

 **Швабе**

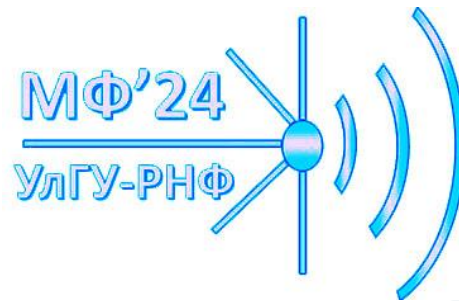


Акционерное общество
«Научно-исследовательский
институт «Полюс»
им. М.Ф. Стельмаха»

МИКРОВОЛНОВАЯ ФОТОНИКА

школа молодых ученых

Москва, Сколково,
6-7 ноября 2024



Полупроводниковые лазеры и фотоприемники спектрального диапазона 1300-2000 нм

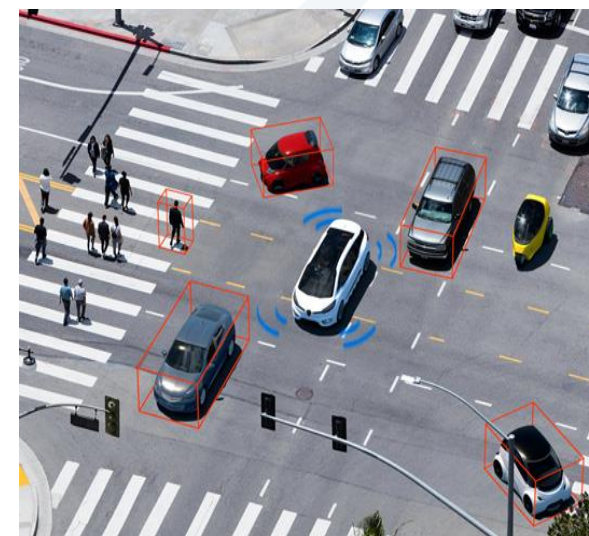
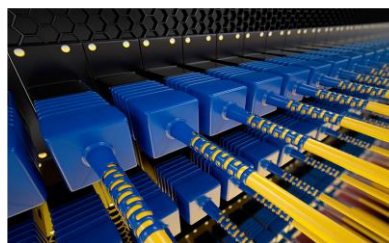
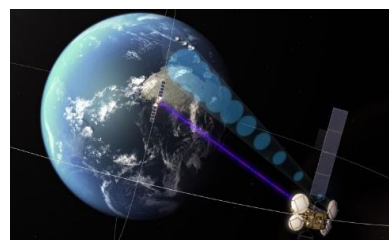
Ладугин

Максим Анатольевич

Начальник научно-производственного комплекса
«Квантовая электроника и радиофотоника», д.ф.м.н.

АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»

Оптическая накачка и прямое применение в обработке материалов в различных отраслях промышленности, телекоммуникации и фотонный интегральные схемы, системы управления движением транспортных средств, наука и медицина, безопасность и мониторинг, радиофотоника.

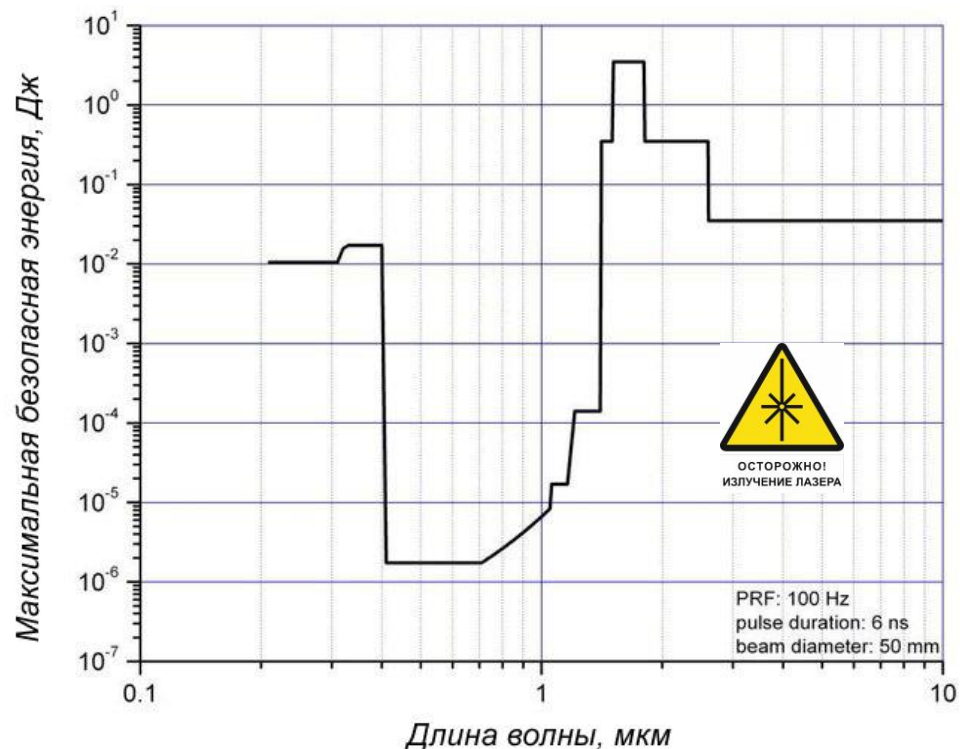


1. Источники накачки: диодная накачка активных сред твердотельных и волоконных лазеров
2. Технологическая обработка материалов: плавка, сварка, пайка, резка, маркировка и др.
3. Медицина: ЭЛТ, дерматология, флебология, хирургия, стоматология, ветеринария и др.
4. Телекоммуникации: передача и обработка информации по высокоскоростным ВОЛС

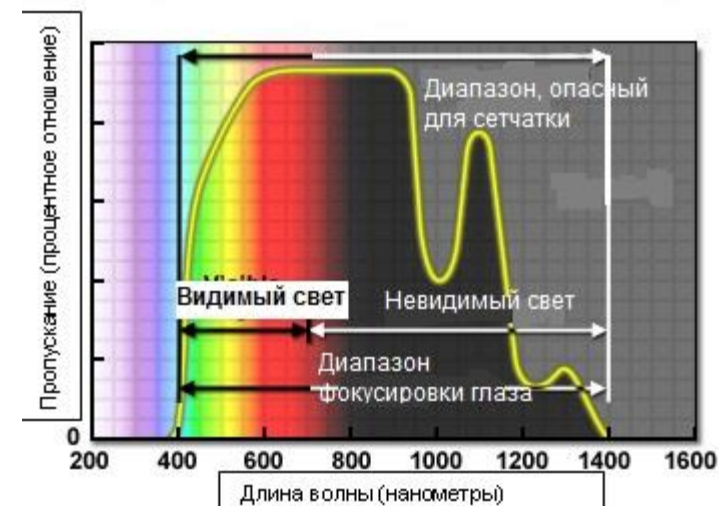
• 750-870 нм

• 880-1100 нм

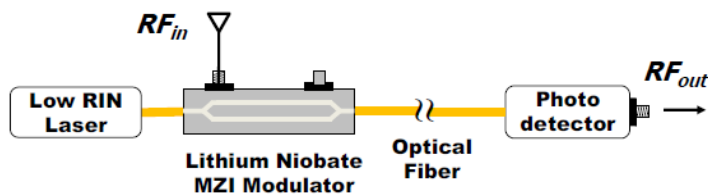
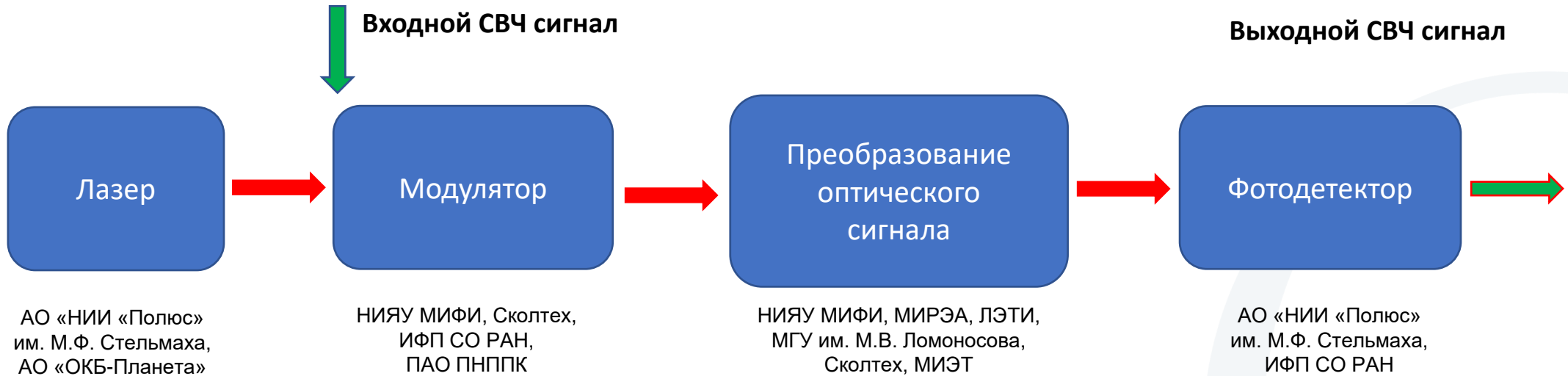
• 1300-2000 нм



Распределение максимальной энергии, являющейся безопасной для глаз человека, в зависимости от длины волны излучения



Структура радиофотонного тракта



Многоцелевые реконфигурируемые радиосистемы

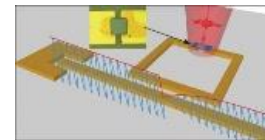


Высокоскоростная оптическая связь



Квантовые компьютеры
Квантовая криптография

Радиофотоника (микроволновая фотоника) является наиболее перспективной областью развития телекоммуникаций, связи, локации и обработки сигналов, в том числе, с чрезвычайно высокой плотностью информации и с широкой полосой сигналов

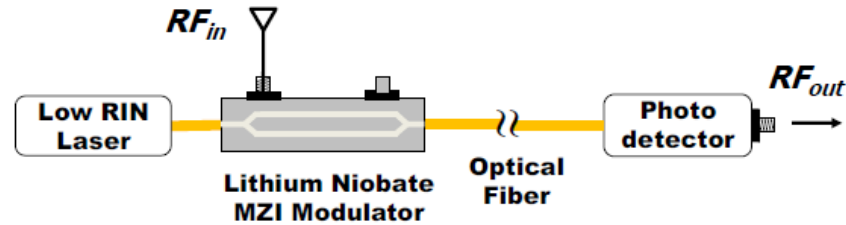


Сенсоры
Измерительное оборудование

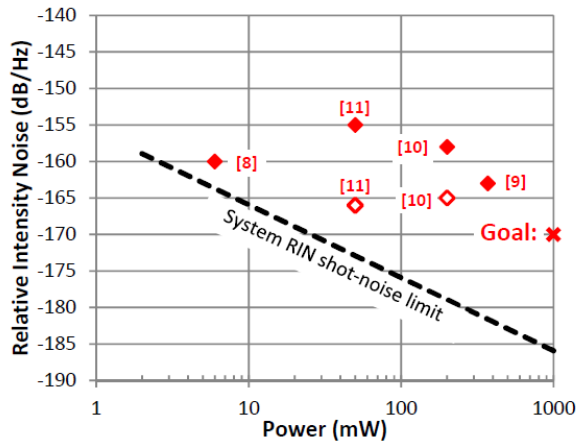


Беспилотные транспорт
Интернет вещей

Компоненты радиопотонного тракта

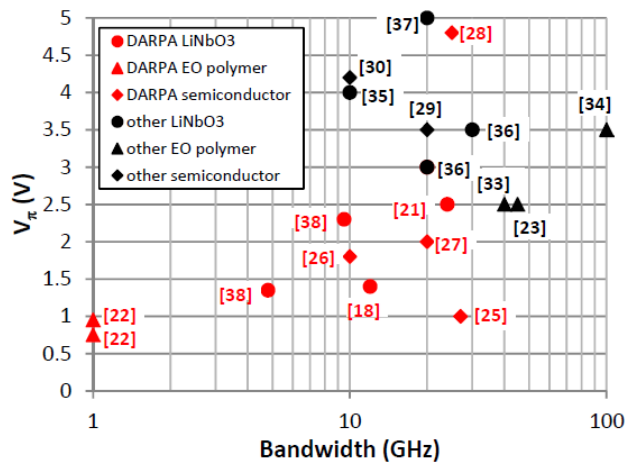


Лазер



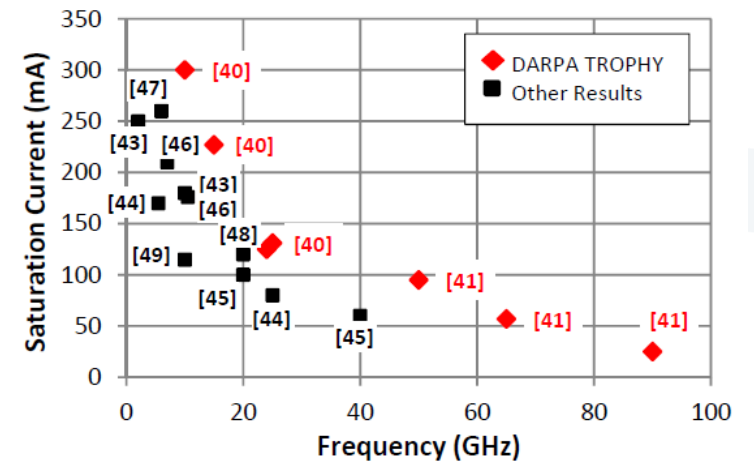
Зависимость измеренной относительной интенсивности шума (RIN) лазера в зависимости от выходной оптической мощности

Модулятор



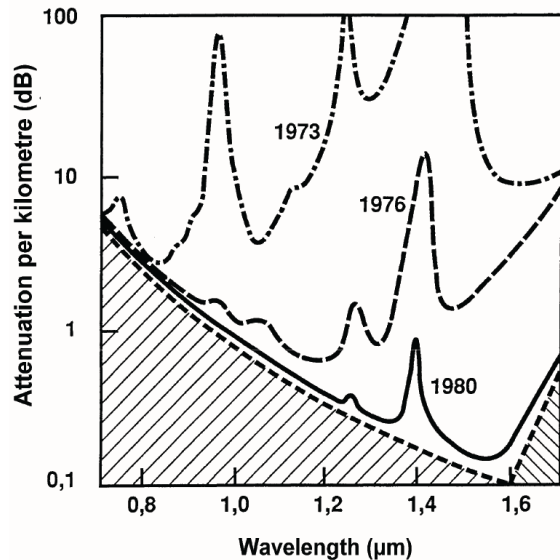
Зависимость V_r от полосы пропускания 3 дБ для ряда модуляторов Маха-Цендера

Фотодетектор



Зависимость тока насыщения от частоты для высокоомощных скоростных фотодиодов

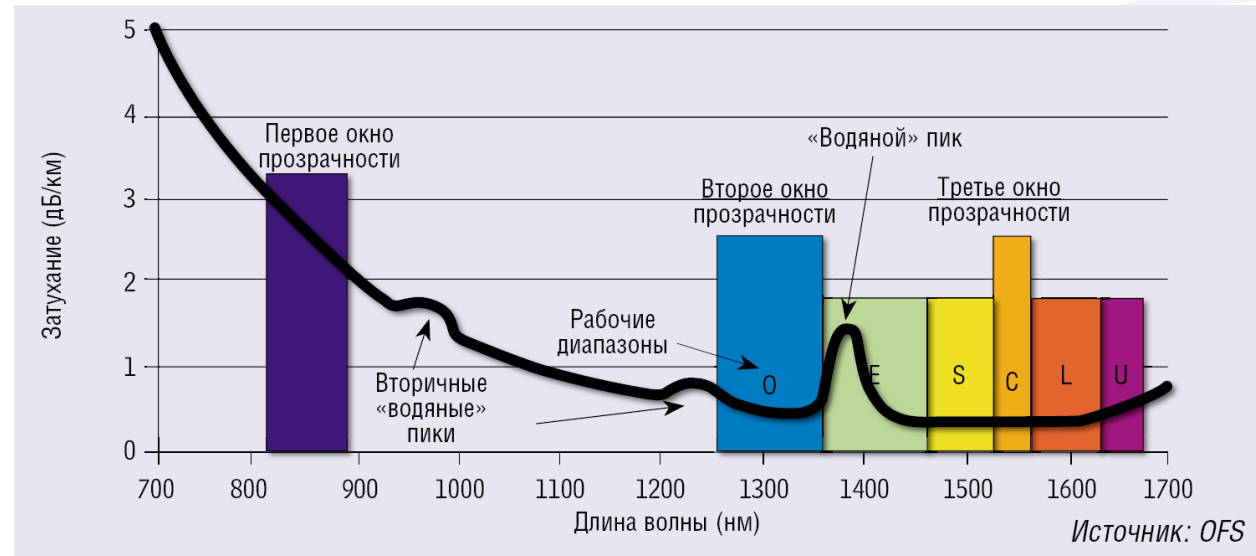
Потери в оптическом волокне



Corning® SMF-28™ Optical Fiber Product Information

Attenuation

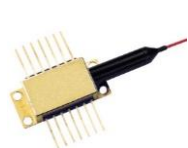
Wavelength (nm)	Attenuation* (dB/km)	
	Premium	Standard
1310	≤0.34	≤0.35
1550	≤0.20	≤0.22



«Телекоммуникационный диапазон»

- 850 нм (локальная связь, последняя миля)
- 1300-1600 нм (дальняя связь)

Первый этап – дискретная радиофотоника



Источники
оптического
излучения



Широкополосные
СВЧ электро-
оптические
преобразователи



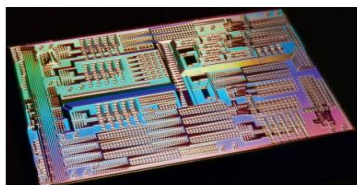
Передача по оптоволокну



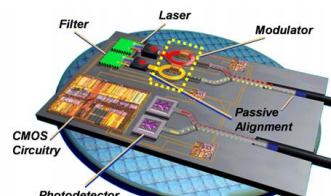
Фотодиод



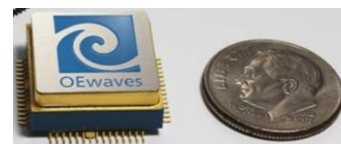
Второй этап – интегральная радиофотоника



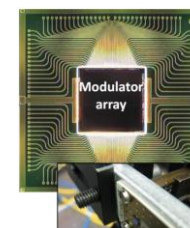
Радиофотонный АЦП/ЦАП



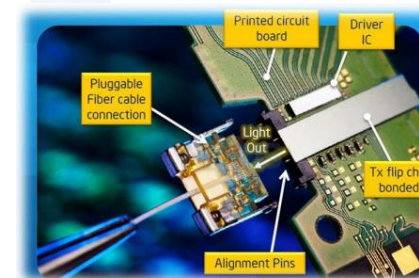
Радиофотонный ППМ



Радиофотонный
СВЧ генератор
(перестраиваемый)

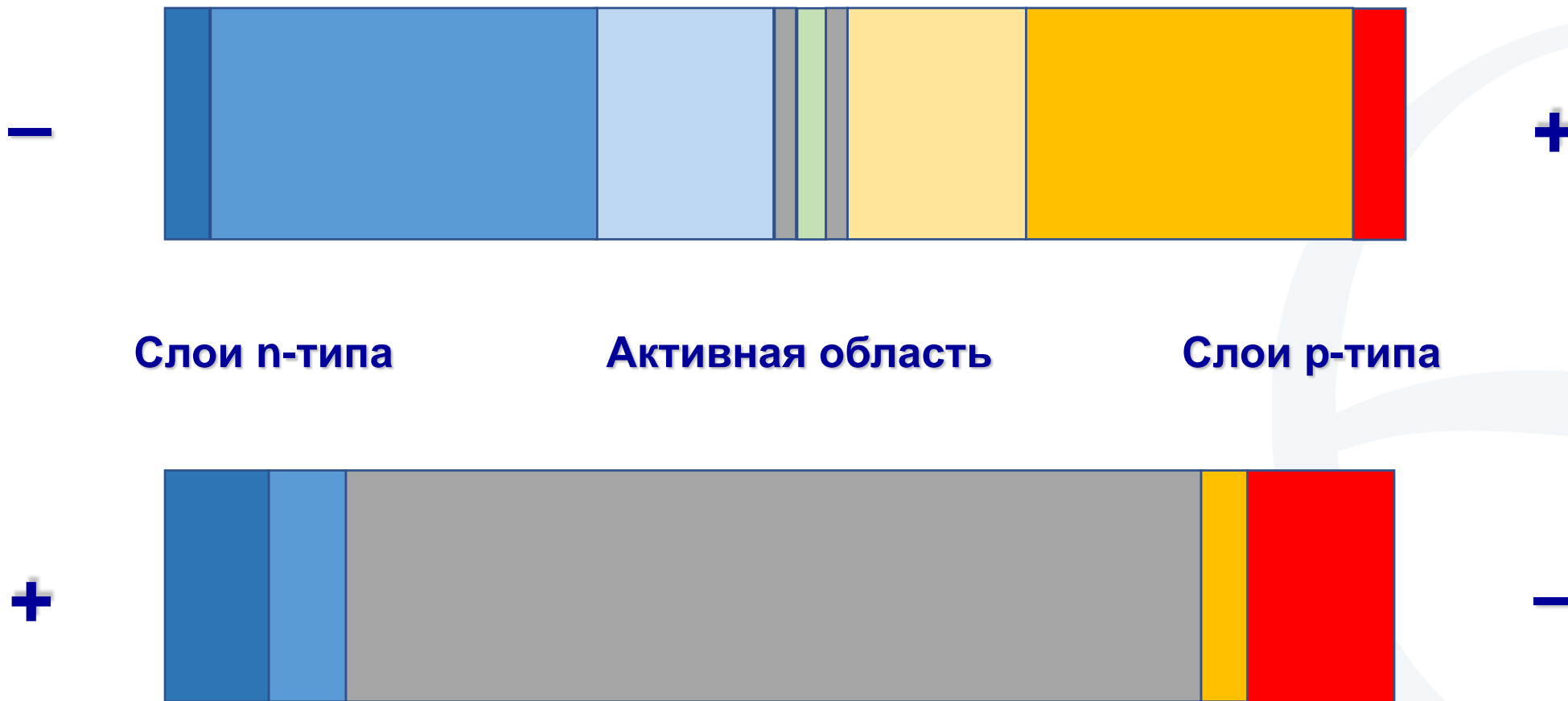


Радиофотонные
интегральные схемы



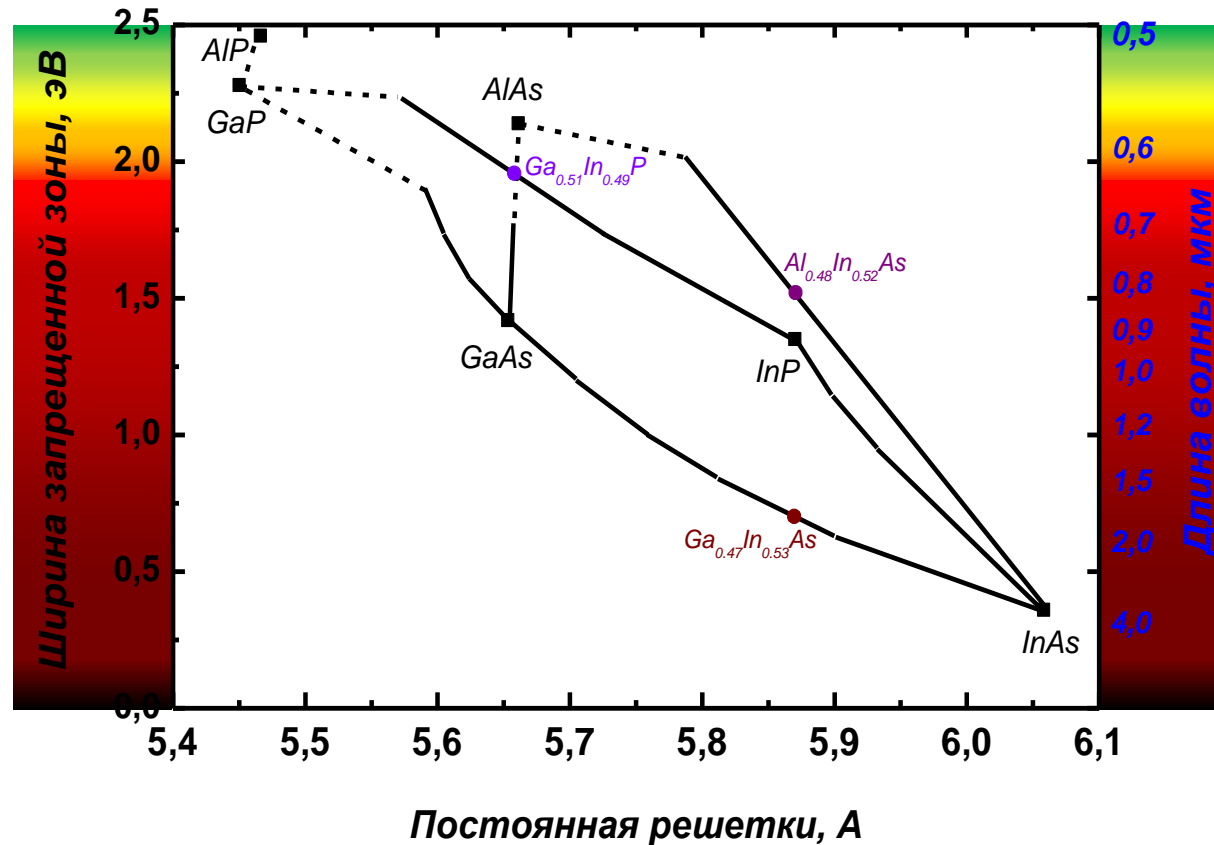
**Интеграция с
микроэлектроникой**

Выбор конструкции гетероструктуры



Материалы для ближнего ИК-диапазона

- 750-870 нм
AlGaAs/AlGaAs/GaAs,
InGaAsP/GaInP/GaAs
- 890-910 нм
GaAs/AlGaAs/GaAs,
InGaAs/AlGaAs/GaAs
- 920-990 нм
InGaAs/GaAs,
InGaAs/AlGaAs/GaAs
- 1000-1100 нм
InGaAs/AlGaAs/GaAs,
InGaAs/GaAsP/GaAs
- 1300-2000 нм
GaInAs/AlInAs/InP,
GaInAs/InGaAsP/InP



выбор
требуемого
спектрального
диапазона



GaAs / AlGaAs / GaAs

- (+) Удобство выбора технологических режимов – варьирование состава только элементом III группы
- (-) Высокое сродство Al к кислороду
- (-) Высокая скорость деградации (ДТЛ)
- (+/-) Согласованная гетеропара AlAs-GaAs по постоянной решетки

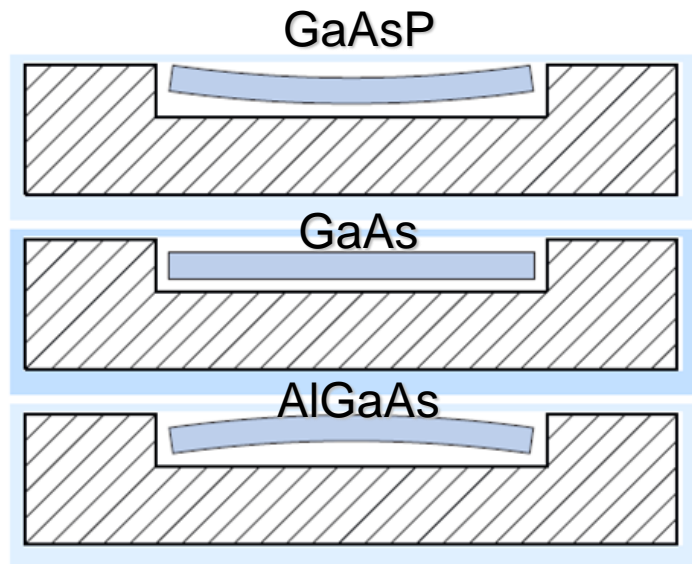
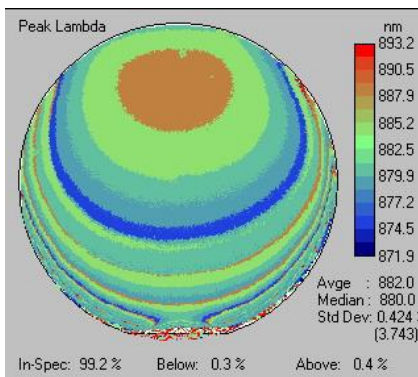
и

GaAsP / InGaP / GaAs

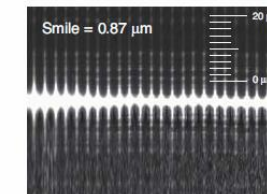
- (-) Упорядочение твердых растворов (Al)GaInP
- (-) Обменное взаимодействие As/P
- (-) Высокая сегрегация In из волновода в КЯ
- (-) Наличие областей несмешиваемости InGaAsP
- (-/+) Необходимость учета упругих напряжений в активной области и согласования состава эпитаксиальных слоев с подложкой GaAs

$$a_{\text{GaAs}} = 5,653 \text{ \AA}$$

$$a_{\text{AlAs}} = 5,661 \text{ \AA}$$



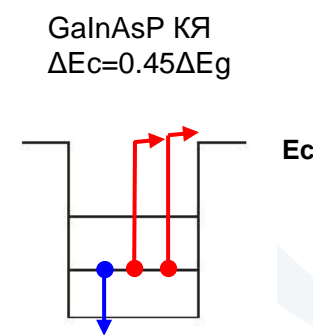
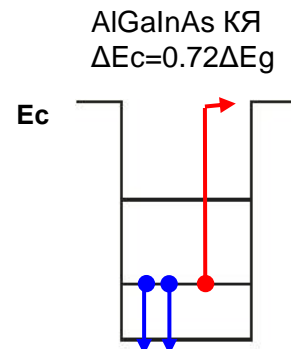
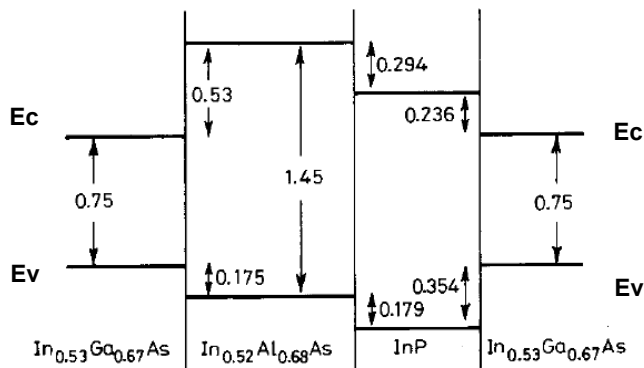
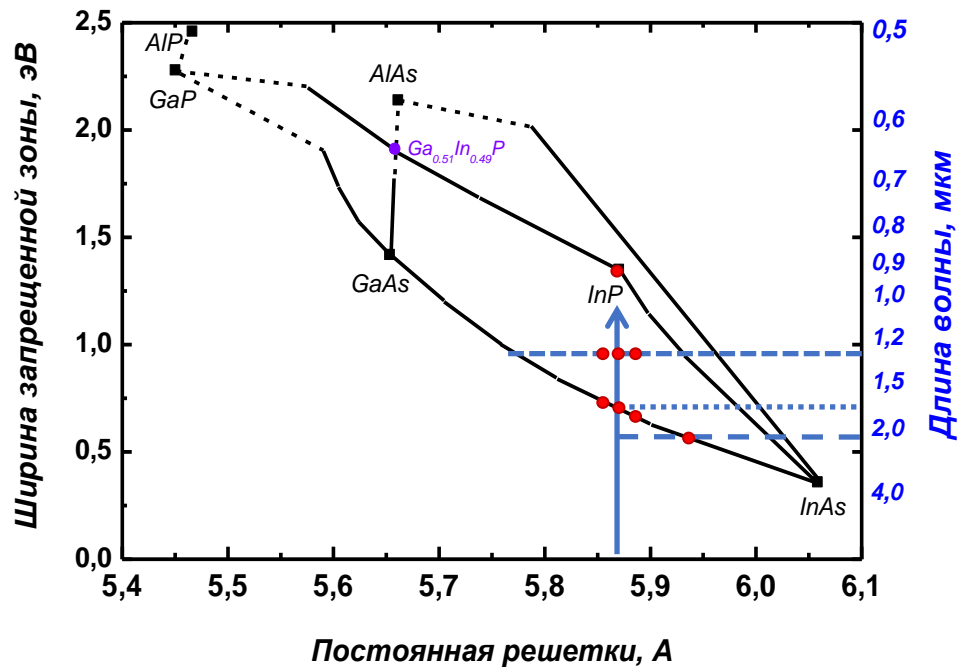
Кривизна пластины →
 → изгиб кристалла →
 → механические напряжения →
 → изменение характеристик ЛЛД



Выбор системы материалов

1300-2000 нм

InAlGaAs / InP
InGaAsP / InP



Оптимизация активной области ЛД

AlGaInAs КЯ
 $\Delta E_c = 0.72 \Delta E_g$

GaInAsP КЯ
 $\Delta E_c = 0.45 \Delta E_g$

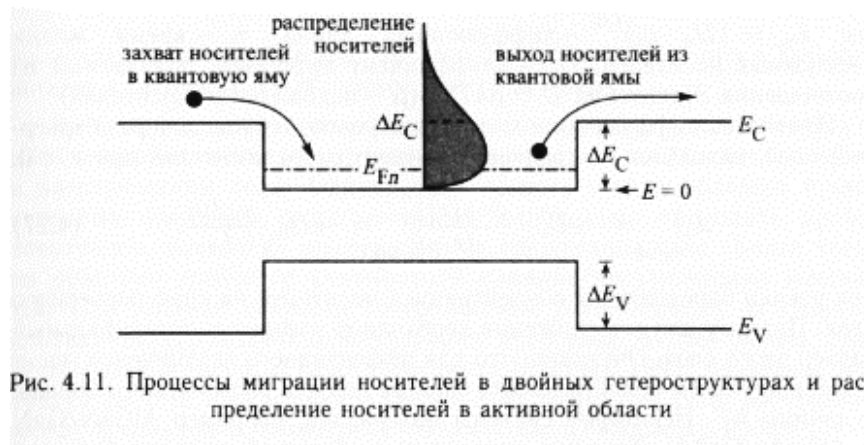
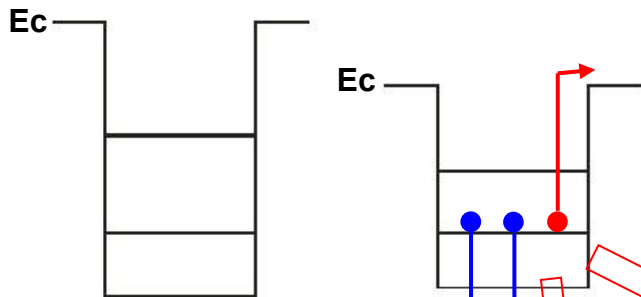
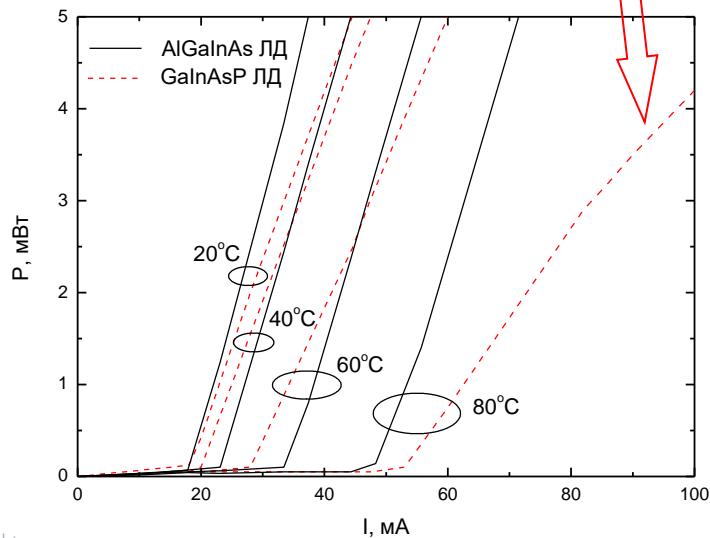
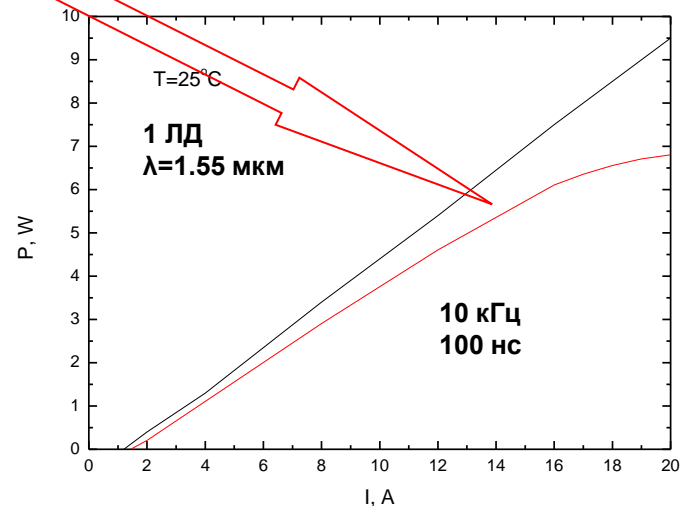


Рис. 4.11. Процессы миграции носителей в двойных гетероструктурах и распределение носителей в активной области

$$n_B = N_c \cdot e^{(E_{Fn} - E_B)/kT}, \quad n_B = \int_{E_B}^{\infty} \rho_{DOS} \cdot f_{FD}(E) dE,$$

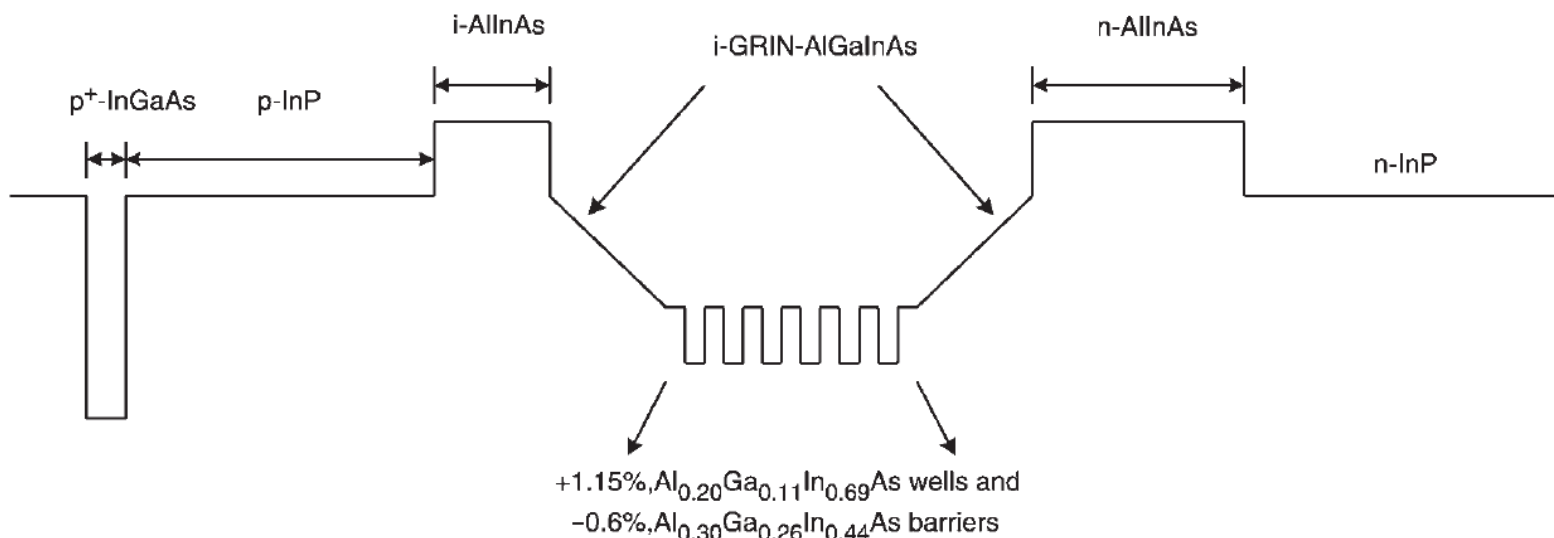
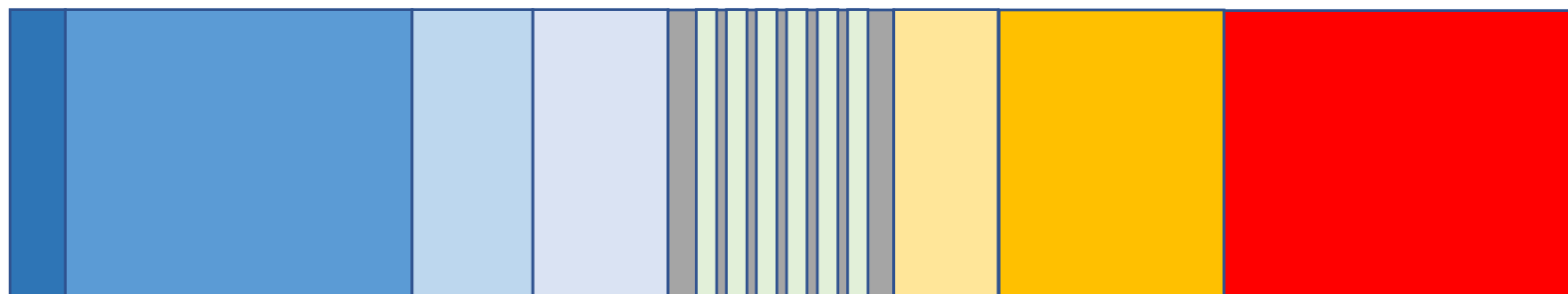


Непрерывный режим работы

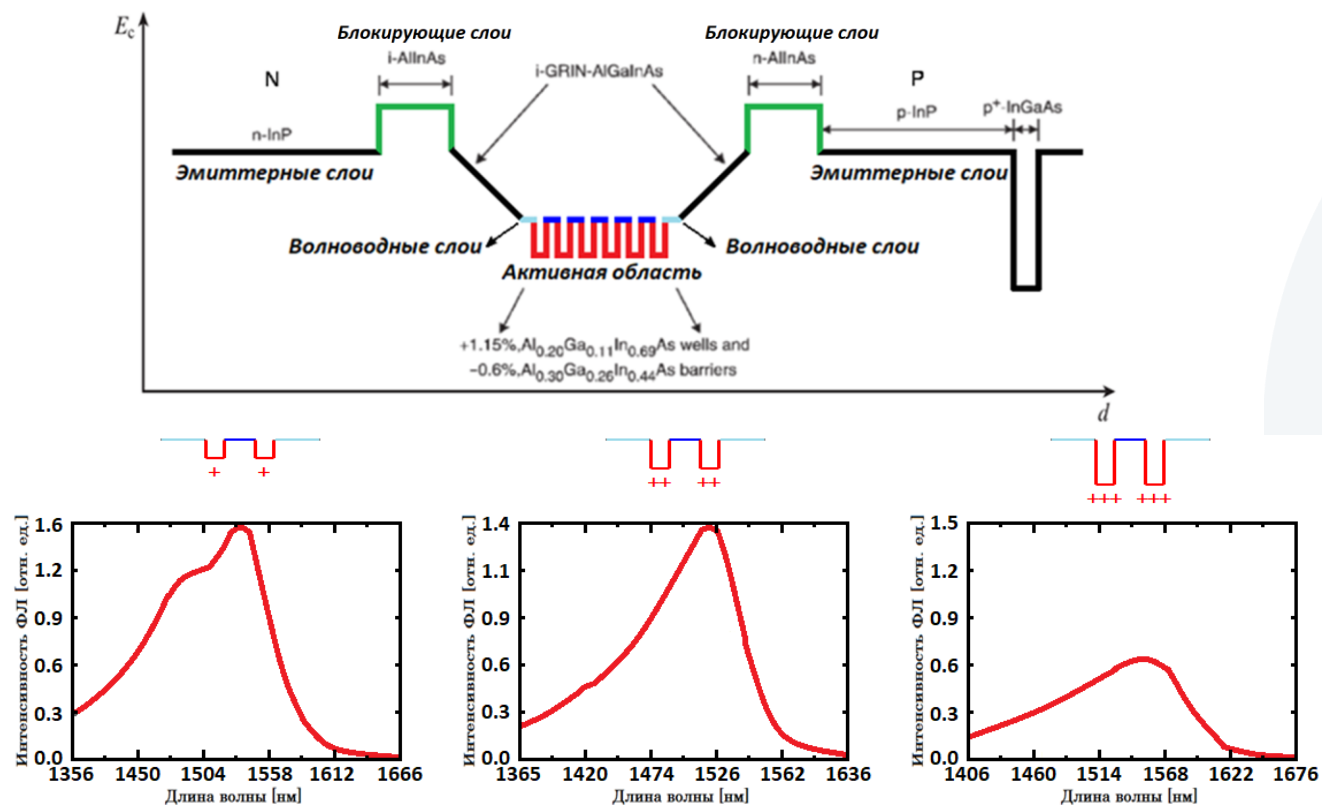


Импульсный режим работы

Выбор конструкции гетероструктуры

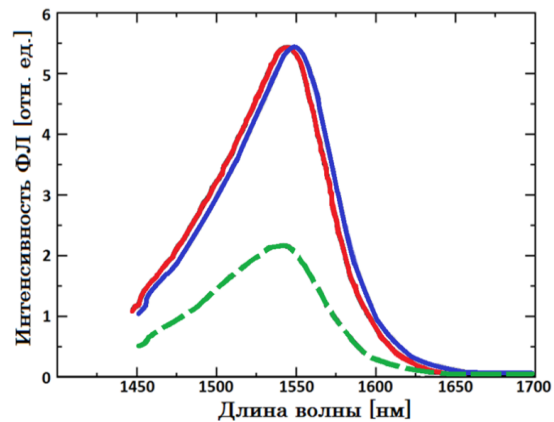
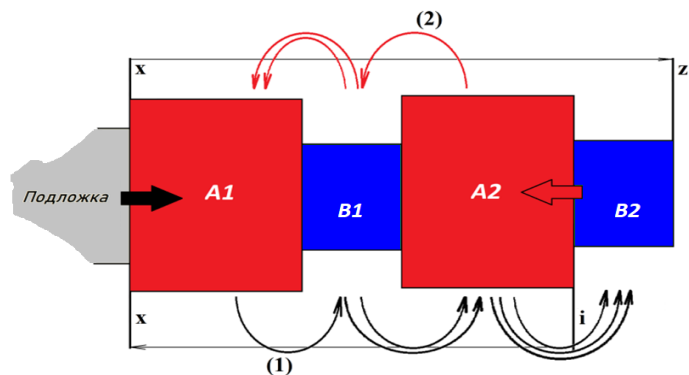


Современная конструкция гетероструктуры для излучателей в спектральном диапазоне от 1300 нм до 1600 нм

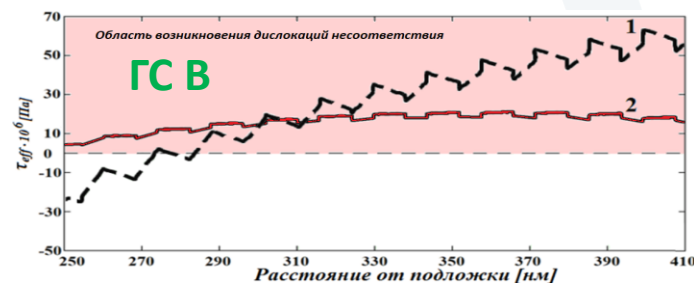
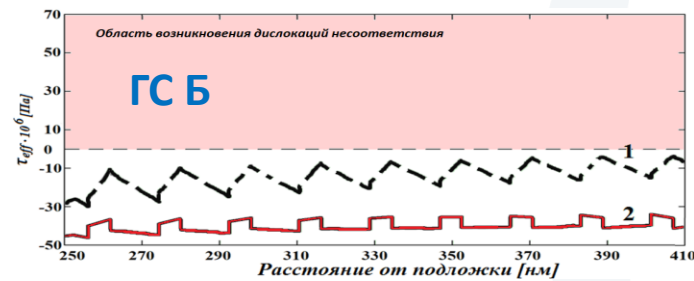
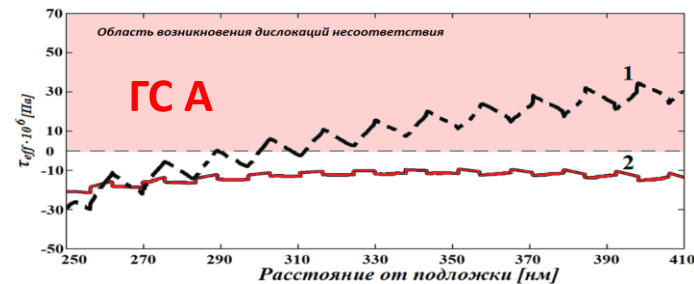


Спектры фотолюминесценции с ростом упругого напряжения в КЯ InGaAs/AlInGaAs

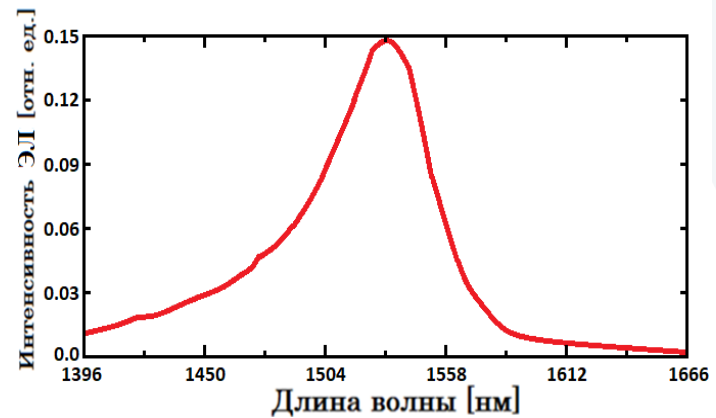
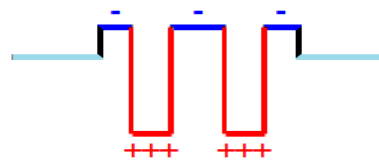
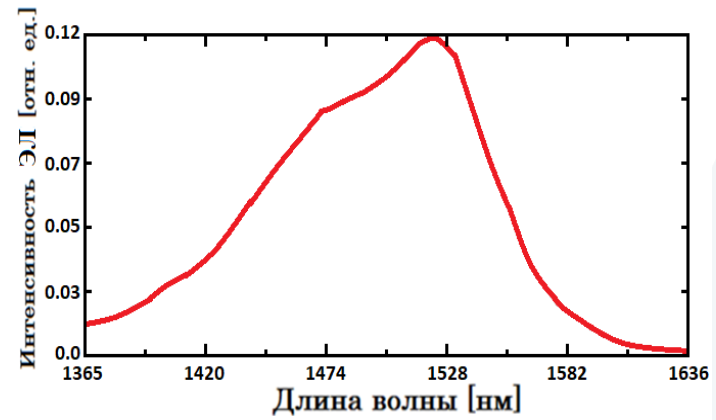
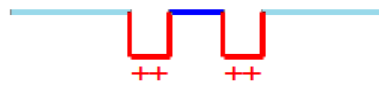
Модифицированная модель расчета упругих напряжений



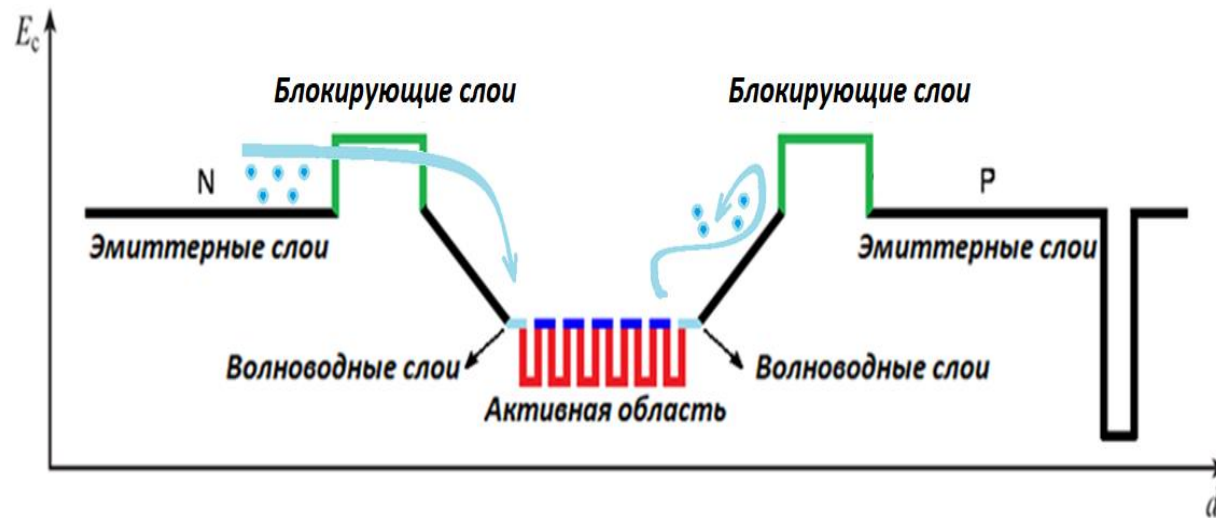
Спектры фотолюминесценции для образцов с различной компенсацией напряжения



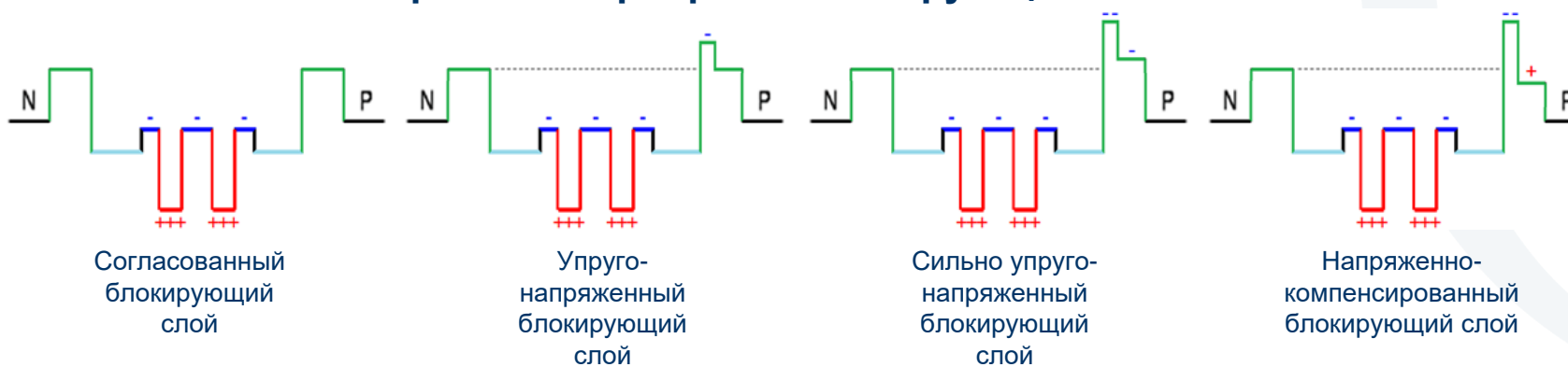
Спектры электролюминесценции КЯ InGaAs/AlInGaAs без и с компенсацией упругого напряжения в активной области



Выбор блокирующих слоев

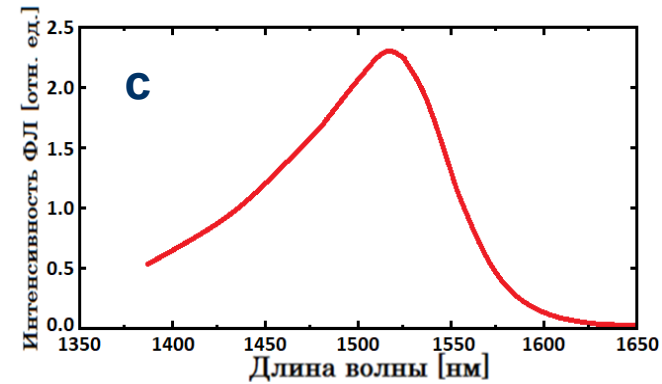
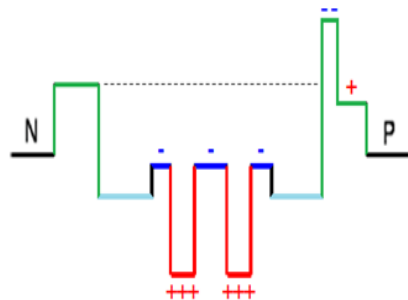
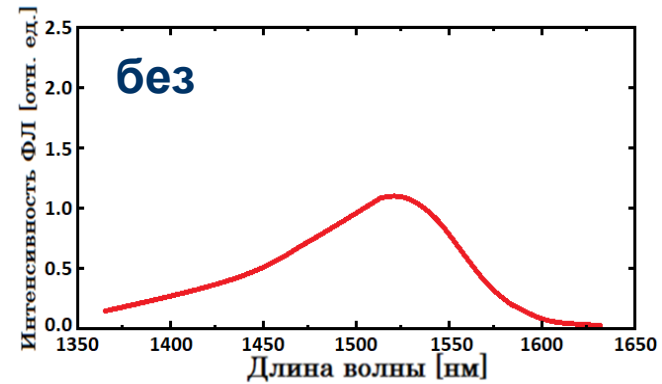
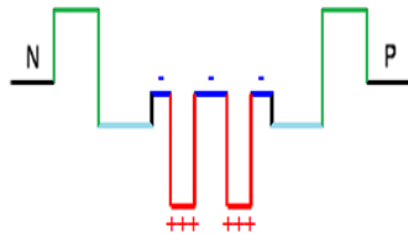


Варианты барьерных блокирующих слоев

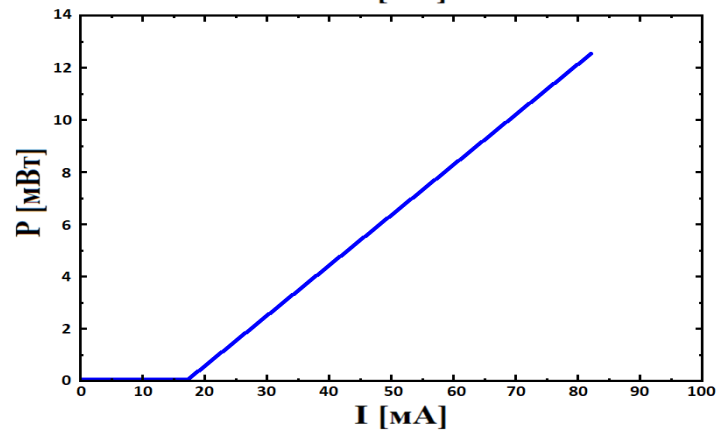
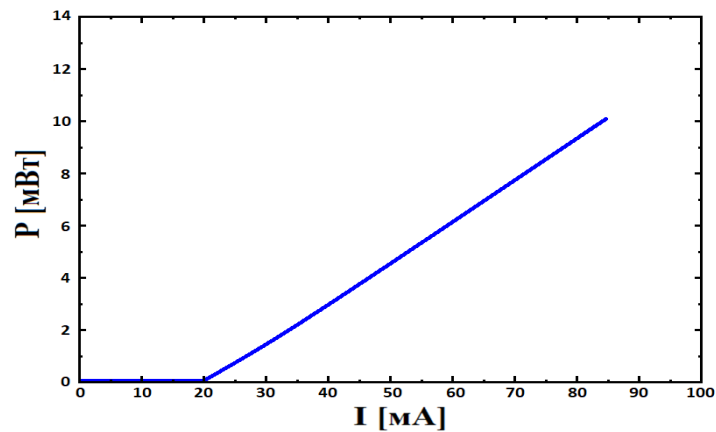
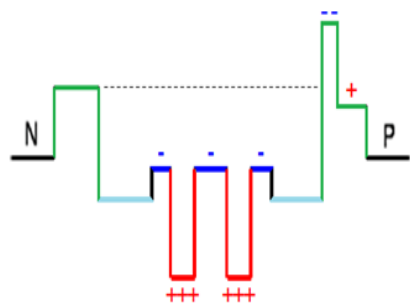
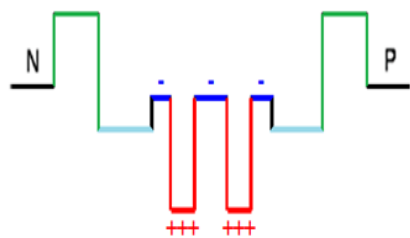


Выбор блокирующих слоев

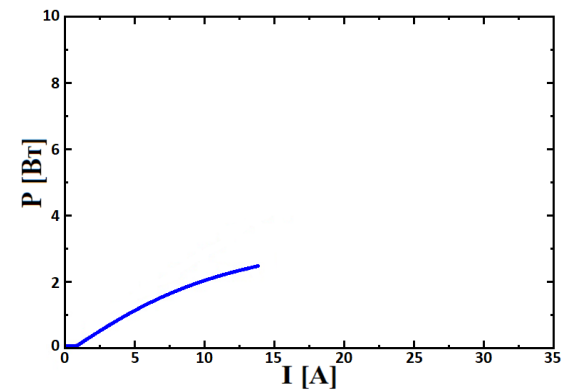
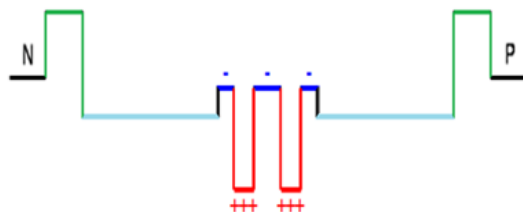
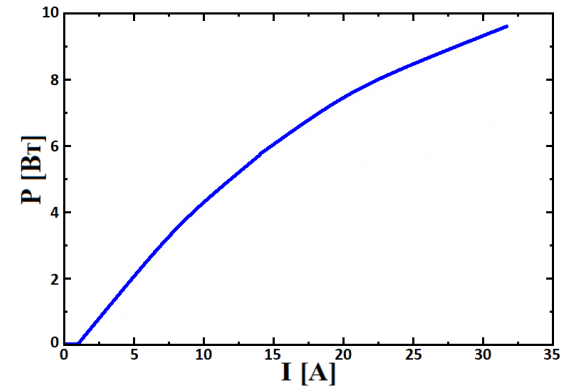
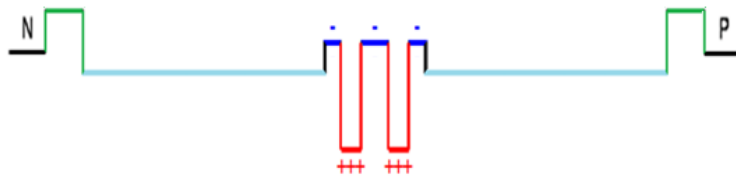
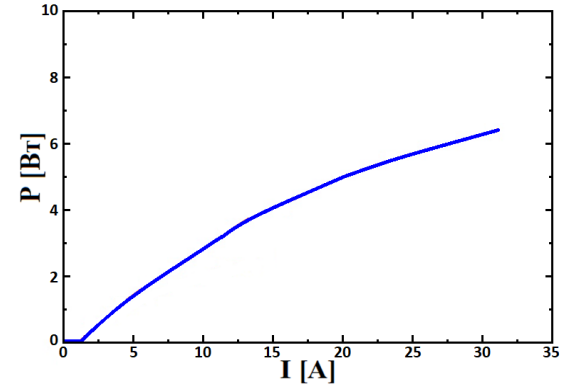
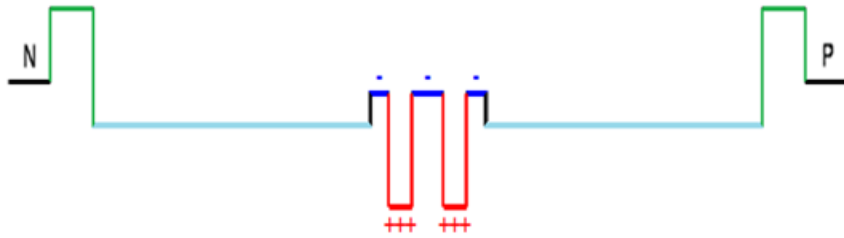
Спектры фотолюминесценции КЯ InGaAs/AlInGaAs без и с компенсацией упругого напряжения в блокирующем слое



Ватт-амперные характеристики ЛД в непрерывном режиме генерации



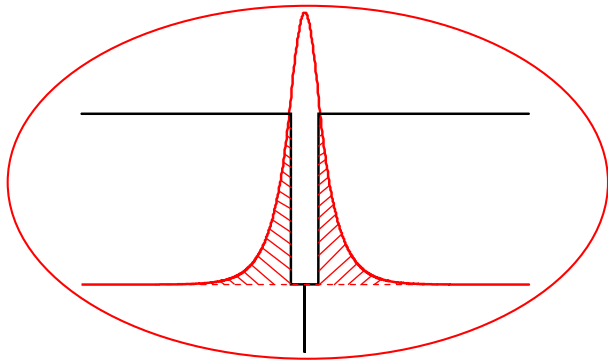
Выбор волноводного слоя



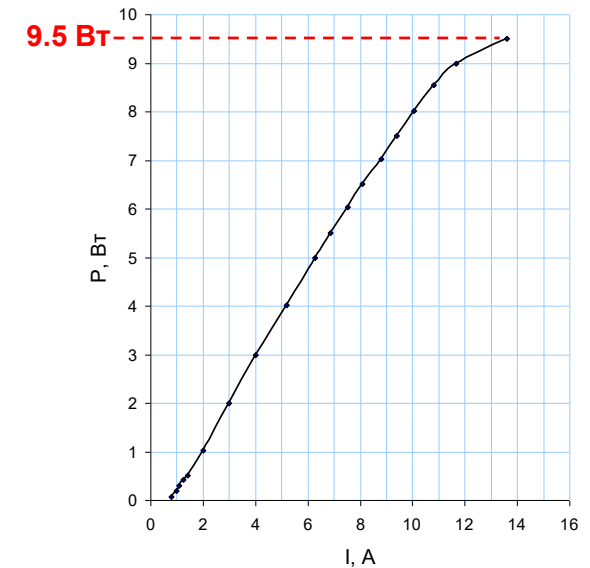
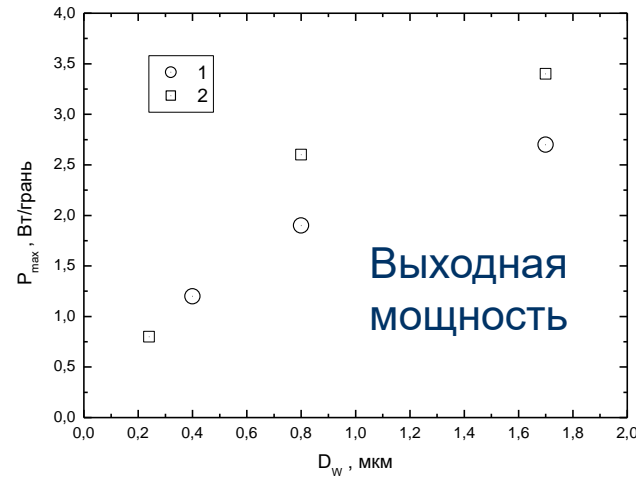
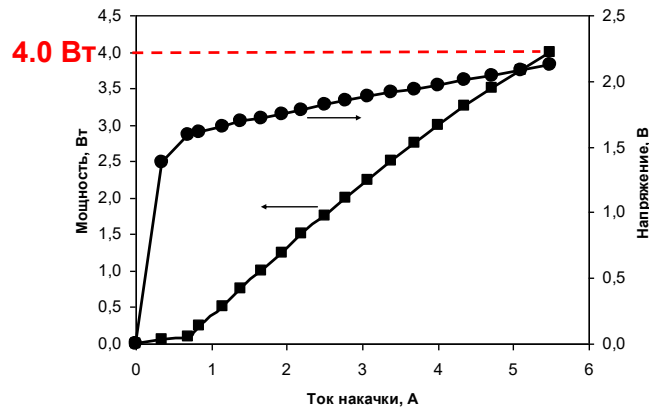
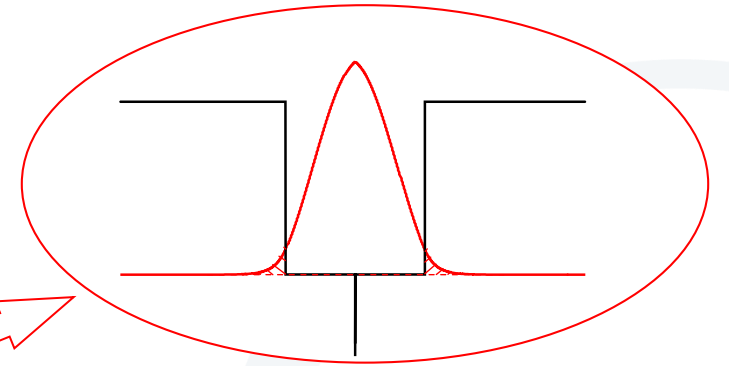
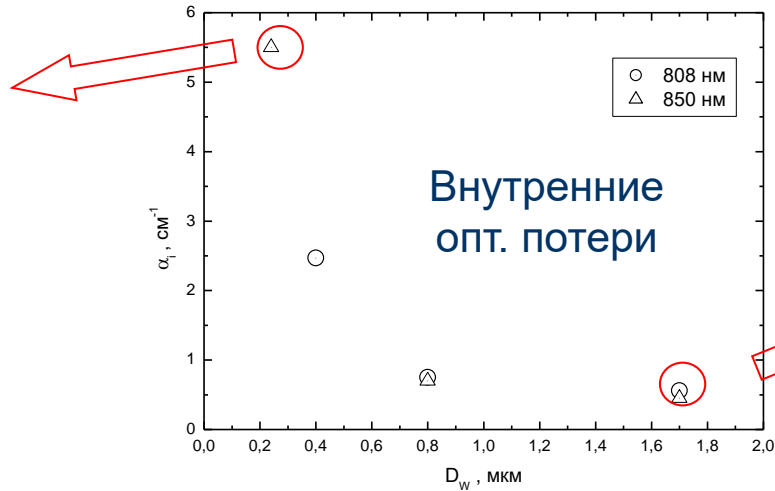
Ватт-амперные характеристики ЛД на основе ГС с различными волноводными слоями.

Длительность имп. – 100 нс
Частота – 10 кГц

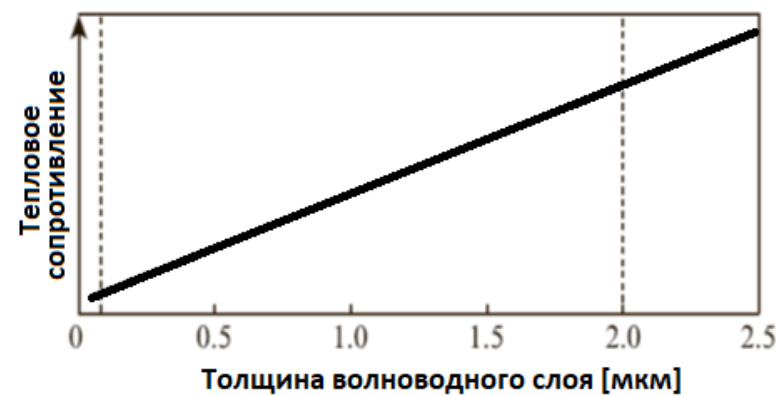
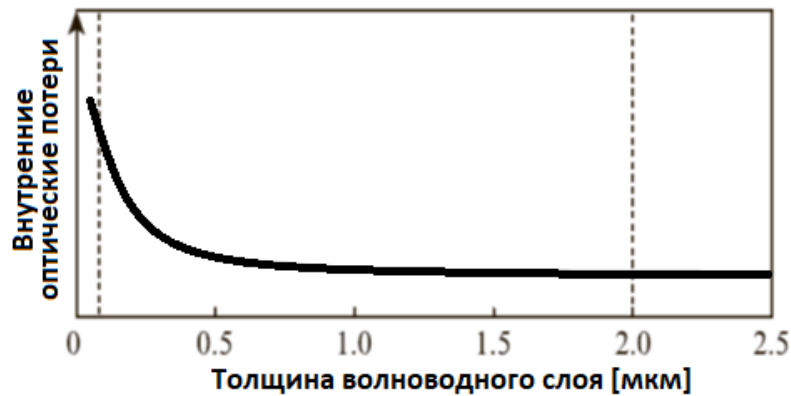
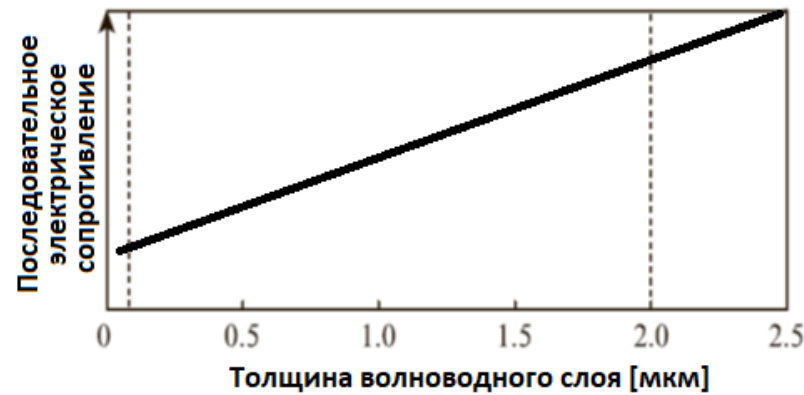
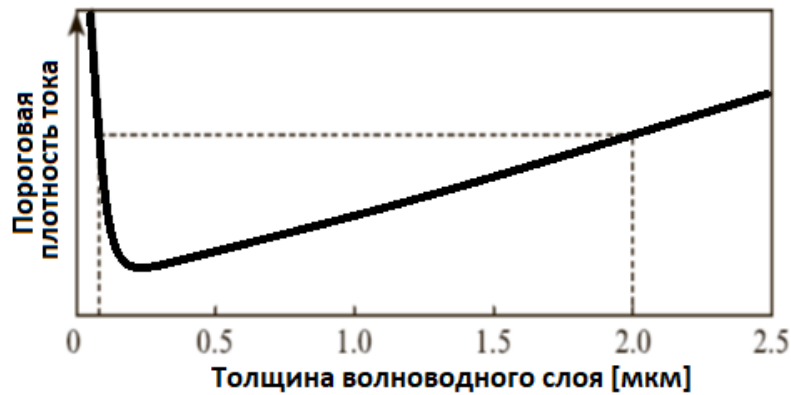
Концепция низких оптических потерь



$$P = \eta_i \cdot \left(\frac{\alpha_{ext}}{\alpha_i + \alpha_{ext}} \right) \cdot \frac{h\nu}{q} \cdot (I - I_{th})$$



Зависимость основных параметров ЛД от толщины волноводных слоев



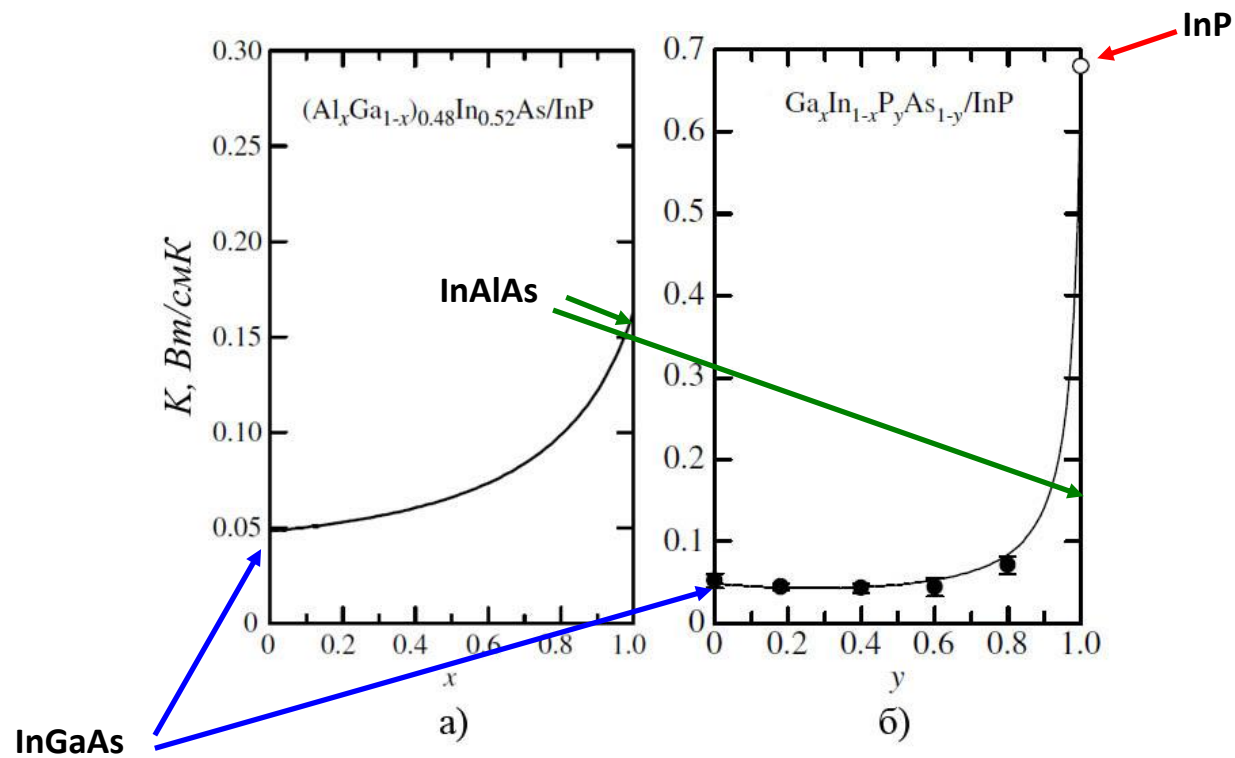
$$R_T^{\text{узк}} < R_T^{\text{шир}}$$

$$R_S^{\text{узк}} < R_S^{\text{шир}}$$

$$I_{th}^{\text{узк}} < I_{th}^{\text{шир}}$$

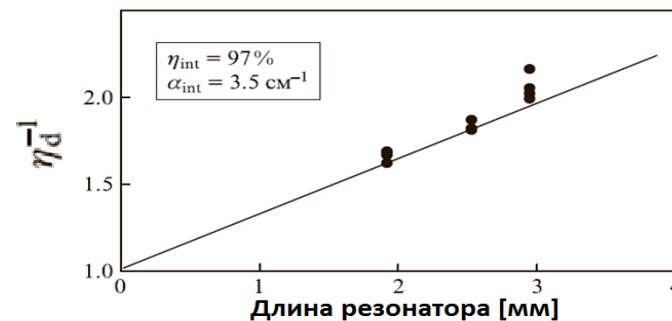
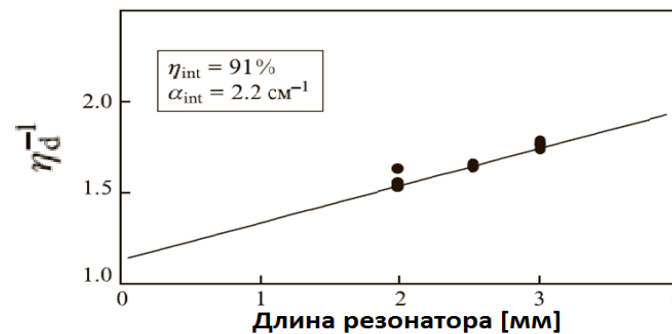
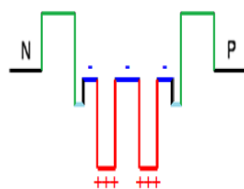
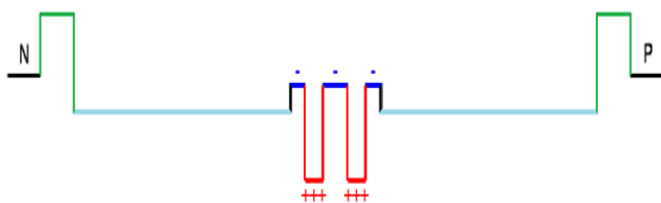
$$\alpha_i^{\text{узк}} > \alpha_i^{\text{шир}}$$

Выбор волноводного слоя



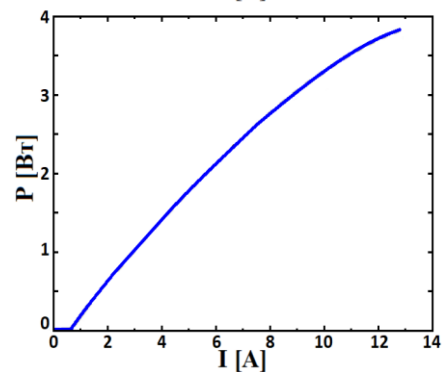
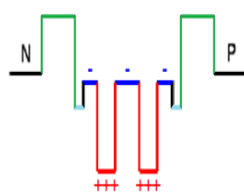
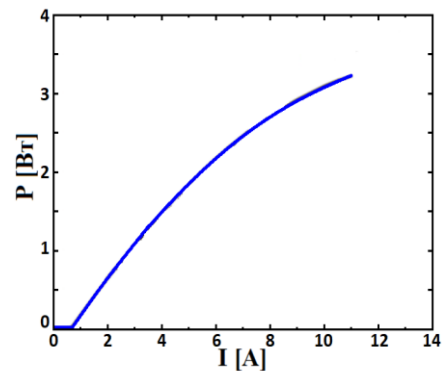
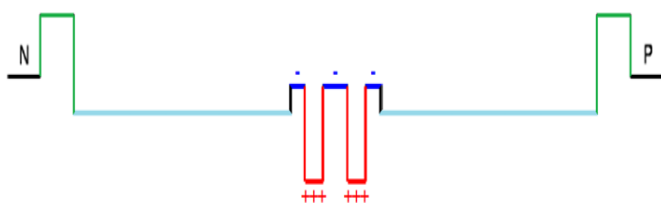
Коэффициент теплопроводности:
а) AlGaInAs; б) GaInAsP



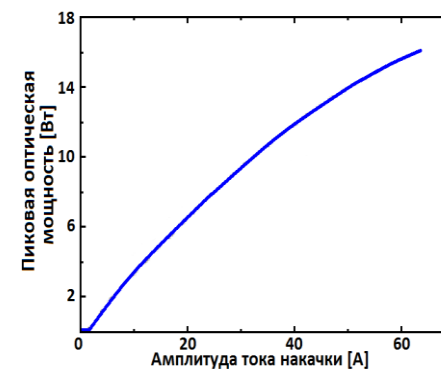
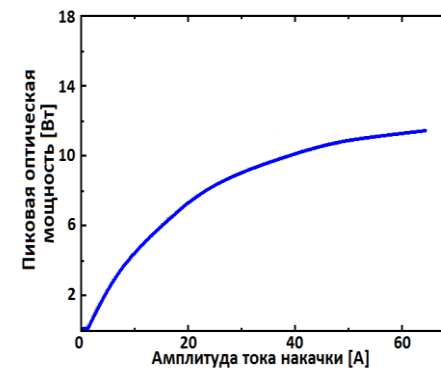


Внутренние оптические потери ЛД с широким и сверхузким волноводным слоем

Широкий и сверхузкий волновод

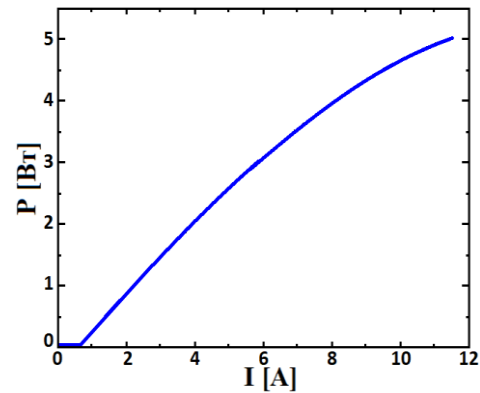
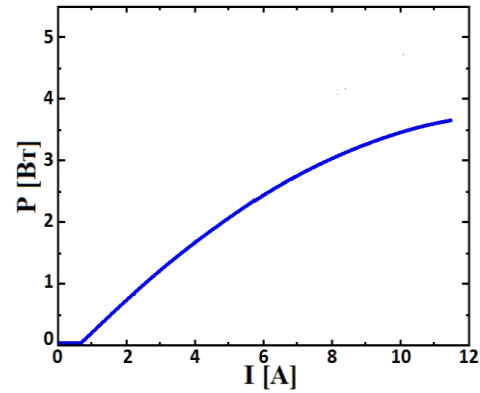
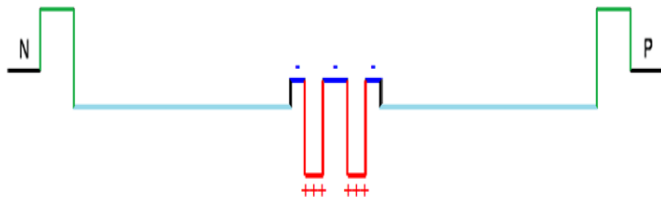


Ватт-амперная характеристики ЛД в непрерывном режиме генерации

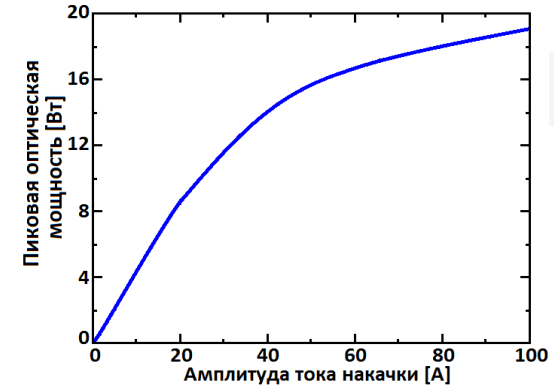
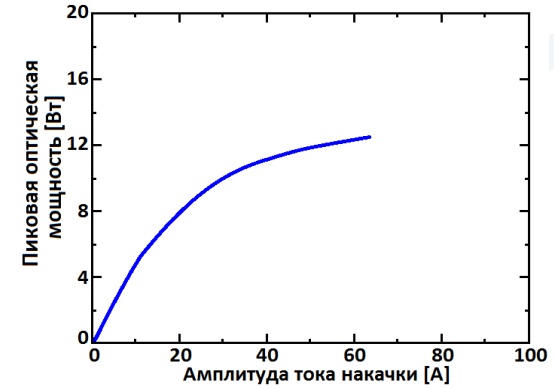


Ватт-амперная характеристики ЛД. Длительность импульсов – 100 нс. Частота повторения – 10 кГц

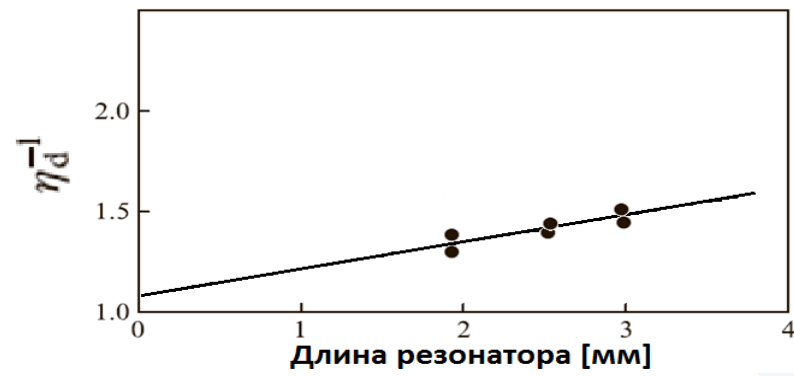
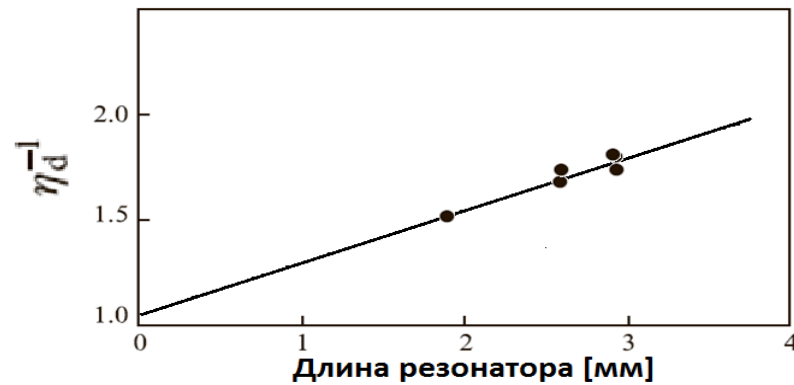
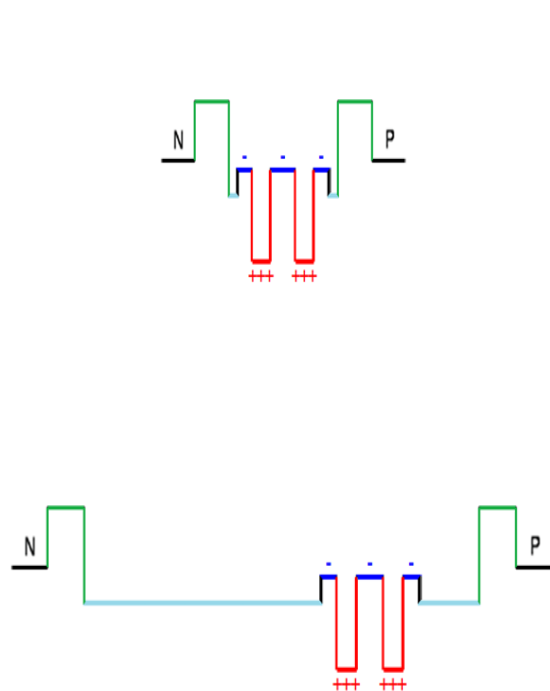
Широкий и асимметричный волновод



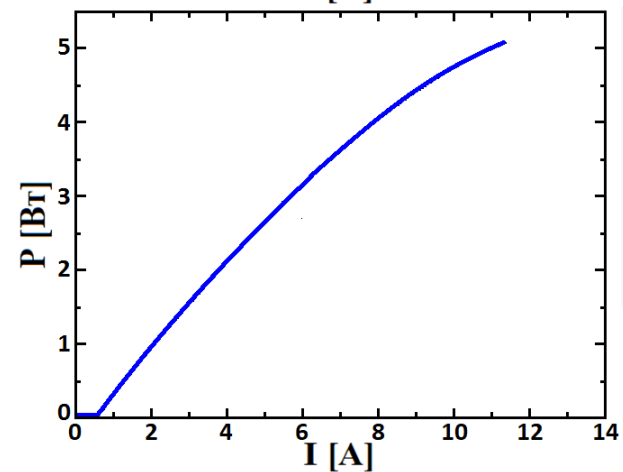
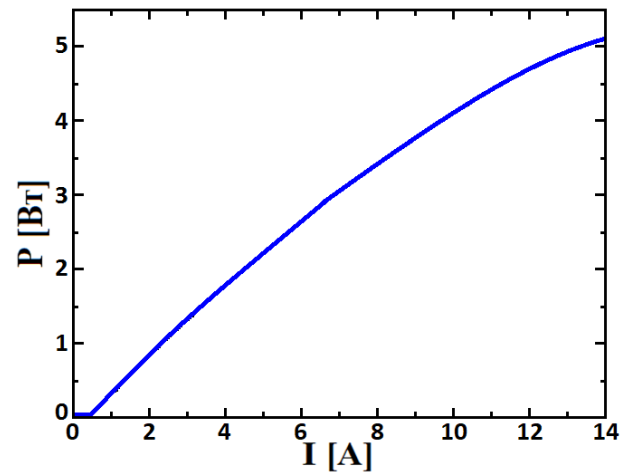
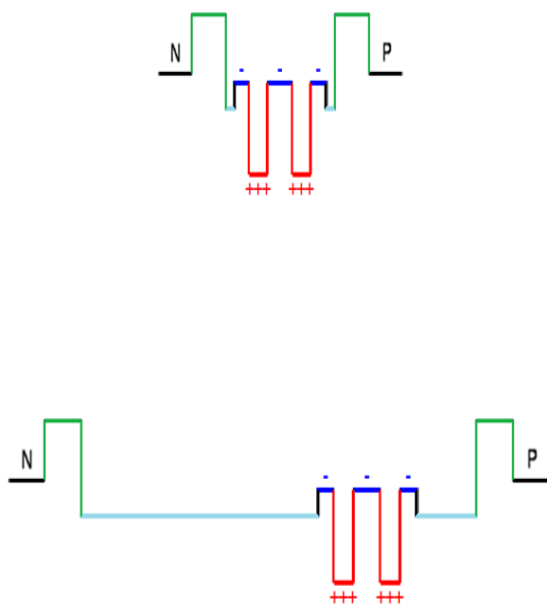
Ватт-амперная характеристики ЛД в непрерывном режиме генерации



Ватт-амперная характеристики ЛД. Длительность импульсов – 100 нс. Частота повторения – 10 кГц

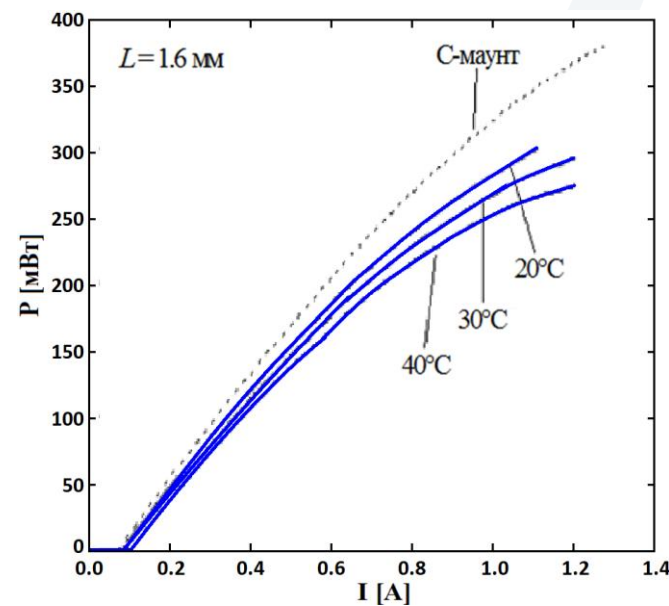
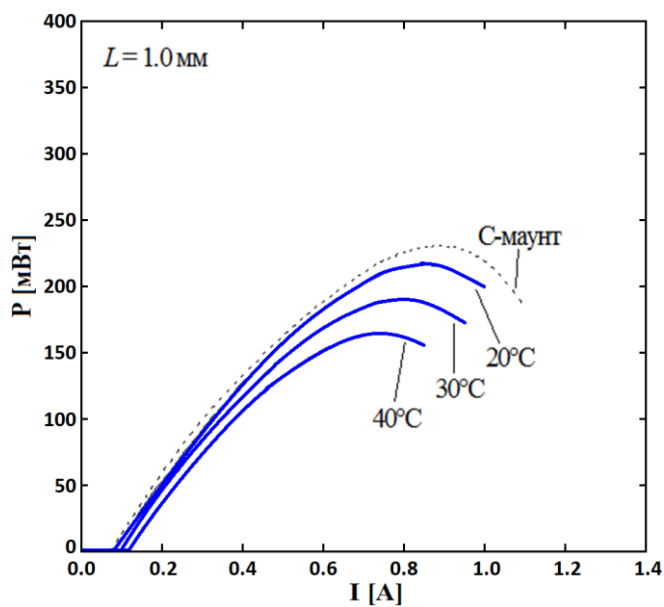
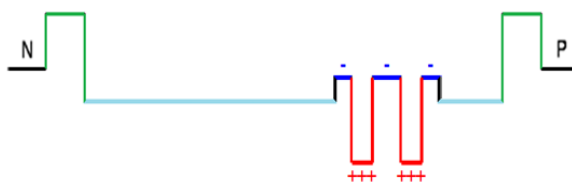


Внутренние оптические потери ЛД с широким и сверхузким волноводным слоем

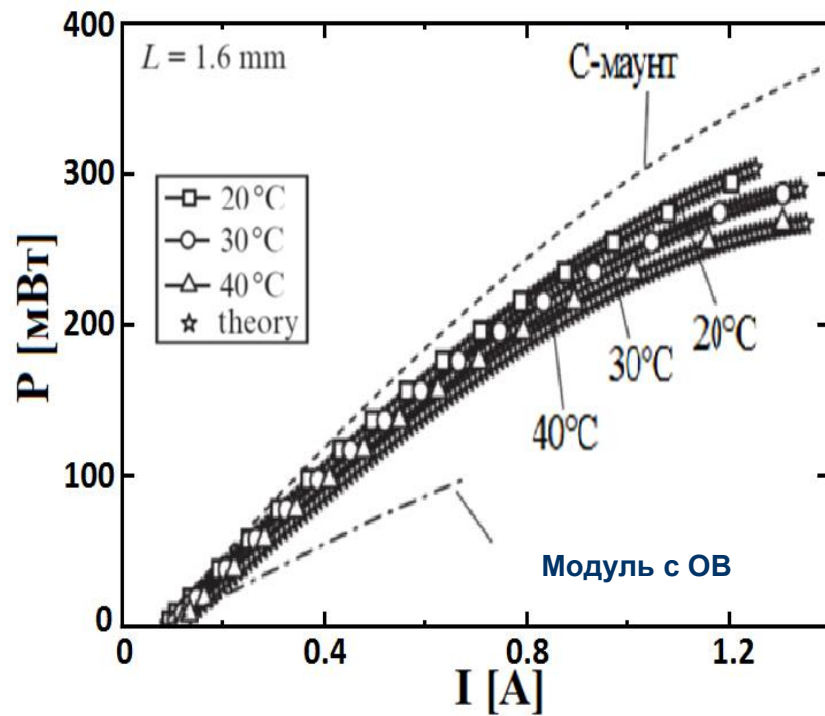


Ватт-амперная характеристики ЛД в непрерывном режиме генерации

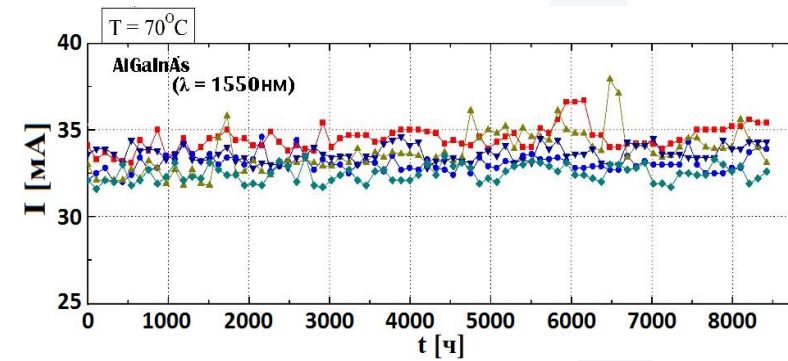
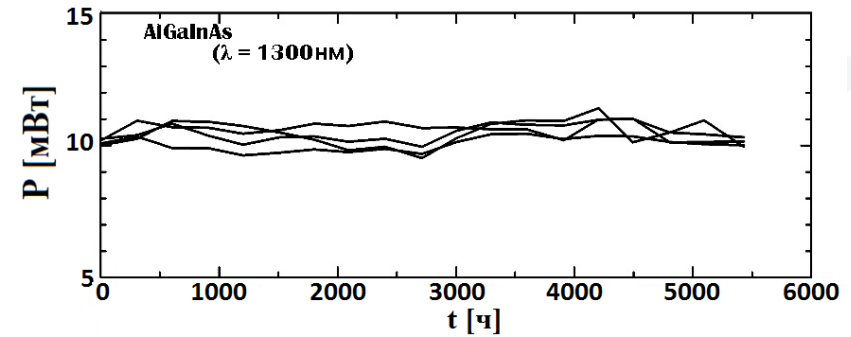
Асимметричный волновод



Ватт-амперная характеристики одномодовых ЛД на основе AlInGaAs/InP с различной длиной резонатора

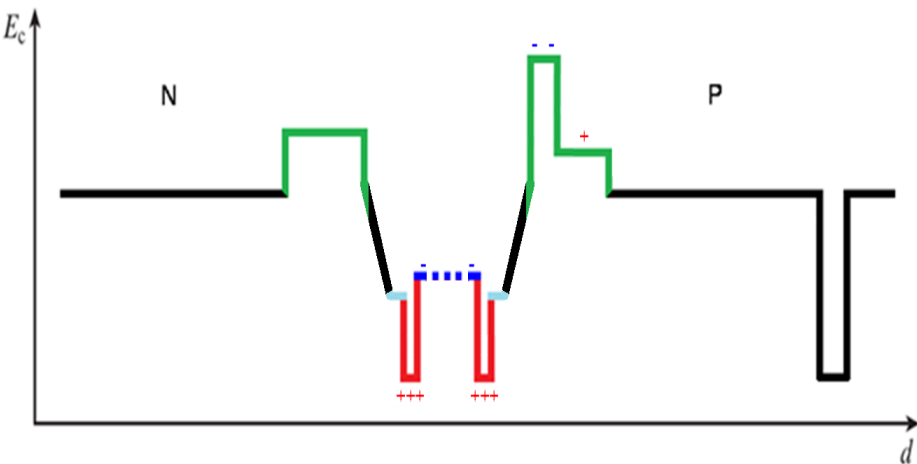


Ватт-амперная характеристики одномодовых ЛД в непрерывном режиме генерации ($\lambda = 1550$ нм)

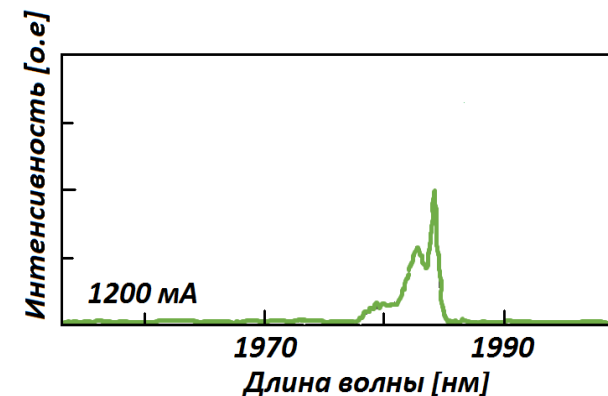
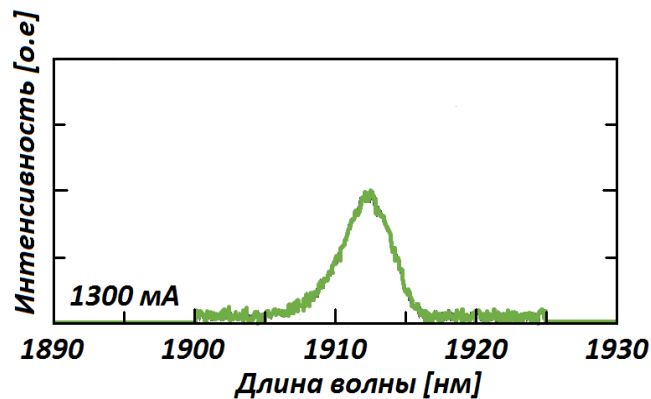
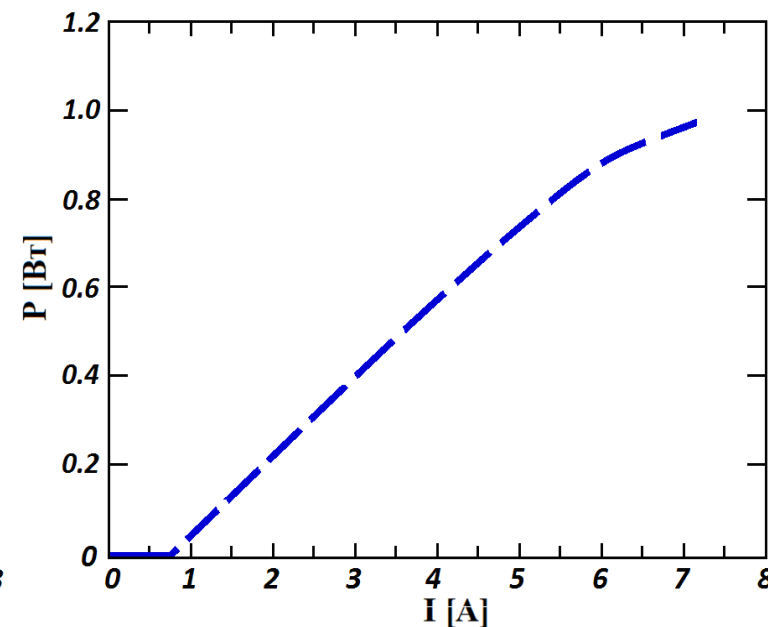
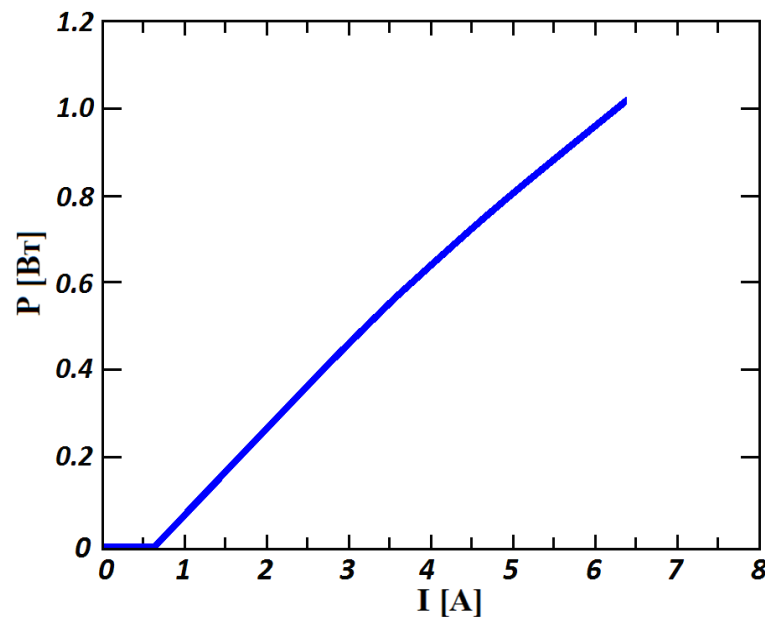


Ресурсный тест при повышенной температуре одномодовых ЛД с λ от 1300 нм до 1600 нм

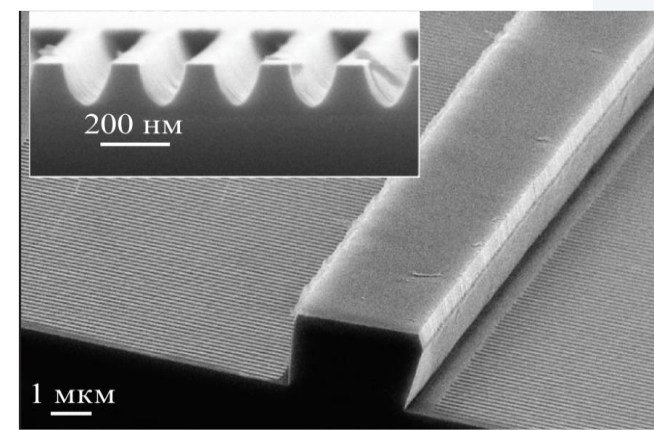
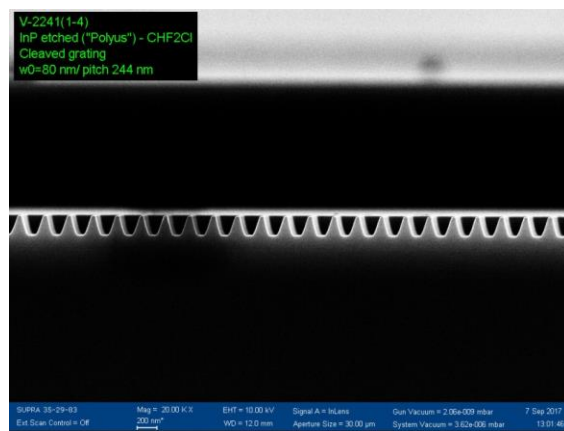
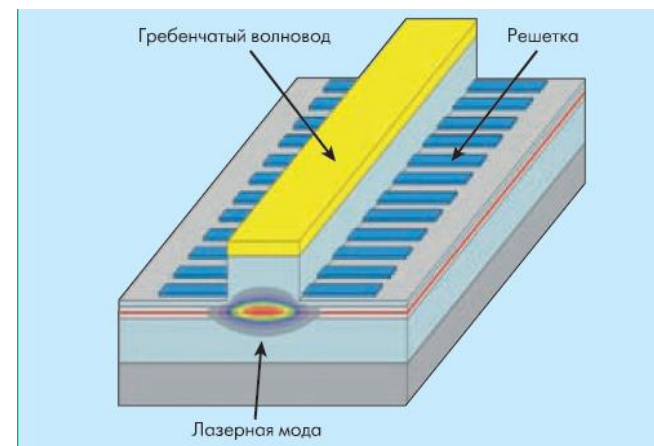
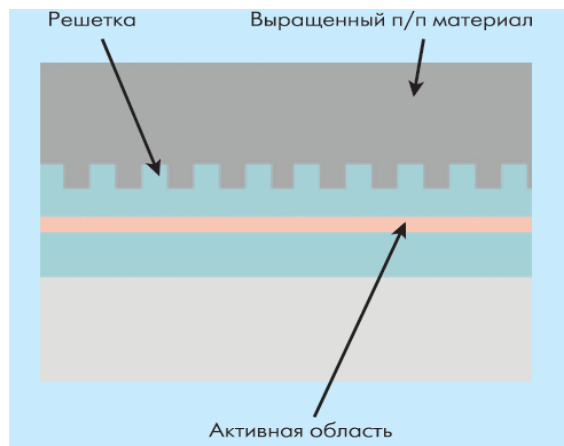
Лазерные диоды с λ вблизи 2000 мкм



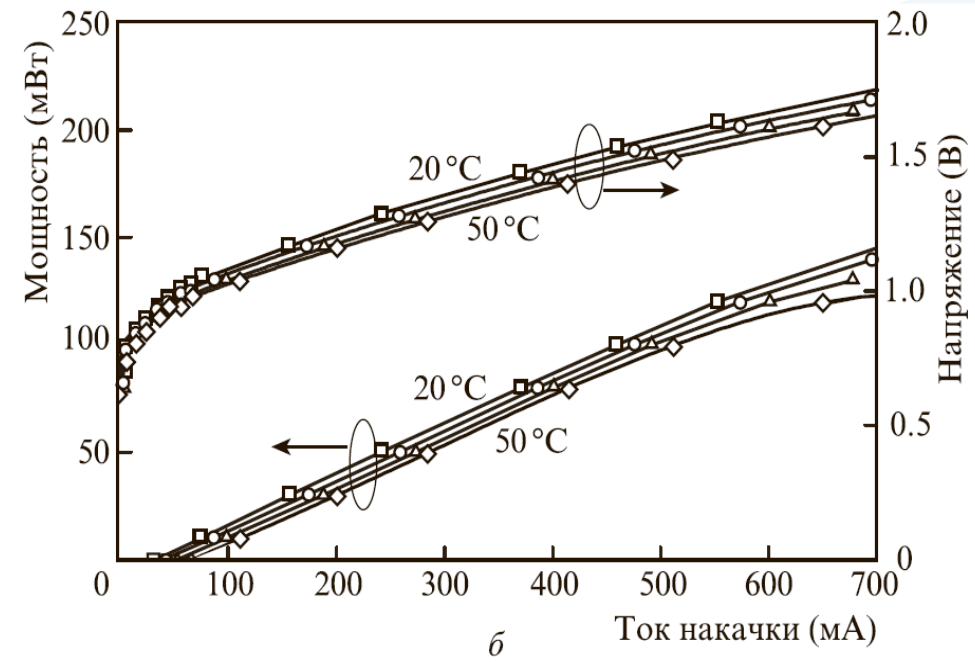
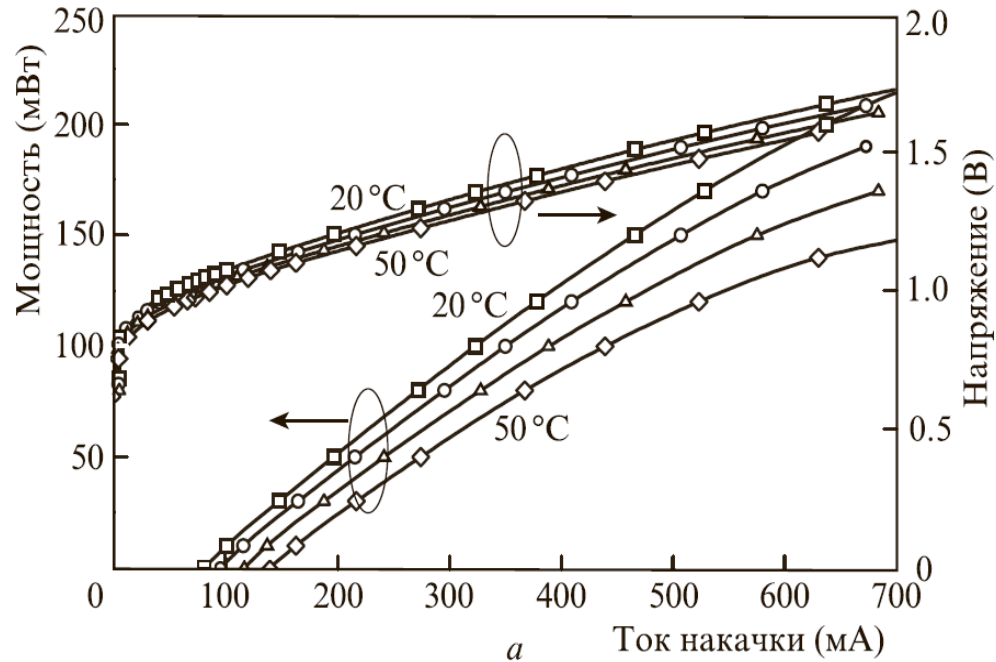
Ватт-амперные и спектральные характеристики ЛД с длиной волны излучения вблизи 2000 нм



Активный элемент РОС-лазера с боковой брэгговской решеткой

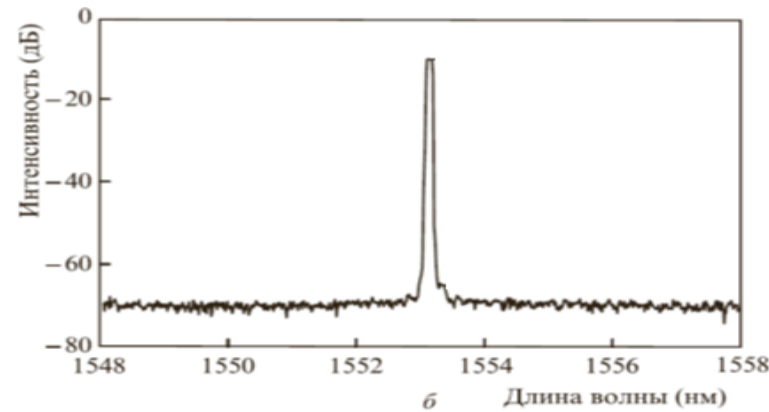
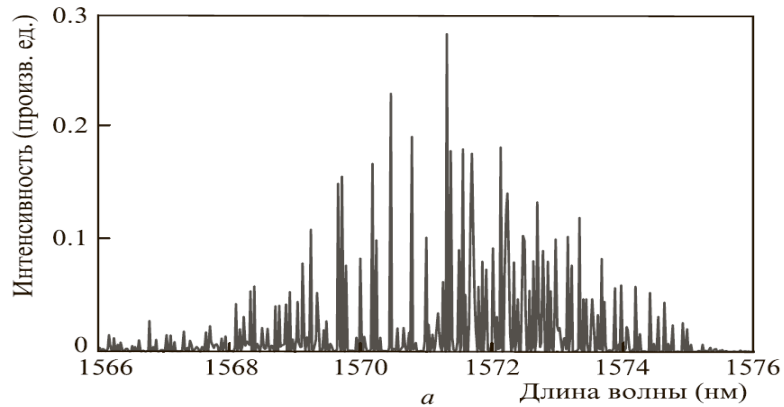


Лазерные диоды с распределенной обратной связью

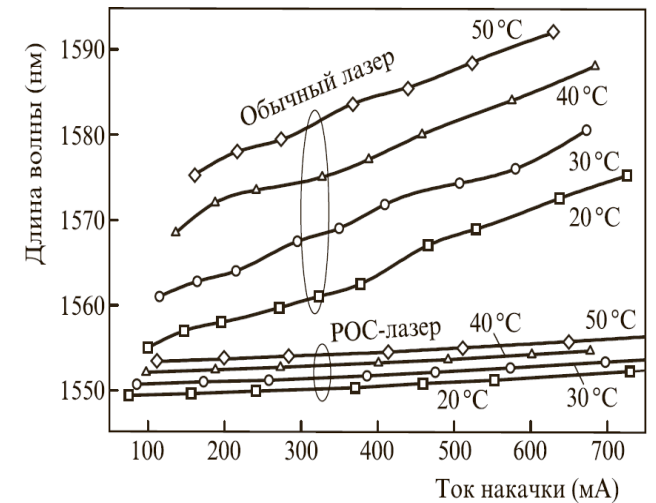


Вольт- и Ватт-амперные характеристики
обычного ФП лазера и РОС-лазера
при различных температурах

Лазерные диоды с распределенной обратной связью

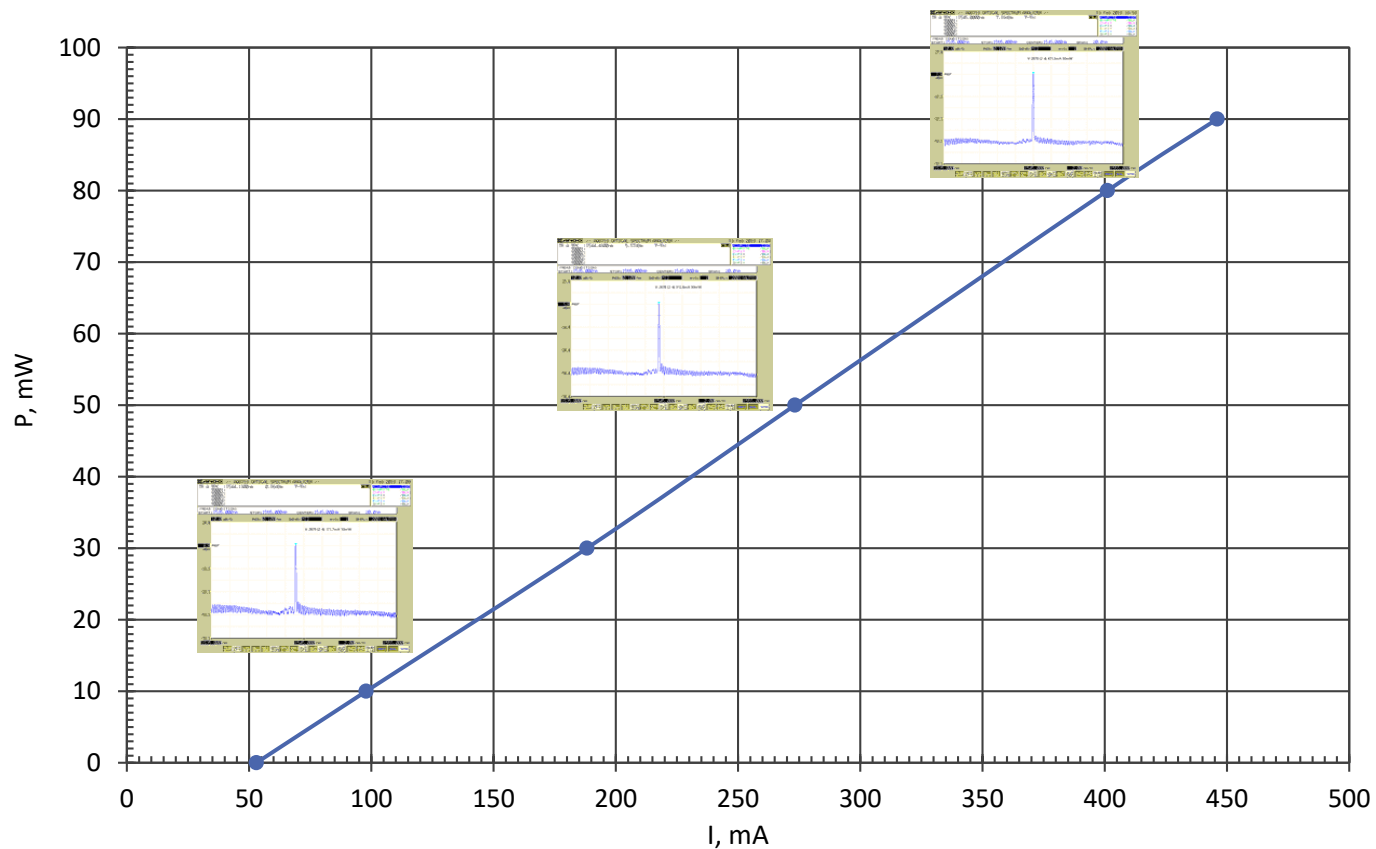


Спектры генерации обычного лазера (а) в линейном масштабе и РОС-лазера (б) в логарифмическом масштабе при токе накачки 500 мА.



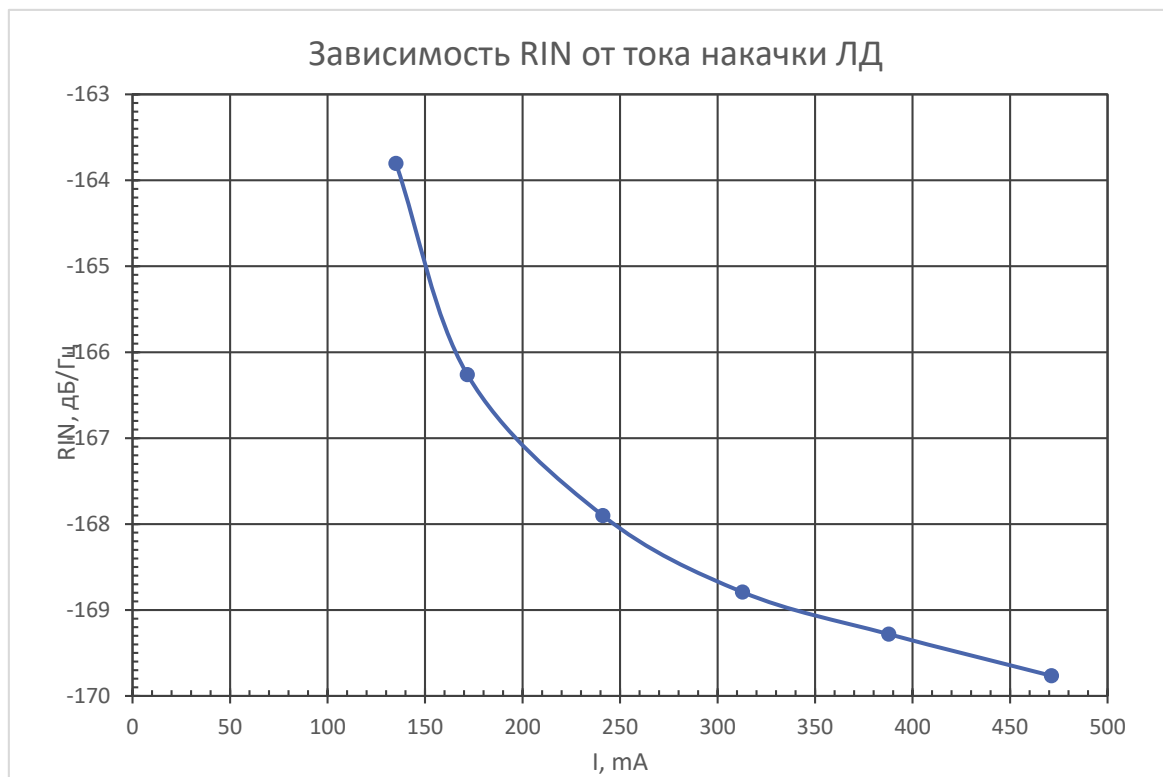
Зависимость длины волны генерации обычного лазера и РОС-лазера от тока накачки в диапазоне температур 20 – 50 °С

Лазерные диоды с распределенной обратной связью



ВТХ одночастотного РОС-лазера на выходе волокна

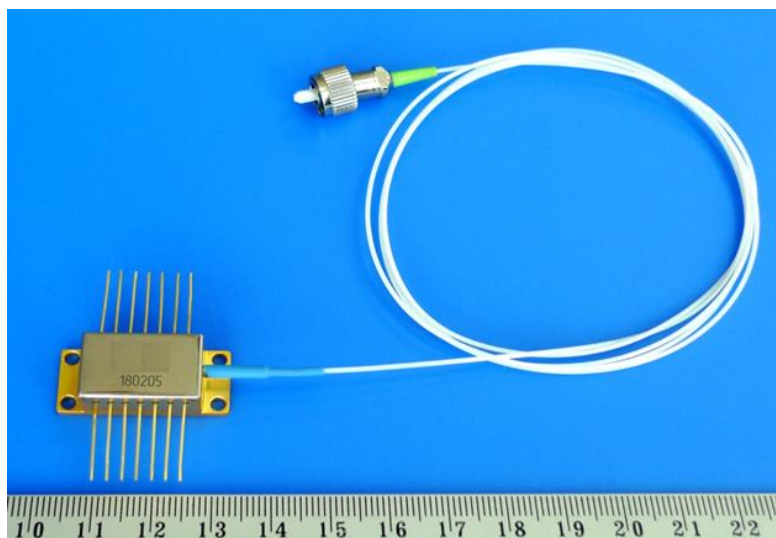
Лазерные диоды с распределенной обратной связью



Зависимость RIN от мощности на выходе волокна

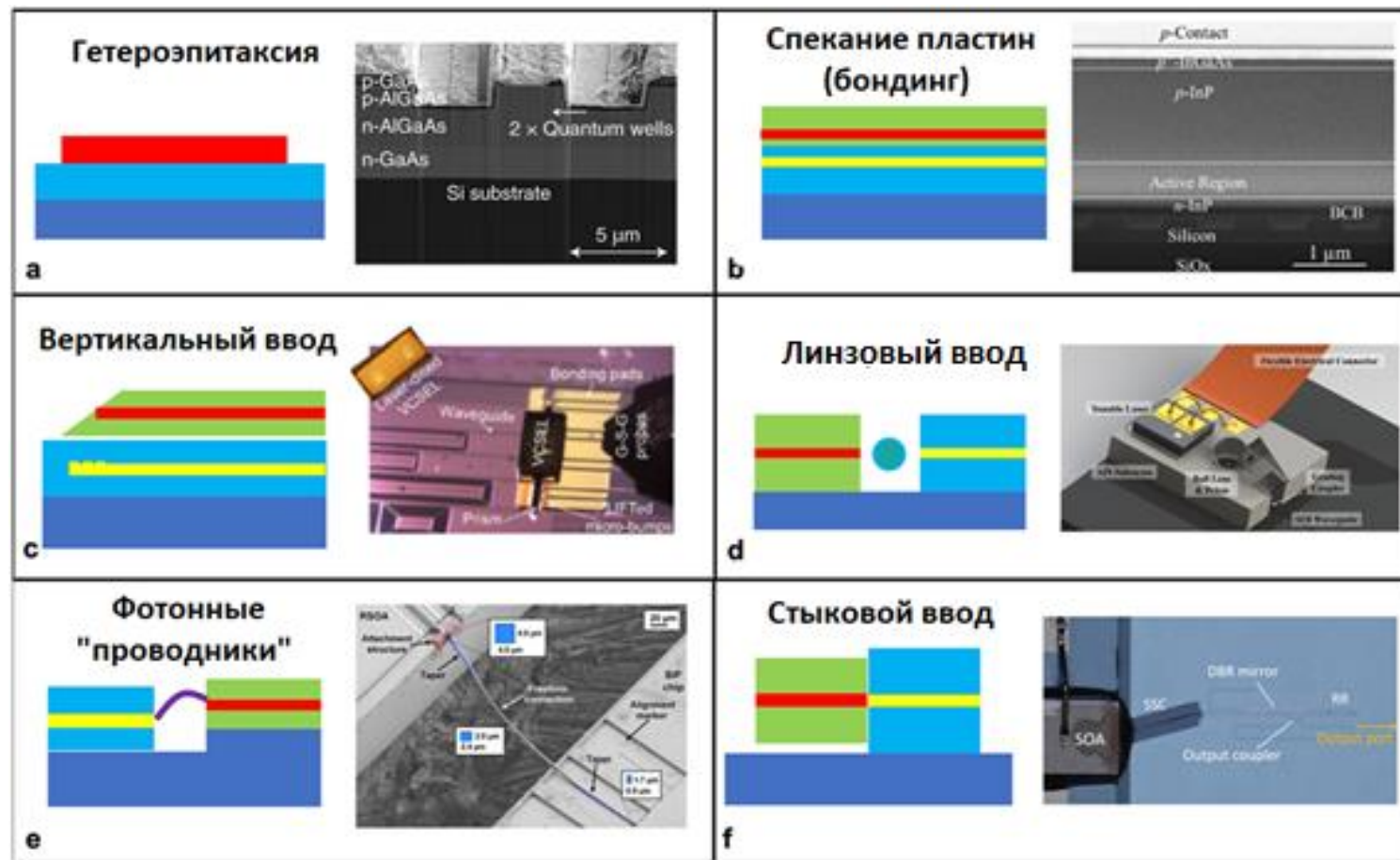
Волоконно-оптический передающий модуль для широкополосных систем передачи СВЧ-диапазона

Наименование параметра, единица измерения	Обозначение параметра	Значение параметра	
		не менее	не более
Оптическая выходная мощность, мВт	$P_{\text{вых}}$	50	–
Коэффициент подавления побочной моды, дБ	SMS	30	–
Относительная интенсивность шума, дБ/Гц	RIN	–	минус 150
Рабочий ток, мА	I	–	500
Длина волны излучения, нм	λ	1530	1560



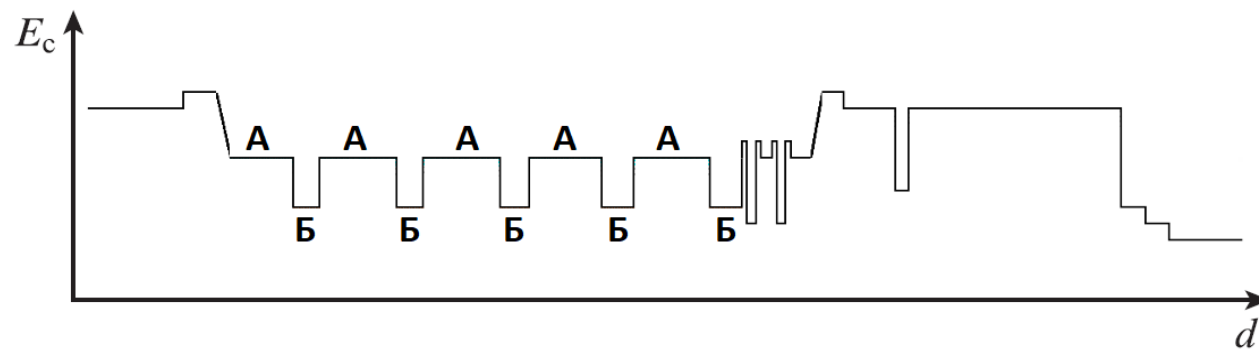
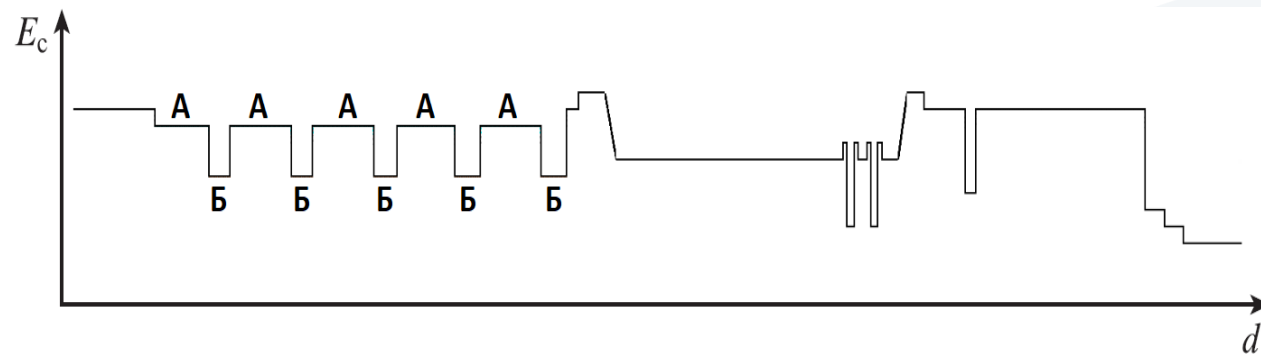
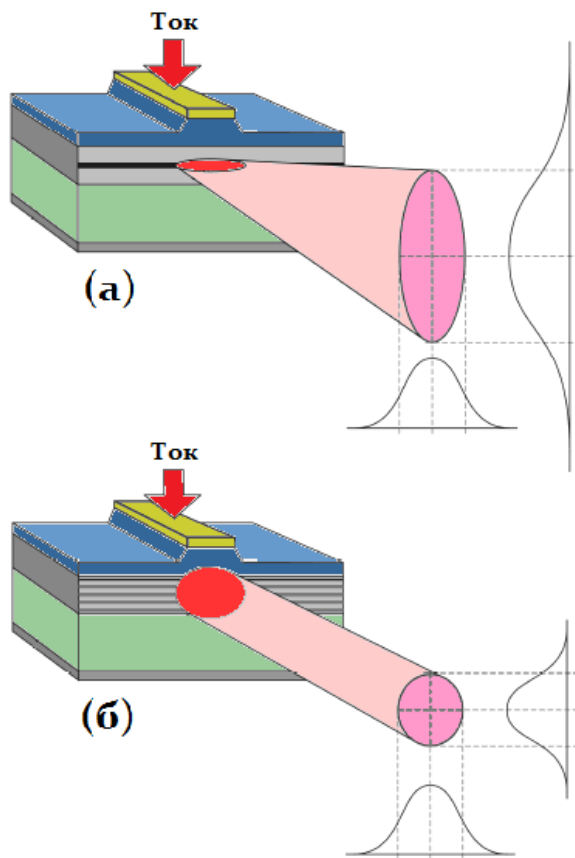
Лазерные диоды для интегральных схем

Различные типы методов сопряжения, используемые при гибридной/гетерогенной интеграции Si чипов с лазерными чипами

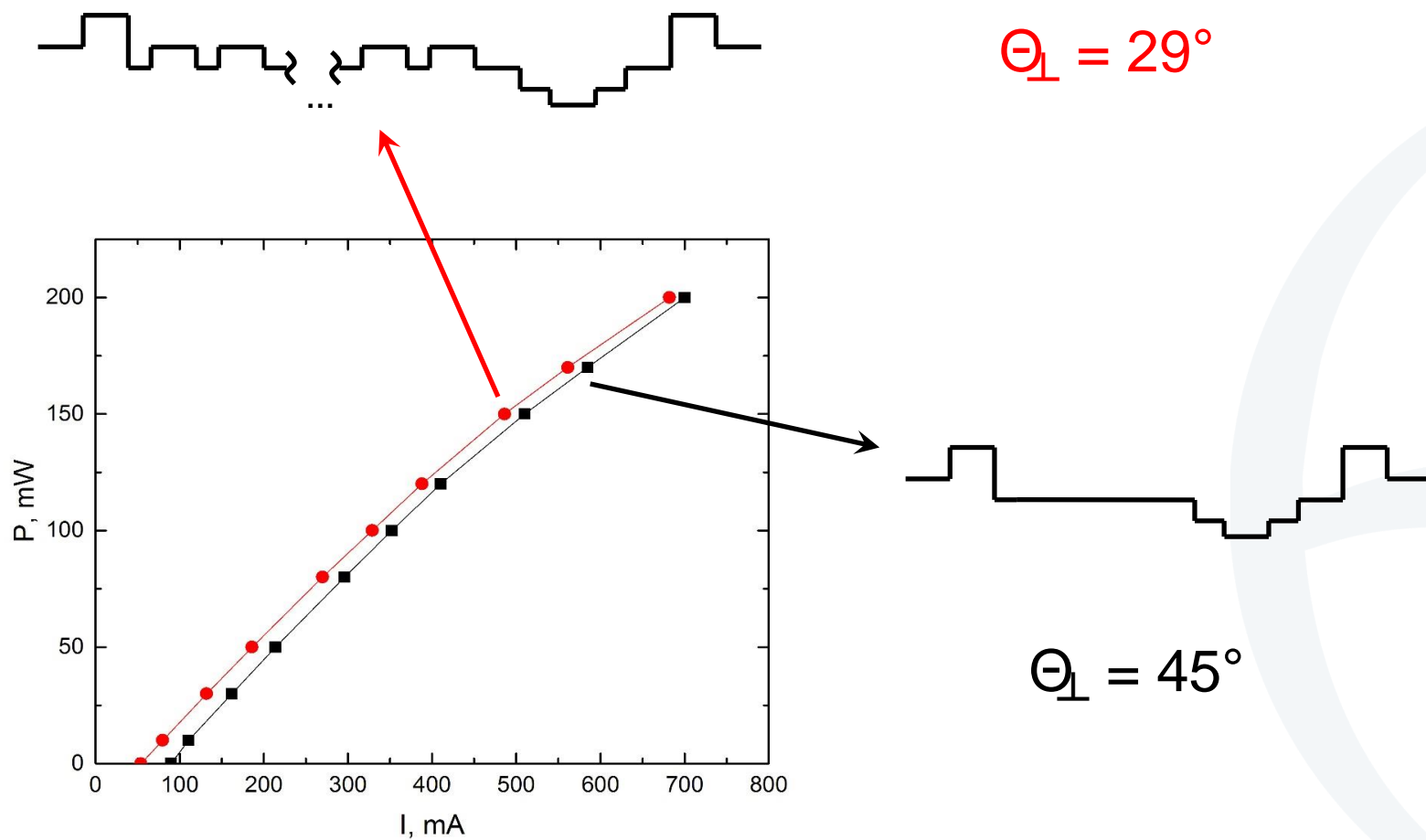


Лазерные диоды с одномерным фотонным кристаллом

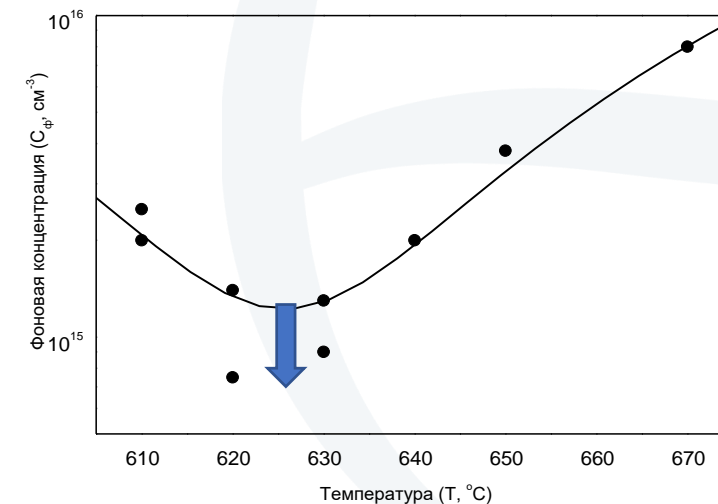
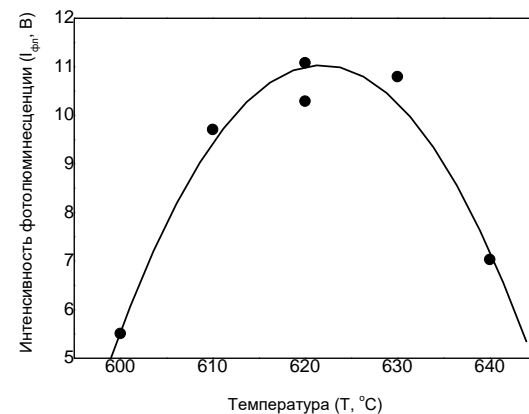
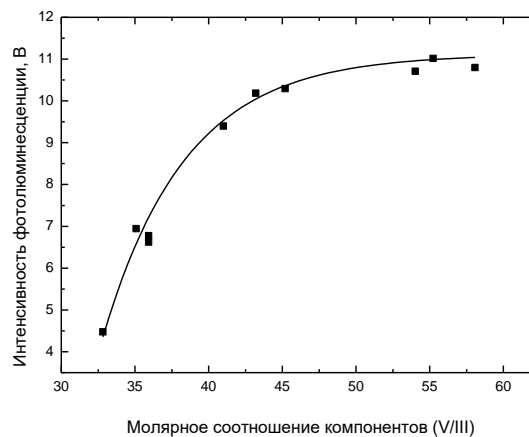
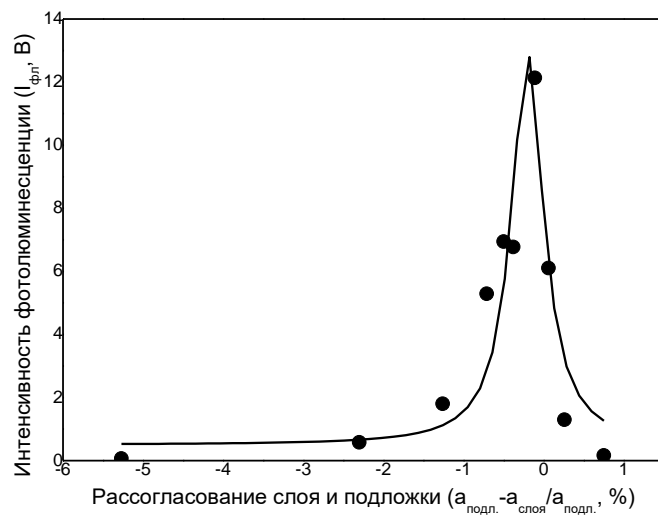
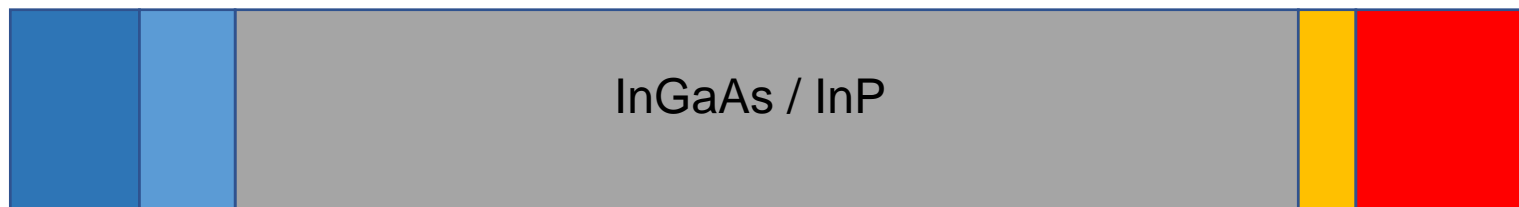
Внедрение фотонного кристалла улучшает угловую расходимость лазерного диода.

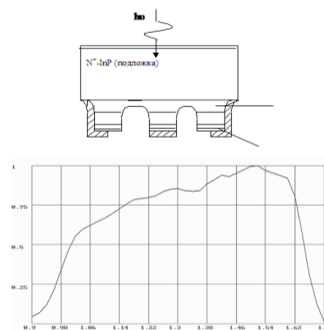
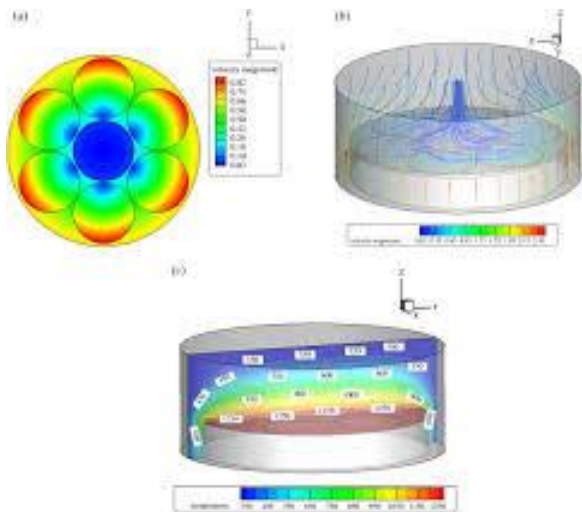


Лазерные диоды с одномерным фотонным кристаллом



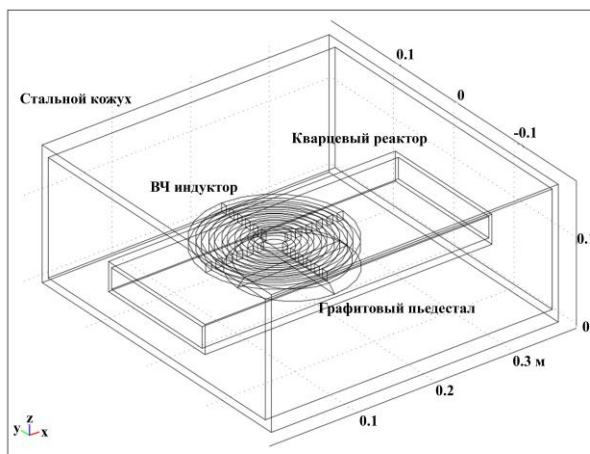
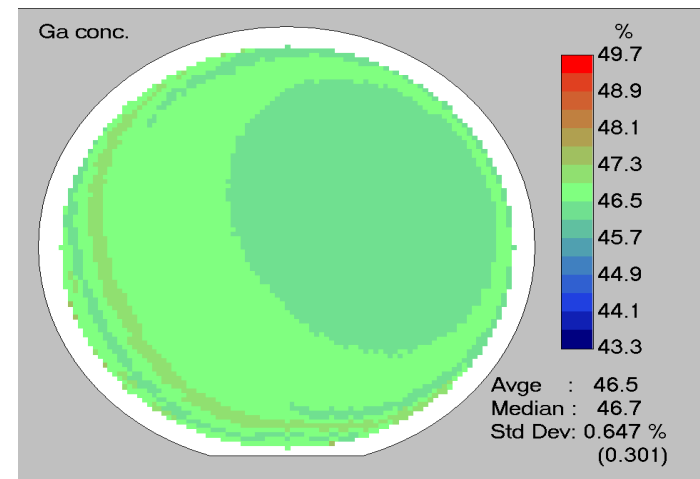
Ватт-амперная характеристика одномодовых лазерных диодов с одномерным фотонным кристаллом в волноводе в непрерывном режиме генерации ($\lambda=1550$ нм)





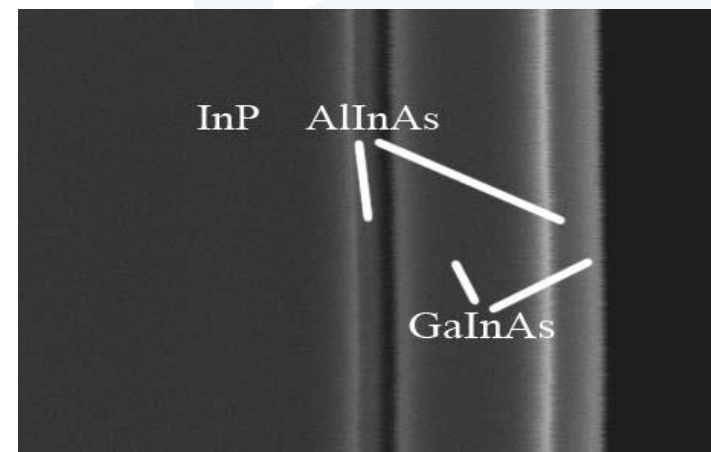
pin-InGaAs/InP

а структура б электрическое поле

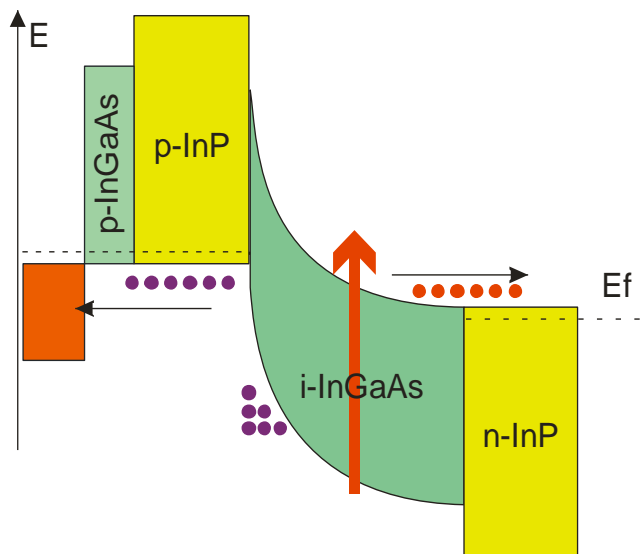


p+	1	Контактный слой p+-InGaAs	0,02 мкм	
	2	База p+-InP	0,5 мкм	
i	3	переходная область нелегир. InGaAlAs	0,1 мкм	
	4	область поглощения излучения нелегиров. InGaAs	2,5 мкм	
p	5	переходная область нелегиров. InGaAlAs	0,1 мкм	
	6	область градиента поля p-Al In As	0,1 мкм	
i	7	область умножения нелегиров. Al In As	0,2 мкм	
	8	область градиента поля n-Al In As	0,2 мкм	
n+	9	буфер n+-InP	0,5 мкм	
	10	подложка n+-InP (100)		

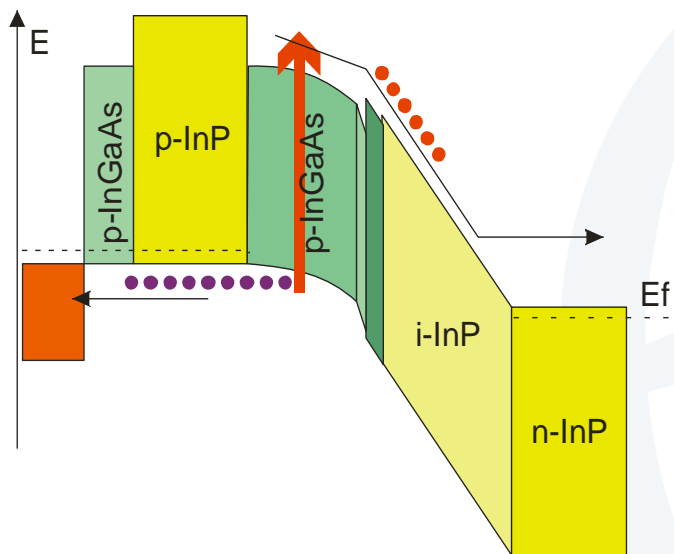
ЛФД InGaAs/AlInAs



«Однозарядный» p-i-n-фотодиод (Uni-Travelling-Carrier photodiode, UTC)

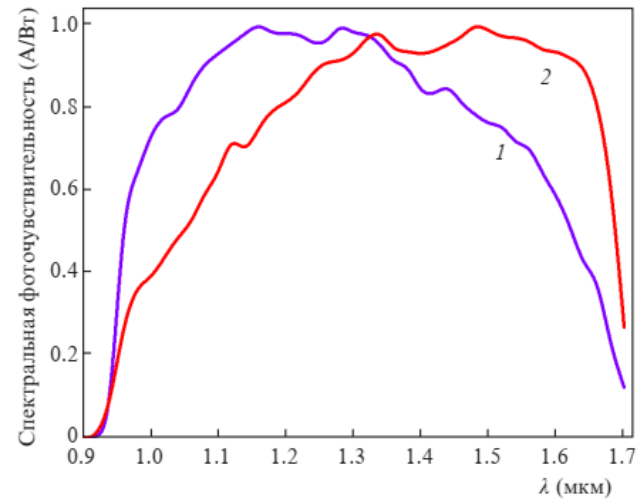
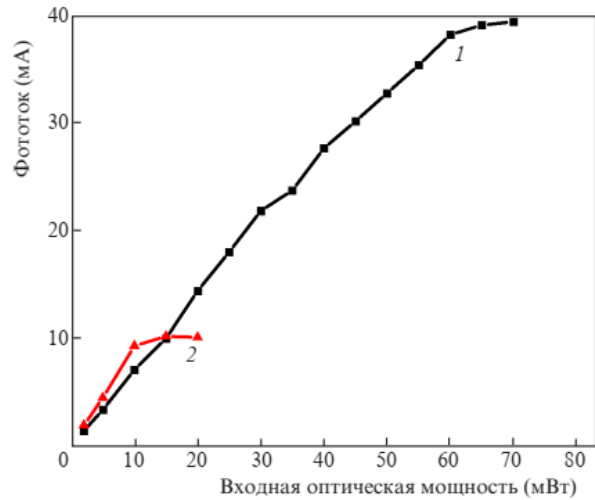
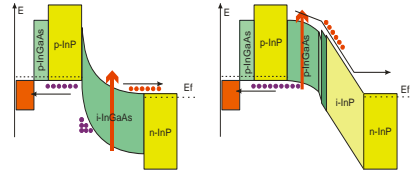


p-i-n-фотодиод



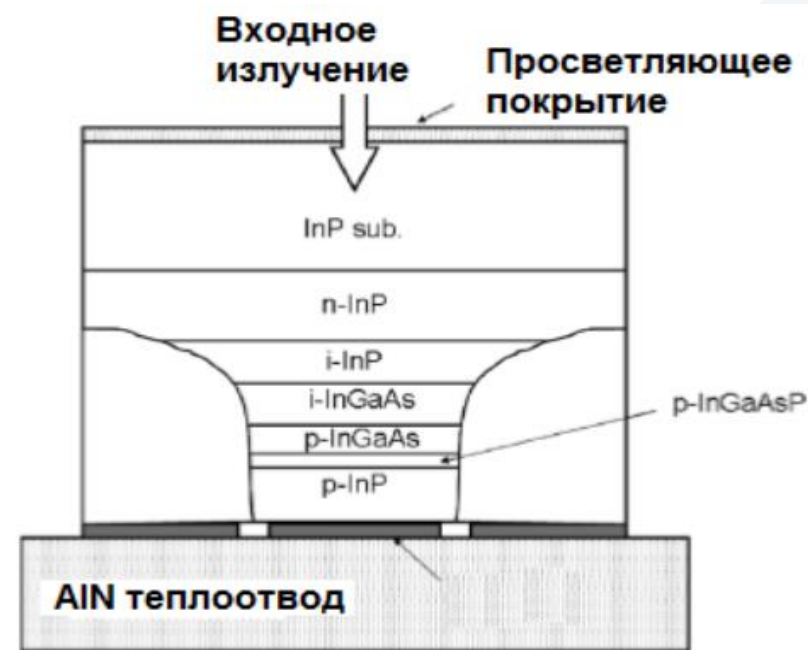
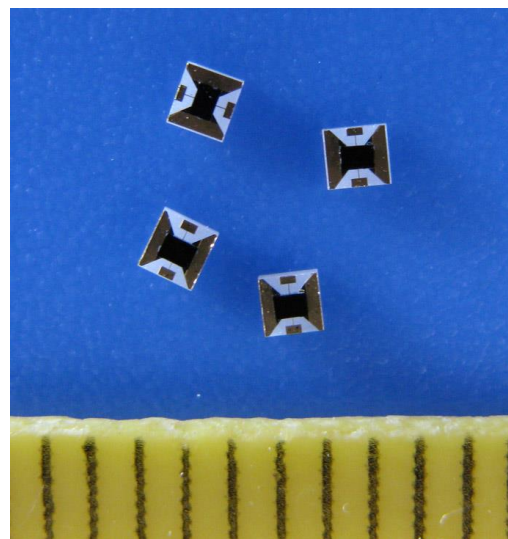
UTC p-i-n-фотодиод

Мощные фотодиоды на $\lambda=900-1700$ нм

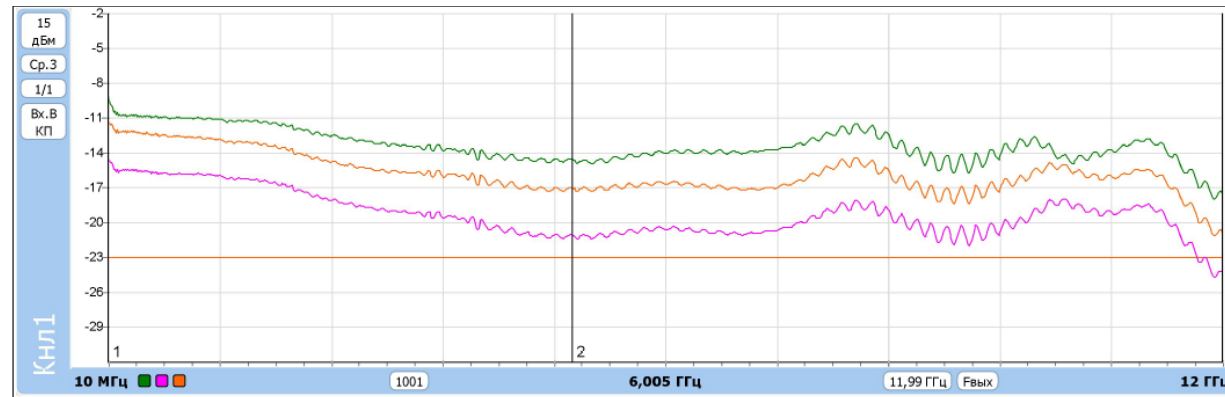


Ток насыщения 30-40 мА (для р-і-п-фотодиода типичный уровень ~10 мА)
 $U = 2-5$ В (для р-і-п-фотодиода типичный уровень 15-20 В)

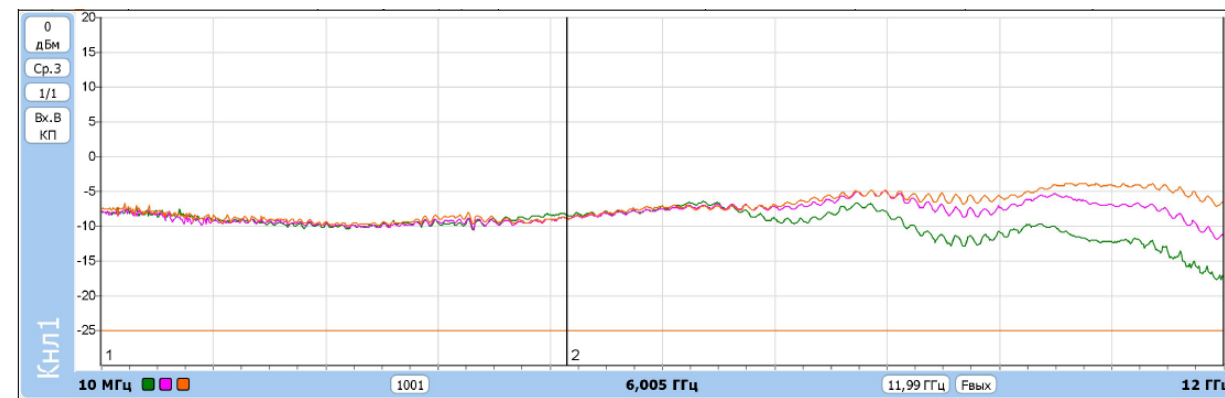
Активный элемент фотодиода, монтаж типа «flip-chip»



АЧХ приемного модуля
ПрОМ-17 при различной
входной мощности:
13 мВт, 25 мВт, 40 мВт

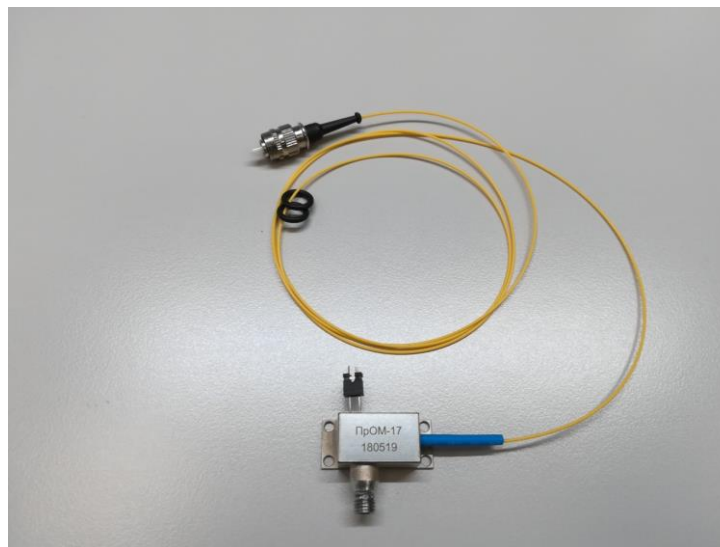


АЧХ приемного модуля
ПрОМ-17 при рабочем
напряжении 4В, 5В, 9В
и $P_{вх}=50$ мВт

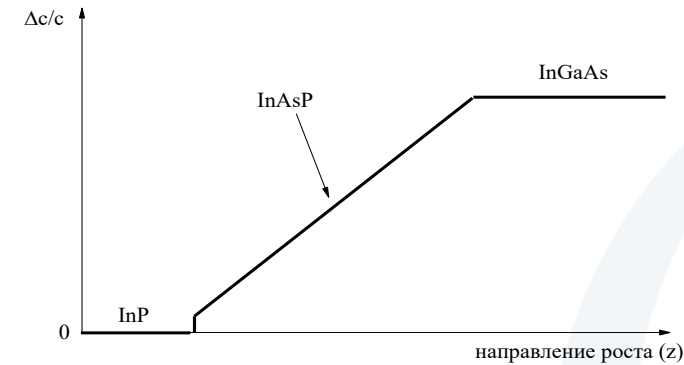
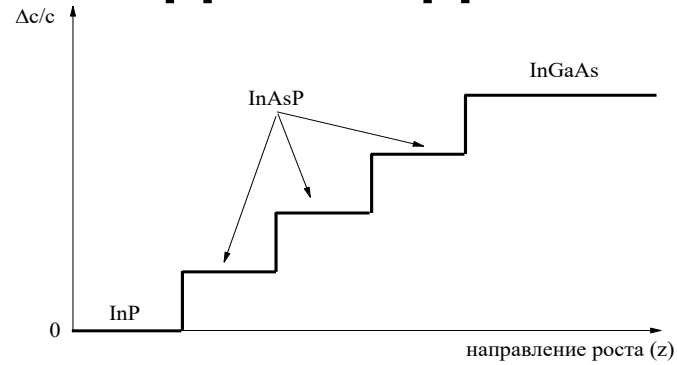


Волоконно-оптический приемный модуль для широкополосных систем передачи СВЧ-диапазона

Наименование параметра, единица измерения	Обозначение параметра	Значение параметра	Примечание
Коэффициент передачи ПОМ и ПрОМ, дБ, не менее	Kп	минус 32	F = 5 ГГц
Длина волны принимаемого излучения, нм	λ	1550	± 50
Диапазон частот модуляции, ГГц	fм	0,1–12,0	
Спектральная чувствительность, А/Вт, не менее	S λ	0,7	$\lambda=1550$ нм
Выходной фототок при 1дБ компрессии, мА, не менее	I _{вых}	26	$\lambda=1550$ нм

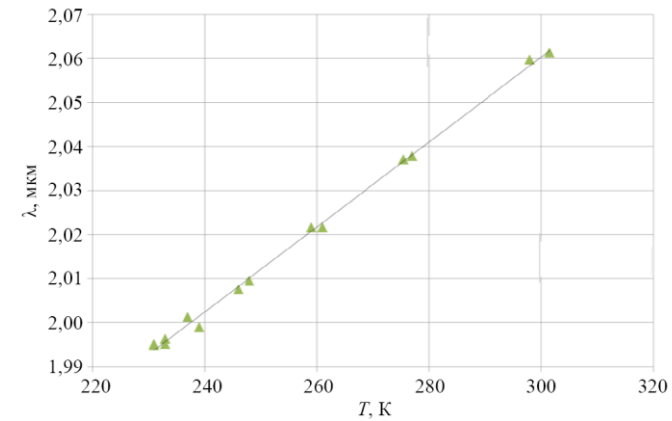
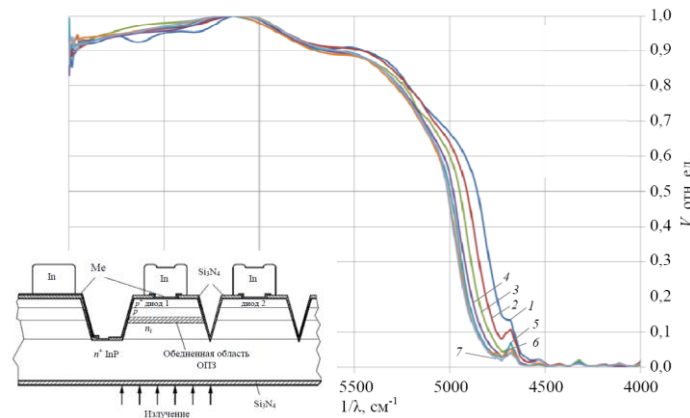


Сдвиг в длинноволновую область



Ступенчатый буфер

Градиентный буфер



InGaAs/InAsP

InGaAs/InAsP

Спасибо за внимание!

Ждем Вас для решения современных научных и производственных задач!



Ладугин Максим Анатольевич

maximladugin@mail.ru