

Фотодетекторы в средней ИК- области спектра

Ю.П.Яковлев

План доклада

«Матери и отцы» создатели полупроводников $A^{III}B^V$

Мотивация работы

Основные параметры p-i-n фотодиодов

Полупроводниковые материалы для фотодиодов

P-i-n фотодиоды на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb для спектрального диапазона 1.5-2.4 мкм

P-i-n фотодиоды на основе гетероструктур InAs/InAsSbP для спектрального диапазона 1.5-3.8 мкм

P-i-n фотодиоды на основе гетероструктур InAs/InAsSb/InAsSbP для спектрального диапазона 1.5-4.9 мкм

Повышение квантовой эффективности фотодиодов на основе гетероструктур InAs/InAsSb/InAsSbP для спектрального диапазона 1.5-4.9 мкм

«Сверхбыстродействующие p-i-n фотодиоды на основе GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb для спектрального диапазона 1.6 – 2.4 мкм

Применение p-i-n фотодиодов

Заключение



Основоположники АЗВ5



Рис. 1

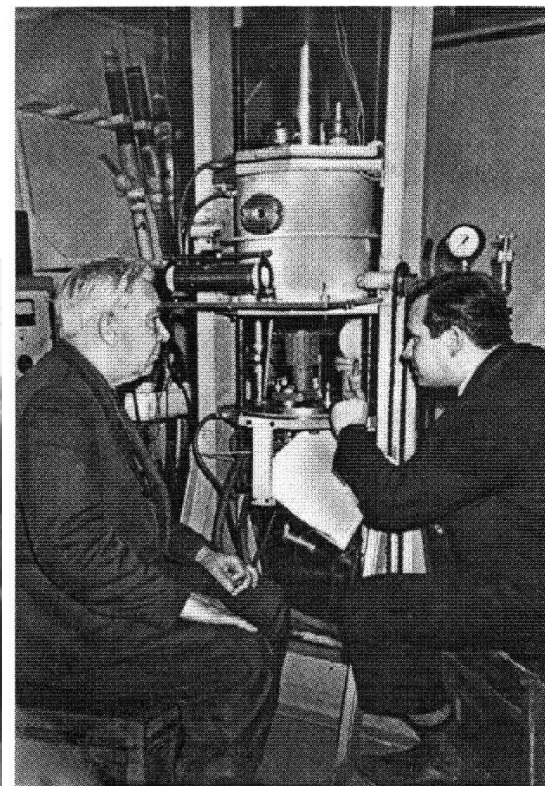
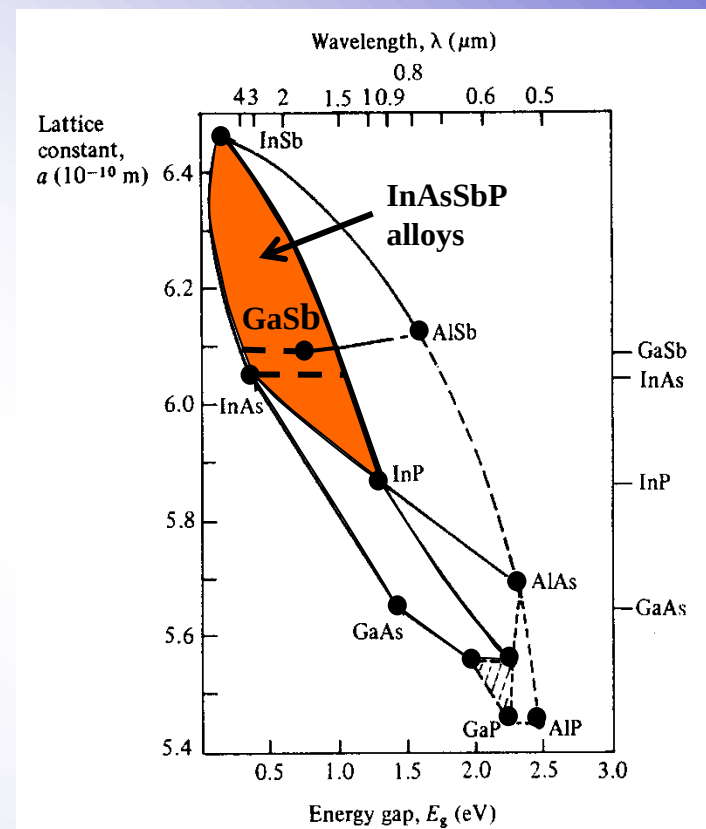
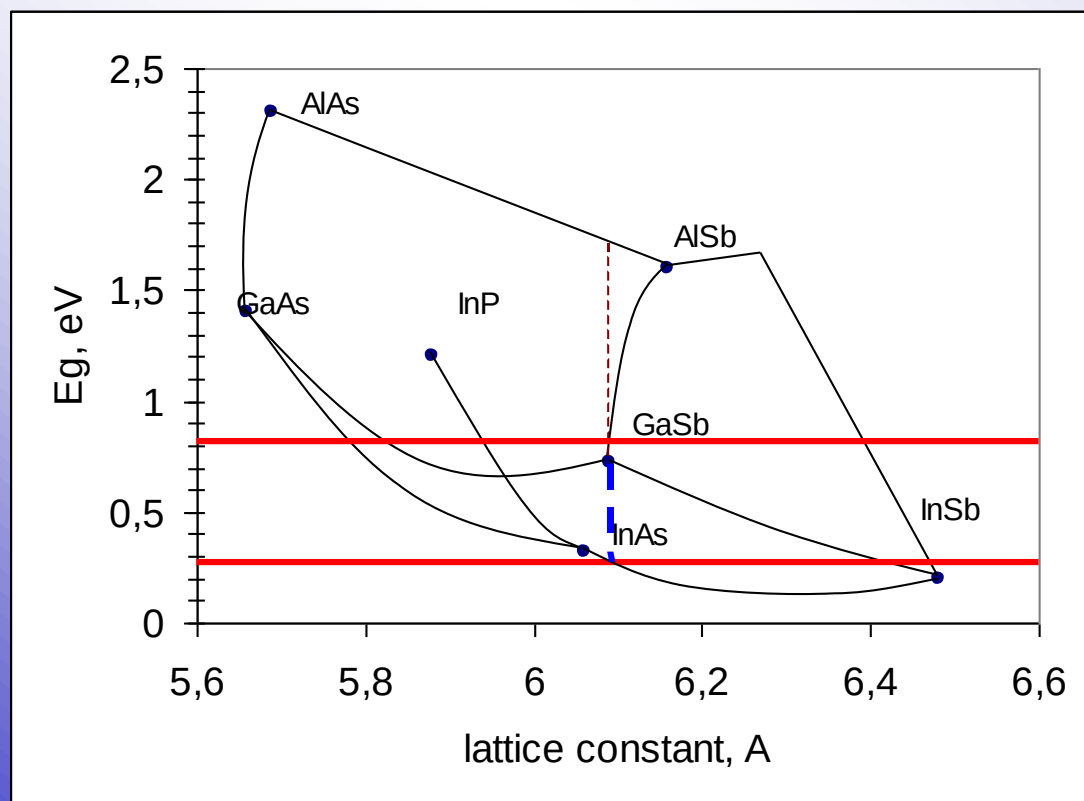


Рис. 4

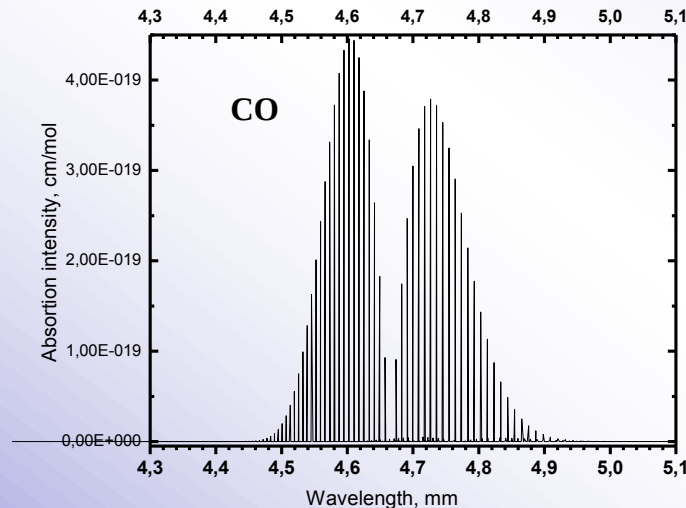
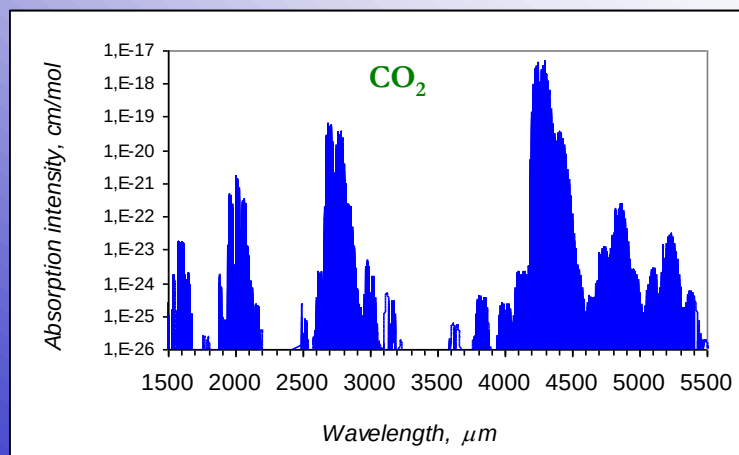
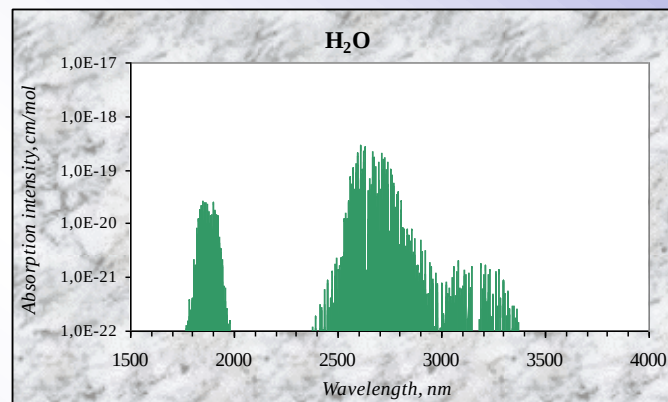
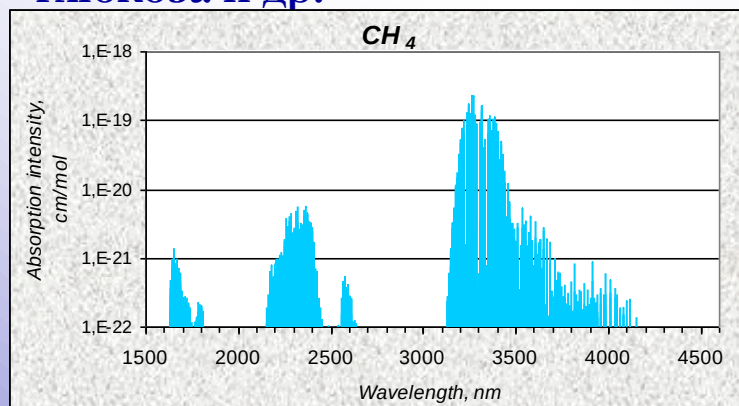
Полупроводниковые материалы для фотодиодов средней ИК-области спектра



Why Mid infrared ???

Полосы поглощения газов в спектральном диапазоне 1.6-5.0 мкм

В средней инфракрасной области спектра **1600-5000 нм** лежат сильные полосы поглощения таких газов и жидкостей как CH_4 , H_2O , CO_2 , CO , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CH_3Cl , OCS , HCl , HOCl , HBr , H_2S , HCN , NH_3 , NO_2 , SO_2 , глюкоза и др.

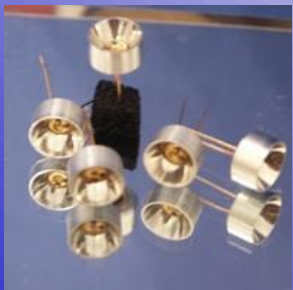
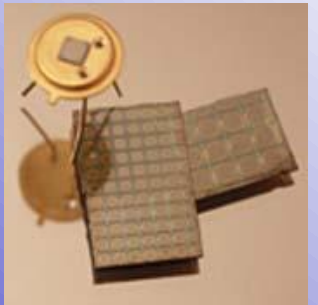
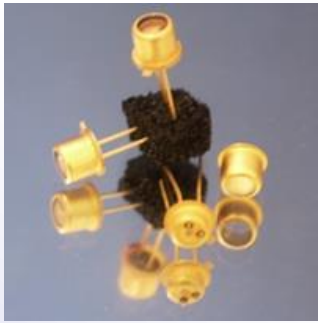






Области применения

- Мониторинг окружающей среды
- Диодно -лазерная спектроскопия газов и молекул
- Системы лазерной дальнометрии и локации в безопасном для органов зрения диапазоне
- Медицинские применения
- Системы передачи информации по открытому атмосферному каналу (the free-space optical link)
- Системы передачи информации по флюоридным волоконным световодам с потерями на уровне 10^{-2} – 10^{-3} дБ/км



Основные параметры $p-i-n$ фотодиодов

I. Квантовая эффективность:

$\eta = N'/N$ N' - число фотоактивных квантов

$N' = (1-R)N$ N - число падающих квантов

$$I_\phi = qN' = q\eta N = (q\eta\lambda)/(hc)$$

II. Токовая монохроматическая чувствительность

$$S_0 = I_\phi/P = (\eta q\lambda)/(hc)$$

$$S = \eta\lambda/1.24 \quad \text{А/Вт}$$

III. Порог чувствительности и удельной обнаружительной способности D^*

$$\Phi_\Pi = \Phi_1 \cdot I_\Pi / (I_c \sqrt{\nu f}) \quad \Phi_1 - \text{поток излучения}$$

$$D^* = I_c / I_\Pi \cdot (\sqrt{A \epsilon \phi \nu f}) / \Phi_1 \quad \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{см}$$

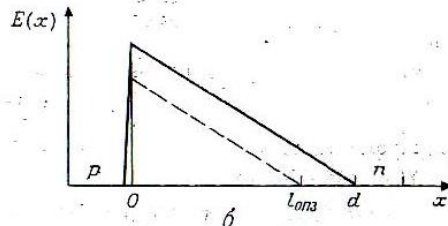
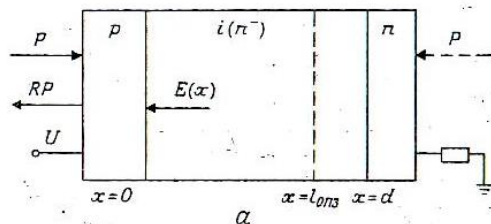
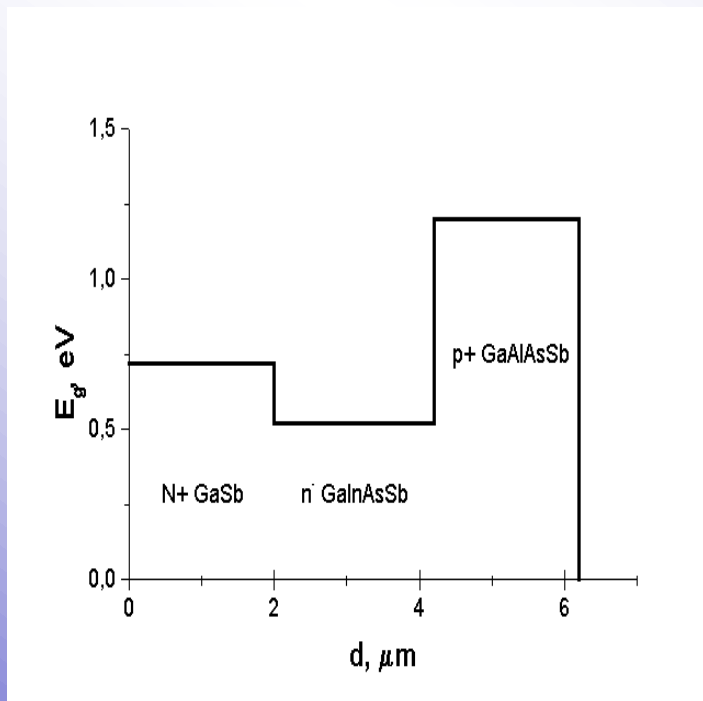
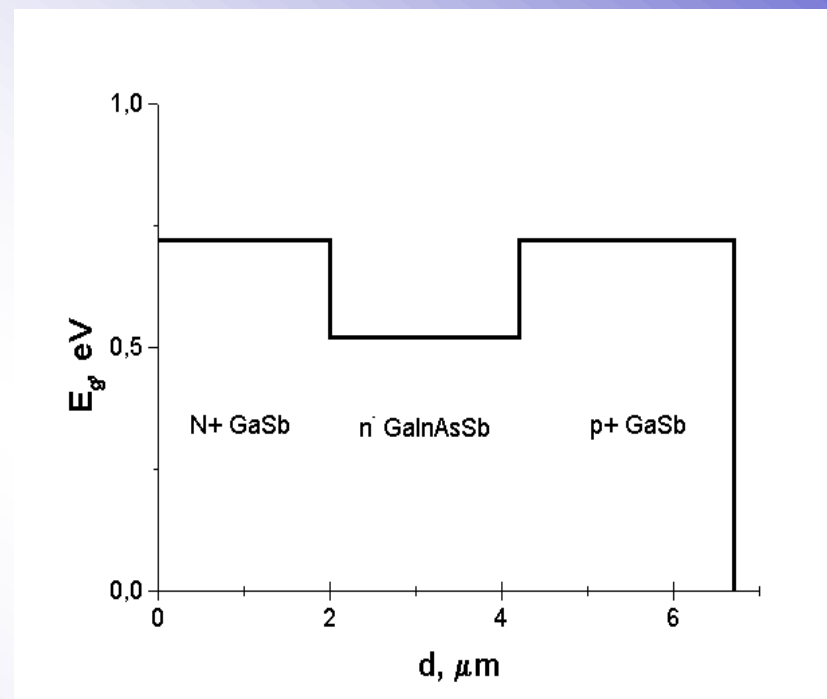


Рис. а — типичная структура $p-i-n$ -фотодиода и б — распределение напряженности электрического поля $E(x)$ в этой структуре.

P-i-n фотодиоды на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb для диапазона спектра 1.2-2.4 мкм.

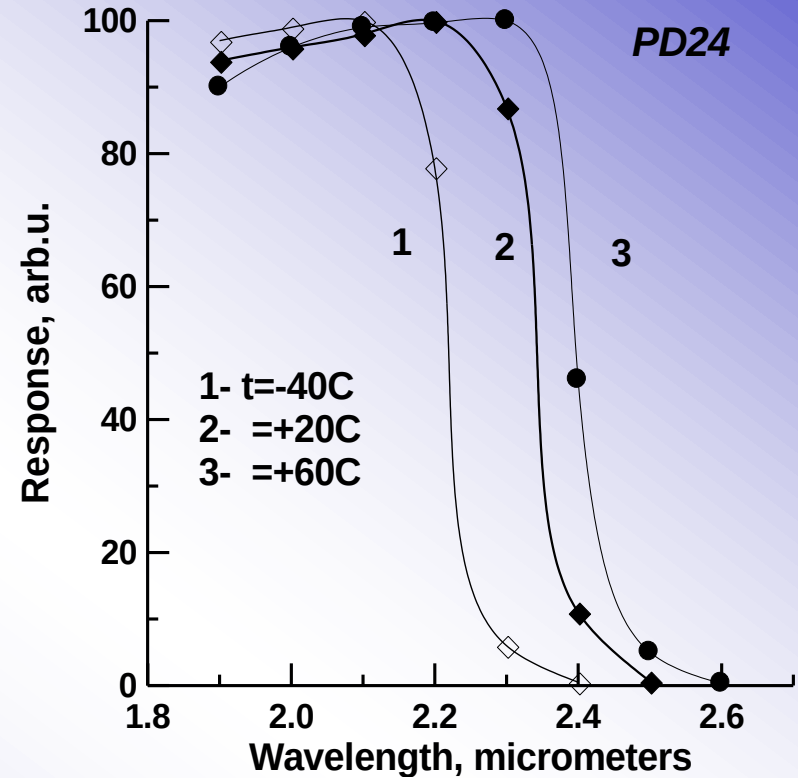
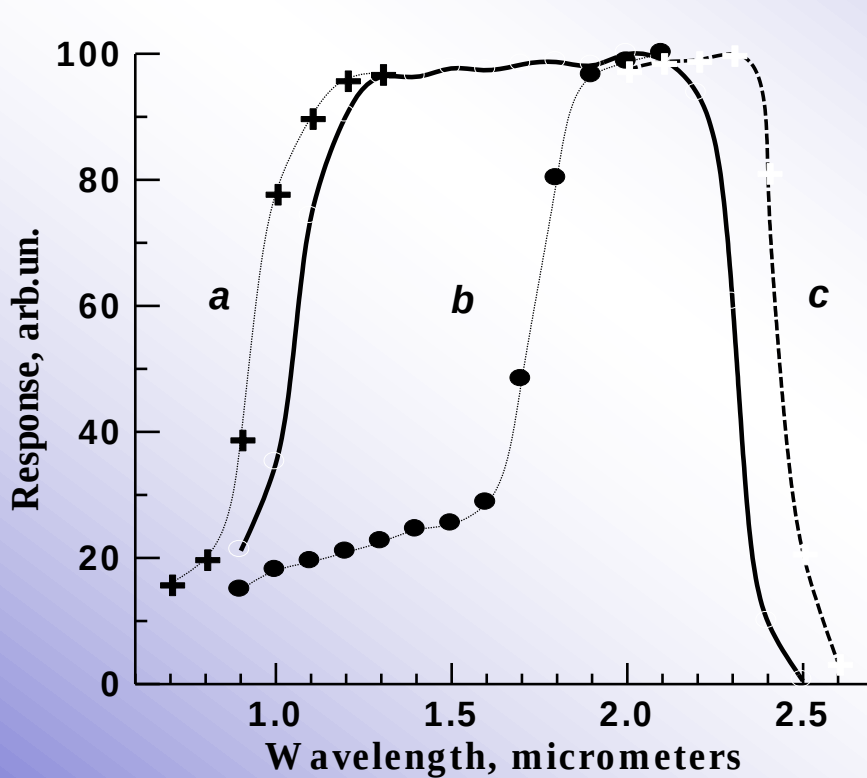


GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb



GaSb/GaInAsSb/GaSb

Гетерофотодиоды с активной областью GaInAsSb. Спектральное распределение фоточувствительности.



Сплошная линия – $\lambda_{th}=2.4 \mu m$;

a) $\lambda_{cut}=0.9 \mu m$; **b)** $\lambda_{cut}=1.6 \mu m$;

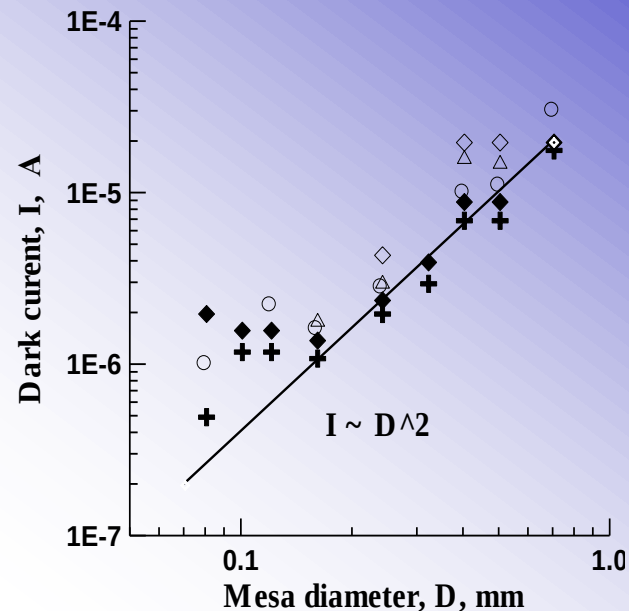
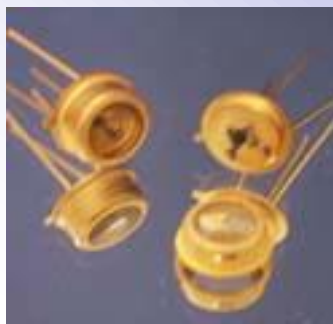
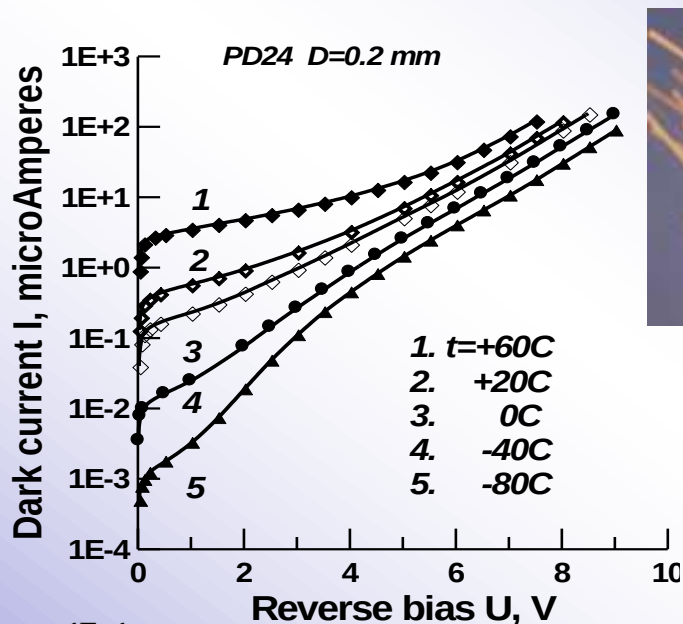
c) $\lambda_{th}=2.55 \mu m$

$S_{\lambda}=0.9-1.1 A/W$, $\eta=0.6-0.7$

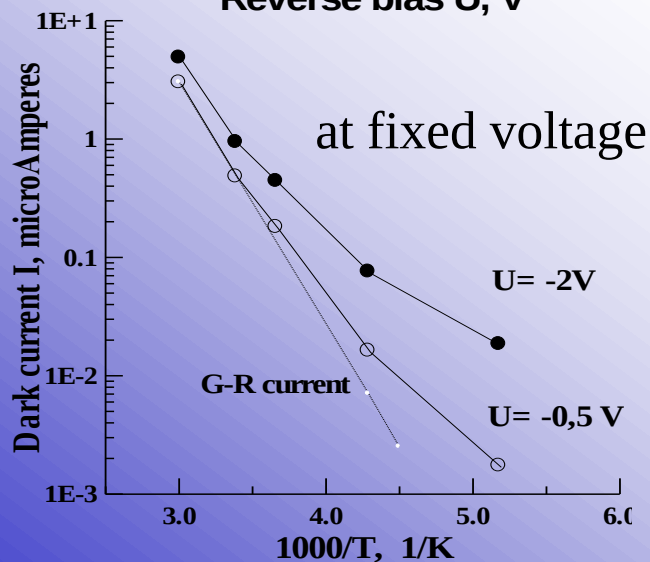
$\Delta E_g/\Delta T= -4.0 \times 10^{-4} eV \times K^{-1}$



ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕМНОВОГО ТОКА GaInAsSb/GaAlAsSb ФОТОДИОДОВ, $\lambda_{th}=2.4\mu m$



Темновой ток как функция диаметра мезы D



$$I \sim T^{3/2} \exp(-E_g/2kT), \quad I_{\Gamma-P} = qn_i W A / \tau_{\text{эфф}}$$

$$n_i = 4 \times 10^{14} \text{ см}^{-3} \quad \text{и} \quad W \sim 1 \text{ мкм}, \quad \tau_{\text{эфф}} = (1.8-9) \times 10^{-7} \text{ с}$$

$$U = -(0,2-1,0) \text{ В.} \quad j = 3 \times 10^{-3} \text{ А/см}^2$$

P-i-n фотодиоды на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb для диапазона спектра 1.2-2.4 мкм.

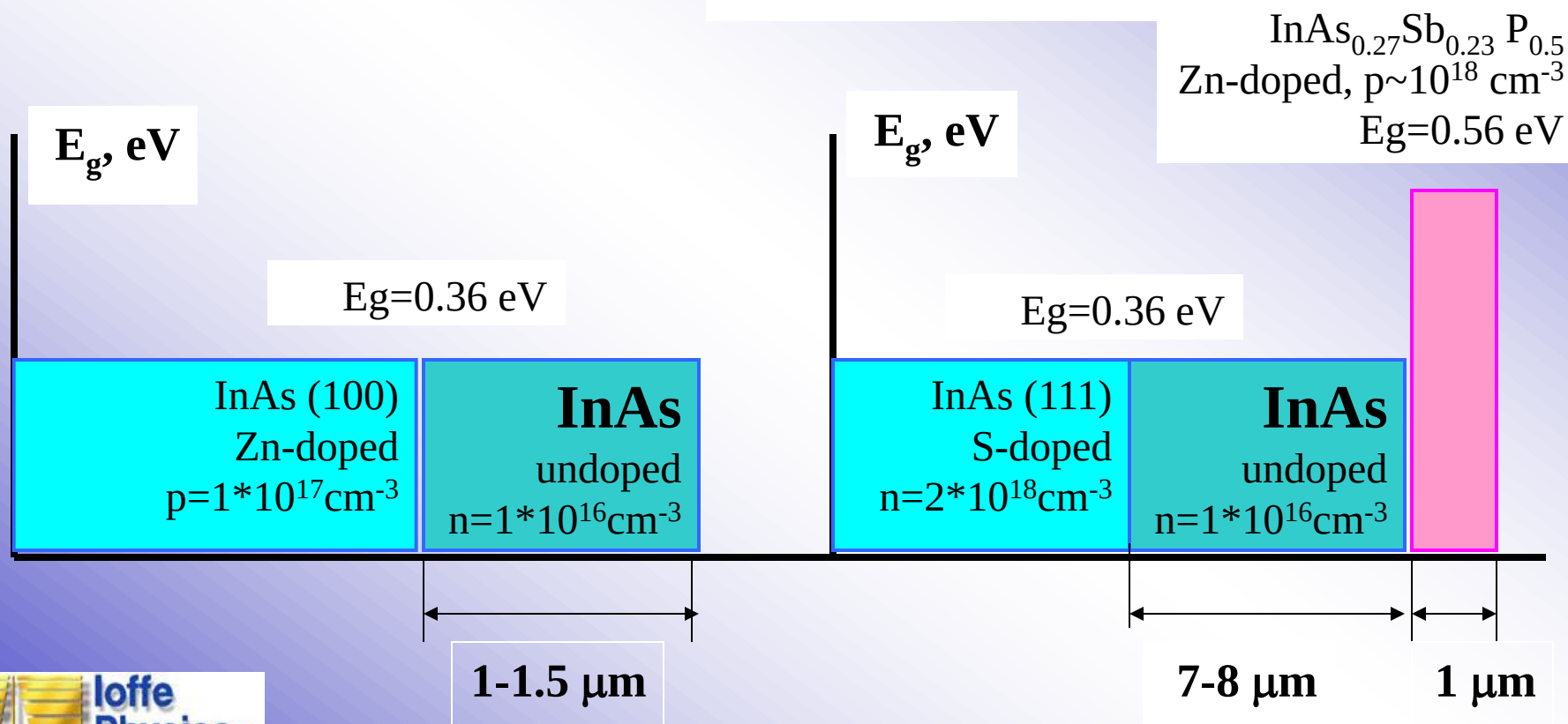
Электрические и фотоэлектрические параметры

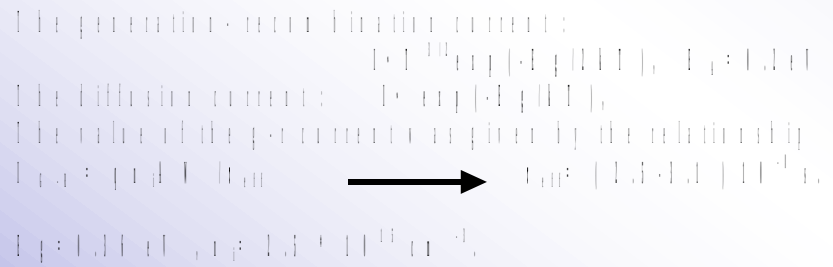
Наименование параметра	Обозначение	Условие $T \approx + 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	не менее	норма	не более	Единица измерения
Длинноволновая граница	λ	на уровне 10%	2.37	2.40	2.42	мкм
Спектральный диапазон	λ_p	на уровне 90%	1.95 - 2.20			мкм
Токовая монохроматическая чувствительность	S	при λ_p	0.9	1.0	1.1	А/Вт
Обнаружительная способность	D^*	при λ_p	$2 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^{10}$	$7 \cdot 10^{10}$	$\text{Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$
Темновой ток	I_d	$V = - 0.2\text{ В}$	0.7	5.0	7.0	мкА
		$V = - 0.5\text{ В}$	1.5	8.0	12.0	
		$V = - 1.0\text{ В}$	2.5	10.0	15.0	
Электрическая ёмкость	C	$V = 0\text{ В}$ $f = 1\text{ МГц}$	20	25	80	пФ
Время нарастания	t_r	$V = 0\text{ В}$ $R_L = 50\text{ Ом}$	2	3	10	нс
Время спада	t_f					
Дифференциальное сопротивление	R_0	$V \approx \pm 10\text{ мВ}$	10	30	100	кОм
Эквивалентная мощность шума	NEP	при λ_p	-	-	-	$\text{Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$

Р-і-п фотодиоды на основе гетероструктур InAs/InAsSbP для диапазона 2.0-3.8 мкм.

1. p- InAs- n-InAs

2. n^+ -InAs- n^0 -InAs- P^+ - $\text{InAs}_{0.27}\text{Sb}_{0.23}\text{P}_{0.5}$





Р-і-п фотодиоды на основе гетероструктур InAs/InAsSbP для диапазона 2.0-3.8 мкм.

Электрические и фотоэлектрические параметры

Наименование параметра	Обозначение	Условие $T \approx +20^\circ\text{C}$	не менее	норма	не более	Единица измерения
Длинноволновая граница	λ	на уровне 10%	3.60	3.80	3.85	мкм
Спектральный диапазон	λ_p	на уровне 90%	2.55 - 3.45			мкм
Токовая монохроматическая чувствительность	S	при λ_p	1.0	1.1	1.2	А/Вт
Обнаружительная способность	D^*	при λ_p	$3 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^9$	$6 \cdot 10^9$	$\text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$
Темновой ток	I_d	$V = -0.2 \text{ В}$	150	250	350	мкА
		$V = -0.4 \text{ В}$	200	400	500	
		$V = -0.6 \text{ В}$	300	600	800	
Электрическая ёмкость	C	$V = 0 \text{ В}$ $f = 1 \text{ МГц}$	100	400	1000	пФ
Время нарастания	t_r	$V = 0 \text{ В}, R_L = 50 \text{ Ом}$ $V = -0.5 \text{ В}$	20 / 10	50 / 10	120 / 20	нс
Время спада	t_f					
Дифференциальное сопротивление	R_0	$V \approx \pm 10 \text{ мВ}$	100	300	1200	Ом
Эквивалентная мощность шума	NEP	при λ_p	-	-	-	$\text{Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$

Фотодиоды на основе гетероструктур InAs/InAsSbP/InAsSb/InAsSbP для спектрального диапазона 2.5 – 4.9 мкм

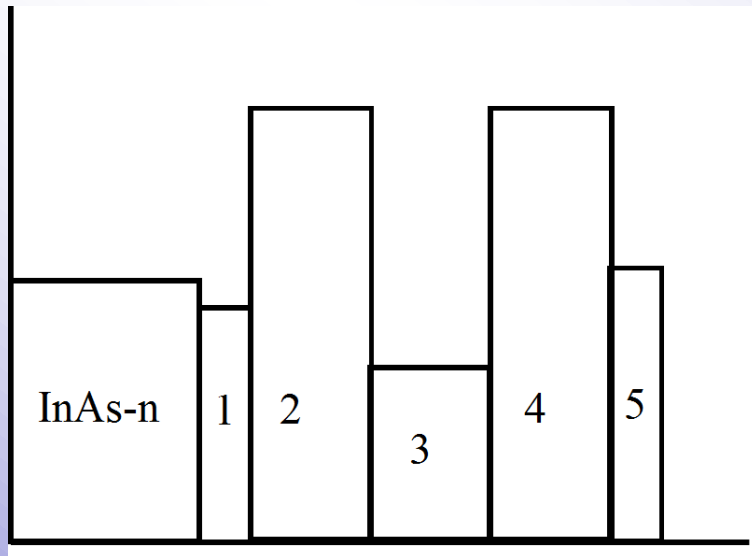


Fig.1. Energy diagram of photodiode heterostructure :

- 1 – n – InAs_{0.95}Sb_{0.05}, $h = 5 \mu\text{m}$,
- 2 – N – InAsSbP_{0.30}, $h = 2.5 \mu\text{m}$,
- 3 – n – InAs_{0.88}Sb_{0.12}, $h = 3.5 \mu\text{m}$,
- 4 – P – InAsSbP_{0.30}, $h = 2.5 \mu\text{m}$,
- 5 – P⁺ – InAs, $h = 0.3 \mu\text{m}$.

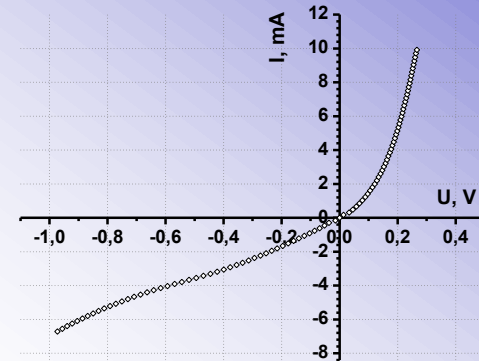


Fig.2. I-U characteristic

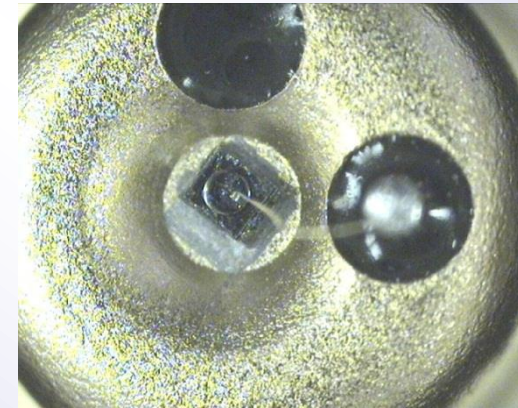
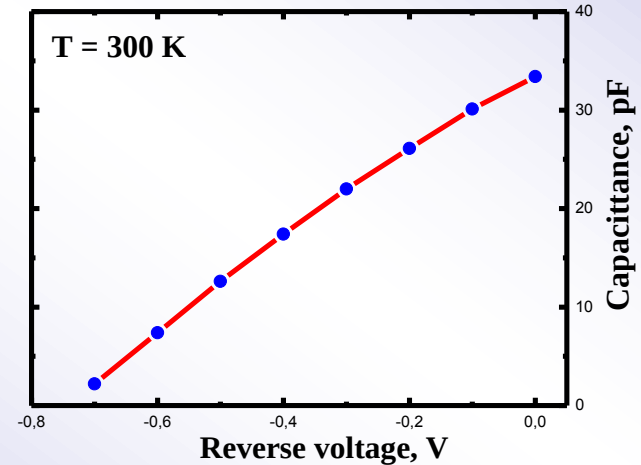
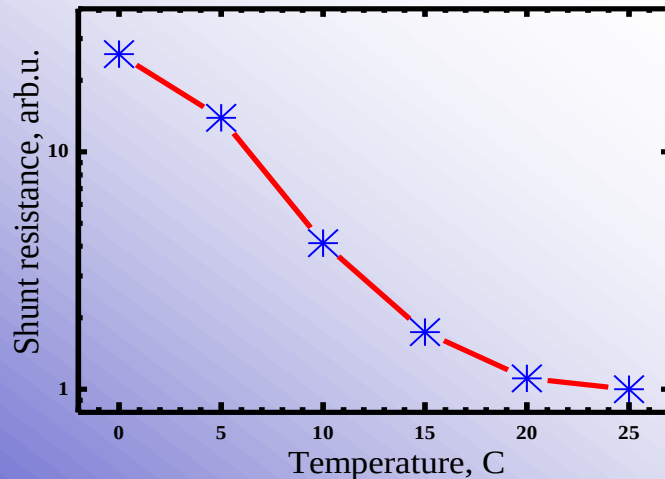
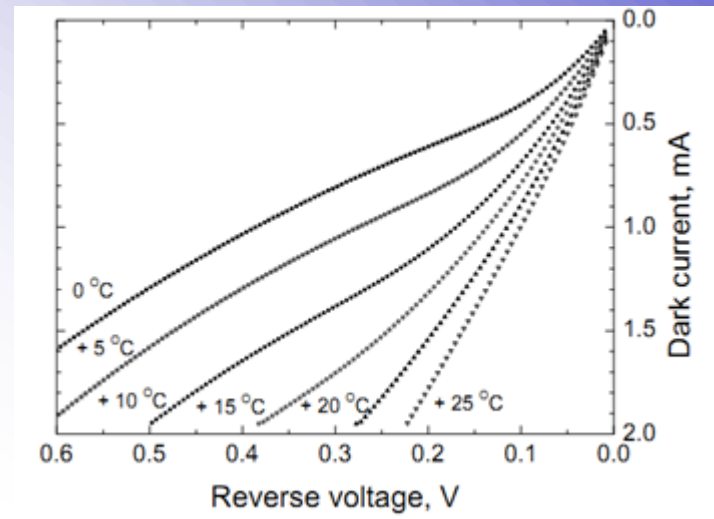
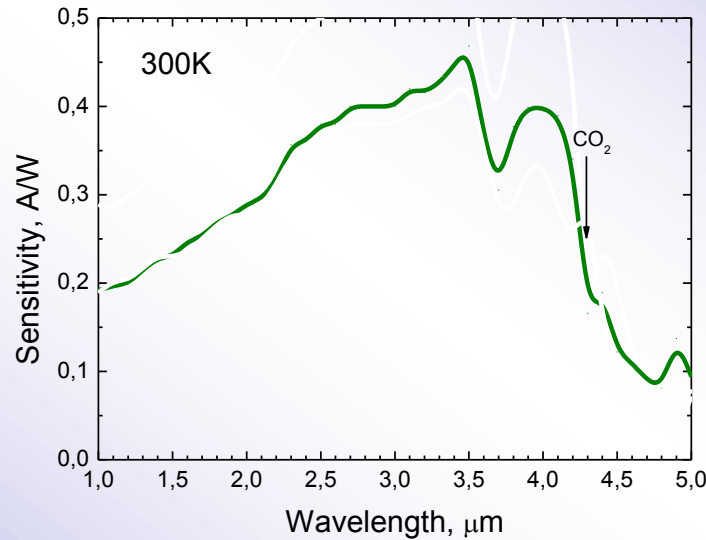


Fig.3. Microphoto of 4.8 photodiode
(diameter 300 μm)

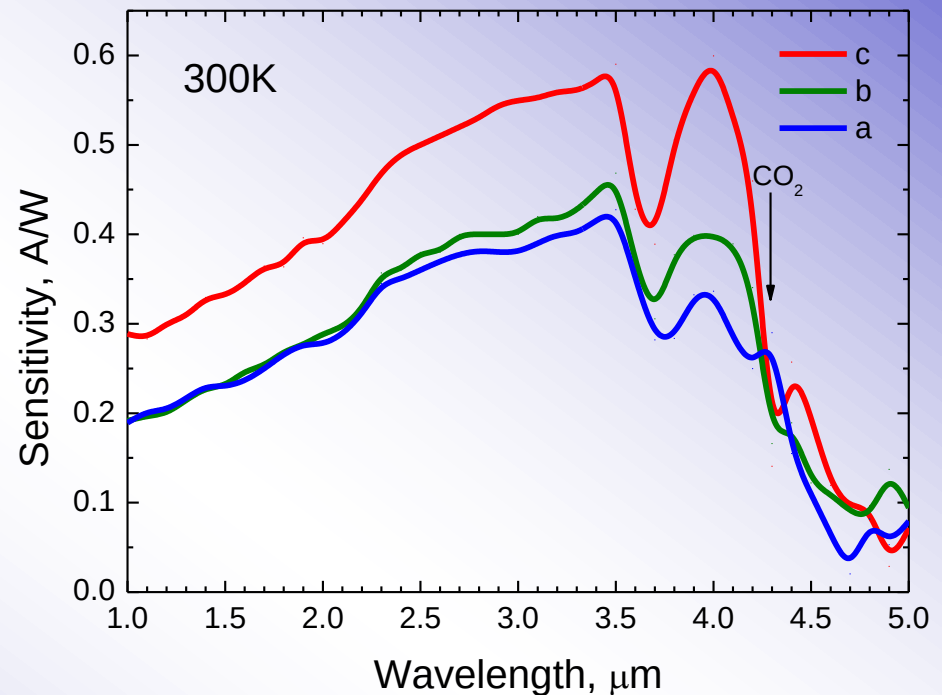
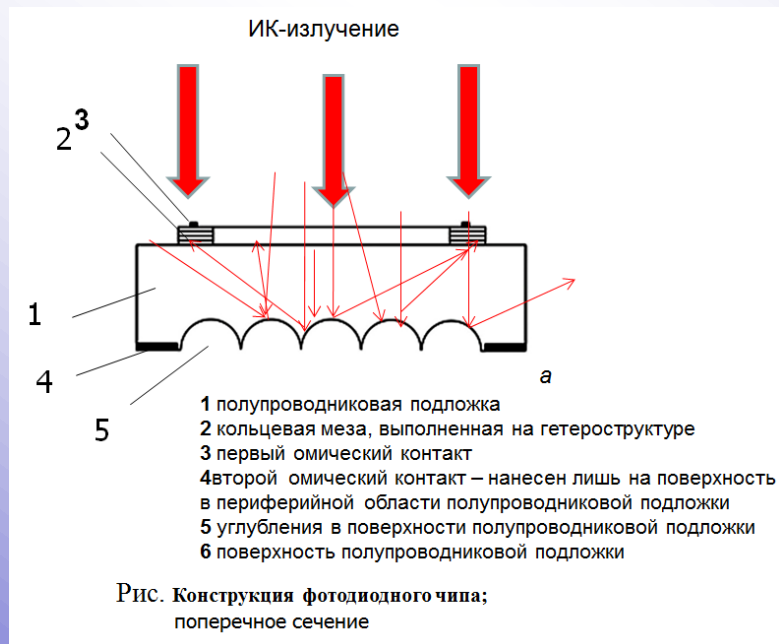
Фотодиоды на основе гетероструктур

InAs/InAsSbP/InAsSb/InAsSbP для спектрального диапазона 2.5 – 4.9 мкм



$\Delta\lambda = 2.5-4.8 \mu m$, $S_\lambda = 0.2-0.4 A/W$, $\eta = 0.15-0.2$,
 $D^* = (5-8) \times 10^8 cm^2 \times Hz^{1/2} \times W^{-1}$, $T = 295 K$.

Повышение квантовой эффективности фотодиодов на основе гетероструктур InAs/InAsSbP/InAsSb/InAsSbP для спектрального диапазона 2.5 – 4.9 мкм



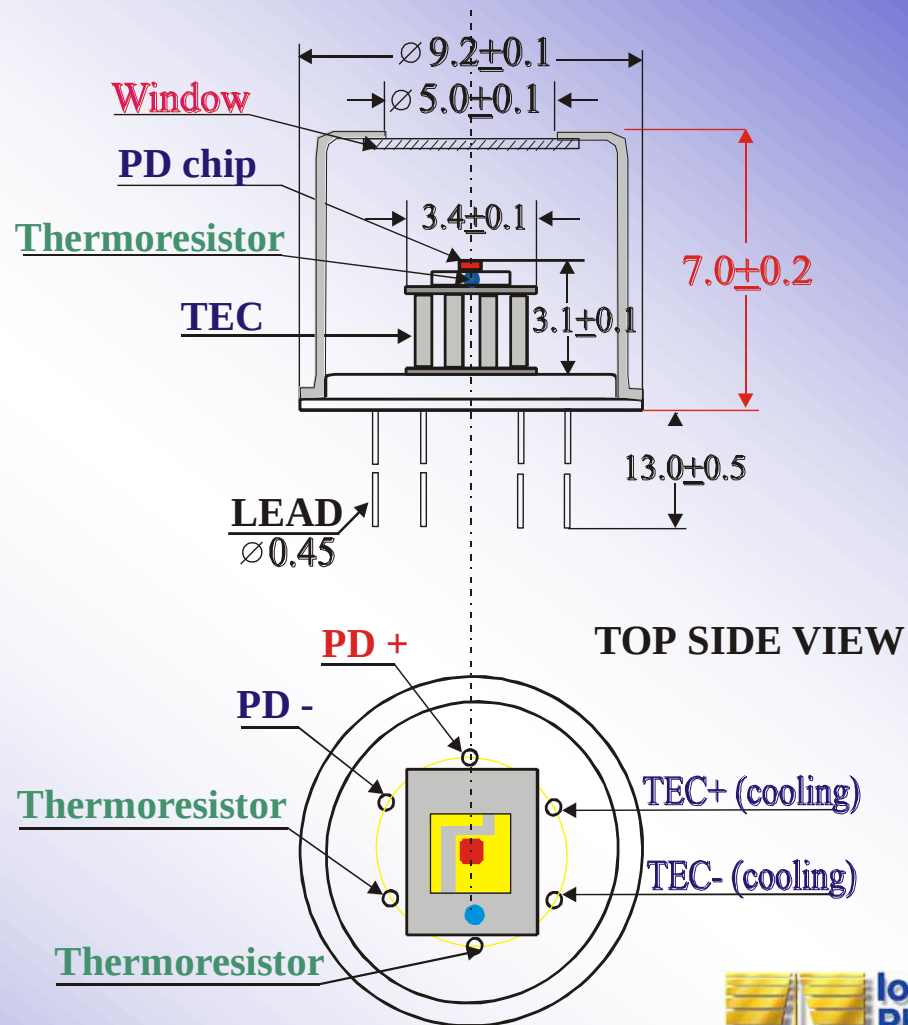
$$S_{\lambda} = 0.3-0.6 \text{ A/W}, \quad \eta = 0.2-0.3, \quad T=295\text{K}.$$

Фотодиоды на основе гетероструктур InAs/InAsSbP/InAsSb/InAsSbP для спектрального диапазона 2.5 – 4.9 мкм

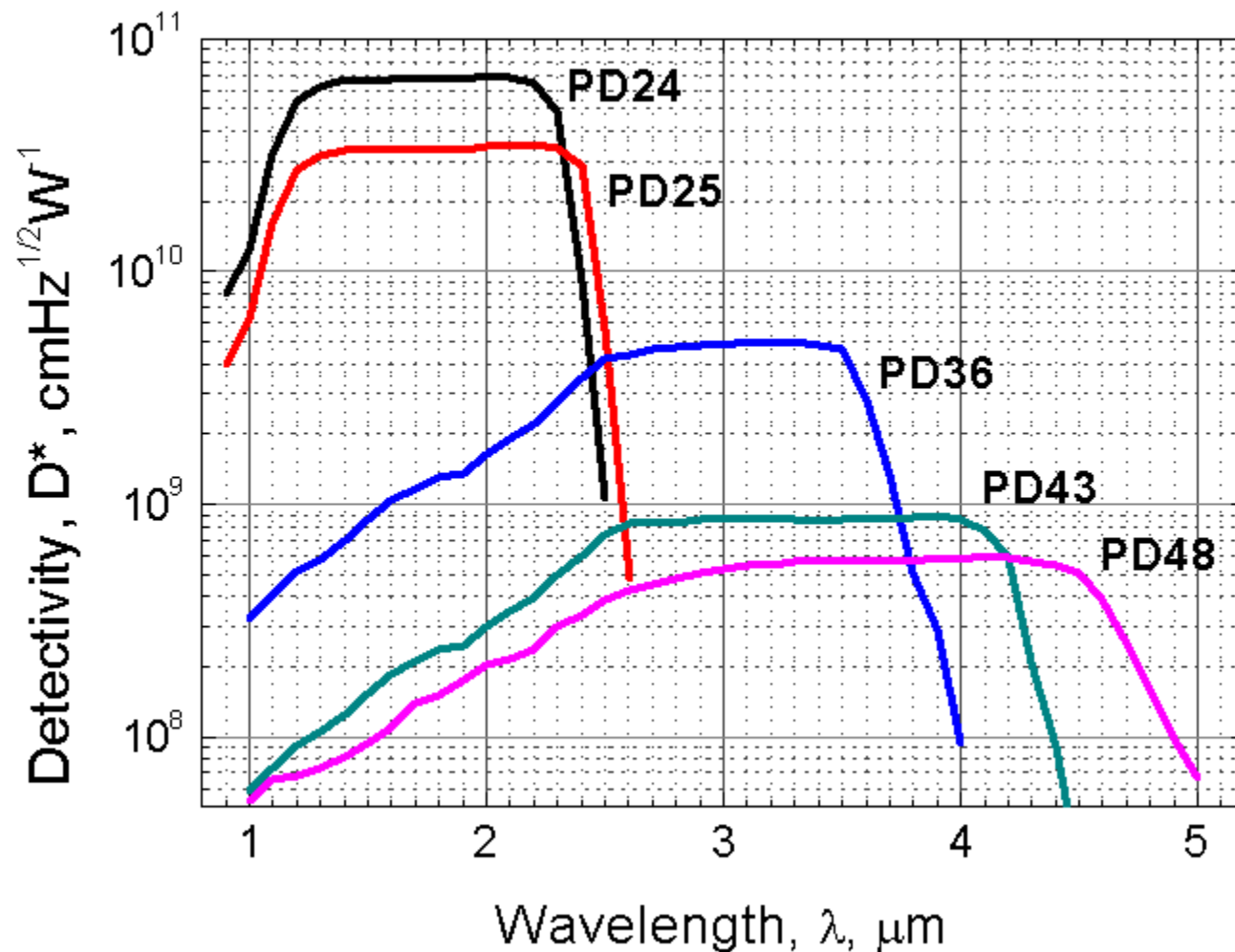
Электрические и фотоэлектрические параметры

Наименование параметра	Обозначение	Условие $T \approx + 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	не менее	норма	не более	Единица измерения
Спектральный диапазон	λ	на уровне 10%	2.5 - 4.9			мкм
	λ_p	на уровне 90%	4.3 - 4.6			мкм
Токовая монохроматическая чувствительность	S	при λ_p	0.6	0.7	0.8	А/Вт
Обнаружительная способность	D^*	при λ_p	$5 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^8$	$8 \cdot 10^8$	$\text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$
Темновой ток	I_d	$V = - 0.1\text{ В}$	0.6	0.9	1.2	мА
Время нарастания	t_r	$V = 0\text{ В}, R_L = 50\text{ Ом}$	≤ 20			нс
Время спада	t_f					
Электрическая ёмкость	C	$V = 0\text{ В}, f = 1\text{ МГц}$	25	30	50	пФ
Дифференциальное сопротивление	R_0	$V \approx \pm 10\text{ мВ}$	100	150 - 200	500	Ом
Эквивалентная мощность шума	NEP	при λ_p	-	-	-	$\text{Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$

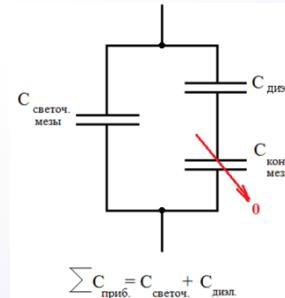
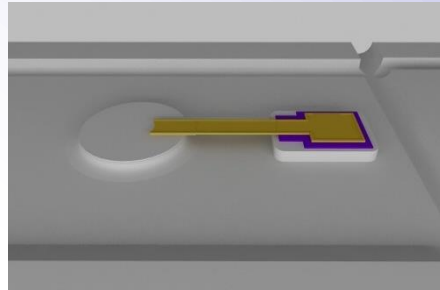
ФОТОДИОДЫ В КОРПУСЕ ТО-5 С ТЕРМОХОЛОДИЛЬНИКОМ



Спектральное распределение обнаружительной способности гетерофотодиодов на основе InAs и GaSb



Разработка конструкции быстродействующего фотоприемника с диаметром фоточувствительной площадки 50 мкм



$$C \sim \frac{S}{d}, \text{ где } S - \text{площадь мезы, а } d - \text{толщина диэлектрика}$$

Диаметр светочувствительной площадки, мкм	S, мкм ²
300	70686
100	7854
50	свetchувствительная меза: 1964
	Свetchувствительная и «контактная» мезы: 6764

Особенности технологии «мостикового» фотодиода:

- Создание двух мез, вместо одной
- Создание на контактной мезе диэлектрического слоя под контактной площадкой
- Создание прочного металлического соединения
- Травление мез с одновременным вытравливанием слоев под «мостиком»

Сверхбыстродействующие р-і-п фотодиоды на основе GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb для спектрального диапазона 1.6-2.4 мкм ($d=50$ мкм)

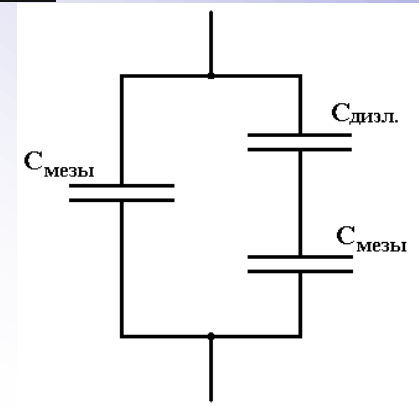
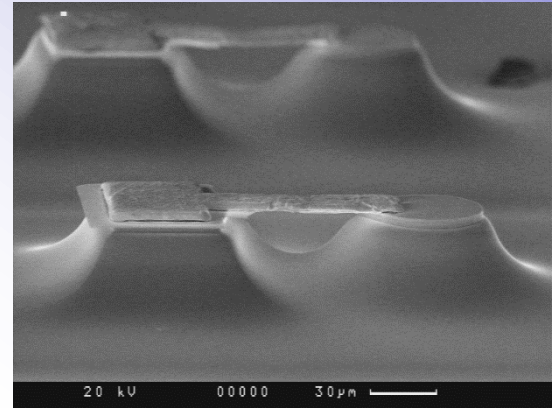
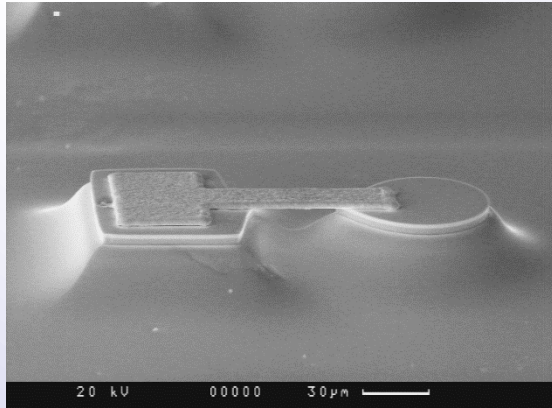
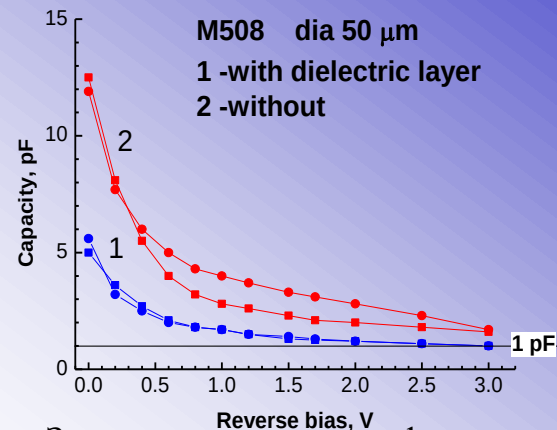
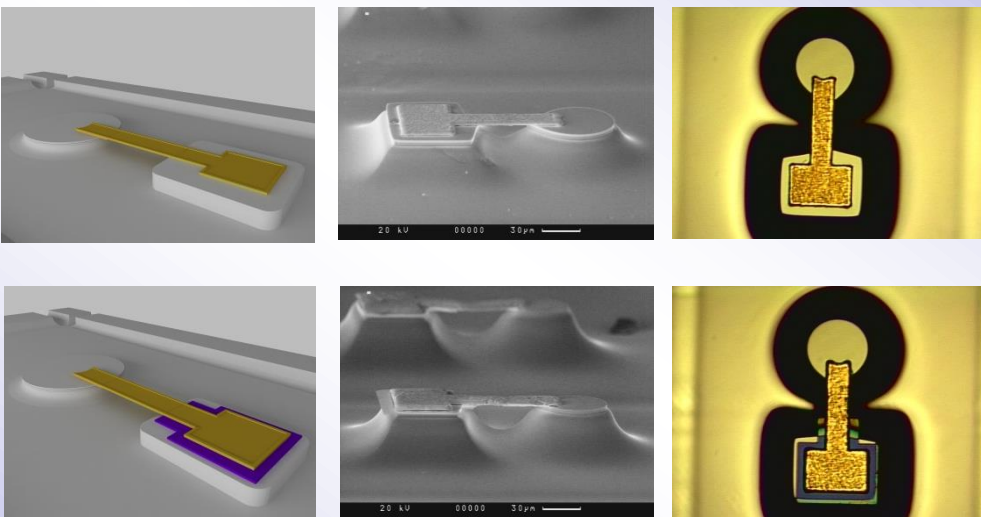


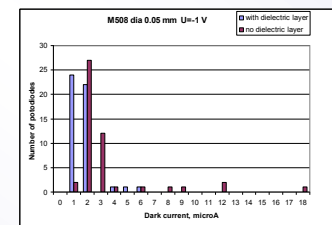
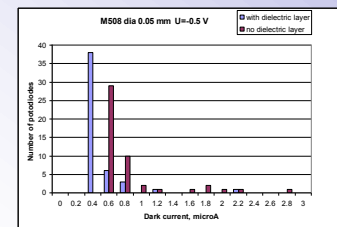
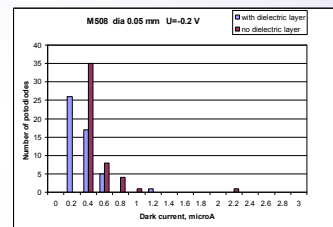
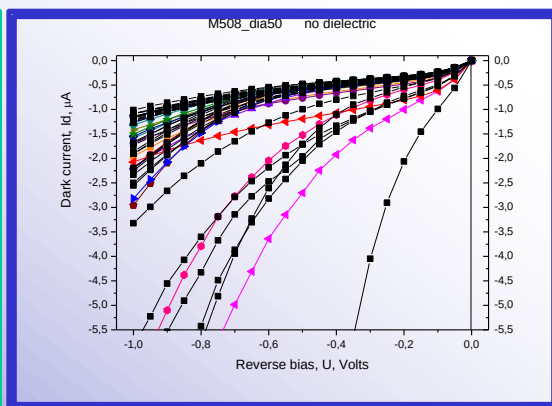
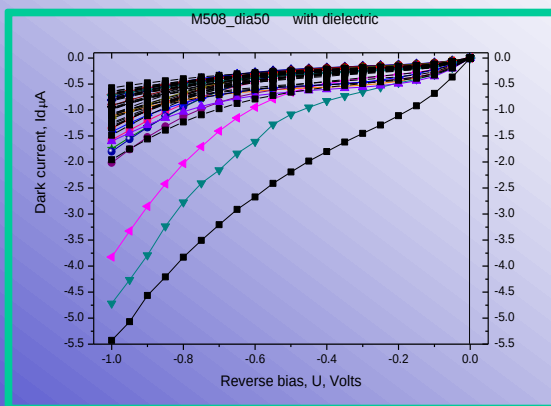
Рис. Р-і-п-фотоприемники созданные по «мостиковой» технологии: слева - без диэлектрической изоляции, справа - с диэлектрической изоляцией

Сравнение характеристик фотоприемников с «мостиковым» контактом с диэлектрической площадкой и без нее



Зависимости емкости фотоприемников двух типов от обратного напряжения (Т комнатная).

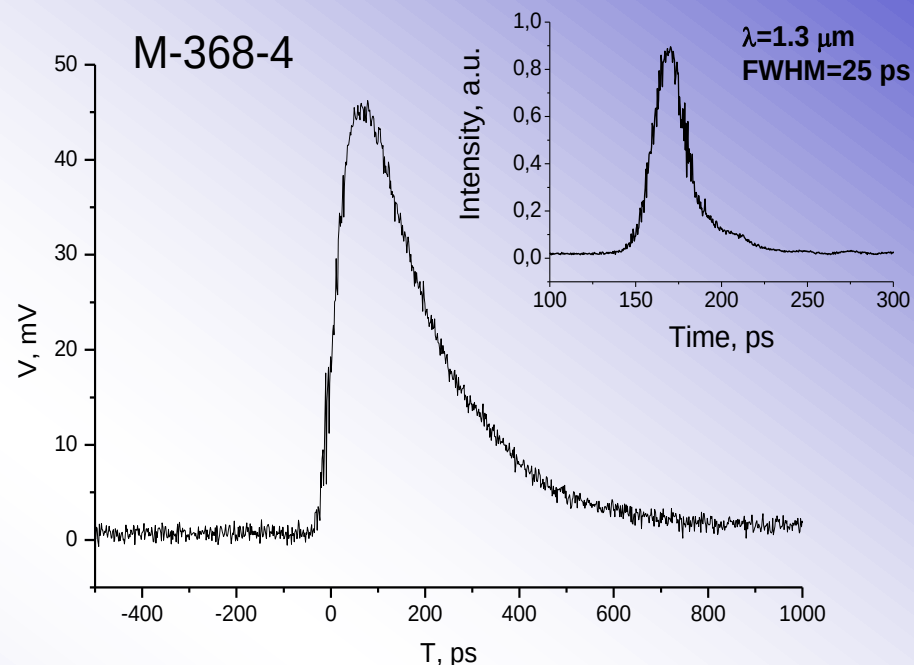
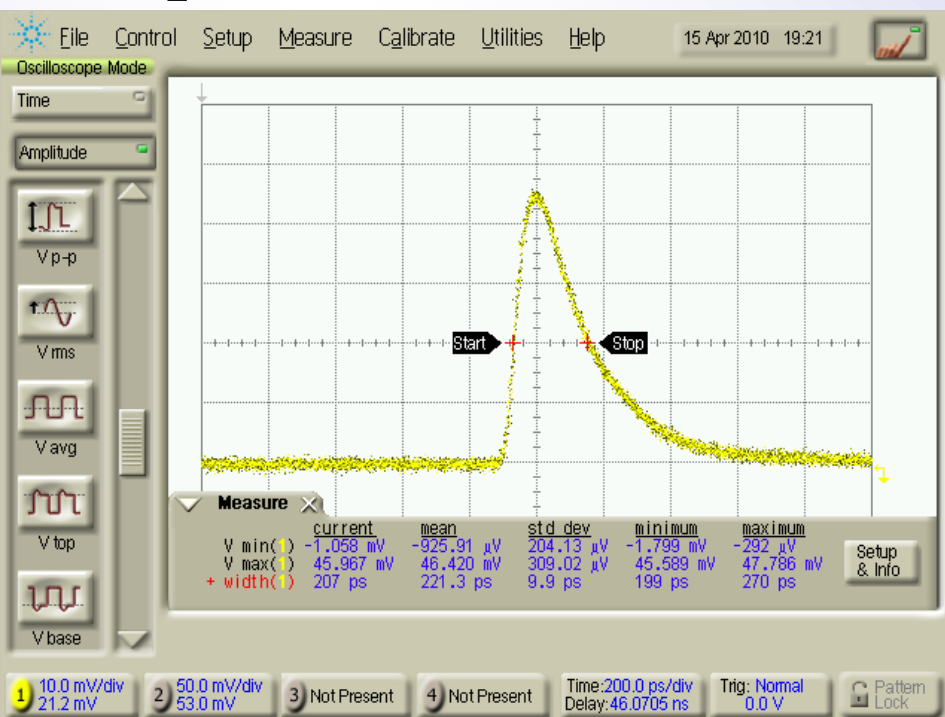
Красный – без диэлектрической площадки,
синий – с диэлектрической площадкой.



Вольт-амперные характеристики фотоприемников:
слева - с диэлектриком, справа – без диэлектрика.
Измерено по 50 приборов каждого типа

Гистограммы показывающие зависимость количества приборов от различных значений темнового тока при разных величинах обратного смещения:
а. -0,2 В, б. -0,5 В, в. -1 В.

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ GaInAsSb/GaAlAsSb p-i-n ФОТОДИОДЫ С ДИАМЕТРОМ 50 мкм



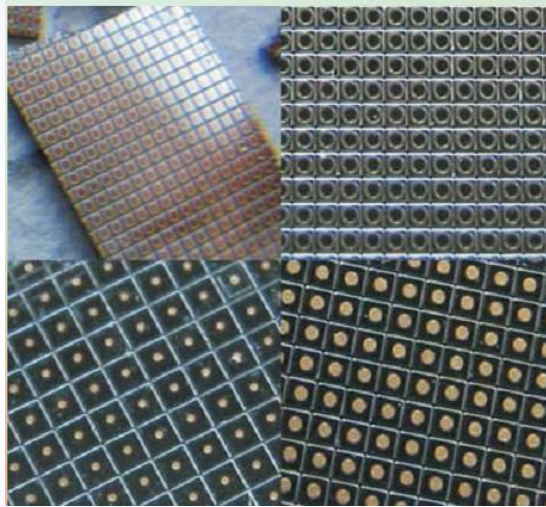
$n=10^{15} - 10^{16} \text{cm}^{-3}$, $d=50 \mu\text{m}$,

$C=1.0-1.7 \text{ pF}$

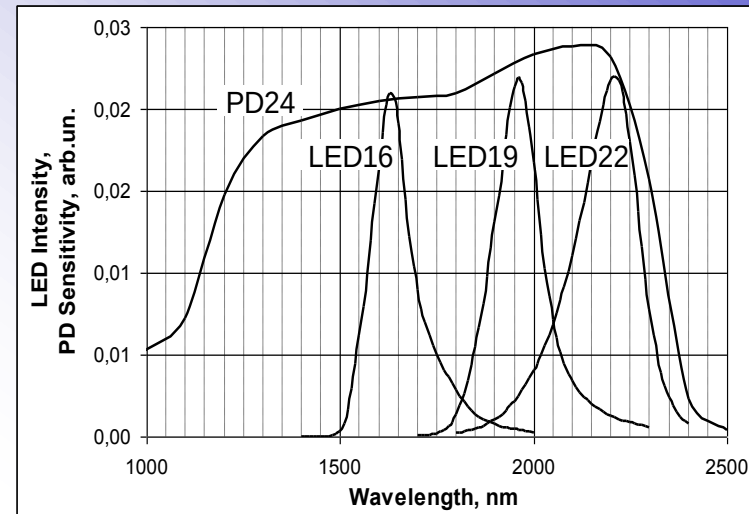
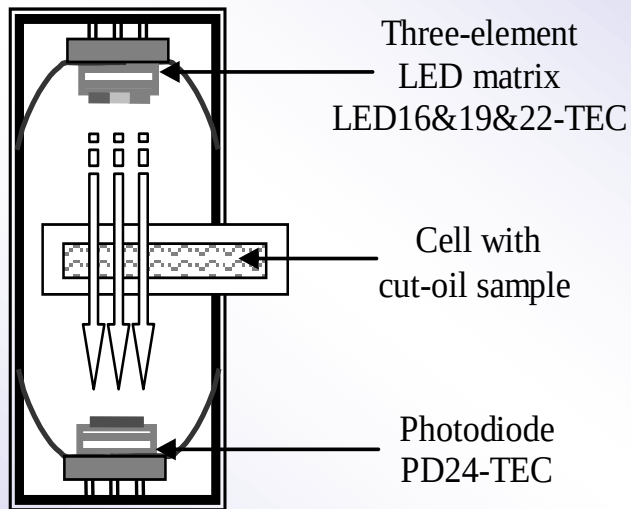
$\tau_1 = \tau_2 = 120 - 160 \text{ ps}$, FWHM~220-320 ps

BANDWIDTH 3-5 GHz

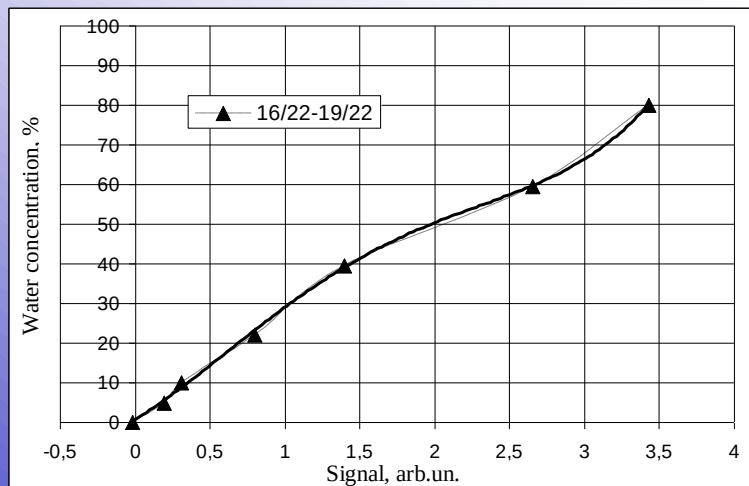
$P-i-n$ фотодиоды



Применение $p-i-n$ фотодиодов и светодиодов для измерения воды в нефти



Калибровочная кривая



Список организаций, которые используют и применяют, разработанные нами фотодиоды.

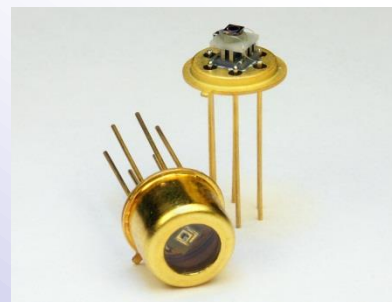
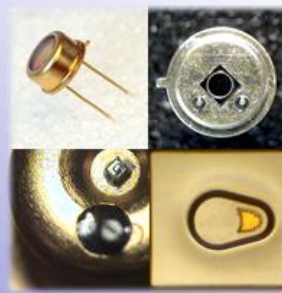
быстродействующие фотодиоды для среднего ИК диапазона востребованы как в России, так и за рубежом, тестировались и используются многими российскими и зарубежными фирмами при создании измерительной аппаратуры. Мелкосерийный выпуск фотодиодов осуществляется фирмами ООО «АИБИ» и ООО «Инфра Красные Фотодиоды Директ» при ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Roithner Lasertechnik GmbH,
Military University of Technology
Laser 2000 GmbH,
Racouchot Service Industrie
Nanjing wending tech Co,Ltd,
Nanjing micro-sensors electronics Ltd.,
Regensburg University
SIEMENS
KEYSTONE International Co., Ltd.,
Frankfurt Laser Company,
Sensorik-Bayern GmbH,
ИФП СО РАН
SAMEER,

Австрия.
Польша
Германия
Франция.
Китай
Китай
Германия
Германия
Япония
Германия
Германия
Новосибирск, Россия
Индия

Pressco Technology Inc.
MicroSensor Technology
Deep Red Technologies
Институт физики НАНБ
ООО "Пром-Опэкс-Сервис"
Институт лазерной физики СО РАН
ООО «ЛЮМЭКС»
ЗАО «КОНВЕРСИОННОЕ
ПРОИЗВОДСТВО «АЛЬТАИР-1»
Горный центр охраны труда+"
Avo Photonics
Coherent Inc.
ГОИ им. С.И. ВАВИЛОВА, НПК
ОАО "ЦНИИ "Электрон"

США
США
Великобритания
Белорусия
Белгород, Россия
Новосибирск, Россия
СПб, Россия
Москва, Россия
Кемерово, Россия
США
США
СПб, Россия
СПб, Россия



Заключение:

1. Созданы и исследованы GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb p-i-n гетерофотодиоды с длинноволновой границей чувствительности $\lambda=2.4$ мкм. Плотность обратного темнового тока достигает величины $j=3 \times 10^{-3}$ А/см², токовая монохроматическая чувствительность составляет 1-1.2 А/Вт. Обнаружительная способность составляет $D^*(\lambda_{\max}, 1000, 1)=(0.8-1.0) \times 10^{11}$ Вт⁻¹×см×Гц^{1/2}.
2. Созданы и исследованы InAs/InAsSbP гетерофотодиоды с длинно- волновой границей чувствительности $\lambda=3.8$ мкм. Токовая монохроматическая чувствительность составляет 1-1.2 А/Вт на $\lambda=3-3.4$ мкм. Обнаружительная способность фотодиодов в максимуме спектра достигает величины $D^*(\lambda_{\max}, 1000, 1)=(2-4) \times 10^9$ Вт⁻¹×см×Гц^{1/2}.
4. Разработаны фотодиоды на основе гетероструктур InAs/ InAs_{0.94}Sb_{0.06}/InAs_{0.88}Sb_{0.12}/InAsSbP. Фотодиоды характеризуются высокой токовой монохроматической чувствительностью (4.2-4.7 мкм) 0,6-0,8 А/Вт, значение плотности обратных темновых токов $(1.3-7.5) \cdot 10^{-2}$ А/см² (U=-0.2В). Дифференциальное сопротивление в нуле смещения достигает величины 700-800 Ом. Обнаружительная способность фотодиодов достигает величины $(5-8) \cdot 10^8$ см × Вт⁻¹ × Гц^{1/2}.
5. Разработаны сверхбыстродействующие GaInAsSb/GaAlAsSb p-i-n фотодиоды для спектрального диапазона 1.1–2.4 мкм. Использование новых конструктивных решений - разделение фоточувствительной и контактной мез с применением технологии “air-bridge” контакта, позволило снизить величину емкости фотодиодов и достигнуть рекордного быстродействия 50-150 пс (полоса пропускания $\geq 2-5$ ГГц).