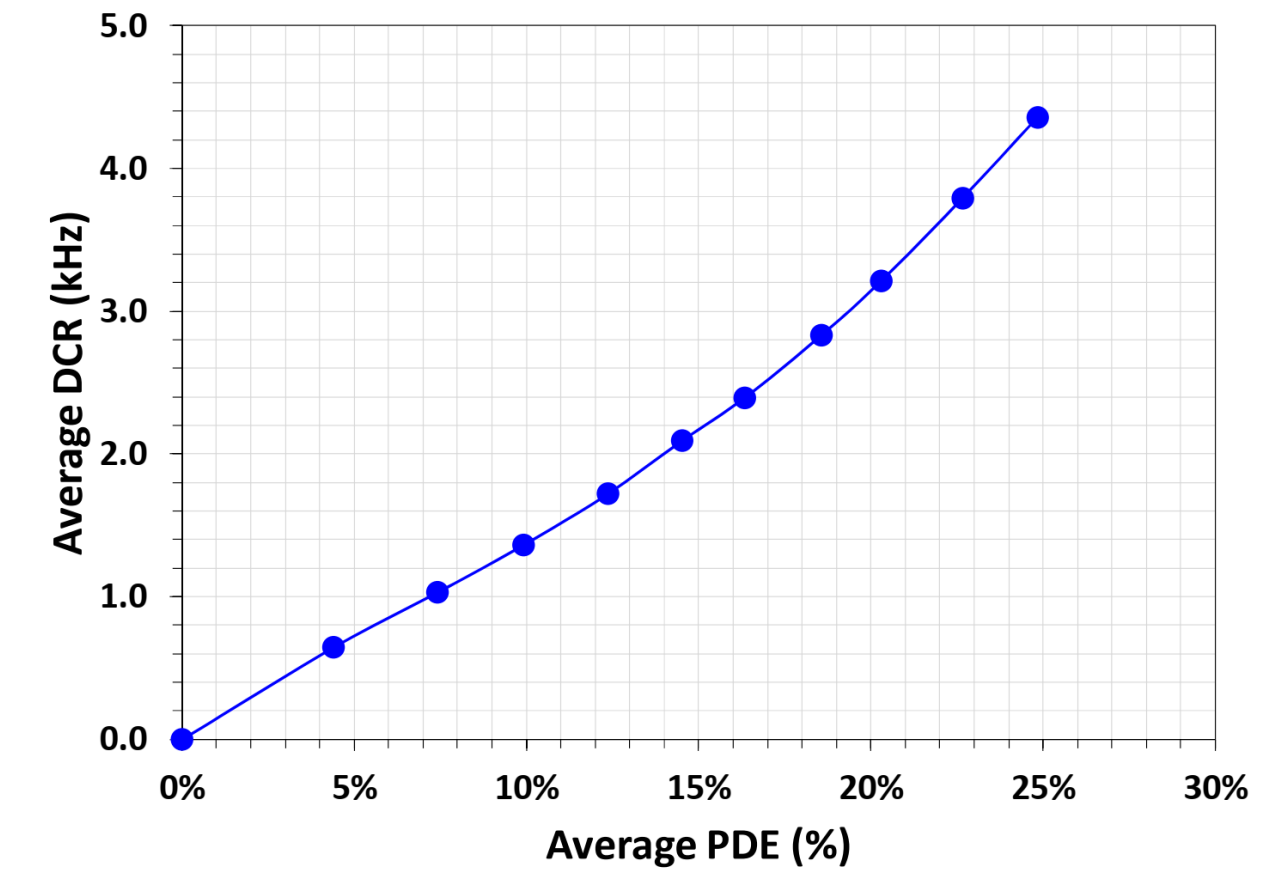
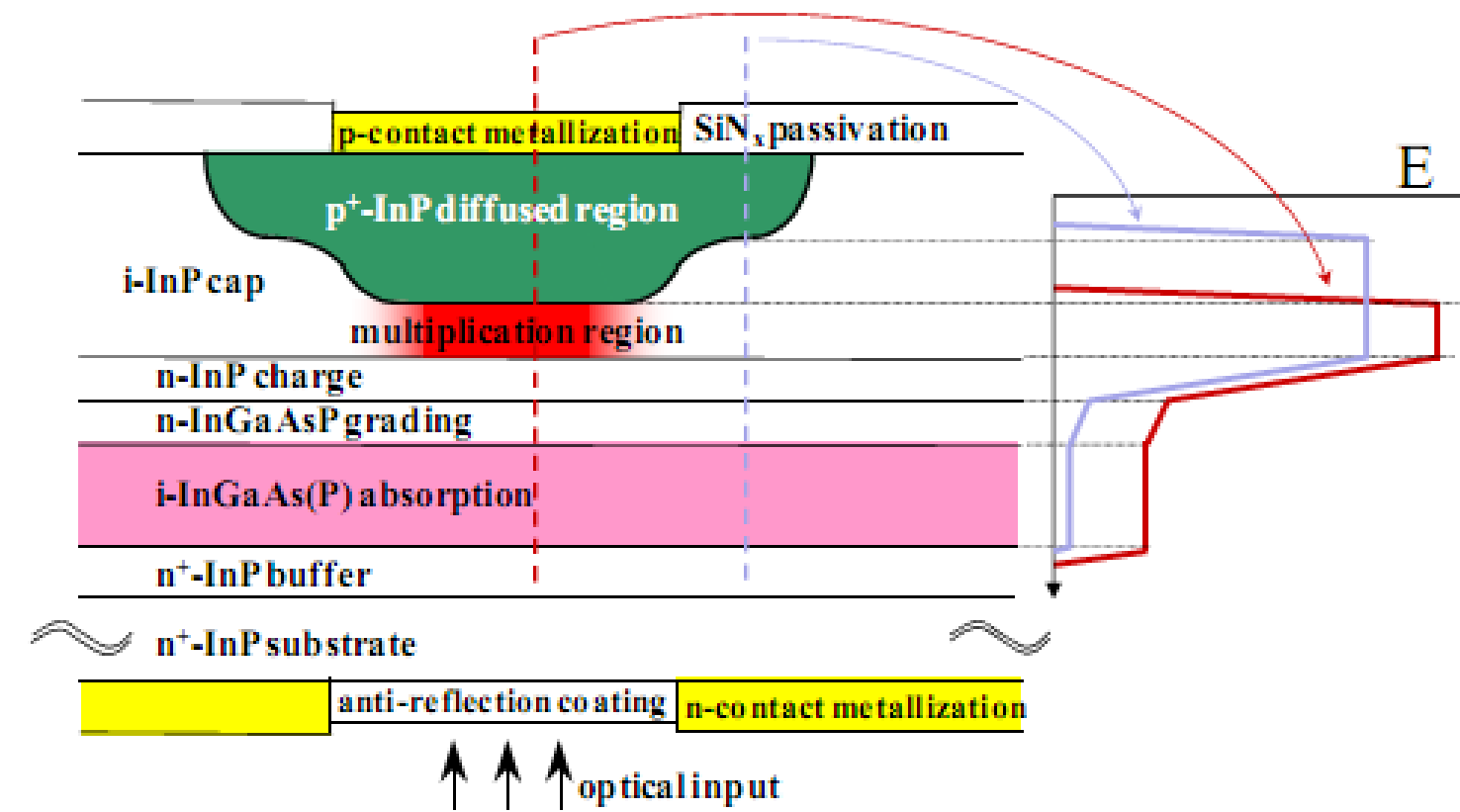
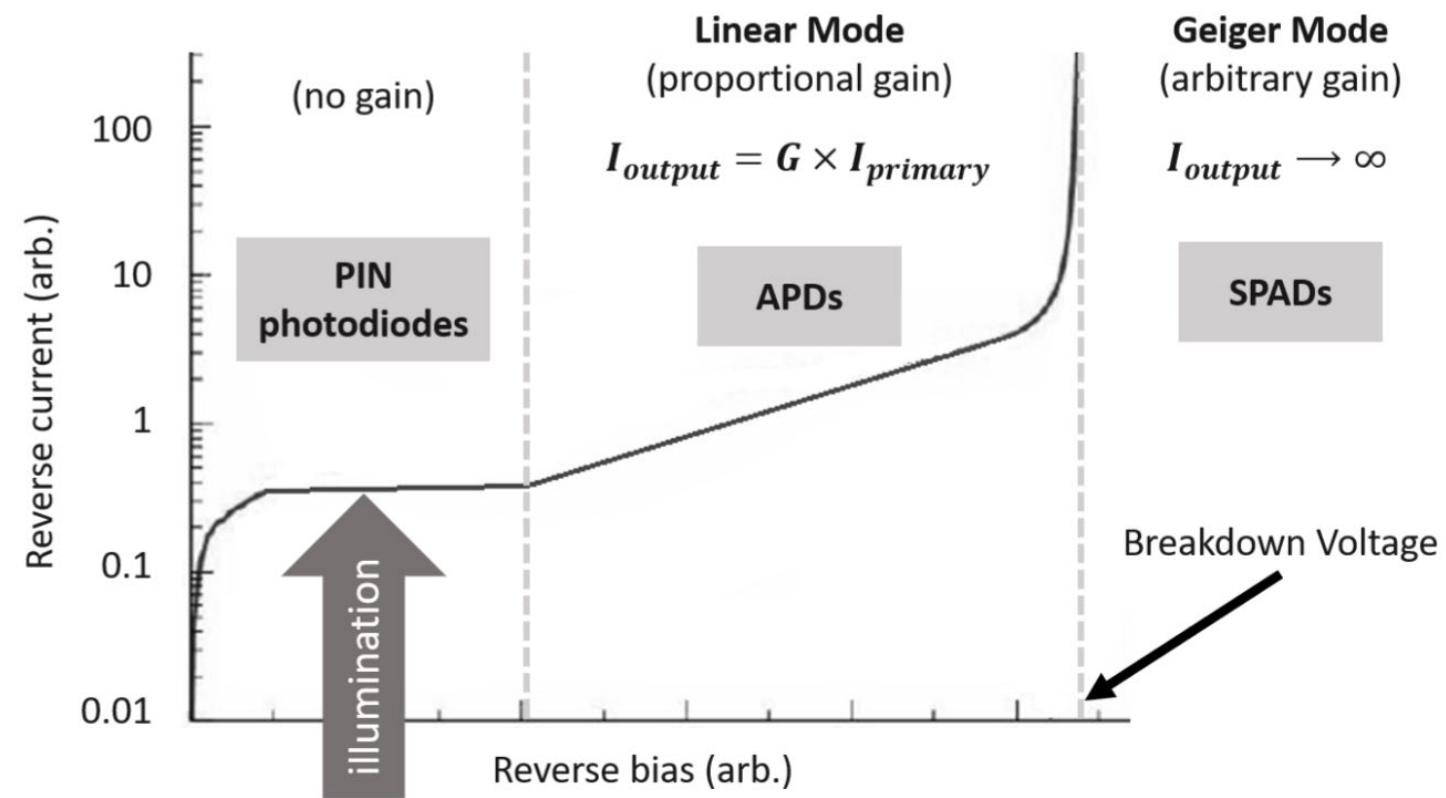
Многоволновая линейка РОС лазеров на основе АЗВ5.

Ключевые элементы:

- Многостадийная MOCVD эпитаксия
- РОС элементы спектральной селекции
- Многосекционная конструкция
- Управляющая электроника



Принцип построения однофотонных Гейгеровских фотоприемников и камер на их основе



Длина волны 1550нм
Длительность импульса 50пс

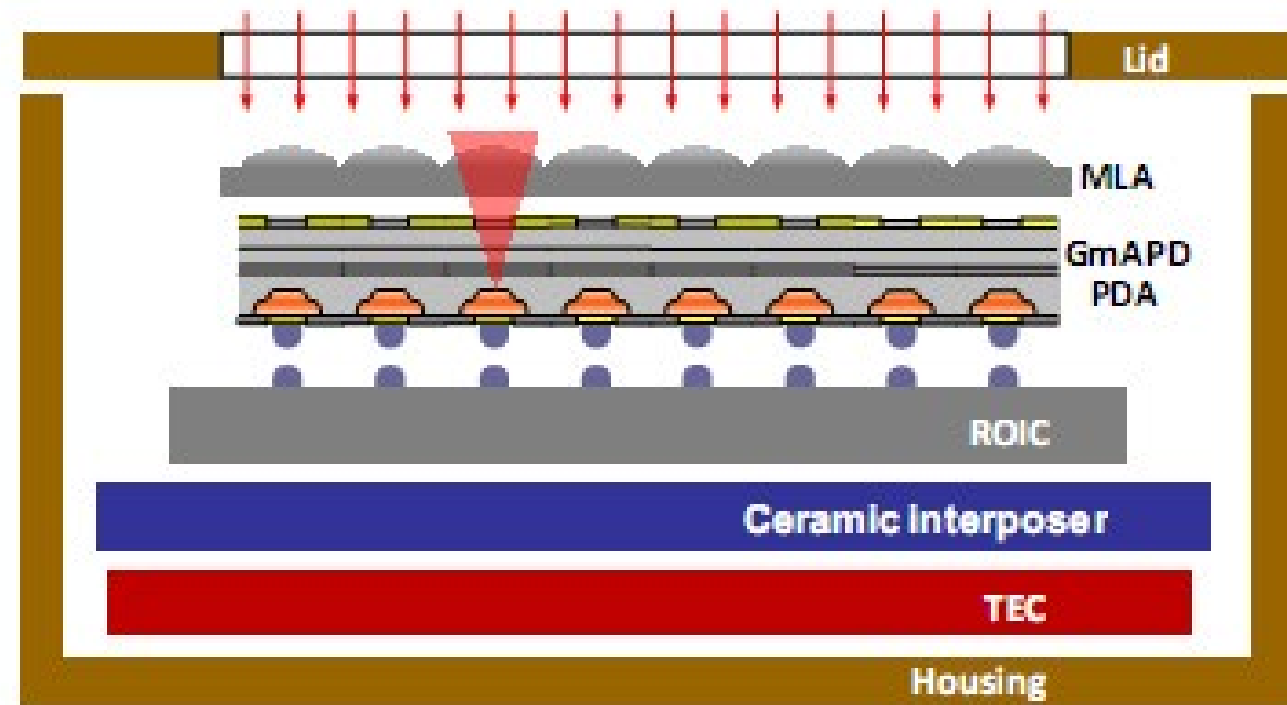
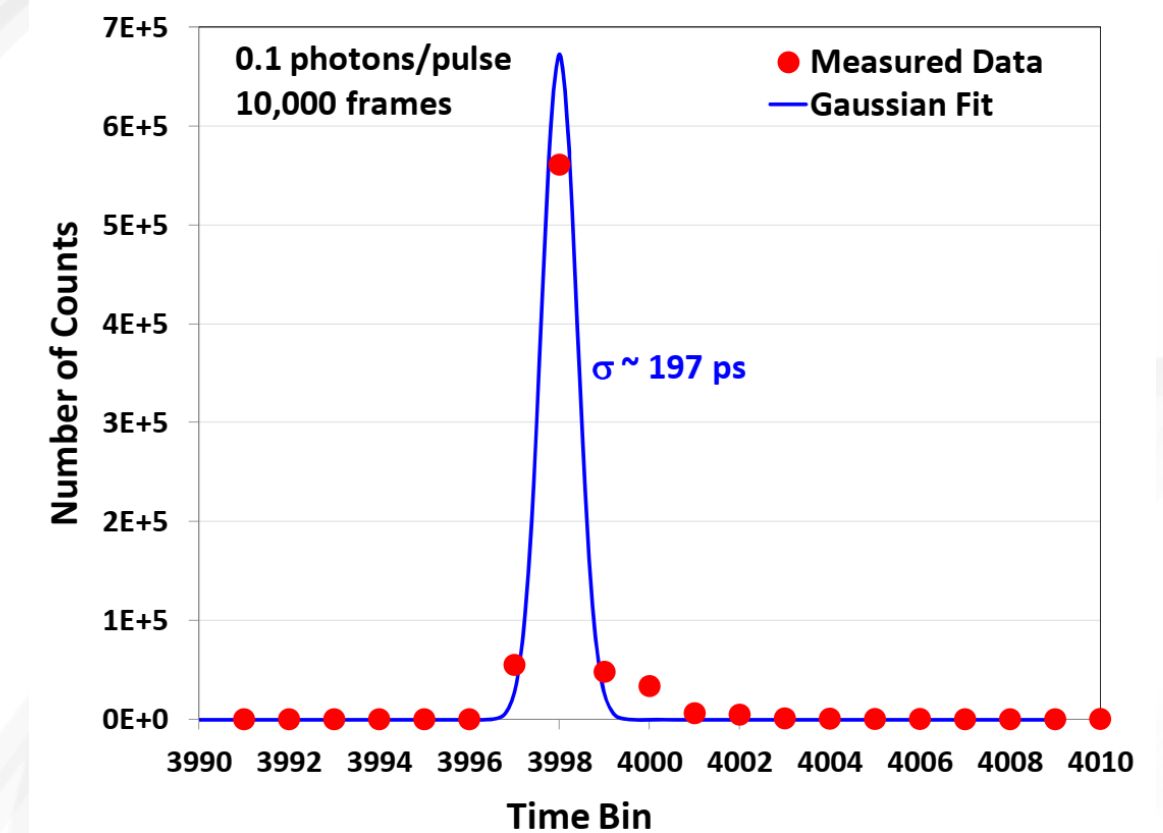
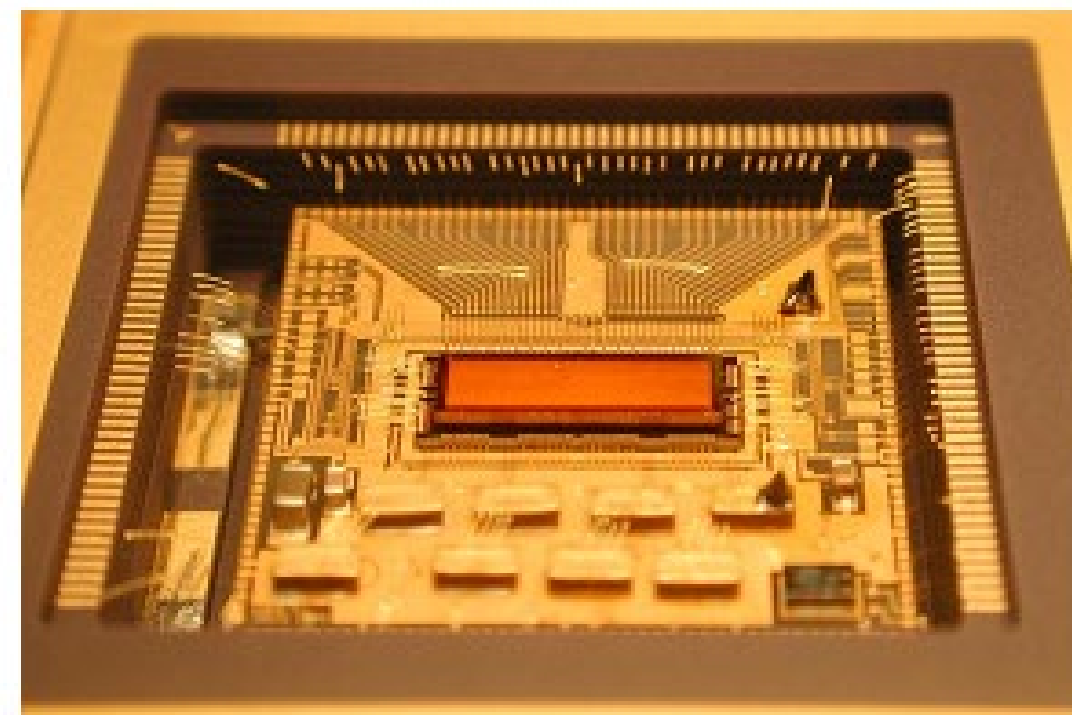


Схема камеры GmSAPD со схемой управления и сбора сигнала



Камера размером 128x32 GmSAPD со схемой управления и сбора сигнала

Критические технологии

Технология создания гетероструктуры однофотонного фотоприемника
Технология создания матрицы-линейки однофотонных фотоприемников
Технология создания камеры со считывающей электроникой

Предложения по развитию отечественных технологий фотоники в части источников лазерного излучения для ЛИДАРов и дальномеров



- **Направления:** разработка импульсных мощных источников лазерного излучения со спектральной стабилизацией, а также перестраиваемых лазерных источников;
- **Актуальность:** бурное развитие автономных транспортных средств в том числе высокоскоростных и миниатюрных
- **Предложения по развитию важнейших технологий на период до 2030 года;**
- Эпитаксиальные (в том числе многостадийная эпитаксия) и постростовые (в том числе интегрированных элементов спектральной и модовой стабилизации на основе фотонных кристаллов) технологии лазерных гетероструктур для мощных импульсных источников со спектральной и модовой стабилизацией, а также перестраиваемых лазерных источников
- **Предложения по развитию технологий на долгосрочную перспективу на период до 2045 года;**
- Эпитаксиальные и постростовые технологии лазерных источников на основе фотонных интегральных схем с управляемыми излучательными характеристиками (спектр генерации, диаграмма направленности) в том числе гетерогенно и монолитно интегрированных источников лазерного излучения с ФИС
- **Наличие/отсутствие компетенций/задела в указанных направлениях**
- Имеются базовые эпитаксиальные технологии мощных импульсных полупроводниковых лазеров. Отсутствуют надежные и доступные решения создания спектрально стабилизированных источников
- **Сведения об уровне развития зарубежных технологий по тематике**
- Разработаны технологии создания мощных импульсных источников со спектральной стабилизацией, а также перестраиваемых лазерных источников
- **Оценка достигаемого результата от внедрения предлагаемых технологий.**
- Могут быть разработаны аналоги или приборы с улучшенными характеристиками
- **Перечень потенциальных организаций-исполнителей**
- АО НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ООО «Коннектор оптикс»

Предложения по развитию отечественных технологий фотоники в части приемников лазерного излучения для ЛИДАРов и дальномеров



- **Направления:** разработка высоко чувствительных и высокоскоростных приемников лазерного излучения для ЛИДАРов и дальномеров;
- **Актуальность:** бурное развитие автономных транспортных средств в том числе высокоскоростных и миниатюрных
- **Предложения по развитию важнейших технологий на период до 2030 года;**
- Эпитаксиальные и постростовые технологии гетероструктур для дискретных однофотонных, а также лавинных фотодетекторов
- **На долгосрочную перспективу на период до 2045 года;**
- Эпитаксиальные и постростовые технологии гетероструктур для матриц однофотонных, а также лавинных фотодетекторов в том числе монолитно интегрированные с ФИС
- **Наличие/отсутствие компетенций/задела в указанных направлениях**
- Имеются базовые эпитаксиальные технологии гетероструктур фотодетекторов. Отсутствуют надежные решения для однофотонных и лавинных фотодетекторов на основе полупроводниковых гетероструктур
- **Сведения об уровне развития зарубежных технологий по тематике**
- Разработаны технологии создания как одиночных так и матричных фотодетекторов
- **Оценка достигаемого результата от внедрения предлагаемых технологий.**
- Могут быть разработаны аналоги
- **Перечень потенциальных организаций-исполнителей**
- АО НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ООО «Коннектор оптикс»

Предложения в дорожную карту развития фотоники и оптоэлектроники на ближайшую и долгосрочную перспективу



- **Наименование технологического направления развития в части источников лазерного излучения для ЛИДАРов и дальномеров;**
- Комплекс эпитаксиальных и постростовых технологий лазерных гетероструктур для мощных импульсных источников со спектральной и модовой стабилизацией, а также перестраиваемых лазерных источников
- **Наименование технологического направления развития в части приемников лазерного излучения для ЛИДАРов и дальномеров**
- Комплекс эпитаксиальных и постростовых технологий лазерных гетероструктур для однофотонных, а также лавинных фотодетекторов
- **Экспертная оценка перспектив создания технологии**
- Могут быть разработаны аналоги или приборы с улучшенными характеристиками
- **Область применения технологии / конечные продукты**
- Автономных транспортных средств в том числе высокоскоростных и миниатюрных
- **Необходимость освоения технологии в Российской Федерации**
- Является критической для создания ЛИДАРов и дальномеров в системах специального назначения



Спасибо за внимание!



24, 25 Июня 2025 г.