

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

На правах рукописи



КОНОВАЛОВ ГЛЕБ ГЕОРГИЕВИЧ

**СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ
ФОТОДИОДОВ ДЛЯ СРЕДНЕЙ ИК-ОБЛАСТИ СПЕКТРА (2-5 МКМ)
НА ОСНОВЕ УЗКОЗОННЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР A^3B^5**

специальность

01.04.10 – физика полупроводников

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
кандидат физико-математических наук
АНДРЕЕВ И.А.

Санкт-Петербург

2014

Оглавление

Введение.....	10
Глава 1. Полупроводниковые узкозонные соединения A^3B^5 и фотодиоды на их основе для спектрального диапазона 1.6-5 мкм (литературный обзор)	15
1.1. Физические принципы работы фотодиодов, параметры, режимы работы.....	15
1.2. Режимы работы фотодиодов.....	30
1.3. Полупроводниковые узкозонные материалы A^3B^5 подходящие для создания фотоприёмников в спектральном диапазоне 2-5 мкм и их свойства	32
1.4. Фотоприёмники для среднего ИК-диапазона на основе узкозонных соединений A^3B^5	37
1.5. Конструкции быстродействующих фотоприёмников.....	44
1.6. Выводы.....	50
Глава 2. Методы исследования параметров фотодиодных гетероструктур и фотодиодов	53
2.1. Объекты исследования	53
2.2. Исследование вольт-амперных характеристик фотодиодов	53
2.3. Исследование вольт-фарадных характеристик фотодиодов	55
2.4. Исследование спектральных характеристик фотодиодов	56
2.5. Исследование быстродействия фотодиодов	57
2.6. Метод исследования магнитотранспортных свойств слоёв фотодиодных гетероструктур	58
Глава 3. Создание и исследование быстродействующих $p-i-n$ -фотодиодов для спектрального диапазона 1.0-2.4 мкм на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb.....	61
3.1. Основные факторы ограничивающие быстродействие $p-i-n$ -фотодиодов.....	61

3.2. Быстродействующие фотодиоды меза-конструкции на основе GaInAsSb	67
3.2.1. Технология создания фотодиодов.....	70
3.2.2. Электрические свойства фотодиодов	75
3.2.3. Фотоэлектрические свойства фотодиодов	76
3.2.4. Быстродействие фотодиодов на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb.....	78
3.3. Фотодиоды с разделенными чувствительной (диаметр 50 мкм) и контактной мезами, соединёнными фронтальным мостиковым металлическим контактом.....	79
3.3.1. Технология создания сверхбыстродействующих фотодиодов	80
3.3.2. Электрические свойства фотодиодов	87
3.3.3. Фотоэлектрические свойства фотодиодов	92
3.3.4. Быстродействие фотодиодов	93
3.4. Выводы.....	95
Глава 4. Разработка и создание фотодиодов для спектрального диапазона 1.5-3.8 мкм на основе гетероструктур InAs/InAsSbP и для спектрального диапазона 1.0-4.9 мкм на основе гетероструктур InAsSb/InAsSbP.....	97
4.1. Фотодиоды для спектрального диапазона 1.5-3.8 мкм на основе гетероструктуры InAs/InAsSbP.....	97
4.1.1. Технология создания фотодиодов.....	97
4.1.2. Свойства, параметры и характеристики фотодиодов.....	98
4.2. Разработка фотодиодов на основе гетероструктур InAsSb/InAsSbP для спектрального диапазона 1.0-4.9 мкм	102
4.2.1. Технология создания фотодиодов.....	103
4.2.1. Результаты исследования фотодиодной гетероструктуры InAsSb/InAsSbP методом Кельвин-зонд микроскопии	106

4.2.2. Электрические свойства фотодиодов на основе гетероструктур InAsSb/InAsSbP.....	111
4.2.3. Фотоэлектрические свойства фотодиодов на основе гетероструктур InAsSb/InAsSbP	112
4.2.3. Повышение квантовой чувствительности фотодиодов на основе гетероструктуры InAs/InAsSb/InAsSbP	113
4.2.4. Оценка быстродействия фотодиодов на основе гетероструктур InAsSb/InAsSbP.....	121
4.3. Выводы.....	122
Глава 5. Разработка и создание фотодиодов на основе квантово-размерных гетероструктур узкозонных соединений A^3B^5 для спектрального диапазона 1.6-5.0 мкм	124
5.1. Фотодиоды на основе квантово-размерных гетероструктур InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/GaSb с глубокими квантовыми ямами	124
5.1.1. Технология создания фотодиодов.....	125
5.1.2. Исследование магнитотранспортных свойств слоёв гетероструктур с глубокими квантовыми ямами AlSb/InAsSb/AlSb.....	126
5.1.3. Электрические свойства фотодиодов	127
5.1.4. Оценка быстродействия фотодиодов.....	131
5.1.5. Фотоэлектрические свойства фотодиодов	132
5.2. Фотодиоды на основе GaSb с глубокой квантовой ямой Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb.....	134
5.2.1. Технология создания фотодиодов.....	135
5.2.2. Электрические свойства фотодиодов	136
5.2.3. Электролюминесцентные и фотоэлектрические свойства фотодиодов.....	138
5.2.4. Лавинное умножение в фотодиодах за счёт ударной ионизации носителей на скачке потенциала	142
5.2.5. Оценка быстродействия фотодиодов.....	143

5.3. Выводы.....	145
Заключение	148
Список литературы	156

Таблица 1. Список принятых сокращений.

ФП	фотоприёмник
ФЭПП	фотоэлектрический полупроводниковый приёмник
ФПУ	фотоприёмное устройство
ФР	фоторезистор
ФД	фотодиод
ЛФД	лавинный фотодиод
ПЗС	прибор с зарядовой связью
ОПЗ	область пространственного заряда
ВАХ	вольт-амперная характеристика
ВФХ	вольт-фарадная характеристика
ЭДС	электродвижущая сила
ЭМВ	электромагнитная волна
ЭЛ	электролюминесценция
ИК-излучение	инфракрасное излучение
ИК-диапазон	инфракрасный диапазон
МДП	структура металл-диэлектрик-полупроводник
МПП	структура металл-полупроводник-металл
ЖФЭ	жидкофазная эпитаксия
МОГФЭ	газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений
МПЭ	молекулярно-пучковая эпитаксия
КЯ	квантовая яма
КЗМ	кельвин зонд микроскопия
СЗМ	сканирующая зонд микроскопия

Таблица 2. Основные символьные обозначения.

n	электронная проводимость, концентрация электронов
p	дырочная проводимость, концентрация дырок
n_i	собственная проводимость
μ_e	подвижность электронов
μ_h	подвижность дырок
α	коэффициент (показатель) поглощения излучения
λ	длина волны
λ_{\max}	длина волны максимума спектральной чувствительности или электролюминесценции
λ_{sp}	длинноволновая граница спектральной чувствительности
ν	частота ЭМВ
c	скорость света
ε_0	электрическая постоянная
ε	диэлектрическая проницаемость среды
h	постоянная планка
q	заряд электрона
E	напряжённость электрического поля
E_{hv}	энергия фотона
E_g	ширина запрещённой зоны
η	квантовая эффективность
S_I	токовая монохроматическая чувствительность
M	коэффициент умножения
f	частота
Δf	частотная полоса пропускания
R	электрическое сопротивление

R_0	сопротивление фотодиода при нулевом смещении
C	электрическая ёмкость
d	диаметр
W	ширина ОПЗ
S	площадь
P	мощность потока оптического излучения
U	напряжение
I	электрический ток
I_0	ток насыщения при обратном смещении
I_ϕ	фототок
I_d	темновой ток
i_n	шумовой ток
j	плотность электрического тока
σ	проводимость
T	температура
K_ϕ	коэффициент внутреннего усиления
t	время
τ	длительность
D	обнаружительная способность
D^*	удельная обнаружительная способность
κ	коэффициент использования чувствительной площадки фотоприёмника

Все единицы измерения параметров ФЭПД соответствуют принятым в ГОСТ 17772-88 (СТ СЭВ 3789-82) [1]. Для удобства используются стандартные приставки типа: н – нано, мк – микро, м – мили и т.д. В обозначении химических элементов и соединений использовались латинские буквы, соответствующие обозначениям в Таблице химических элементов Менделеева Д.И. Используются обозначения, термины и определения

установленные ГОСТ 21934-83 [2].

Введение

В настоящее время средняя инфракрасная (ИК) область спектра (2-5 мкм) становится всё более востребованной благодаря развитию эффективных излучающих светодиодных и лазерных систем. Улучшение характеристик излучателей требует объективного улучшения параметров и характеристик согласованных с ними по длине волны приёмников и фотоприёмных устройств.

Такие приборы находят широкое применение в лабораторных исследованиях, технике, различных отраслях народного хозяйства. Наиболее перспективные применения фотоприёмников для средней ИК-области спектра – это экологический мониторинг окружающей среды, лазерная диодная спектроскопия газов, медицинская диагностика в безопасном для зрения диапазоне [3], системы высокоскоростной передачи в открытом атмосферном канале [4, 5, 6].

Инфракрасные системы широко используются в настоящее время для обнаружения и слежения за наземными, надводными и подводными целями, они используются в приборах ночного видения, тепловой разведки местности, в системах обзора летательных аппаратов и лазерных дальномерах, в системах секретной связи, а также другой специальной технике.

Для ИК-области спектра разработаны различные типы широкополосных полупроводниковых лазеров, работающих при комнатной температуре [7, 8], а также мощные компактные твердотельные лазеры на основе кристаллов YAG и Nd-KGW, легированных ионами Ho, Tm и Er [9].

Для создания быстродействующих приёмников излучения в средней ИК-области спектра наиболее перспективными материалами являются соединения A^3B^5 и их твёрдые растворы: в диапазоне 1.0-2.5 мкм – многокомпонентные узкозонные твёрдые растворы системы GaSb-InAs [10, 11], в диапазоне 2.5-5.0 мкм – полупроводниковые соединения InAs, InSb и

их твёрдые растворы [12, 13].

Основные требования, предъявляемые к ФП – это высокое быстродействие [14], высокая квантовая эффективность в заданном диапазоне спектральной чувствительности, низкий уровень шумов, соответственно низкие обратные темновые токи.

Наиболее актуальными задачами в инфракрасной оптоэлектронике в настоящее время являются повышение быстродействия существующих приёмников, расширение их спектрального диапазона чувствительности [15], создание эффективных приёмников на основе квантово-размерных структур. Решение этих задач требует проведения широкого ряда исследований по разработке новых конструктивных решений фотоприёмников, совершенствованию существующих и разработка новых технологических подходов к ростовым и постростовым технологиям фотодиодных структур. Данное диссертационное исследование как раз направлено на решение этих задач.

Цель диссертационной работы заключалась в создании и исследовании высокоэффективных неохлаждаемых сверхбыстродействующих фотодиодов на основе объёмных, квантово-размерных гетероструктур узкозонных полупроводниковых соединений A^3B^5 и их твёрдых растворов, для спектрального диапазона 1.0-5.0 мкм.

Научная новизна полученных результатов в диссертационной работе состоит в следующем:

1. Впервые созданы быстродействующие $p-i-n$ -фотодиоды для спектрального диапазона 1.0-2.4 мкм на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с диаметром чувствительной площадки $d=100$ мкм меза-конструкции, с разделёнными чувствительной ($d=50$ мкм) и контактной мезами, соединёнными фронтальным мостиковым металлическим контактом. Использование оригинальной конструкции контактной мезы с дополнительным диэлектрическим слоем Si_3N_4 , толщиной

$l=0.3$ мкм, под металлическим контактом позволило снизить как собственную ёмкость фотодиода, так и значения обратных темновых токов. Собственная ёмкость фотодиодов достигла значений: $C_0=3-5$ пФ при нулевом напряжении смещения и $C=0.8-1.5$ пФ при $U=-3.0$ В. Фотодиоды обладали быстродействием $\tau=50-100$ пс, которому соответствует частотная полоса пропускания $\Delta f=3-5$ ГГц.

2. Созданы фотодиоды на основе гетероструктуры InAs/InAs_{0.94}Sb_{0.06}/InAsSbP/InAs_{0.88}Sb_{0.12}/InAsSbP/InAs с диаметрами фоточувствительной площадки $d=300$ мкм и фотодиоды на основе гетероструктуры InAs/InAs_{0.94}Sb_{0.06}/InAsSbP/InAs_{0.88}Sb_{0.12}/InAsSbP с размером чувствительной площадки 0.45×0.45 мкм, работающие при комнатной температуре в диапазонах $2.5-4.9$ и $1.0-4.8$ мкм, соответственно. Отличительной особенностью фотодиодов является высокое значение сопротивления при нулевом смещении, достигающего значений $R_0=700-800$ Ом.

3. В фотодиодах на основе гетероструктуры InAs/InAs_{0.88}Sb_{0.12}/InAs_{0.50}Sb_{0.20}P_{0.30} с узкозонной активной областью ($E_g=0.2-0.3$ эВ) достигнуто увеличение квантовой эффективности и удельной обнаружительной способности в $1.5-1.7$ раза, в интервале длин волн $2.2-4.8$ мкм. Такое увеличение реализуется за счёт изменения направления излучения внутри фотодиодного чипа, благодаря формированию криволинейной отражающей поверхности, образованной селективным травлением, на фотодиодном чипе со стороны подложки. Криволинейная отражающая поверхность позволяет направлять оптическое излучение к активной области фотодиода. Достигнута квантовая эффективность $\eta=0.24$ (электрон/фотон) на длине волны $\lambda=3$ мкм.

4. Показано, что в наногетероструктуре p -InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/ p -GaSb с глубокими квантовыми ямами InAsSb увеличение их числа приводит

к пропорциональному уменьшению удельной ёмкости структуры за счёт последовательного соединения емкостей $p-n$ -переходов.

Результаты проведённых исследований позволили сформулировать следующие научные положения, выносимые на защиту:

ПОЛОЖЕНИЕ I.

Разделение площади $p-i-n$ -фотодиода на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb на изолированные фоточувствительную и контактную площадки и соединение их между собой фронтальным металлическим мостиковым контактом обеспечивает высокое быстродействие $\tau=50-100$ пикосекунд за счёт малого времени зарядки-разрядки барьерной ёмкости прибора.

ПОЛОЖЕНИЕ II.

В асимметричной наногетероструктуре на основе p -InAs с глубокой квантовой ямой AlSb/InAsSb/AlSb при комнатной температуре реализуются интенсивная положительная и отрицательная электролюминесценция, что обеспечивает работу структуры в светодиодном или фотодиодном режиме при переключении полярности напряжения.

ПОЛОЖЕНИЕ III.

В наногетероструктуре, выращенной на подложке n -GaSb, с глубокой электронной квантовой ямой Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb и содержащей два электронных уровня, излучательная рекомбинация осуществляется при переходе носителей между первым электронным и первым дырочным уровнями с энергией излучаемого фотона $E_{hv}=0.669$ эВ ($\lambda \approx 1.85$ мкм), а фоточувствительность в фотовольтаическом режиме обеспечивается за счёт переходов между двумя электронными уровнями, что соответствует энергии фотона в максимуме спектральной чувствительности $E_{hv}=0.826$ эВ ($\lambda \approx 1.55$ мкм).

ПОЛОЖЕНИЕ IV.

В фотодиоде на основе наногетероструктуры n -GaSb/AlAsSb/InAsSb/AlAsSb/

p -GaSb с глубокой квантовой ямой Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb в активной области лавинное умножение в слабом электрическом поле ($E < 10^4$ В/см) обеспечивается за счёт ударной ионизации электронами, дополнительно разогретыми на скачке потенциала в зоне проводимости $\Delta E_c = 1.27$ эВ между потенциальным барьером AlSb и первым электронным уровнем $E_{e_1} = 0.394$ эВ.

Практическая ценность.

Созданные высокоэффективные быстродействующие фотодиоды расширяют номенклатурную линейку существующей элементной базы приборов ИК оптоэлектроники. Развитие целого ряда применений, таких как высокоскоростная связь в открытом атмосферном канале, спектроскопия и анализ газов, лазерная локация в безопасном для зрения человека диапазоне, становится возможным благодаря новым быстродействующим фотодиодам. Показан новый подход увеличения эффективности фотодиодов для средней ИК-области спектра за счёт изменения направления излучения внутри фотодиодного чипа, благодаря формированию криволинейной отражающей поверхности, образованной селективным травлением, на фотодиодном чипе со стороны подложки.

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы, содержит 168 страниц, включая 72 рисунка и 3 таблицы. Список цитированной литературы содержит 118 наименований.

Глава 1. Полупроводниковые узкозонные соединения A^3B^5 и фотодиоды на их основе для спектрального диапазона 1.6-5 мкм (литературный обзор)

В главе 1 будут описаны основные физические принципы работы, параметры и характеристики фотодиодов, кратко изложены основные схемы их включения. Также в главе 1 будут рассмотрены физические свойства полупроводниковых узкозонных (или узкощелевых) соединений A^3B^5 , в особенности GaSb, InAs и твёрдых растворов на их основе, используемых для разработки фотоприёмников для спектрального диапазона 1.6-5.0 мкм, а также дан обзор существующих фотоприёмников для указанного диапазона, их конструкций и параметров.

1.1. Физические принципы работы фотодиодов, параметры, режимы работы

Главным элементом приёмников и фотоприёмных устройств (ФПУ), который определяет все самые важные их характеристики, является фотоприёмник (ФП). В качестве ФП в ФПУ широко используются фоторезисторы (ФР), фотодиоды (ФД), лавинные фотодиоды (ЛФД). В приборах с зарядовой связью (ПЗС) излучение детектируется структурой МДП. Существенно реже в ФПУ используются фототранзисторы и некоторые другие ФП [16]. Принцип преобразования оптического сигнала в электрический (детектирование) всех указанных приборов основан на внутреннем фотоэффекте. Принцип внутреннего фотоэффекта – счёт фотонов. Каждый поглощённый фотон создаёт в полупроводнике одну пару электрон-дырка. Обязанностью ФП является счёт этих пар.

Наиболее просто и непосредственно счёт осуществляется в ФД. ФД часто в литературе называют счётчиками фотонов [17]. На границе $p-n$ -перехода возникает область пространственного заряда с сильным электрическим полем (ОПЗ) (рис. 1, а). Электронно-дырочные пары, попадая

в эту область (либо диффундируя из квазинейтральных n - и p -областей, либо при непосредственной генерации в ней), разделяются полем: положительно заряженные дырки движутся вдоль поля к p -области, а отрицательно заряженные электроны – против поля к n -области. Если внешняя цепь замкнута, то в ней протекает фототок I_ϕ , пропорциональный числу падающих фотонов N . Для излучения длиной волны λ энергия фотона:

$$E_{h\nu} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1)$$

где ν - частота, c - скорость света, h - постоянная Планка при мощности потока излучения P . Число фотонов, падающих на ФП в единицу времени,

$$N = \frac{P}{E_{h\nu}} = \frac{P\lambda}{hc}. \quad (2)$$

Не все фотоны поглощаются проходя через кристалл, не все генерированные пары внесут свой вклад в фототок, часть из них рекомбинирует не дойдя до $p-n$ -перехода. Коэффициент η будет учитывать эффективность преобразования в целом, $N' = \eta N$, N' - число фотоактивных квантов, которые создают ток во внешней цепи:

$$I_\phi = qN' = q\eta N = \frac{q\eta\lambda P}{hc}. \quad (3)$$

ФД линейно преобразует падающую оптическую мощность сигнала P в электрический сигнал – фототок I_ϕ . Отношение фототока I_ϕ к оптической мощности сигнала P является коэффициентом первичного преобразования, называется токовой монохроматической чувствительностью:

$$S_I = \frac{I_\phi}{P(\lambda)} = \frac{\eta q \lambda}{hc}, \quad (4)$$

если λ измеряется в микрометрах, подставить постоянные h , c , q , выражение (4) примет вид:

$$S_I = \eta \frac{\lambda}{1.24}, \quad (5)$$

S_I имеет размерность А/Вт.

Преобразование оптическая мощность P в электрический ток I_ϕ происходит в любом ФП, только необходимо учесть, что под фототоком понимается первичный фототок I_ϕ' , т.е. заряд фотоактивных носителей, генерированных в полупроводнике в единицу времени. На выходе ФП течёт вторичный фототок I_ϕ . В ФД эти токи совпадают,

$$I_\phi = I_\phi', \quad (6)$$

но в общем случае они пропорциональны,

$$I_\phi = K_\phi I_\phi', \quad (7)$$

Коэффициент K_ϕ называют коэффициентом внутреннего усиления ФП ($K_\phi \geq 1$), аналогично для чувствительности ФП

$$S = K_\phi S_0, \quad (8)$$

Для ФД коэффициент $K_\phi = 1$, для лавинного фотодиода (ЛФД) $K_\phi = M$. Коэффициент умножения M от рабочего напряжения U определяется эмпирической формулой Миллера:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_{np}}\right)^n}, \quad (9)$$

здесь $n=2-5$, U_{np} - напряжение лавинного пробоя, при котором умножение стремится к бесконечности.

Если на выходе ФП изменяется ток, то ФП характеризуется токовой чувствительностью S_I . Токовой чувствительностью является величина, характеризующая изменение тока ΔI во внешней цепи ФП при единичном изменении мощности ΔP падающего оптического излучения:

$$S_I = \frac{\Delta I}{\Delta P}, \quad (10)$$

В случае если регистрируемый сигнал на выходе ФП - напряжение, то пользуются вольтовой чувствительностью

$$S_U = \frac{\Delta U}{\Delta P}, \quad (11)$$

имеет размерность В/Вт.

На выходе ФП всегда имеется хаотический сигнал $\sqrt{I_n^2}$, связанный с флуктуациями параметров приёмника. Наличие темнового шума I_n определяет физическую границу детектирования внешнего сигнала [18].

Минимальная пороговая энергия, которая вызовет сигнал называется пороговой чувствительностью или шумовой эквивалент мощности NEP

$$NEP = \frac{\langle I_n \rangle}{S_I}, \quad (12)$$

NEP представляет собой мощность излучения сигнала, которая обеспечивает отношение сигнал/шум в ФП, равное 1, для данных полосы пропускания измерительного тракта, апертуры и площади фоточувствительного элемента. Измеряется NEP в Вт.

При электрическом смещении, приложенном к полупроводнику, всегда существует некоторый минимальный шум, называемый шумом Джонсона, шумом Найквиста или тепловым шумом. Этот вид шума обусловлен хаотическим движением носителей заряда в материале и определяется диссипативным характером рассеяния энергии. Мощность шума Джонсона зависит только от температуры и полосы частот, в котором шум измеряется, хотя напряжение шума и шумовой ток зависят от сопротивления [19].

Шум Джонсона характерен для всех материалов обладающих конечным сопротивлением, включая полупроводники. Он наблюдается и в отсутствие электрического смещения и проявляется в виде флуктуаций напряжения или тока (в зависимости от схемы измерений). Средний квадрат мощности шума Джонсона в полосе частот измерительного тракта Δf

$$P_n = kT \cdot \Delta f, \quad (13)$$

где k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура образца. Напряжение холостого хода $\langle U_n \rangle$ и ток короткого замыкания записываются в виде

$$\langle U_n \rangle = \sqrt{4kTR_0 \cdot \Delta f}, \quad (14)$$

$$\langle i_n \rangle = \sqrt{\frac{4kT \cdot \Delta f}{R_0}}, \quad (15)$$

где $R_0 = R_0$ - темновое сопротивление ФД при малых напряжениях смещения $U \approx \pm 10$ мВ. Темновое сопротивление в идеальном случае обусловлено сопротивлением $p-n$ -перехода, но в реальности на R_0 оказывают ещё влияние сопротивления омических контактов.

Одним из видов шумов, который обнаруживается фотодиодах, является дробовой шум. Вольт-амперная характеристика ФД при произвольном облучении может быть выражена соотношением

$$I = I_d(U) - I_\phi(U), \quad (16)$$

Темновой ток выражается уравнением для ВАХ обычного диода

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (17)$$

где I - ток через диод, I_0 - ток насыщения при обратном смещении, U - приложенное напряжение, q - заряд электрона, k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура.

Шумовой ток короткого замыкания

$$i_n = \sqrt{(2qI + 4qI_0)\Delta f}, \quad (18)$$

где Δf - ширина полосы пропускания измерительного тракта. Сопротивление диода при нулевом смещении, т.е. наклон ВАХ

$$R_0 = \frac{kT}{qI_0}. \quad (19)$$

Тогда при нулевом смещении ток $I=0$ и выражение (18) принимает вид

$$i_n = \sqrt{\frac{4kT \cdot \Delta f}{R_0}}, \quad (20)$$

полностью совпадает с выражением для шума Джонсона. При достаточно большом обратном смещении $I = -I_0$, и выражение (18) приобретает вид

$$i_n = \sqrt{2qI_0 \cdot \Delta f}, \quad (21)$$

Эта формула для шумового тока короткого замыкания при дробовом шуме (short noise) используется наиболее часто.

Величина, обратная пороговой чувствительности называется обнаружительной способностью

$$D = \frac{1}{NEP}. \quad (22)$$

Поскольку от шумов приёмников ИК излучения зависят их предельные характеристики, необходимо связать величины фотосигнала и отношения сигнал-шум с мощностью падающего излучения. Такой величиной является удельная обнаружительная способность D^* , нормированная величина на единицу площади ФП и на полосу частот, которая не зависит от площади фоточувствительного элемента и является одной из основных параметров характеризующим параметры ФП. Качество ФП для обнаружения слабых оптических сигналов характеризуются величиной D^* , имеет размерность в $\text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{см}$, общее выражение для удельной обнаружительной способности

$$D^* = \frac{\sqrt{S \cdot \Delta f}}{P} \cdot \frac{U_s}{U_n}, \quad (23)$$

где S - площадь эффективной чувствительной площадки ФП, см^2 , (U_s/U_n) - отношение напряжений фотосигнала и шума (шум измеряется в полосе частот Δf), а P - мощность внешнего излучения, Вт. Если измеряются шумовой ток и фототок, вместо (U_s/U_n) вводится отношение (I_s/I_n) .

Параметр обнаружительной способности полезен для сравнения различных фотоприёмников, причём не важно какая у него площадь и

материал из которого он изготовлен. Значение темнового шума i_n оценивается по формулам (20) и (21).

Расчёт удельной обнаружительной способности фотодиодов D^* , ограниченной тепловыми шумами сопротивления R_0A , проводится при токовой чувствительности в максимуме спектральной чувствительности S_I по формуле Джонса при нулевом смещении:

$$D^* = \frac{S_I}{\sqrt{4kT \cdot \Delta f / R_0 S}}, \quad (24)$$

где S - площадь чувствительной площадки фотодиода, k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура. При обратном смещении $I = -I_0$ формула Джонса примет вид:

$$D^* = \frac{S_I}{\sqrt{2qI_0 \cdot \Delta f / S}}, \quad (25)$$

D^* и NEP связаны соотношением [20]

$$NEP = \frac{\sqrt{S \cdot \Delta f}}{D^*}. \quad (26)$$

D^* и NEP определяют по отношению к монохроматическому излучению или по отношению к излучению абсолютно чёрного тела.

Многие приёмники обладают «идеальной» частотной зависимостью, т.е. в некотором диапазоне частот выходной сигнал не зависит от частот, далее сигнал изменяется обратно пропорционально частоте. Уравнение, описывающее такую зависимость, имеет вид

$$U_s = \frac{U_{s_0}}{\sqrt{1 + (2\pi f \tau)^2}}, \quad (27)$$

где U_{s_0} - напряжение фотосигнала на нулевой частоте, f - частота, τ - время фотоотклика, которое часто называют постоянной времени ФП. Как видно,

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_{3dB}}, \quad (28)$$

где f_{3dB} - частота, при которой мощность фотосигнала на 3 дБ меньше

мощность фотосигнала на нулевой частоте, при этом напряжение фотосигнала соответствует $0.707 \cdot U_{s_0}$.

Для фотодетекторов параметр D^* в области низких частот не зависит от частоты, но выше некоторого критического значения f убывает обратно пропорционально частоте. Такую частоту называют граничной f^* [21]. Как показано в [21], произведение $D^* f^*$ является постоянной величиной, определяемой сечением захвата фотонов и той минимальной частотой, которая необходима для поглощения фотона в данном материале.

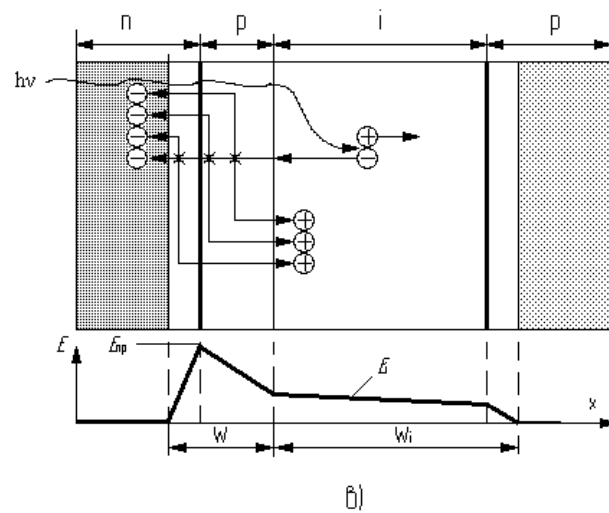
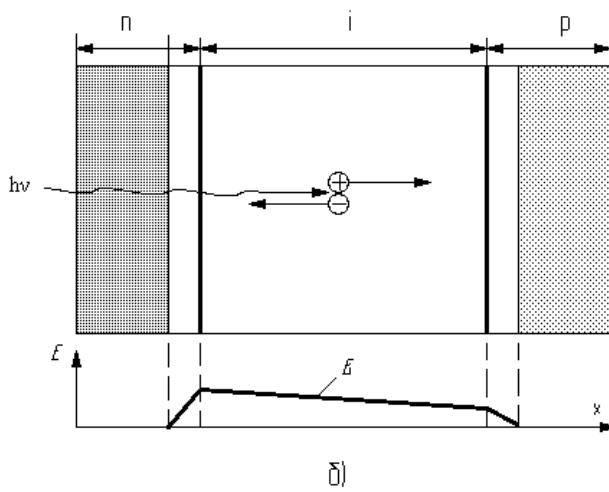
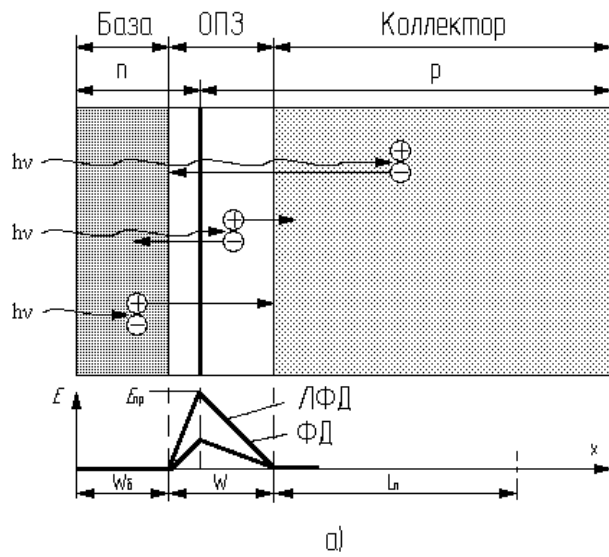


Рис. 1. Основные структуры ФД и эиоры полей в них: а) $p-n(n-p)$ -структура; б) $p-i-n(n-i-p)$ -структура; в) $n-p-i-p$ -структура; \times - ударное столкновение первичного электрона.

На рис. 1 изображены три основные структуры фотодиодов и эпюры полей в них.

Основным критерием качества ФП как оптического детектора является квантовая эффективность η . Квантовая эффективность ФП η в общем случае можно записать как

$$\eta = \eta_i \kappa (1 - \mathfrak{R})(1 - e^{-\alpha l}), \quad (29)$$

где \mathfrak{R} - френелевский коэффициент отражения, который определяется границей раздела внешняя среда-материал ФП, κ - коэффициент использования, η_i - внутренняя квантовая эффективность, α и l - коэффициент поглощения излучения и глубина активной области ФП. Коэффициент κ зависит от конструкции ФП, некоторую часть фоточувствительной площадки могут закрывать контактные металлические слои или внешние элементы, например контактная проволока. У приборов с вводом излучения со стороны подложки $\kappa=1$, а у ФП с вводом излучения со стороны эпитаксиального слоя величина κ может быть существенно ниже единицы. Не все генерированные излучением носители внесут вклад в фототок внешней цепи ФП, это и характеризует коэффициент η_i . К этому приводят неоптимальная структура ФП и дефекты в материале активной области. В ФП со структурой $p-i-n$ не обладает первым недостатком. Показатель α для всех полупроводников зависит от длины волны - $\alpha(\lambda)$. На рис. 2 показана зависимость $\alpha(\lambda)$ для некоторых наиболее распространённых полупроводниковых материалов, из которых изготавливают ФП.

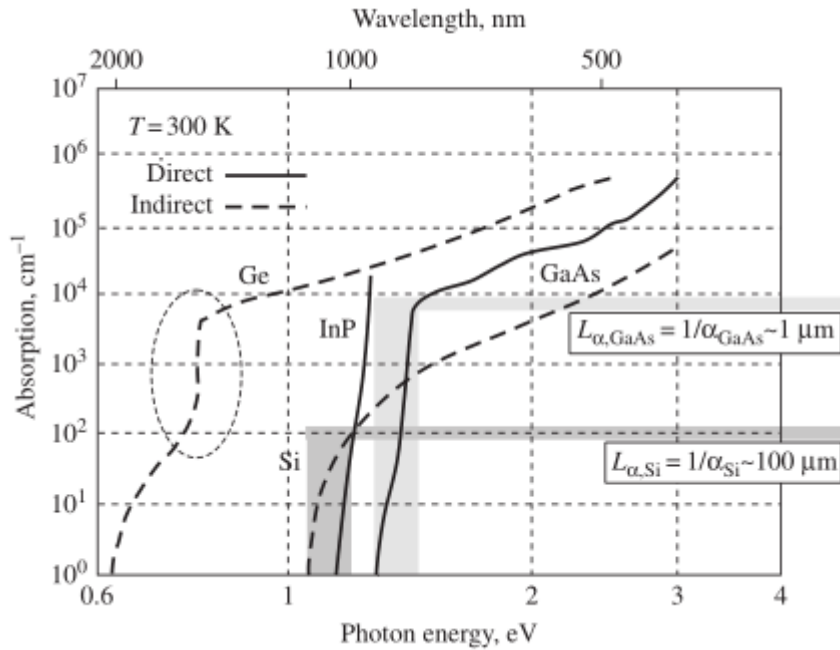


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения излучения $\alpha(\lambda)$ от длины волны λ некоторых распространённых полупроводниковых материалов, из которых изготавливают фотоприёмники. Прямозонные (InP, GaAs) и непрямозонные (Ge, Si) полупроводники, сравнение между значениями длин поглощения Si и GaAs при одинаковом расстоянии от края поглощения [22].

Стоит отметить, что η для некоторых ФП вполне может достигать 95-100% [23], к ним можно отнести ФП со структурой $p-i-n$ на основе Si, Ge, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$.

Для K_ϕ существует оптимальное значение $K_{\phi_{opt}}$, выше него усиление нецелесообразно и даже вредно, так как приводит к снижению отношения сигнал-шум. Внутреннее усиление ФП необходимо, чтобы снизить долю шума усилителя в общем шуме ФПУ. Величина K_ϕ будет оптимальной, когда шум ФП превысит шум усилителя:

$$K_{\phi_{opt}} i_n = (1 \div 3) \cdot i_{шв}, \quad (30)$$

где i_n - шумовой ток ФП. Чем больше $i_{шв}$, тем требуются большие значения

$$K_{\phi_{opt}} \approx i_{шв} / i_n, \quad (31)$$

Фотодиоды по типу структуры и свойствам разделяют обычно на низкочастотные и высокочастотные (быстродействующие). Структура

низкочастотного ФД – это обычный $p-n(n-p)$ -переход (рис. 1, *a*), толщина базы (переднего освещаемого слоя) составляет $l=1-10$ мкм. Легко рассчитать толщину ОПЗ W , обычно это узкий слой относительно высокоомного коллектора-подложки, который покинули подвижные носители. Если оставшиеся некомпенсированные атомы примеси являются донорными, то они создают пространственный заряд $qN_D W$. Согласно электростатике этот заряд приводит к появлению поля напряжённости $E = qN_D W / \varepsilon_0$. Заряд распределён равномерно, поле плавно меняется от нуля до указанного максимального значения (рис. 1, *a*), поэтому его среднее по слою значение равно $E/2$. Соответственно падение напряжения на слое [24]:

$$U' = (E/2)W = (qN_D / 2\varepsilon_0)W^2, \quad (32)$$

На обратно смещённом $p-n$ -переходе падает внешнее напряжение $|U|$ и собственная контактная разность потенциалов φ_{p-n} этого перехода, поэтому

$$U' = |U| + \varphi_{p-n}, \quad (33)$$

Формула (32) даёт возможность выразить толщину ОПЗ через напряжение на $p-n$ -переходе:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 U'}{qN_D}}, \quad (34)$$

Переменных величин здесь три – это ε , U , N_D , если взять типичные для них значения 12-16, 1-10, 10^{14} - 10^{16} , соответственно, $W=0.4-13$ мкм.

Длинноволновое излучение (вблизи длинноволновой границы чувствительности) из-за малости коэффициента поглощения глубоко проникает в область коллектора (подложку). Генерированные в коллекторе пары диффундируют к ОПЗ с достаточно большой глубины – глубины диффузии L . Это относительно медленный процесс, его постоянная времени порядка времени жизни носителей в коллекторе, типичные значения которой $t=1-100$ мкс. Приборы с такой инерционностью пригодны для опико-электронных систем с механической модуляцией сигнала на низких частотах

$f = 1-10$ кГц.

Длительность лазерных импульсов ($\tau = 1-100$ нс) значительно меньше указанной постоянной времени и для их регистрации требуются специальные высокочастотные ФД. Высокочастотные ФД могут иметь $p-n$ -структуру, только базовый слой делается тоньше, порядка $l = 0.5-2$ мкм, что обеспечивает малые времена пролёта носителей через неё. Если излучение проникает глубоко, на 10 мкм и более, то необходимо обеспечить собирание носителей с большой глубины быстро и без потерь. Для этого требуется создать в области поглощения весьма сильное тянущее поле - желательно напряжённостью $E \geq 10^4$ В/см, при котором скорость носителей близка к насыщению. Высокочастотные ФД специальной $p-i-n$ -структуры (рис. 1, б). Здесь между n - и p -областями встроен высокоомный i -слой (intrinsic). Т.к. в нём мала концентрация примеси - $n_i = 1 \cdot 10^{10}$ см⁻³ для Si, $n_i = 2.1 \cdot 10^6$ см⁻³ для GaAs, $n_i = 6.3 \cdot 10^{11}$ см⁻³ для In_{0.53}Ga_{0.47}As, $n_i = 1.5 \cdot 10^{12}$ см⁻³ для GaSb, $n_i = 9.3 \cdot 10^{14}$ см⁻³ для InAs при $T = 300$ К [25], обычно это на 2-4 порядка меньше концентрации в соседних n - и p -областях, то этот слой ведёт себя почти как изолятор: при его истощении заряд примесей мал и не экранирует поле. Так ОПЗ распространяется на весь i -слой. Толщину W_i стараются выбрать порядка одной – нескольких глубин поглощения. Глубиной поглощения называют глубину l , при которой интенсивность падающего излучения I уменьшается в e раз. Большинство материалов A^3B^5 имеют показатель поглощения $\alpha \geq 10^4$ см⁻¹, при столь сильном поглощении значение глубины $l \approx 1$ мкм. Рабочее напряжение при $W_i \approx 1$ по порядку величины будет $U = 0.01$ В.

Широкий истощённый i -слой как бы раздвигает обкладки конденсатора (проводящие p - и n -области), поэтому удельная ёмкость $p-i-n$ -структуры очень мала, на один-два порядка меньше, чем в обычных $p-n$ -переходах, что является ещё одним привлекательным достоинством

этой структуры.

В обычной $p-n$ -структуре можно получить усиление, но для этого необходимо подать большое напряжение, чтобы в ОПЗ создалась максимальная напряжённость поля, $E > 10^5$ В/см. Первичный генерированный носитель, когда попадает в ОПЗ, ускоряется и набирает в таком сильном поле энергию, достаточную для ионизации новой пары. Вторичные носители тоже вызывают ударную ионизацию, т.е. развивается лавинный процесс. На каждый генерированный носитель на выходе приходится M вторичных носителей. При типичных значениях $M \approx 10-100$ формула Миллера (9) упрощается, учитывая, что U близко к U_{np} , заменяя $U/U_{np} = 1 - (U_{np} - U)/U_{np}$, раскладывая степень в ряд и удерживая в нём первый член, получим:

$$M = \frac{U_{np}}{n(U_{np} - U)}. \quad (35)$$

Недостатком ЛФД является высокое требование по стабилизации U , увеличивающееся с ростом коэффициента M , поэтому недостаток ограничивает максимальное значение этого коэффициента. Но и значение U_{np} возрастает с повышением температуры.

ЛФД и нелавинные ФД с $p-n$ -структурой обладают большой инерционностью для проникающего излучения. При создании $p-i-n$ ($n-i-p$)-лавинных структур, рабочее напряжение лавинного режима становится недопустимо большим $U \sim 1000$ В. Поэтому разработка $p-i-n$ -ЛФД не является перспективной [26]. Современные ЛФД имеют специальную $n-p-i-p$ -структуру, благодаря этому удаётся существенно снизить рабочее напряжение. Такая структура является гибридом, последовательным соединением $n-p$ - и $n-i-p$ -структур (рис. 1, а, б, в). Главная особенность такой структуры в том, что умножение и поглощение в пространстве разделены: ОПЗ диодной $n-p$ -структуры поручена функция умножения, а поглощение осуществляется в i -области. За счёт локализации

высокой напряжённости E_{np} в узкой области толщиной $W=1-2$ мкм удаётся добиваться снижения рабочего напряжения, обычно это от десятков до сотен вольт. $n-p$ -структура позволяет использовать умеренное значение рабочего напряжения, а $n-i-p$ позволяет получить малую инерционность при глубоко проникающем излучении. ЛФД с такой структурой называют «ЛФД с разделёнными областями поглощения и умножения» или «ЛФД с проникновением» (ОПЗ и поле проникают в высокоомную i -область).

Темновой ток приёмника – это ток, протекающий через приёмник в отсутствие действия светового потока в диапазоне спектральной чувствительности. В ФД в неравновесных условиях при смещении носители генерируются не только фотонами, но и теплом (фононами). Темновой ток является одним из источников шума. У фотоприёмников, которые работают в средней ИК-области спектра, фоновая составляющая тока теплового излучения преобладает, её шумы ограничивают величину минимально обнаруживаемого сигнала.

Порог чувствительности определяется как среднеквадратическое значение первой гармоники действующего на приёмник модулированного потока излучения источника фотосигнала, при котором среднеквадратическое значение первой гармоники напряжения (тока) фотосигнала равно среднеквадратическому значению напряжения (тока) шума, приведённому к единичной полосе на частоте модуляции потока излучения. Порог чувствительности находится, когда отношение сигнал-шум на выходе в полосе $\Delta f=1$ Гц. Порог чувствительности $P_0 m_\Omega / \sqrt{2} = I_n / S_\lambda$, где P_0 - средняя мощность, m_Ω - коэффициент модуляции. В соответствии с общепринятым определением порог чувствительности не зависит от коэффициента модуляции ($m_\Omega = 1$), пропорционален уровню шума и обратно пропорционален чувствительности. Полоса частот, в которой происходит измерение шума I_n , обычно во много раз меньше модулирующей частоты. В

пределах малой полосы можно считать спектральную плотность напряжения (тока) шума постоянной. Порог чувствительности определяется при заданных частоте модуляции и сопротивлении нагрузки.

1.2. Режимы работы фотодиодов

Фотодиоды используются в двух принципиально различных режимах работы – фотодиодном и вентильном (фотовольтаическом).

При работе в вентильном (ещё называется фотовольтаический или фотогальванический) режиме источник смещения не используется. Отсутствие внешних источников смещения является одним из преимуществ вентильного режима. Возможны два режима, с нагрузочными сопротивлениями $R_L \rightarrow 0$ и $R_L \rightarrow \infty$.

Если ФД используется в вентильном режиме при $R_L \rightarrow 0$ («режим короткого замыкания»), напряжение на ФД поддерживается нулевым (разность потенциалов между p - и n -областями не возникает), ток ФД оказывается равным его фототоку и пропорционален потоку излучения.

Если ФД используется в вентильном режиме при $R_L \rightarrow \infty$ (режим «холостого хода»), ток I в его внешней цепи равен нулю. Фотонапряжение на облучённом ФД пропорционально логарифму потока падающих на него фотонов [23].

При практическом использовании применяются промежуточные случаи, когда внешняя цепь содержит нагрузочное сопротивление различной величины, в котором выделяется мощность. Тогда между p - и n -областями создаётся разность потенциалов в прямом по отношению к переходу направлении. При включении в схеме ФД в вентильном режиме достигаются максимальные значения вольтовой чувствительности и обнаружительной способности [20]. К преимуществам вентильного режима можно отнести работу приёмника с минимально возможным уровнем его шумов [27].

При включении ФД в фотодиодном режиме обязательными элементами

схемы, кроме самого ФД, являются сопротивление нагрузки R_L и источник питания. Источником питания прикладывается внешнее напряжение в запирающем направлении. Изменение в допустимых пределах напряжение питания и сопротивления нагрузки позволяет изменить степень усиления и довести выходной сигнал до величины, близкой к значению приложенного напряжения.

Фотодиодный режим используется при использовании ФД в оптоэлектронной аппаратуре для преобразования оптической информации в электрические сигналы. Истощение i -области в $p-i-n$ -ФД и ударная ионизация в лавинных ФД могут быть реализованы только в фотодиодном режиме. В фотодиодном режиме уменьшается ёмкость ФД, а в $p-i-n$ -ФД и время пролёта фотоносителей через его ОПЗ, расширяется частотная характеристика ФД. У некоторых типов ФД в фотодиодном режиме повышается квантовая эффективность. В фотодиодном режиме линейность между мощностью излучения и фототоком сохраняется в большем диапазоне облучённостей. При включении в схеме ФД в фотодиодном режиме достигается максимальное значение токовой монохроматической чувствительности. К преимуществам фотодиодного режима можно отнести значительно меньшую инерционность ФД, т. е. более высокое быстродействие по сравнению с вентильным [27].

Если нагрузочное сопротивление во внешней цепи ФД, работающего в фотодиодном режиме, достаточно велико, то изменение напряжение на нагрузке при облучении ФД может превысить E_g . При этом оптический сигнал не только преобразуется в электрический, но и происходит усиление его мощности.

Увеличение нагрузочного сопротивления R_L приводит к сокращению динамического диапазона фототока и к возрастанию RC -постоянной внешней цепи. Также увеличение R_L может перевести его ФД в «гибридный» (гибрид фотодиодного и вентильного режимов) режим, когда его рабочая

точка в отсутствие облучения находится в третьем квадранте ВАХ, а при облучении переходит в четвёртый. Такой «гибридный» режим приводит к уменьшению динамического диапазона ФД, а также к увеличению его инерционности [23].

1.3. Полупроводниковые узкозонные материалы A^3B^5 подходящие для создания фотоприёмников в спектральном диапазоне 2-5 мкм и их свойства

Несмотря на то, что соединения типа A^4B^6 (PbS, PbSe, SeTe, GeTe и т.п.) образуют одну из важных групп полупроводников, известных как приёмники ИК-излучения [28], они обладают низкими подвижностями носителей и практически всегда с большой концентрацией ($\sim 10^{17}$ - 10^{18} см⁻³) присутствуют вакансии одного из компонентов, а энергия связи носителей с этими вакансиями мала, поэтому не подходят для создания быстродействующих ФП [29].

Во многом материалы кадмий-ртуть-теллур (HgCdTe) подходят для создания приёмников для среднего ИК-диапазона, т.к. возможно изменять положение края фундаментального поглощения в очень широком диапазоне (0.8-12 мкм). Дорогостоящие технологии их получения и создания на их основе ФП существенно ограничивают их применение [30]. Важным для оптоэлектроники является потенциал HgCdTe для создания одноэлементных и многоэлементных ФП, линеек и матриц, для детектирования излучения в области ИК спектра 8-14 мкм [31]. Особого внимания заслуживают двухдиапазонные матрицы чувствительные в коротковолновом и длинноволновом, средневолновом и длинноволновом диапазонах на основе HgCdTe [23, 32].

Более экономичные узкозонные материалы на основе соединений A^3B^5 по многим параметрам являются подходящими для создания доступных быстродействующих фотодиодов.

По строению своей кристаллической решётки материалы A^3B^5 относятся к алмазоподобным полупроводникам [33]. Полупроводниковые материалы A^3B^5 являются соединением элементов третьей группы периодической системы (Al, Ga, In) с элементами пятой группы (P, As, Sb).

Атомы третьей группы имеют три валентных электрона, а пятой – пять, среднее число валентных электронов на один атом в этих соединениях – четыре. Каждый атом образует четыре валентные связи с ближайшими соседями, в результате чего образуется кристаллическая решётка, подобная решётке алмаза, с той лишь разницей, что ближайшими соседями атома A^3 являются атомы B^5 , а атома B^5 – A^3 . За счёт частичного перераспределения электронов атомы A^3B^5 не полностью ковалентные, а частично ионные. Однако ковалентная связь в них преобладает и определяет структуру, в результате по многим свойствам являются ближайшими аналогами материалам A^4 (Si, Ge) [28].

Антимонид галлия GaSb (стибид галлия) — химическое соединение галлия и сурьмы. Представляет собой светлосерые кристаллы с металлическим блеском. Как и характерно для материалов A^3B^5 , GaSb обладает высокой подвижностью электронов $\mu_e = 4000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ и дырок $\mu_h = 800 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Величина ширины запрещённой зоны составляет $E_g = 0.726 \text{ эВ}$ при $T = 300 \text{ К}$.

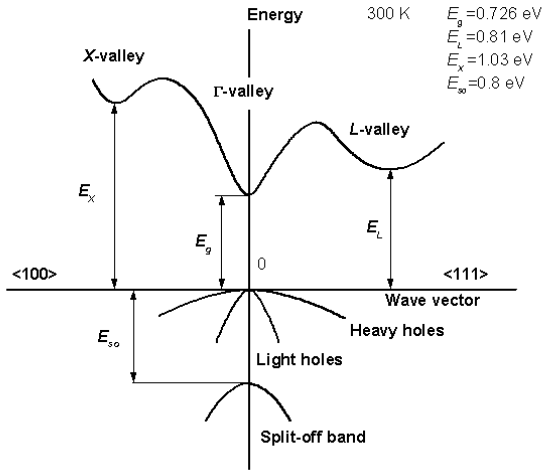


Рис. 3. Зонная диаграмма энергии зон в пространстве импульса соединения GaSb [25].

Дополнительным способом уменьшения концентрации носителей в полупроводниковых соединениях является компенсация, т. е. введение акцепторов с концентрацией N_A в полупроводник n -типа. Концентрация свободных электронов в этом случае будет определяться следующим образом:

$$\frac{2n(n + N_A)}{N_D - N_A - n} = N_c \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right), \quad (36)$$

где N_c - эффективная плотность состояний в зоне проводимости. Таким образом, если величину N_A можно сделать близкой к N_D , то получается выигрыш, обусловленный как увеличением числителя, так и уменьшением знаменателя в левой части уравнения (36). Например, для типичного фотоприёмника, имеющего $E_g = 0.1$ эВ, концентрацию 10^{17} см $^{-3}$ и работающего при $T = 90$ К, концентрация уменьшается в 20 раз, если компенсация достигает 80%.

Температурная зависимость энергии запрещённой зоны в эВ:

$$E_g = \frac{0.415 - 2.76 \cdot 10^{-4} \cdot T^2}{T + 83}, \quad (37)$$

где T - это температура в градусах К ($0 < T < 300$).

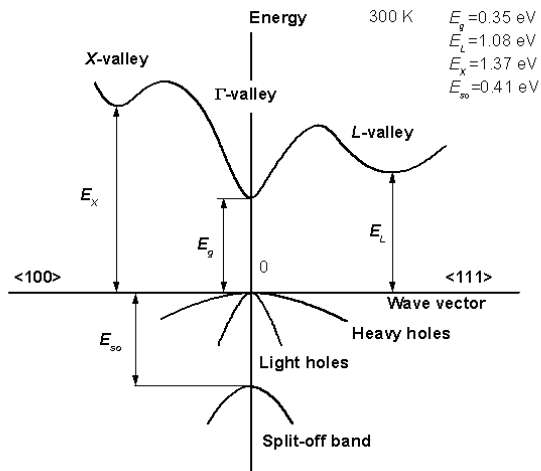


Рис. 4. Зонная диаграмма энергии зон в пространстве импульса соединения InAs [25].

Арсенид индия по своим физическим свойствам близок к InSb. Кристаллизуется в решётку цинковой обманки, постоянная решётки 0.60583 нм. При комнатной температуре ширина запрещённой зоны в InAs составляет $E_g = 0.36$ эВ, при $T = 77$ К увеличивается до $E_g = 0.43$ эВ. Эффективные массы электронов и лёгких дырок малы, $0.023 m_0$ и $0.026 m_0$, соответственно. При легировании InAs донорными примесями до концентрации приблизительно равной 10^{17} см^{-3} и более проявляется эффект Бурштейна-Мосса.

При $T = 77$ К спин-орбитальное отщепление в InAs становится равным ширине запрещённой зоны E_g и коэффициент ударной ионизации для дырок на порядок превосходит аналогичный коэффициент для электронов, но при температурах близких к комнатной, коэффициент ударной ионизации для электронов становится намного больше, чем для дырок.

Коэффициент преломления InAs равен 3.44. InAs также обладает высокой подвижностью электронов $\mu_e \leq 4 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и дырок $\mu_h = 500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при комнатной температуре. Наибольшими подвижностями обладает интерметаллическое соединение InSb, что объясняет интерес к нему исследователей занимающихся изучением физических явлений в твёрдом теле.

В тройных соединениях $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ зависимость ширины запрещённой зоны от состава x носит немонотонный характер, минимальной шириной запрещённой зоны соответствует состав, в котором $x \approx 0.65$. При комнатной температуре край собственного поглощения в таком материале расположен вблизи $\lambda_{zp} = 12$ мкм, а при $T = 77$ К он сдвигается к $\lambda_{zp} = 9$ мкм.

Вообще материалы GaSb-InAs образуют целое семейство составных материалов (тройных и четверных твёрдых растворов) с близкими постоянными кристаллической решётки, такое семейство в зарубежной литературе называют “6.1 Å family” [34]. Большое количество исследовательских работ было посвящено изучению твёрдых растворов системы GaSb-InAs и технологии их создания [35, 36, 37, 38], обширный обзор о материалах A^3B^5 [39] содержит очень много данных об этом семействе.

1.4. Фотоприёмники для среднего ИК-диапазона на основе узкозонных соединений A^3B^5

Спектральный диапазон 1.5-5.0 мкм интересен с точки зрения практических применений, поскольку в нём лежат полосы поглощения многих соединений, важных с точки зрения экологии. Полосы поглощения H_2O расположены на длинах волн 1.94 мкм и 2.75 мкм, CH_4 на 1.66 мкм, 2.35 мкм и 3.34 мкм, CO_2 на 4.27 мкм, CO на 4.67 мкм и др. [40]. Поэтому актуальной задачей является разработка для этого диапазона источников излучения [41] и ФП, как элементной базы оптических датчиков. Также перспективными являются волоконные световоды для среднего ИК диапазона длин волн (2-11 мкм), в который попадают длины волн генерации химических, CO и CO_2 -лазеров. Имеются материалы, такие, как халькогенидные стёкла, флюоридные стёкла, щёлочно-галлоидные кристаллы, в которых оптические потери могут составлять величину $\sim 10^{-1}$ - 10^{-3} дБ/км в указанном диапазоне [42, 43].

Характеристики каждого ФП в общем случае определяются его конструкцией и составом материала, на основе которого он изготовлен. В частности, характеристиками применяемого материала, конфигурацией электрических полей, подвижностями носителей заряда, шириной ОПЗ. Кроме того, характеристики ФП определяются внешним приложенным напряжением и длиной волны принимаемого оптического излучения.

Быстродействующие фотодетекторы являются наиболее важным элементом при создании широкополосных волоконно-оптических систем передачи (ВОСП). При разработке и конструировании систем ВОСП огромное количество исследований, направленных на создание ФП было выполнено на основе изопериодного тройного соединения $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ с подложкой InP [17]. Так как потери в коммерческих волоконно-оптических кабелях минимальны при длинах волн $\lambda > 1.2$ мкм, то основной задачей стало достижение требуемой эффективности в спектральном диапазоне 1.3-1.55

мкм, а ФП на основе $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ обладают максимальной чувствительностью как раз в этом диапазоне, в дальнейшем технология этих ФП достигла совершенства [44]. Работы по созданию ФП для указанного диапазона проводились на основе соединения GaSb и его твёрдых растворов, но более высокий темновой ток таких ФП существенно снизил интерес исследователей к системе материалов GaSb-InAs. В современной литературе технологию создания ФП на основе системы GaInAsSb называют не «конкурсной» по сравнению с технологией на основе InP [22], тем не менее работы по созданию ФП на основе этой системы проводятся [45].

Относительно высокий интерес к ФП на основе Ge ранее (приблизительно до 1980 г.), которые обладают высокой эффективностью в спектральном диапазоне 1.0-1.7 мкм, в дальнейшем резко снизился вследствие появления альтернативы – ФП на основе InP/InGaAs. Фотоприёмники на основе Ge обладают существенно более высоким уровнем темнового тока по сравнению с $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ФП. Высокий уровень темновых токов ФП как известно ухудшает пороговые характеристики [17]. В настоящее время, Ge ФП из-за более низкой стоимости являются более доступной альтернативой ФП на основе $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$. Стоит отметить, что некоторые исследователи всё же используют Ge для создания сверхбыстродействующих ФП [46]. Например, в работе [47] авторы сообщают о создании компактного Ge ФП волноводной конструкции с горизонтальной $p-i-n$ -структурой. Такой ФП обладает частотной полосой пропускания $\Delta f \geq 32$ ГГц при напряжении смещения $U = -1$ В.

В последние два десятилетия наблюдается значительный исследовательский и практический интерес к $p-i-n$ фотодиодным структурам [48, 47], структурам на основе выпрямляющих контактов в системе металл-полупроводник-металл (МПМ) [49], быстродействие таких ФП достигает десятков пикосекунд [50].

Фотодиодная гетероструктура на основе активной области GaInAsSb

ещё в 1987 г. была предложена сотрудниками ФТИ им. А.Ф. Иоффе для создания быстродействующих $p-i-n$ -ФД [51]. Быстродействие $p-i-n$ -диодов исследовалось методом импульсно-растровой микроскопии. Минимальная длительность импульса составляла $\tau=25-35$ пс, в зависимости от тока пучка. В этой работе сообщается, что впервые создан $p-i-n$ -ФД с быстродействием $\tau=50$ пс на основе узкозонных твёрдых растворов GaInAsSb на спектральный диапазон 2.0-2.4 мкм. Минимальное значение ёмкости в режиме истощения составило $C=0.4$ пФ при смещении $U=-2$ В, очень низкое значение ёмкости, несмотря на диаметр площадки $d=90$ мкм. Ширина ОПЗ составляла $W=2$ мкм, что соответствовало толщине узкозонного слоя GaInAsSb. Столь низкое значение ёмкости было достигнуто благодаря малой концентрации носителей заряда в этом слое ($4.8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$), такое значение было ниже на порядок, чем в работах [10, 52]. Собственная концентрация в твёрдом растворе GaInAsSb с $E_g=0.53$ эВ составляет $n_i=4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. На структурах с активной областью GaInAsSb наблюдалось лавинное умножение [53], а в 1998 г. авторы сообщили о создании малошумящих лавинных ФД с разделёнными областями поглощения и умножения для области спектра 1.6-2.4 мкм [54].

В работе [55] представлены результаты теоретического исследования сдвига края фундаментального поглощения излучения фотодиодов на основе соединения GaInAsSb $p-i-n$ - и $p-n$ -структурах как в длинноволновую, так и в коротковолновые области.

В 2003 г. сотрудниками ФТИ им. А.Ф. Иоффе были созданы высокоэффективные ФД на основе GaInAsSb/GaAlAsSb для спектрального диапазона 0.9-2.55 мкм с большим диаметром чувствительной площадки [56], также в этой работе детально описана технология создания гетероструктур.

Одна из проблем при работе с ФД на основе узкозонных материалов связана с относительно высоким уровнем обратного темнового тока, который как правило определяется тепловой генерацией носителей через

генерационно-рекомбинационные центры в ОПЗ. Энергетические уровни генерационно-рекомбинационных центров находятся вблизи середины запрещённой зоны, поэтому температурная зависимость тока, генерированного в ОПЗ, оказывается пропорциональной $\exp(-\Delta E_g / 2kT)$. При увеличении обратного смещения на $p-n$ -переходе ОПЗ расширяется и генерированный ток в этой области не растёт.

При тепловой генерации носителей в нейтральных областях $p-n$ -перехода темновой ток (ток Шокли или диффузионный ток) не меняется со смещением. В $p-n$ -переходах и гетеропереходах диффузионный ток генерируется в основном в высокоомном или узкозонном полупроводнике соответственно, а его зависимость от температуры пропорциональна $\exp(-\Delta E_g / kT)$. С увеличением ширины запрещённой зоны полупроводника токи, природа которых вызвана генерацией и рекомбинацией в ОПЗ и нейтральных областях $p-n$ -перехода, экспоненциально уменьшаются. Если при высокой температуре диффузионная компонента темнового тока оказывается больше, в $p-n$ -переходах и гетеропереходах на основе A^3B^5 , обычно при понижении температуры начинает доминировать ток, генерированный в ОПЗ.

Благодаря использованию двойного гетероперехода в фоточувствительной структуре при рабочих смещениях узкозонная область, поглощающая излучение, не обедняется основными носителями. Компонента генерационно-рекомбинационного тока в ОПЗ узкозонного полупроводника практически отсутствует.

В ФП на основе гетероструктур с энергетическим барьером для основных носителей, как и в ФД сквозные токи основных отсутствуют, фотогенерированные носители диффундируют к ОПЗ и разделяются его полем. В ФП с энергетическим барьером для основных носителей области по разные стороны барьера могут иметь одинаковый тип проводимости, что

невозможно для $p-n$ -переходов. В этом и состоит отличие таких ФП от традиционных ФД с $p-n$ -переходом. Основным из преимуществ структур с энергетическим барьером является уменьшенная ёмкость, что очень важно для создания на их основе быстродействующих ФП [23].

Природа темнового тока и электрические свойства ФД на основе p -GaSb/ p -GaInAsSb/ N -GaAlAsSb гетеропереходов тщательно изучалась в работе [57], в которой были изучены механизмы протекания тока в гетероструктурах при различных температурах, а также показано, что при малых диаметрах чувствительных площадок фотодиодных мез, $d < 300$ мкм, поверхностная составляющая темнового тока становится значительно более существенной, чем объёмной. Сравнение экспериментальных и теоретических результатов показало, что при низких температурах ($T < 150$ К) как для прямого, так и для обратного тока преобладает туннельный механизм протекания. Величина туннельного тока становится определяющей при напряжённости электрического поля $p-n$ -перехода $E \geq 10^5$ В/см, что является следствием малой ширины запрещенной зоны исследуемых материалов и малых эффективных масс электронов и дырок.

Соответственно, успех в снижении общего темнового тока может быть достигнут за счёт уменьшения поверхностных утечек. Для соединений на основе GaSb и его твёрдых растворов, эффективным методом пассивации является анодное окисление. Разработанная сотрудниками ФТИ им. А.Ф. Иоффе технология сульфидной пассивации позволяет защитить и зафиксировать боковую поверхность мезы с помощью анодного окисла [58]. Обнаружено, что при обработке в водных сульфидных растворах таких полупроводниковых материалов присутствует фаза травления. Авторами изучено воздействие процесса обработки (тип и молярность раствора, продолжительность обработки) на скорость травления исследованных материалов. Определены оптимальные технологические условия пассивации фотодиодных меза-конструкций на основе GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb и было

получено значительное снижение (в 5-10 раз) величины обратного темнового тока.

Арсенид индия представляет особый интерес как материал, используемый для создания оптоэлектронных приборов, которые работают в средней ИК-области спектра. На основе InAs в сочетании с многокомпонентными твёрдыми растворами (InAsSb, InAsSbP и др.) могут быть созданы фотодиоды [59], светодиоды [41], лазеры [60], работающие в диапазоне 2-5 мкм, важном для газового анализа и охраны окружающей среды [61, 62, 63].

Фотодиоды из InAs получают диффузией, ионной имплантацией или выращивают эпитаксиальными методами. Для пассивации поверхности используют анодное окисление с последующим нанесением оксинитридных плёнок или другие покрытия.

Удельная обнаружительная способность фотодиодов из InAs при охлаждении их до температур $T \leq 150$ К и комнатном фоне на длине волны $\lambda = 3$ мкм близка к радиационному пределу и достигает $D^* = (5-8) \cdot 10^{11}$ Вт⁻¹·Гц^{1/2}·см. При комнатной температуре максимум спектральной чувствительности располагается при $\lambda = 3.5$ мкм, а удельная обнаружительная способность в максимуме уменьшается до $D^* = (1-2) \cdot 10^9$ Вт⁻¹·Гц^{1/2}·см.

Фотодиоды из InAs, в том числе и лавинные, применяют для приёма лазерного излучения, экологического мониторинга, в инфракрасной спектроскопии, датчиках температуры и др.

Выращивание эпитаксиальных гетероструктур осуществляется в основном ЖФЭ и МОГФЭ [64, 65]. Сотрудниками лаборатории ИК оптоэлектроники были разработаны и предложены высокоэффективные ФД для спектрального диапазона 2.0-3.5 мкм на основе гетероструктуры InAs/InAsSbP [66], меза-ФД со структурой $p-n$ были изготовлены из гетероструктур выращенных по технологии ЖФЭ. Диаметр

фоточувствительных площадок варьировался в пределах $300 \leq d \leq 450$ мкм. Приборы продемонстрировали высокую токовую монохроматическую чувствительность $S_i \approx 1.2$ А/Вт при комнатной температуре, величину быстродействия $\tau \approx 50$ нс при напряжении смещения $U = -1.5$ В. По проведённым оценкам это время соответствовало диффузионной составляющей. В работе [67] сообщается о результатах исследований, направленных на создание более длинноволновых ФД со структурой $p-i-n$, на основе двойной гетероструктуры выращенной на подложке n -InAs с активной областью i -InAs_{0.94}Sb_{0.06}, на основе варизонной гетероструктуры с активной областью переменного состава InAs_{1-x}Sb_x ($x \approx 0.06-0.07$) и гомоперехода $p-n$ Ga_xIn_{1-x}As_{1-y}Sb_y ($x=0.11$, $y=0.21$). Значения быстродействия фотодиодов составило $\tau = 30-50$ нс, при этом ёмкость не ограничивала их быстродействие. ФД продемонстрировали чувствительность $S_i \leq 0.9$ А/Вт в спектральных диапазонах 1.3-4.2 мкм (InAsSb) и 1.3-4.8 мкм (GaInAsSb).

При создании ФП на основе InAs_{1-x}Sb_x трудной задачей является выбор подложки, согласованной с тройным соединением по постоянной решётки. С составом InAs_{0.35}Sb_{0.65} с минимальной шириной запрещённой зоны по параметрам решётки согласовано соединение Ga_{0.38}In_{0.62}Sb.

Наилучшие характеристики фотодиодов из InAs_{1-x}Sb_x с $0.09 \leq x \leq 0.15$ получены при использовании эпитаксиальных слоёв на подложках из InAs и GaSb, также почти согласованных с InAs_{1-x}Sb_x по постоянной решётки. Фотоны проходят через прозрачную для ИК-излучения подложку из GaSb или InAs и поглощаются в активном слое InAs_{1-x}Sb_x, если фотодиоды используются с облучением через подложку. Длинноволновая граница спектральной чувствительности в таком случае определяется фундаментальным краем поглощения подложки, для GaSb при $T = 77$ К он составляет $\lambda_{cp} = 1.7$ мкм, для InAs $\lambda_{cp} = 3.5$ мкм. В случае засветки со стороны широкозонного окна коротковолновая граница спектральной

чувствительности может существенно сдвинуться в сторону меньших длин волн. Длинноволновая граница спектральной чувствительности задаётся количественным значением компонента $Sb(x)$ и располагается в диапазоне 3.5-5.0 мкм.

Фотодиоды на основе $InAs_{1-x}Sb_x$ удалось получить с использованием практически всех известных методов, в том числе молекулярно-лучевой и газофазной эпитаксии. Например, с помощью жидкофазной эпитаксии созданы $p-n$ -гомопереходы в $InAs_{1-x}Sb_x$. Концентрация электронов в слоях n -типа составляла $\approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$, область p -типа легировалась Zn. При $T=77 \text{ К}$ темновые токи в фотодиодах обусловлены генерацией и рекомбинацией носителей в ОПЗ (эффективное время жизни меньше 0.5 мкс), произведение R_0S достигает значений $10^{17}-10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$, а $D^*=(2-4)\cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1}\cdot\text{Гц}^{1/2}\cdot\text{см}$. Такие фотодиоды предназначены для волоконно-оптических систем среднего инфракрасного диапазона.

Опробовано тройное соединение $InAs_{1-x}Sb_x$ в качестве исходного материала для изготовления ЛФД (при $x<0.4$ вследствие спин-орбитального резонанса коэффициент ударной ионизации для дырок больше, чем для электронов), а также для изготовления ФР [23].

По масштабам применения полупроводниковый материал $InAs_{1-x}Sb_x$ пока не может конкурировать с InSb.

1.5. Конструкции быстродействующих фотоприёмников

Частотные характеристики фотодиода являются одними из основных, определяющих их качество и широту охвата возможных применений.

В настоящее время существует несколько разновидностей конструкций фотодетекторов, подходящих для создания быстродействующих фотодиодов. Принципиально их можно разделить на две группы. ФП со структурой $p-i-n$ и поверхностно-барьерные ФП.

О ФД $p-i-n$ -типа было написано достаточно ранее. Отметим только,

что по технологии формирования заданной площади $p-n$ -перехода $p-i-n$ -ФД можно разделить на меза и планарные [68]. Меза-технология более проста и доступна, позволяет быстро изготавливать образцы для исследования. Планарная технология сложная и более совершенная, позволяет изготавливать образцы с меньшим темновым током при заданной площади $p-n$ -перехода и стабильными характеристиками [69].

У поверхностно-барьерных ФД контактный барьер располагается на поверхности полупроводника. Их изготавливают на основе эффекта Шоттки (образование контактного барьера на границе металл-полупроводник) или специальной обработкой, когда поверхностный слой полупроводника в отличие от объёмного приобретает иной знак [70]. Падающий поток излучения в таких приёмниках проходит сквозь оптический контакт с поверхностным инверсионным слоем, выполненный из тонкой золотой плёнки толщиной $l=2-10$ нм, и поглощается в области $p-n$ -перехода. Очень распространены ФД со структурой металл-полупроводник-металл (МПМ), принцип работы которых также основан на эффекте Шоттки. Конструкция представляет собой выращенный на подложке активный слаболегированный слой полупроводника с концентрацией близкой к собственной, на поверхности которого расположена встречно штыревая система металлических контактов [22]. ФД такой конструкцией обладают высокой чувствительностью и часто превосходят по величине быстродействия ФД со структурой $p-i-n$ с близкими значениями площадей чувствительных площадок. Например коммерческие МПМ-ФД от Hamamatsu Photonics (Япония) серий G4176 (GaAs) и G7096 (InGaAs) обладают быстродействием 30 пс и 40 пс, соответственно [50]. При этом площадь чувствительной площадки составляет $S=200$ мкм². ФД UPD-15-IR2-FC (InGaAs) от Alphas (ФРГ) обладает быстродействием $\tau \approx 15$ пс, а частотной полосой пропускания $\Delta f > 25$ ГГц. Коммерческие ФД от указанных производителей $p-i-n$ -типа по быстродействию уступают МПМ ФД. Характерной особенностью для всех

сверхбыстродействующих ФД является длинноволновая граница спектральной чувствительности $\lambda = 1.65$ (1.7) мкм.

Интересным по структуре и конструкции представляется ФП от Discovery Semiconductors (США) изготовленный на основе InGaAs/InP с отдельными областями поглощения излучения и разделения фотоносителей [71]. Структура имеет узкозонную активную область *i*-InGaAs изопериодную с InP, широкозонную область разделения генерированных носителей *i*-InP. Фотоприёмники имели чувствительность в диапазоне 0.8-1.7 мкм, были изготовлены с диаметрами чувствительных площадок $d = 30$ мкм и $d = 40$ мкм, обладали частотной полосой пропускания $\Delta f = 10$ ГГц. Для конструкции ФП DSC30 с $d = 30$ мкм характерен окружающий заземляющий контакт, а к кольцевому контакту на широкозонном входном окне для излучения подведён мостиковый контакт (рис. 5).

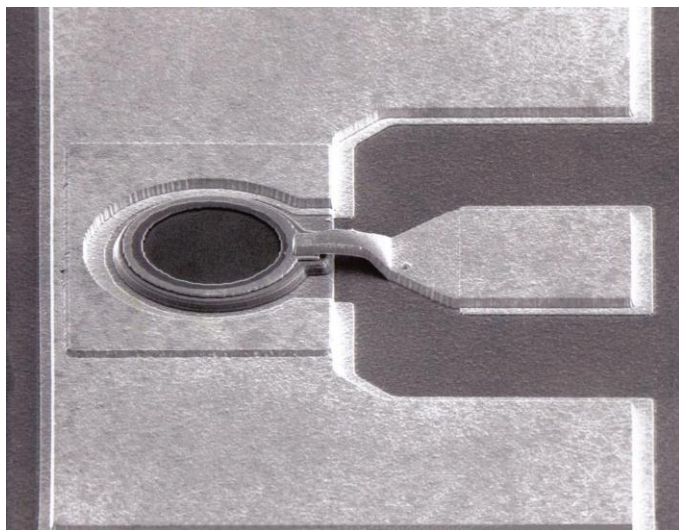


Рис. 5. СЭМ-фото конструкции ФП DSC30 с диаметром чувствительной площадки $d = 30$ мкм [71].

Как утверждают авторы, такие ФП идеально подходят для создания аппаратуры, работающей в открытом канале, например лидаров и средств оптической связи [71]. В этой же работе авторы сообщают об исследовании радиационной стойкости ФД DSC40S, деградации параметров при воздействии ионизирующего излучения не наблюдалось.

В 2013 г. исследователи под руководством Abhay Joshi сообщили о

создании неохлаждаемых ФП с неизопериодной активной областью $\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{As}$ с $E_g=0.57$ эВ при $T=300$ К к подложке InP [15]. Для согласования с постоянной решётки подложки $n\text{-InP}$ активного слоя структуры $i\text{-In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{As}$ предварительно наращивались слои переменного состава $n\text{-InAs}_y\text{P}_{1-y}$. Накрывающим верхним слоем был твёрдый раствор $p\text{-InAs}_{0.33}\text{P}_{0.67}$. ФП обладали длинноволновой границей спектральной чувствительности с $\lambda_{sp}=2.2$ мкм, токовой чувствительностью $S_I=1.2$ А/Вт на длине волны $\lambda_{\max}=2.05$ мкм, временем нарастания и спада импульса фототока $\tau \approx 15$ пс, частотной полосой пропускания $\Delta f \leq 25$ ГГц.

Теоретически максимально возможная частотная полоса пропускания технологически оптимизированных ФД $p-i-n$ -типа с диаметром чувствительных площадок $d < 30$ мкм $\Delta f = 40$ ГГц [22].

В работе [72] достигнута частотная полоса пропускания $\Delta f = 5.2$ ГГц монолитного оптоэлектронного приёмника на основе GaAs , а в работе [73] сообщалось о создании приёмника на основе InGaAs/InP структуры $p-i-n\text{-JFET}$ в интегрированном исполнении с полевым транзистором. Структура была изготовлена на полуизолирующей подложке InP . Активным являлся нелегированный слой InGaAs толщиной $l=1.5$ мкм, с концентрацией носителей 10^{15} см⁻³. ФП с диаметром чувствительной площадки $d=80$ мкм обладал величиной темнового тока $I_d=2$ нА и ёмкостью $C \approx 0.35$ пФ при напряжении смещения $U=-5$ В. Максимальное усиление по напряжению было достигнуто на этой структуре величины 12.5, а частотная полоса пропускания $\Delta f = 1.2$ ГГц.

Дальнейшее развитие $p-i-n$ -ФД привело к созданию сверхбыстродействующих фотодиодов бегущей волны, с отдельными областями поглощения излучения и разделения фотоносителей и расширенным динамическим диапазоном (Uni-Travelling-Carrier или UTC-ФД) для аналоговых волоконно-оптических линий связи [23].

Преимуществом UTC-ФД является возможность уменьшения толщины слоя поглощения без увеличения RC-постоянной времени фотодиодов, что не удаётся в случае утонения i -области в $p-i-n$ -фотодиодах. Значительное расширение динамического диапазона привело к уменьшению токовой чувствительности, обычно $S_I \leq 0.1$ А/Вт, что обусловлено тонкостью слоя поглощения. Для повышения квантового выхода и токовой чувствительности используют ввод излучения в UTC-ФД через скошенную преломляющую грань, в этом случае достигнута чувствительность $S_I \leq 0.48$ А/Вт. Частотная полоса пропускания UTC-ФД достигает значений $\Delta f \geq 300$ ГГц [23, 22].

В ФП бегущей волны (waveguide detector) активная фоточувствительная площадка была уменьшена настолько, что ввод излучения стал возможен только с торцевой стороны структуры [22].

В исследовательской работе [48] сообщается о создании InGaAs/InP $p-i-n$ фотодиодов на основе многомодовой волноводной структуры с частотной полосой пропускания $\Delta f = 100$ ГГц.

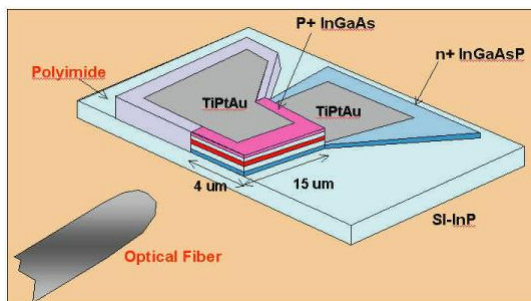


Рис. 6. Схематическая структура высокоэффективных фотодиодов с частотной полосой пропускания $\Delta f = 100$ ГГц на основе волноводной InGaAs/InP $p-i-n$ структуры [48].

Структура, на основе которой были изготовлены приборы, была выращена с помощью технологии МПЭ (МВЕ) на (100)-ориентированном полуизолирующем InP. Толщина намеренно нелегированного активного слоя $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ составляла $l = 0.6$ мкм.

Характерными особенностями таких приборов являются малая активная область размерами 4×15 мкм, использование полиимидного

(polyimide) слоя для увеличения площади верхнего контакта (рис. 6). Остаточная концентрация основных носителей в нелегированном активном слое $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ составляла величину порядка 10^{15} см^{-3} , а электрическая ёмкость прибора достигала $C=32$ фФ при напряжении обратного смещения $U=1.0$ В, в том числе паразитная ёмкость. Измеренная ёмкость изготовленных многомодовых волноводных ФД подтвердила ограниченную частотную полосу пропускания величиной $\Delta f=100$ ГГц RC-компонентой. ФД бегущей волны обладает чрезвычайно низким током утечки величиной несколько наноампер при $U=-1$ В и высокой токовой чувствительностью $S_I=0.58$ А/Вт. Структура многомодового волновода является подходящей для интеграции с СВЧ монолитными интегрированными цепями (Microwave Monolithic Integrated Circuit (ММИС)), например с цепями усилителей, путём одного эпитаксиального ростового процесса на эпитаксиальном биполярном транзисторе с гетеропереходом (НВТ).

На основе Ge также разрабатываются ФД бегущей волны, например в работе [47] авторы сообщают о создании компактного ФД с горизонтальной структурой $p-i-n$ (рис. 7). Такой ФД обладал частотной полосой пропускания $\Delta f \geq 32$ ГГц при напряжении смещения $U=-1$ В. Ширина активной области i -Ge составляла всего 0.65 мкм, для ввода излучения в неё использовался интегрированный со структурой волновод шириной 3 мкм.

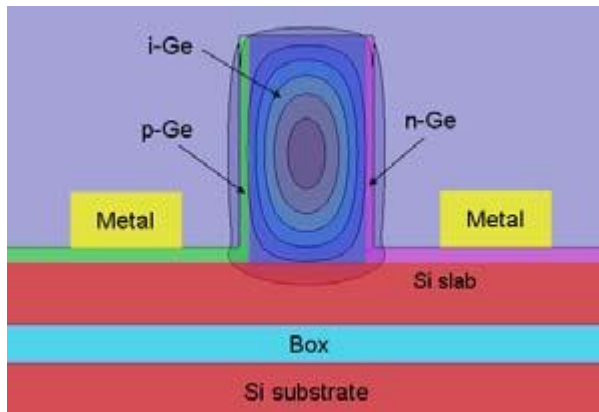


Рис. 7. Схема бокового разреза компактного ФД с горизонтальной структурой $p-i-n$ на основе Ge [47].

В исследовательской работе [74] описан простой быстродействующий ФП мощного лазерного излучения на основе эффекта оптического выпрямления, показана возможность его применения для регистрации импульсного лазерного излучения в диапазоне длин волн 0.266-1.9 мкм. Такой фотоприёмник не требует внешнего источника питания и обладает быстродействием лучше, чем 0.5 нс. Такой ФП подходит для исследования формы импульсов вынужденного комбинационного рассеяния света. Не сообщается об абсолютных величинах его чувствительности и пороговых характеристиках. Авторами сделан вывод о том, что чувствительность в ИК-области спектра уменьшается.

1.6. Выводы

Глава 1 является обзорной, на основе приведённого обзора можно сделать следующие обобщения и выводы:

1. Много работ выполнено по исследованию свойств и параметров узкозонных полупроводниковых соединений GaSb, InAs, InSb и их твёрдых растворов. Есть публикации о создании на их основе оптоэлектронных приборов, но не имеется сведений о создании быстродействующих ФП, работающих в средней ИК-области при комнатной температуре.

2. В настоящее время большое число исследователей ведут работы направленные на создание и разработку сверхбыстродействующих

инфракрасных ФП на основе Ge и InGaAs/InP, ФП имеют спектральную область чувствительности 0.8-1.8 мкм. Кроме структуры $p-i-n$ для создания сверхбыстродействующих ФП используется структура МПМ. Сравнительно недавно разработаны ФД бегущей волны и UTC-ФД с расширенным динамическим диапазоном для аналоговых волоконно-оптических линий связи.

3. Не уделялось внимание, особенно в отечественных научных изданиях, созданию быстродействующих ФП на основе квантово-размерных гетероструктур работающих в среднем ИК-диапазоне.

На основе вышеперечисленных выводов и обобщений сформулирована цель и поставлены задачи диссертационной работы.

Цель диссертационной работы заключалась в создании и исследовании высокоэффективных неохлаждаемых сверхбыстродействующих фотодиодов на основе объёмных, квантово-размерных гетероструктур узкозонных полупроводниковых соединений A^3B^5 и их твёрдых растворов, для спектрального диапазона 1.0-5.0 мкм.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Проведение анализа факторов, влияющих на быстродействие $p-i-n$ -фотодиода и ограничивающих его. Разработка оптимальной мезоконструкции фотодиодного чипа, оценка его параметров.

2. Разработка и создание быстродействующих фотодиодов на основе объёмной гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb для спектрального диапазона 1.0-2.4 мкм, фотодиодов на основе двойной гетероструктуры InAs/InAsSbP для спектрального диапазона 1.5-3.8 мкм, а также фотодиодов на основе гетероструктур InAsSb/InAsSbP для спектрального диапазона 2.5-4.9 мкм.

3. Исследование электрических, фотоэлектрических характеристик и параметров созданных быстродействующих фотодиодов.

4. Разработка методики определения быстродействия фотодиодов при

возбуждении фотосигнала ультракороткими лазерными импульсами.

5. Повышение квантовой эффективности фотодиодов на основе гетероструктур InAsSb/InAsSbP за счёт изменения направления излучения внутри фотодиодного чипа.

6. Разработка быстродействующих фотодиодов на основе квантово-размерных гетероструктур узкозонных полупроводниковых соединений A^3B^5 с глубокими квантовыми ямами, исследование их электрических, фотоэлектрических характеристик и параметров.

Глава 2. Методы исследования параметров фотодиодных гетероструктур и фотодиодов

В главе 2 будут детально описаны методы исследования характеристик, параметров фотодиодов, также будут представлены схемы (или блок-схемы) измерительных установок.

2.1. Объекты исследования

Объекты исследования представляли собой фотодиодные чипы меза-конструкции, которые подверглись специальной обработке на всех технологических этапах в процессе своего создания. Фотодиодные чипы монтировались на корпуса промышленного производства ТО-18 и ТО-5 для оптоэлектронных приборов. При измерении временных характеристик (быстродействия) фотодиоды монтировались на специальные безъёмкостные контактные полоски с целью согласования с измерительным трактом и минимизации паразитной ёмкости. Измерения во многом соответствовали ГОСТ 17772-88 [1], регламентирующему методики измерения параметров и характеристик ФЭПП и ФПУ.

2.2. Исследование вольт-амперных характеристик фотодиодов

Измерение ВАХ проводилось по ГОСТ 17772-88 [1] (метод измерения темнового тока ФЭПП). Была собрана установка для определения ВАХ фотодиодов, блок-схема которой представлена на рис. 8.

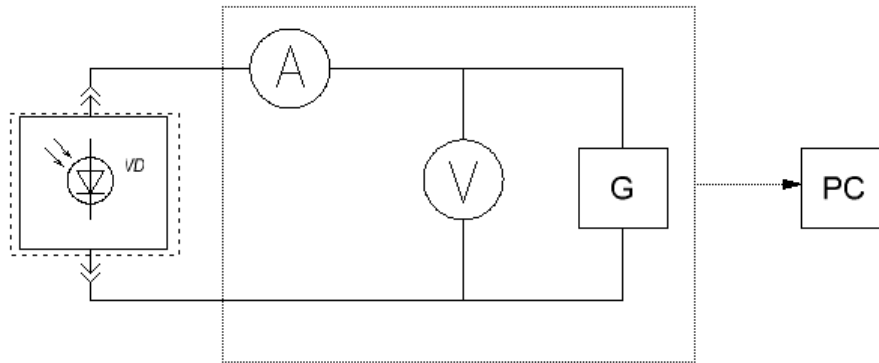


Рис. 8. Блок-схема измерительной установки для определения ВАХ фотодиодов. VD – исследуемый образец фотодиода, А – амперметр, V – вольтметр, G – источник питания, пунктирной линией показан светозащитный экран, PC – персональный компьютер.

Для проведения исследований электрических и фотоэлектрических характеристик фотодиодные чипы монтировались подложечной стороной на корпус ТО-18 с двумя выводами.

Выводы корпуса соединялись с автоматизированным измерителем ВАХ через цанговые разъёмы. Автоматизированный измеритель ВАХ состоял из амперметра – А, вольтметра – V и автоматически управляемого источника питания – G, подключенных согласно схеме на рис. 8. Напряжение U источника питания G менялось дискретно с шагом от $\Delta U = 0.005$ В до $\Delta U = 0.05$ В, значения приложенного напряжения и соответствующего ему темнового тока, протекающего через фотодиод, регистрировались в цифровом виде, далее передавались через параллельный порт LPT персонального компьютера PC. Программа позволяла получать и сохранять в цифровом виде значения приложенного напряжения и соответствующие значения протекающего электрического тока. Вывод кривой ВАХ и значений R_0 осуществлялись в режиме реального времени на монитор ПК.

Значения дифференциального электрического сопротивления фотодиодов рассчитывались по закону Ома для участка цепи при малых напряжениях обратного смещения до $U_0 = 10$ мВ, где ВАХ имеет линейную

зависимость.

2.3. Исследование вольт-фарадных характеристик фотодиодов

Измерение ёмкости ФЭПП проводилось мостовым методом по ГОСТ 18986.4-73 [75].

ВФХ были получены с помощью цифрового измерителя иммитанса L, C, R E7-12. Шаг изменения прикладываемого напряжения смещения $\Delta U = 0.1$ В. Электрическая ёмкость экспериментальных образцов ФД измерялась на частоте $f = 1$ МГц при напряжении обратного смещения до $U = -1$ В. Блок-схема измерительной установки показана на рис. 9.

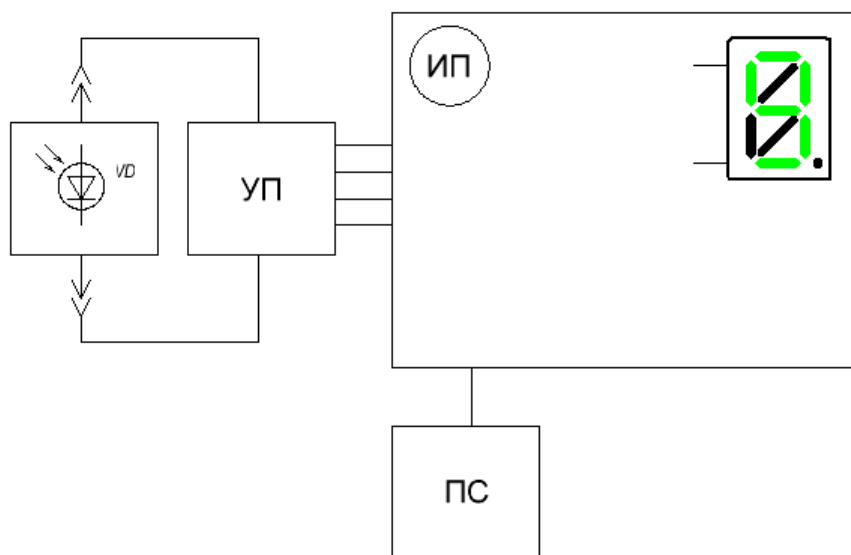


Рис. 9. Блок-схема измерительной установки для определения ВФХ фотодиодов. VD – исследуемый фотодиод, УП – устройство присоединительное E7-12, ПС – пульт смещения, ИП – измерительный прибор E7-12.

Исследуемый ФД VD на стандартном корпусе ТО-18 с двумя выводами подключался к присоединительному устройству E7-12 УП через цанговые контактодержатели. Приставка УП соединялась с цифровым измерителем иммитанса L, C, R E7-12 четырьмя сигнальными радиочастотными коаксиальными кабелями (рис. 9). Измерения электрической ёмкости экспериментальных образцов фотодиодов измерителем E7-12

осуществлялись на частоте $f=1$ МГц при напряжении обратного смещения до $U=-1$ В. Пульт смещения позволял изменять напряжение прикладываемого смещения дискретно от $U=0$ В с шагом $\Delta U=0.1$ В. С цифрового табло измерительного прибора Е7-12 считывались и регистрировались показания электрической ёмкости.

2.4. Исследование спектральных характеристик фотодиодов

Для определения спектральных характеристик ФД за основу был взят ГОСТ 17772-88 (метод измерения относительной спектральной характеристики чувствительности), в используемой схеме не было контрольного ФЭП. Измерения проводились на установке, структурная блок-схема которой приведена на рис. 10.

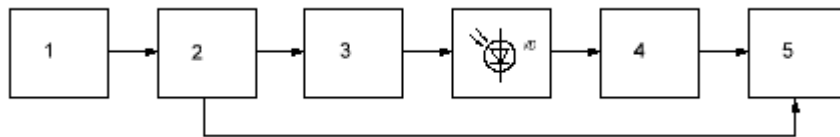


Рис. 10. Блок-схема измерительной установки для определения спектральной характеристики чувствительности фотодиодов. VD – исследуемый фотодиод, 1 – источник излучения, 2 – модулятор, 3 – монохроматор, 4 – блок смещения и магазин нагрузочных сопротивлений, 5 – регистрирующий прибор.

В качестве источника инфракрасного излучения использовалось чёрное тело - карбид-кремниевый глобар, нагретый до температуры $T \approx 1500-1600^\circ\text{C}$, что соответствовало максимуму излучения абсолютно чёрного тела (АЧТ) на длине волны $\lambda \approx 2$ мкм. Температура накала чёрного тела измерялась с помощью визуального пирометра ПРОМИНЬ М1. Квантовая эффективность η определялась путём сравнения токовой монохроматической чувствительности исследуемого ФД S_i с чувствительностью калиброванного термостолбика фирмы Carl Zeiss.

Для получения спектров фоточувствительности исследуемых ФД использовалась схема синхронного детектирования, которая состояла из

механического модулятора, призмного монохроматора SPM2 (Carl Zeiss) и синхронного детектора Stanford Research SR830. Ключевым дисперсионным элементом монохроматора являлась призма LiF. Излучение от глобара фокусировалось конденсорным зеркалом на входную щель монохроматора, проходя через диск модулятора. Механический модулятор обеспечивал частоту модуляции излучения $f=500$ Гц. Исследуемый ФД был нагружен на конечное сопротивление магазина нагрузочных сопротивлений, с которого измерялся регистрирующим прибором – синхронным детектором сигналов Stanford Research System SR830. Синхроимпульс от ФП оптопары модулятора подавался на синхровход регистрирующего прибора.

Токовая монохроматическая чувствительность S_I определялась по формуле (4).

Удельная обнаружительная способность фотодиодов D^* оценивалась по измеренной величине уровня шумов и токовой чувствительности по формуле Джонса (25) [20].

2.5. Исследование быстродействия фотодиодов

Методика исследования быстродействия фотодиодов также должна удовлетворять ГОСТ 17772-88.

Для исследования быстродействия ФД, фотодиодные чипы VD были собраны в разрыве микрополосковой линии с сопротивлением $Z=50$ Ом для согласования с волновым сопротивлением измерительного тракта. ФД зондировались импульсами излучения с длиной волны $\lambda=1.3$ мкм от сверхбыстродействующего полупроводникового лазера LD. Ширина на половине высоты максимума (FWHM) импульса накачки составляла $\tau=25$ пс [76, 77]. Излучение полупроводникового лазера вводилось в оптическое волокно, на выходе которого была размещена оптическая система 1, обеспечивающая фокусировку излучения на входное окно исследуемого ФД VD. Фотоотклик фотодиода регистрировался стробоскопическим

осциллографом С1-91 3, имеющим полосу пропускания $\Delta f = 18$ ГГц. Блок-схема измерительной установки приведена на рис. 11.

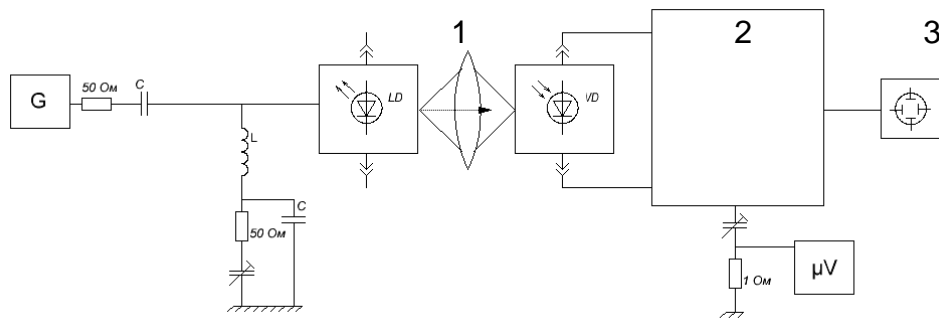


Рис. 11. Блок-схема измерительной установки для определения быстродействия фотодиодов. VD – исследуемый фотодиод, 1 – оптическое волокно с оптической системой, 2 – микрополосковая линия с сопротивлением $R_L = 50$ Ом, 3 – стробоскопический осциллограф.

2.6. Метод исследования магнитотранспортных свойств слоёв фотодиодных гетероструктур

Измерения магнитотранспортных свойств проводились шестизондовым методом на прямоугольных образцах с размером 3×10 мм, при этом исключалось искажение линий тока вдоль образца, так как выполнялось условие, что отношение длины образца L к его ширине d : $\frac{L}{d} > 3$.

На поверхность образцов со стороны эпитаксиального слоя с помощью паяльника наносились 6 индиевых контактов (рис. 12). Омические свойства контактов проверялись с помощью осциллографа. Если сопротивление контактов $R \leq 100$ Ом, то ВАХ контакта "металл-полупроводник" имела линейный вид.

Образец закреплялся в специальном держателе и распайка контактов осуществляется серебряной проволокой диаметром $d = 50$ мкм. Величина тока через образец не превышала значений, при которых зависимость падения напряжения от тока носит линейный характер (т.е. выполняется закон Ома). В большинстве случаев величина тока лежит в пределах $I = 50$ - 100 мкА.

Для измерений при температуре $T=77$ К держатель с исследуемым образцом помещался в криостат с азотом. Далее держатель помещался между полюсами электромагнита (0.5-20 кЭ) и подключался к установке для измерения гальваномагнитных эффектов. Измерение тока через образец осуществлялось с помощью универсального микровольтметра В7-21, напряжения на контактах - микровольтметрами В2-15 и Щ68003. Температура образца контролировалась путём измерения напряжения на стандартной градуированной термопаре «медь-константан».

При проведении экспериментов на контактах 3-5 и 4-6 измерялось падение напряжения U_σ , а на контактах 3-4 и 5-6 – ЭДС Холла U_H (рис. 12). Из этих данных рассчитывается электропроводность σ , коэффициент Холла R_H и подвижность $\mu_H = R_H \times \sigma$.

Величина коэффициента Холла рассчитывалась из данных U_H по формуле:

$$R = \frac{U_H}{I} \cdot \frac{h}{H} \cdot \frac{d}{d'}, \quad (38)$$

где I – величина тока, проходящего через образец, h – толщина образца, d – ширина образца, H – напряженность магнитного поля, $\frac{d}{d'}$ – поправочный коэффициент (d' – усредненное расстояние между парами контактов 3-4 и 5-6, которое, в общем случае, меньше ширины образца d).

Величина проводимости рассчитывается из данных по U_σ по формуле:

$$\sigma = \frac{I}{U_\sigma} \cdot \frac{\Delta l}{d \cdot h}, \quad (39)$$

где I – величина тока, проходящего через образец, h и d – толщина и ширина образца, Δl – усредненное расстояние между зондами 3 и 5, 4 и 6.

Величина холловской подвижности рассчитывается из данных по U_H и U_σ по формуле (обозначения те же, что и в (38) и (39)):

$$\mu_H = \frac{U_H}{U_\sigma} \cdot \frac{\Delta l}{d' \cdot H}, \quad (40)$$

где U_σ – падение напряжения на контактах 3-5 и 4-6, U_H – падение напряжения на контактах 3-4 и 5-6, Δl – усредненное расстояние между зондами 3 и 5, 4 и 6, H – напряженность магнитного поля, d' – усредненное расстояние между парами контактов 3-4 и 5-6.

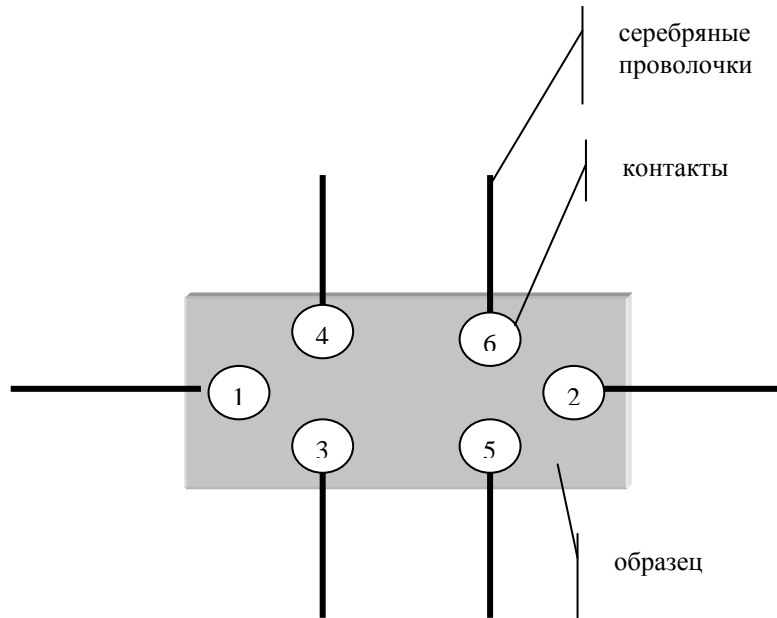


Рис. 12. Схема образца, подготовленного для исследований гальваномагнитных свойств слоёв фотодиодных гетероструктур.

Глава 3. Создание и исследование быстродействующих $p-i-n$ -фотодиодов для спектрального диапазона 1.0-2.4 мкм на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb

Глава 3 посвящена исследованиям, направленным на разработку, создание и изучение свойств высокоэффективных быстродействующих $p-i-n$ -фотодиодов для спектрального диапазона 1.0-2.4 мкм на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb.

В разделе 3.1 будет проведён анализ факторов, ограничивающих быстродействие $p-i-n$ -ФД, определены требования, которым должны удовлетворять гетероструктуры и меза-конструкции фотодиодных чипов.

В разделе 3.2 внимание будет уделено технологии создания фотодиодов с диаметром фоточувствительной площадки $d=100$ мкм, описан технологический цикл по созданию быстродействующих $p-i-n$ -фотодиодов для спектрального диапазона 1.0-2.4 мкм. Также будут перечислены основные требования к твёрдым растворам GaInAsSb с точки зрения их использования в качестве активной области ФД. Будут представлены результаты измерения электрических, фотоэлектрических параметров ФД, а также результаты исследования их быстродействия.

Раздел 3.3 посвящён созданию и изучению свойств высокоэффективных сверхбыстродействующих (широкополосных) ФД на основе фотодиодной гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с разделёнными фоточувствительной ($d=50$ мкм) и контактной мезами, соединёнными металлическим мостиковым контактом. Будет проанализирована эквивалентная ёмкость ФД с разделёнными мезами.

3.1. Основные факторы ограничивающие быстродействие $p-i-n$ -фотодиодов

Конструкцию фотодиодов с вытравленной плоской вершиной называют «меза-конструкцией». В фотодиодных структурах $p-n$ -переходы

выращиваются современными эпитаксиальными методами, а чувствительные площадки формируются травлением через маски.

Величина поглощения излучения в материалах A^3B^5 $\alpha = 10^4 - 10^5 \text{ см}^{-1}$, что следует из прямозонного характера перехода носителей между энергетическими зонами при возбуждении. Длина поглощения определяется по формуле [78]

$$L_\alpha = \frac{1}{\alpha}. \quad (41)$$

Из формулы (41) следует, что $L_{A^3B^5} \sim 1$ мкм. Чтобы обеспечить условие высокой эффективности $p-i-n$ -ФД, необходимо сформировать толщину ОПЗ порядка длины поглощения. В подавляющем большинстве материалов A^3B^5 , в электрических полях с напряжённостью $E \approx 10^4$ В/см, скорости носителей достигают значения $U = 10^7$ см/с. Время пролёта носителями ОПЗ толщиной $W = 1$ мкм составляет около $t = 10$ пс. Толщина ОПЗ в ФД требуется несколько микрометров, чтобы сохранить высокую квантовую эффективность и приблизиться к скорости отклика в несколько десятков пикосекунд [17].

Известно, что быстродействие ФД определяется [22]:

- 1) временем диффузии созданных излучением электронно-дырочных пар до ОПЗ $p-n$ -перехода t_{diff} ,
- 2) дрейфовым временем пролёта носителей ОПЗ t_{dr} ,
- 3) длительностью зарядки-разрядки собственной ёмкости $p-n$ -перехода $\tau = R_L C$, т.е. величинами его ёмкости C и нагрузочного сопротивления R_L ,
- 4) наличием дефектов в гетеропереходе.

Последнее условие можно не учитывать, если используются изопериодные гетероструктуры для создания на их основе ФД. Временем диффузии носителей t_{diff} можно пренебречь, поскольку в конструкции ФД генерация электронно-дырочных пар происходит непосредственно в слое ОПЗ, процесс диффузии отсутствует. При толщине ОПЗ $w = 1-2$ мкм

дрейфовое время $t_{dr}=10-20$ пс. На практике, в технологически оптимизированных $p-i-n$ -ФД дрейфовое время пролёта носителями ОПЗ t_{dr} и RC -компонента ограничивают быстродействие, обычно время $\tau_{RC} > t_{dr}$. Снижения инерционности ФД возможно достичь, снижая ёмкость. Слои гетероструктуры плоские, поэтому ёмкостным эквивалентом будет служить модель плоского конденсатора. Выражение для зависимости ёмкости $p-n$ перехода C_{p-n} от ширины ОПЗ записывается так [68]:

$$C_{p-n} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S_{p-n}}{W}, \quad (42)$$

где S_{p-n} – площадь $p-n$ -перехода, ε – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводникового материала, для большинства полупроводниковых соединений A^3B^5 $\varepsilon \approx 13$.

Для создания ФД с высокой квантовой эффективностью, высоким быстродействием и низким уровнем обратных темновых токов необходимо формировать активную область (i область $p-i-n$ -ФД, область поглощения) с низкой концентрацией остаточных примесей, что является непростой технологической задачей при создании узкозонных полупроводниковых соединений. Одним из способов определения концентрации примесей в слаболегированной области служит метод исследования зависимости ёмкости фотодиода C от величины обратного смещения. Для резкого $p-n$ -перехода с концентрацией остаточных доноров N_D ширина ОПЗ описывается выражением [79]:

$$W = [2\varepsilon_0 \varepsilon (U_{обp} - \varphi_{p-n}) / eN_D]^{1/2}, \quad (43)$$

где $U_{обp}$ – напряжение обратного смещения, φ_{p-n} – контактная разность потенциалов.

Из формул (42) и (43) можно получить следующую зависимость:

$$(C_{p-n})^{-2} = 2(U_{обp} - \varphi_{p-n}) / eN_D S^2. \quad (44)$$

Ёмкость ФД обычно представляет собой сумму емкостей $p-n$ -перехода C_{p-n} и паразитной ёмкости C_p , связанной с конструктивными особенностями корпуса, на котором расположен ФД:

$$C \approx C_{p-n} + C_p. \quad (45)$$

Паразитная ёмкость, как правило, составляет величину $C_p \leq 0.5$ пФ, причём для широкополосного ФП ёмкость должна быть $C_p \leq 0.1$ пФ.

Из формулы (42) очевидно, что если ёмкость C_{p-n} пропорционально зависит от площади S_{p-n} , то необходимо её уменьшать для понижения RC -компоненты. Площадь для круговой мезы $S = \pi r^2 = \frac{\pi d^2}{4}$, поэтому уменьшение диаметра площадки в два раза приводит к уменьшению площади и соответственно ёмкости $p-n$ -перехода в 4 раза.

Зависимость ширины ОПЗ от концентрации в общем случае имеет зависимость обратно пропорциональную квадратному корню от остаточной концентрации. Уровень концентрации также имеет свой минимальный предел – это уровень собственной концентрации.

Таким образом, путь увеличения быстродействия $p-i-n$ -ФД – уменьшение площади $p-n$ -перехода S_{p-n} при условии достижения концентрации основных носителей в активной области ФД близкой к собственной.

Быстродействие ФД связано также с параметрами электрической эквивалентной схемы. На рис. 13 изображена эквивалентная схема высокочастотного $p-i-n$ -ФД.

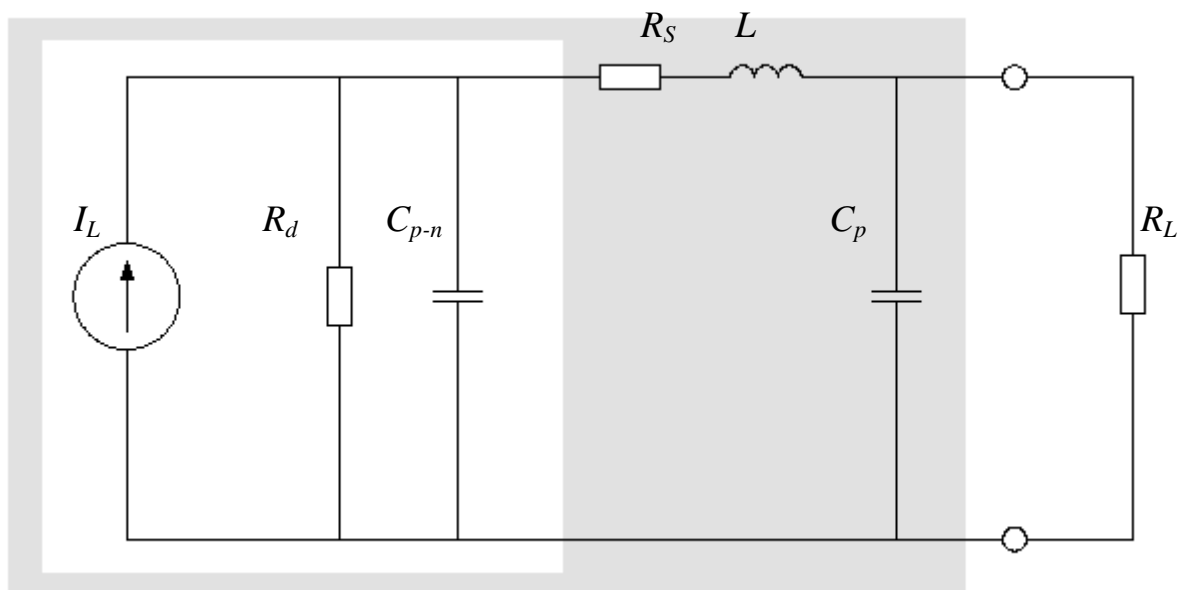


Рис. 13. Эквивалентная схема $p-i-n$ -фотодиода. В серой области показаны паразитные элементы, в белой – собственные параметры ФД [22, 80].

На рис. 13 показана эквивалентная схема: источник фототока I_L , дифференциальное сопротивление R_D , последовательное сопротивление R_S , барьерная ёмкость перехода C_{p-n} , индуктивность вывода L и ёмкость корпуса C_p . У оптимально сконструированных ФД можно не учитывать индуктивность вывода до нескольких ГГц.

Для характеристики эквивалентной схемы можно ввести следующие частоты:

$$f_{R_D} = 1/(2\pi R_D C_{p-n}), \quad (46)$$

$$f_{R_D R_S} = 1/(2\pi \sqrt{R_D R_S}), \quad (47)$$

$$f_{R_S} = 1/(2\pi C_{p-n} R_S). \quad (48)$$

В высокочастотных ФД на основе Si, Ge и материалов A^3B^5 f_{R_D} составляет десятки-сотни герц, $f_{R_D R_S}$ - сотни килогерц. Наибольшая часть рабочего диапазона находится между $f_{R_D R_S}$ и f_{R_S} . При очень малом сопротивлении нагрузки f_{R_S} является предельной частотой ФД. Для

увеличения предельной частоты необходимо уменьшать R_S и C_{p-n} . Сопротивление R_S связано с электрической проводимостью базы и коллектора. Эти области значительно легированы примесями и имеют высокую удельную проводимость. Однако из-за малой чувствительной площадки сопротивление R_S увеличивается. Барьерная ёмкость диода C_{p-n} определяется по формуле (42). Поэтому для уменьшения ёмкости уменьшают латеральную площадь перехода.

Суммируя вышесказанные заключения о приближении, запишем неравенство:

$$R_D \gg R_S, R_L. \quad (49)$$

Тогда ограничение частотной полосы пропускания ФД на уровне -3 дБ, что соответствует значению 0.707 от максимума уровня сигнала, определяется RC -компонентой:

$$f_{3дБ,RC} \approx \frac{1}{2\pi RC}, \quad (50)$$

где $R \approx R_S + R_L$, $C \approx C_{p-n} + C_p$ и $C_{p-n} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{W}$.

Если учитывать влияние времени переноса носителей, то частоту ограничивающую верхний предел полосы пропускания, можно записать в виде

$$f_{3дБ} \approx \frac{1}{\sqrt{f_{3дБ,RC}^{-2} + f_{3дБ,tr}^{-2}}}. \quad (51)$$

Подробный расчёт и определение влияния импедансов эквивалентной схемы $p-i-n$ -ФД сделаны в [80]. Показано, что среди различных постоянных времени, вносящих вклад в инерционность ФД, преобладает постоянная RC -цепи.

3.2. Быстродействующие фотодиоды меза-конструкции на основе GaInAsSb

Как было показано в разделе 3.1, увеличение быстродействия $p-i-n$ -ФД связано с уменьшением RC -компоненты, т.е. ёмкости, до того уровня, когда быстродействие не будет ограничиваться временем дрейфа носителей t_{dr} в ОПЗ. Также было показано, что барьерная ёмкость C_{p-n} зависит от площади $p-n$ -перехода S_{p-n} и остаточной концентрации носителей в i -слое. Главный вывод – увеличения быстродействия можно достичь, снижая ёмкость за счёт уменьшения размера чувствительной площадки при сохранении минимальной концентрации основных носителей в i -слое для заданного материала, на основе которого изготавливается ФД.

К преимуществам ФД на основе твёрдых растворов GaInAsSb и GaAlAsSb следует отнести возможность получения эпитаксиальных слоёв высокого качества с низкой плотностью дислокаций несоответствия ($<10^4$ см⁻²). Получение низкого уровня легирования активного слоя (10^{14} - 10^{15} см⁻³) позволяет добиться низкой ёмкости и получить высокое быстродействие ФД. Сотрудниками ФТИ им. А.Ф. Иоффе на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb были созданы первые образцы неохлаждаемых как $p-i-n$, так и лавинных фотодиодов [51, 56]. Работа по созданию быстродействующих фотоприёмников для спектрального диапазона 1.0-2.4 мкм является продолжением исследований [81].

Впервые была предложена меза-конструкция со смещённым контактом. Действительно, чтобы обеспечить высокую внешнюю квантовую эффективность необходимо сместить контактную область от чувствительной площадки. Конструкция мезы показана на рис. 15, приёмная чувствительная площадка с диаметром $d=100$ мкм и примыкающий к ней контакт треугольной формы с сопряжёнными углами. Такое топологическое решение мезы увеличивает её площадь, следовательно площадь $p-n$ -перехода S_{p-n} .

Преимущество такого решения – фоточувствительная поверхность оказывается полностью открытой для излучения после монтажа ФД.

На рис. 14 показана эквивалентная ёмкостная схема $p-i-n$ -фотодиода меза-конструкции. Общая эквивалентная ёмкость ФД является суммой барьерной ёмкости $p-n$ -перехода C_{p-n} и паразитной ёмкости C_p :

$$C = C_{p-n} + C_p. \quad (52)$$

Площадку мезы частично занимает верхний металлический контакт, применение такого контакта увеличивает площадь $p-n$ -перехода, соответственно увеличивается ёмкость на величину $C_{к.л.}$, другая часть площадки мезы является фоточувствительной, которая имеет ёмкость $C_{фч.л.}$.

На эквивалентной ёмкостной схеме $p-i-n$ -ФД меза-конструкции (рис. 14) видно, что ёмкости $C_{фч.л.}$ и $C_{к.л.}$ соединены параллельно, соответственно общая ёмкость:

$$C = C_{фч.л.} + C_{к.л.} + C_p. \quad (53)$$

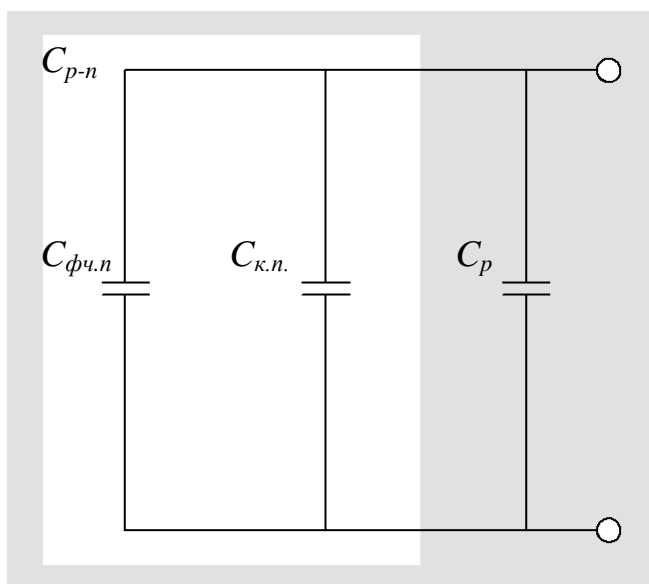


Рис. 14. Эквивалентная ёмкостная схема $p-i-n$ -фотодиода меза-конструкции.

Будем считать, что контактная область прямоугольная с размерами

40×60 мкм, тогда площадь такой области $S_{к.л.} = 24 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$. Площадь фоточувствительной области $S_{фч.л.} \approx 78.54 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$, следовательно $3.27 \cdot S_{к.л.} \approx S_{фч.л.}$. Отсюда следует, что ёмкость примыкающего контакта вносит вклад в увеличение ёмкости ФД приблизительно на 20-25%.

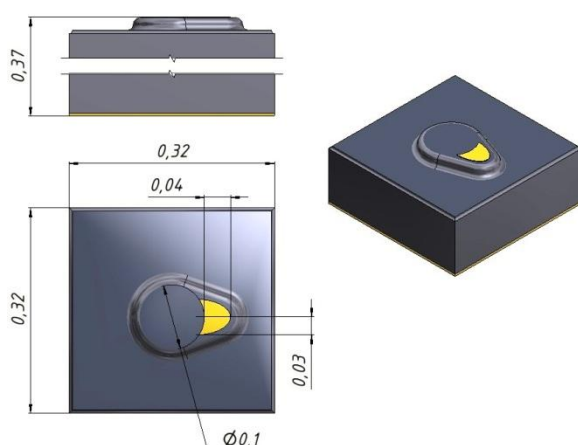


Рис. 15. Конструкция фотодиодного чипа с приёмной чувствительной площадкой диаметром $d = 100$ мкм.

Создание высококачественных бездефектных эпитаксиальных слоёв с низкой остаточной концентрацией носителей является сложной технологической задачей, так как в быстродействующих ФД необходим материал GaInAsSb с низкой концентрацией носителей, близкой к собственной $n_i \approx (2-4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Высокая концентрация природных акцепторов в твёрдых растворах $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ затрудняет решение данной задачи. При легировании твёрдых растворов $\text{Ga}_{0.78}\text{In}_{0.22}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ теллуrom (Te) удалось получить слабелегированный материал n - или p -типа проводимости, с концентрацией носителей вплоть до $(1-2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ [82]. Из формулы (42) и $S = \pi r^2 = \frac{\pi d^2}{4}$ следует, что при уменьшении диаметра мезы активной площади ФД в 2 раза, ёмкость уменьшается в 4 раза. Соответственно при концентрации носителей $n_i = (1-2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ с уменьшением диаметра мезы до значения $d = 100$ мкм ёмкость $p-i-n$ -ФД

будет достигать единиц пикофарад, что обеспечит достижение быстродействия ФД на уровне сотен пикосекунд.

3.2.1. Технология создания фотодиодов

Для создания быстродействующего высокоэффективного ФД с граничной длиной волны $\lambda_{sp}=2.4$ мкм была выбрана гетероструктура GaSb/Ga_{0.78}In_{0.22}As_{0.18}Sb_{0.82}/Ga_{0.66}Al_{0.34}As_{0.025}Sb_{0.97}, на её основе была разработана конструкция фотодиода со структурой *p-i-n*. На рис. 16 показана схематическая зонная диаграмма *p-i-n* гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb. В качестве активного слоя в структуре использовался твёрдый раствор Ga_{0.78}In_{0.22}As_{0.18}Sb_{0.82} с шириной запрещённой зоны $E_g=0.53$ эВ.

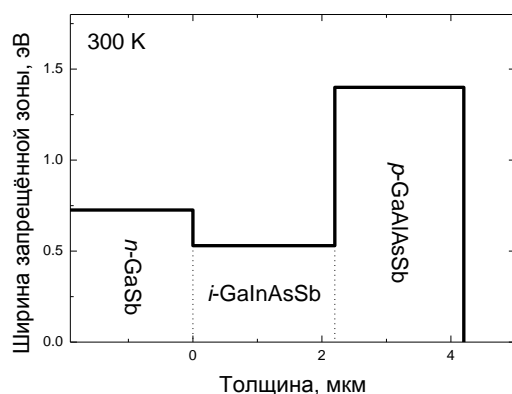


Рис. 16. Схематическая зонная диаграмма *p-i-n* гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb.

Для создания гетероструктуры, представленной на рис. 16, применялось эпитаксиальное выращивание твёрдых растворов GaInAsSb и GaAlAsSb, изопериодичных с подложкой GaSb. Технологический рост гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb осуществлялся технологами Куницыной Е.В. и Уткиной М.Ю. В качестве подложек для выращивания эпитаксиальных слоёв использовались монокристаллические пластины GaSb *n*- и *p*-типа проводимости, ориентированные в кристаллографической

плоскости (100) с точностью до $10''$. Подложки GaSb были нелегированными, p -типа проводимости с концентрацией $p=(1-3)\cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при $T=77 \text{ К}$ (подвижность $\mu\sim 3500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$) или легированные Te до концентрации $n=(1-5)\cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ($\mu\sim 5700 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$), плотность дислокаций в подложках не превышала $5\cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$. Подложки GaSb перед эпитаксиальным ростом структур подготавливались специальным образом: обезжиривались, погружались в травитель, промывались в дистиллированной воде, кислотах, изопропиловом спирте. После обработки толщина подложек составляла 350-360 мкм, толщина измерялась с помощью микрометра. Данные о толщинах подложек подтвердились микрофотографиями полученными с помощью сканирующего электронного микроскопа.

В состав шихты входили бинарные соединения – InSb, GaSb, InAs или добавлялись индий (In) чистотой 99.999 масс.% и сурьма (Sb) чистотой 99.999 масс.% в элементарном виде. Для получения эпитаксиальных слоёв также использовались свинец (Pb) и теллур (Te) чистотой 99.9999 масс.% в качестве легирующих примесей. Компоненты шихты, также как подложки, подвергались специальной химической обработке.

Для технологического роста гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb использовалась стандартная установка для жидкофазной эпитаксии на основе диффузионной печи СДО-125/4 с высокотемпературной коаксиальной тепловой трубой ВКТТ-3.049.001-07. Эпитаксиальные слои выращивались в предварительно очищенном путём диффузии через палладиевые фильтры потоке H_2 . В работе использовался горизонтальный реактор из оптического кварца, который перед использованием всегда очищался, а после отжигался в вакууме. Кассетные контейнеры, изготовленные из графита марки МПГ-6 и МПГ-8, перед введением в реактор также подвергались химической обработке.

В работе [81] исследовалась технология роста системы Ga-In-As-Sb были проведены расчёты для определения количества масс исходных

материалов. На основе термодинамического анализа диаграмм фазовых равновесий системы, был определён состав жидкой фазы, который необходим для получения эпитаксиальных слоёв твёрдых растворов $\text{Ga}_{0.78}\text{In}_{0.22}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ заданного состава. Также проводились расчёты толщины слоёв и концентраций твёрдых растворов, которые обеспечивают заданные параметры ФД на основе гетероструктур $\text{GaSb}/\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ для спектрального диапазона 1.0-2.4 мкм.

Из полученных гетероструктур $\text{GaSb}/\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ с помощью разработанного нами процесса фотолитографии изготавливались меза-ФД с диаметром чувствительной площадки $d=100$ мкм. Поперечный срез простейшей конструкции меза-ФД схематически представлен на рис. 17.

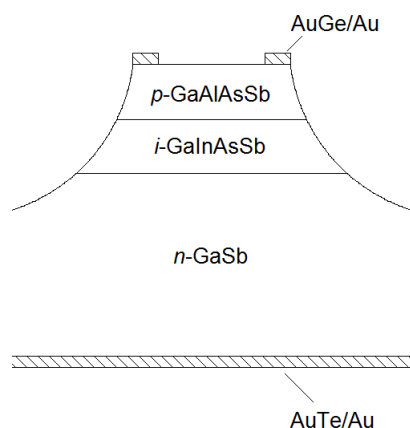


Рис. 17. Схематическое изображение меза-фотодиода на основе гетероструктуры $\text{GaSb}/\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$.

При изготовлении опытных меза-ФД эпитаксиальные гетероструктуры подвергались обработке, которая включала в себя несколько основных операций: обработка поверхности, нанесение фоторезиста, сушка фоторезиста, совмещение и экспонирование, проявление, задубливание, использование задублированного фоторезиста в качестве маски, удаление фоторезиста. Полученные маски из фоторезиста применялись в операциях локального травления при создании мезы (и последующего анодного окисления), разделительной сетки, лицевых контактов методом взрывной

фотолитографии и при осаждении гальванического золота.

При изготовлении омических контактов к эпитаксиальным структурам применялся метод сплавления в полупроводник контактных металлов и сплавов. В процессе сплавления в приконтактной области образовывался тонкий эвтектический слой «металл-полупроводник» того же типа проводимости, что и материал полупроводника. Наличие рекристаллизованного слоя с высоким уровнем легирования позволяет значительно снизить сопротивление контакта и уменьшить инжекцию носителей из контакта в объём полупроводника.

Создание омического контакта осуществлялось в два этапа: напыление и гальваническое осаждение металла, в качестве контактной системы использовалась композиция Cr/Au/Ni/Au. При металлизации толщина слоя металла составляла $l \approx 0.2$ мкм. Далее проводилось усиление омического контакта методом гальванического осаждения Au толщиной $l \approx 2$ мкм.

Контакт представлял собой сложную систему: Cr/Au/Ni/Au. Первые слои Cr и Au наносятся для создания контакта с малым сопротивлением, слой Cr в этой системе выступает в качестве компонента эффективной адгезии. Слой Ni наносится из-за его тугоплавкости, что необходимо для последующей операции вжигания – Ni блокирует последний слой золота, не позволяет полностью диффундировать в полупроводниковый материал образца при вжигании.

Напыление контакта проводилось методом электронно-лучевого испарения металла, в котором горячий катод эмитирует электроны, система магнитов формирует электронный луч, бомбардирующий поверхность напыляемого материала.

Для получения мез используют химическое травление материала, в результате которого получается вершина (меза). Для изготовления планарных диодов $p-n$ -переход изготавливают с помощью внедрения примеси небольшого участка структуры.

В этой работе все приборы имели меза-конструкции и изготавливались с помощью химического травления. Для вытравливания мезы и разделения элементов использовалось локальное химическое травление гетероструктуры через маску фоторезиста. В технологии постростовой обработки полупроводниковых структур к процессу травления предъявляют особые требования: обработка должна быть полирующей, неселективной, изотропной, травление должно быть осуществимо через маску фоторезиста, с возможностью контролировать глубину.

Для осуществления этой задачи был подобран травитель «винная кислота+HF+перекись водорода». Сложный состав травителя был подобран экспериментально. Травитель «винная кислота+HF+перекись водорода» имел небольшую постоянную скорость травления. После создания разделительных канавок на поверхности пластины элементы могли быть легко разделены механическим воздействием.

Микрофотография фотодиодного чипа с диаметром чувствительной площадки $d = 100$ мкм представлена на рис. 18.

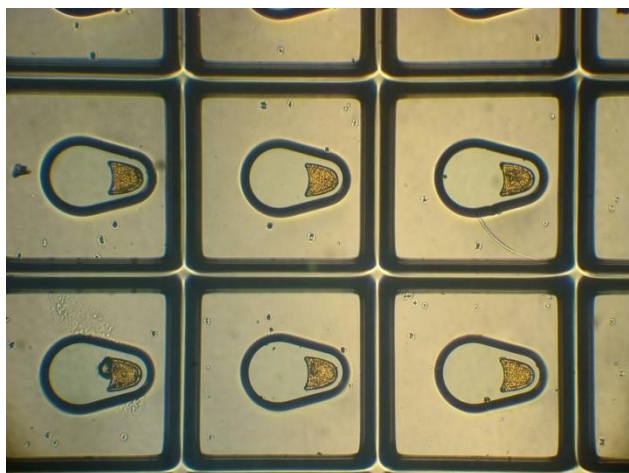


Рис. 18. Микрофотография фотодиодных чипов с диаметром чувствительной площадки $d = 100$ мкм.

Для дальнейшего исследования сборка приборов осуществлялась на стандартный корпус оптоэлектронных приборов ТО-18, если же оценочная частотная полоса пропускания $\Delta f \geq 2$ ГГц, то сборка фотодиодных чипов осуществлялась на специальный ВЧ-полосок или ВЧ соединитель с разъёмом

SMA. Основание чипа припаивалось индием или приклеивалось токопроводящим клеем к корпусу. В случае применения токопроводящего клея, полимеризация его проходила при $T=120\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 часов. К верхнему точечному либо кольцевому контакту припаивалась индием золотая проволока диаметром $d=30\text{ }\mu\text{м}$.

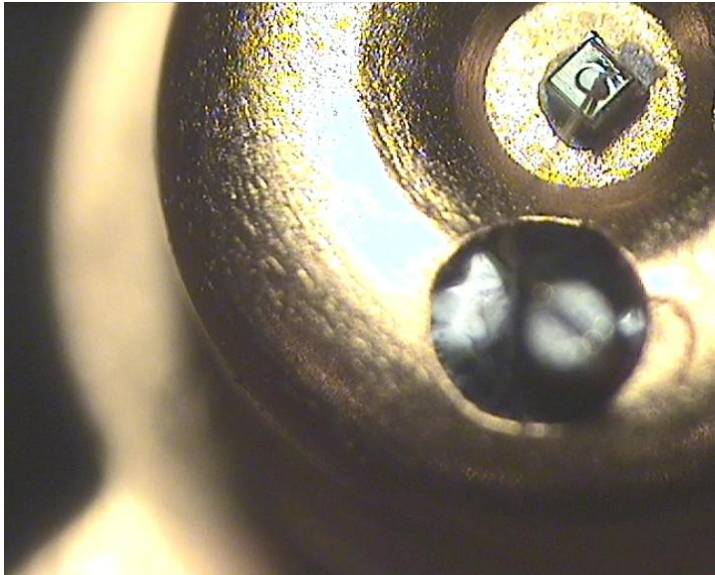


Рис. 19. Фотодиодный чип с диаметром фоточувствительной площадки $d=100\text{ }\mu\text{м}$, смонтированный на корпусе ТО-18.

3.2.2. Электрические свойства фотодиодов

В данной работе первоочередной технологической задачей являлось снижение концентрации основных носителей в узкозонном слое GaInAsSb. Для этой цели в качестве легирующей примеси использовался теллур (Te).

ВАХ ФД с диаметром чувствительной площадки $d=100\text{ }\mu\text{м}$ представлена на рис. 20. Величина обратного темнового тока для лучших диодов составляла $I_d=500-1000\text{ нА}$ при обратном напряжении $U=-(0.5-3.0)\text{ В}$. Исследование ВФХ (рис. 21) показало, что распределение примеси в гетероструктуре было резким, а остаточная концентрация носителей в активной области составила $n_i=(0.7-2)\cdot 10^{15}\text{ см}^{-3}$. При нулевом смещении ФД имели собственную ёмкость $C_0=2.0-3.0\text{ пФ}$. При напряжении смещения $U=-3.0\text{ В}$ ёмкость ФД составляла величину $C=0.9-1.2\text{ пФ}$.

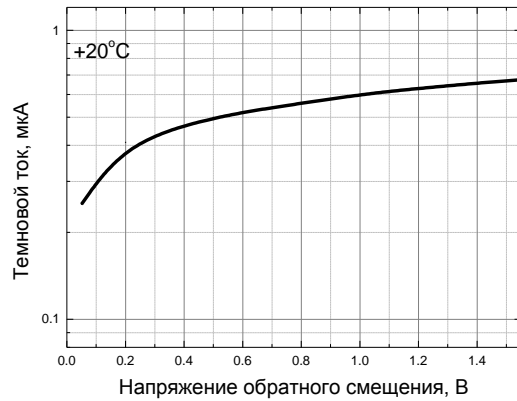


Рис. 20. Зависимость темнового тока от обратного напряжения смещения GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb $p-i-n$ -фотодиода.

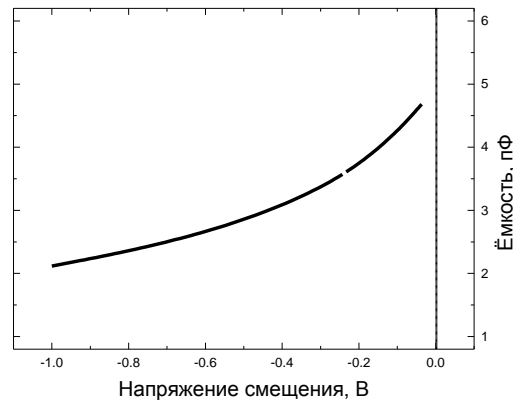


Рис. 21. Зависимость ёмкости фотодиода от напряжения обратного смещения GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb $p-i-n$ -фотодиода.

3.2.3. Фотоэлектрические свойства фотодиодов

Спектральное распределение чувствительности исследованных ФД при комнатной температуре представлено на рис. 22. Длинноволновая граница составляет $\lambda_{zp}=2.4$ мкм при $T=300$ К. Спад fotocувствительности на уровне 50% от максимальной на длине волны $\lambda=2.32$ мкм соответствует ширине запрещенной зоны узкозонного твёрдого раствора $\text{Ga}_{0.78}\text{In}_{0.22}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ $E_g=0.53$ эВ, что согласуется с данными, полученными при исследовании фотолюминесценции и спектров пропускания. Спад чувствительности в коротковолновой области спектра обусловлен сильным поглощением

излучения в широкозонном «окне» $\text{Ga}_{0.66}\text{Al}_{0.34}\text{As}_{0.025}\text{Sb}_{0.975}$, наличие которого существенно снижает потери связанные с поверхностной рекомбинацией. Коротковолновая граница спектральной чувствительности фотодиода составляет $\lambda = 0.9$ мкм (рис. 22). Токовая монохроматическая чувствительность на длине волны $\lambda_{\text{max}} = 2.1$ мкм составила $S_i = 0.9-1.1$ А/Вт, что соответствует квантовой эффективности $\eta = 0.6-0.7$. Обнаружительная способность ФД, оценённая по измеренной величине уровня шумов токовой монохроматической чувствительности, в максимуме спектра достигает величины $D^*(\lambda_{\text{max}}, 1000, 1) = 9.0 \cdot 10^{10}$ Вт⁻¹·см·Гц^{1/2}. Нелинейность выходного сигнала не превышала 0.1%.

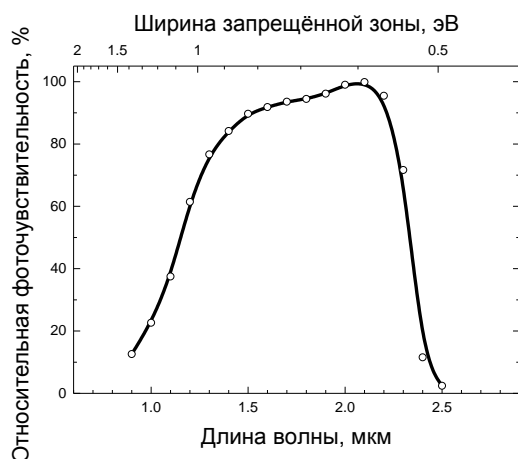


Рис. 22. Спектральное распределение фоточувствительности $p-i-n$ -фотодиода на основе гетероструктуры $\text{GaSb}/\text{GaInAsSb}/\text{GaAlAsSb}$ при комнатной температуре.

Полученное значение внешней квантовой эффективности $\eta = 0.6-0.7$ отличается от 1 из-за отражения части излучения на границе раздела воздух-полупроводник, формула (29). Френелевский коэффициент отражения на границе раздела при нормальном падении излучения

$$\mathfrak{R} = \left| \frac{n_n - n_e}{n_n + n_e} \right|^2, \quad (54)$$

где n_n и n_e - показатели преломления полупроводника и воздуха, соответственно. Подставляя характерное значение показателя преломления

для полупроводниковых материалов A^3B^5 $n_n \approx 3.5$ в формулу (54), получим $\mathfrak{R} \approx 0.31$.

В действительности ФД на основе GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb обладают высокой внутренней квантовой эффективностью близкой к 95-100%. Увеличение внешней квантовой эффективности может быть достигнуто за счёт использования просветляющих (антиотражающих) покрытий на заданную рабочую длину волны ФД.

3.2.4. Быстродействие фотодиодов на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb

Для определения быстродействия ФД были собраны в разрыве микрополосковой линии с нагрузочным сопротивлением $R_L = 50$ Ом для согласования с измерительным трактом.

Осциллограммы импульсов тока фототовета были получены совместно с Соколовским Г.С. Быстродействие $p-i-n$ -ФД исследовалось по методике, изложенной в разделе 2.5. Типичная осциллограмма фототовета приведена на рис. 23.

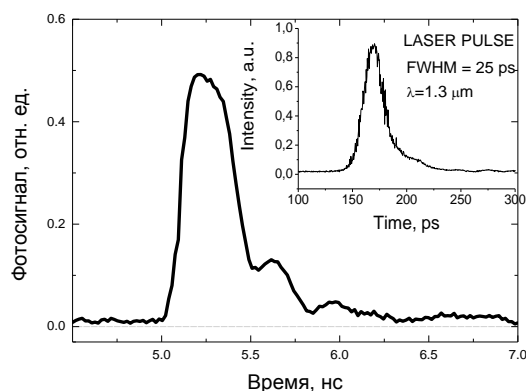


Рис. 23. Осциллограмма фототовета $p-i-n$ GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb фотодиода при освещении импульсом излучения с длиной волны $\lambda = 1.3$ мкм. На вставке осциллограмма импульса накачки.

Из рис. 23 видно, что полуширина зарегистрированного импульса фототовета составляет $\tau \approx 300$ пс. Быстродействие ФД, определяемое по

времени нарастания импульса фотоотклика на уровне 0.1-0.9, составило величину $\tau_{0.1-0.9}=130-150$ пс. Полоса пропускания ФД определялась по формуле [1]

$$\Delta f = \frac{0.35}{\tau_{0.1-0.9}}, \quad (55)$$

соответствовала значению $\Delta f \approx 2$ ГГц. Основной причиной ограничения предельной частоты работы таких ФД, как было изложено в разделе 3.1, является RC -компонента, что следует из очевидной симметрии фронтов нарастания и спада импульса фотоответа (рис. 23). Колебания, сопровождающие спад импульса фотоответа на уровне менее $\frac{1}{e}$ от максимума, связаны, в первую очередь, с рассогласованием волнового сопротивления нагрузки ФД с измерительным трактом [83, 84].

В соответствии с оценкой времени нарастания-спада импульса фотоответа, приведенной выше, двукратное уменьшение диаметра мезы от $d=100$ мкм до $d=50$ мкм и соответствующая оптимизация контактной области позволит ожидать увеличения предельной частоты работы ФД на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb до $\Delta f \leq 10$ ГГц.

3.3. Фотодиоды с разделенными чувствительной (диаметр 50 мкм) и контактной мезами, соединёнными фронтальным мостиковым металлическим контактом

ФД на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с диаметром чувствительной площадки $d=100$ мкм были разработаны и детально исследованы (см. раздел 3.2). Выпуск этой модели ФД налажен в ООО «АИБИ» при ФТИ им. А.Ф. Иоффе [85]. Получение низкой, на уровне собственной, концентрации носителей в активном слое GaInAsSb ($n_i \sim 10^{14}-10^{15}$ см⁻³) позволило добиться низкой ёмкости ФД с диаметром чувствительной площадки $d=100$ мкм в спектральном диапазоне 1.0-2.4 мкм

и получить быстродействие $\tau = 150-300$ пс ($\Delta f = 1-2$ ГГц).

В меза-конструкции ФД на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb появляется проблема создания верхнего омического контакта. Контакт необходимо обладать достаточной площадью для разварки проволоки, при этом подходящий контакт не должен закрывать собой чувствительную площадку, это важно для сохранения высокой внешней квантовой эффективности.

3.3.1. Технология создания сверхбыстродействующих фотодиодов

При создании высокоэффективных быстродействующих ФД, работающих в средней ИК-области при комнатной температуре, необходимо искать новые альтернативные подходы к принципам работы и конструкции приборов.

На этапе проектирования фотодиодного чипа с диаметром чувствительной площадки $d = 50$ мкм потребовалось существенно изменить его конструкцию, по сравнению с ФД, описанными в разделе 3.2.

Сотрудниками ФТИ им. А.Ф. Иоффе был предложен новый подход к проектированию конструкции сверхбыстродействующих ФД [86]. Конструкция таких ФД позволяет сохранить значение внешней квантовой эффективности высоким. Фотодиодная площадка функционально разделена на две части – чувствительную и контактную, которым соответствуют отдельно расположенные мезы. Эти мезы соединены металлическим мостиковым контактом, они же являются опорами для контакта. Идея мостиковых контактов использовалась для создания таких типов полупроводниковых приборов, как транзисторы [87] и диоды Шоттки [88].

Эпитаксиальная гетероструктура GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb использовалась для создания сверхбыстродействующего ФД с новой меза-конструкцией. Состав слоёв гетероструктуры и технологические параметры остались прежними (раздел 3.2).

Подход разделения функциональных областей фотодиодного чипа потребовал разработать новую постростовую технологию травления полупроводникового материала между мезами одного чипа и нанесения металлического фронтального контакта.

Постростовая технология изготовления фотодиодных чипов была разработана под руководством Ильинской Н.Д. Благодаря серии экспериментов был подобран травитель – смесь винной кислоты, HF и перекиси водорода.

Эксперименты показали, что угол 45° , под которым лежала прямая, образованная двумя центрами мез относительно граней подложки GaSb(100), являлся оптимальным для однородного качественного травления структуры. Травление слоёв гетероструктуры под мостиковым контактом осуществлялось одновременно с вытравливанием мез. Кроме того, травление должно обеспечивать гладкий (без ступенек) профиль. В противном случае каждая из ступенек ФД фотодиода, вносящих основной вклад в величину обратного темнового тока ФД с малыми диаметрами чувствительной площадки ($d \leq 300$ мкм) [58].

В новой конструкции ФД (рис. 24) чип имел прямоугольное основание размерами 0.38×0.25 мм, контактная меза прямоугольной формы с размерами 50×70 мкм, контактный мостик имел ширину 20 мкм, длину 85 мкм. Металлический контакт, расположенный на контактной мезе, обладал размерами 40×60 мкм. Металлический слой толщиной $l = 3-6$ мкм отделён от верхнего широкозонного слоя GaAlAsSb диэлектрическим анодным окислом полупроводникового материала.

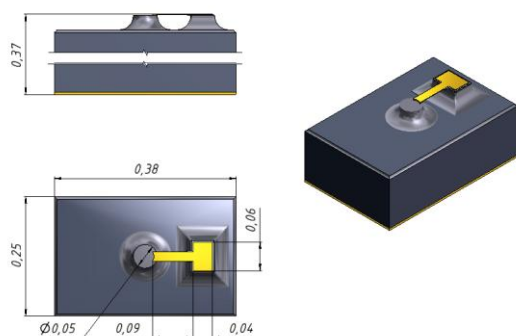


Рис. 24. Конструкция сверхбыстродействующего фотодиодного чипа с разделенными чувствительной (диаметр $d=50$ мкм) и контактной мезами, мостиковым фронтальным контактом.

В процессе изготовления фотодиодного чипа возникла идея использовать диэлектрический подслоя между контактной площадкой и верхним эпитаксиальным слоем гетероструктуры контактной мезы. Предполагалось, что эквивалентная ёмкость контактной мезы $C_{к.м.}$ теперь будет представлять собой две последовательно соединённые в цепи электрические ёмкости:

$$C_{к.м.} = \frac{C_{p-n} C_{диэл.}}{C_{p-n} + C_{диэл.}}, \quad (56)$$

где $C_{диэл.}$ – эквивалентная ёмкость анодного окисла полупроводника и подслоя диэлектрика нитрида кремния (Si_3N_4).

Материал Si_3N_4 имеет диэлектрическую проницаемость $\varepsilon=6.3-7.1$. Слой Si_3N_4 толщиной $l=0.3$ мкм и размерами 40×60 мкм, который ограничивает металлический слой контакта, будет иметь эквивалентную ёмкость $C_{Si_3N_4} \approx 0.45-0.50$ пФ.

Будем считать, что ёмкости C_{p-n} , образованные барьером $p-n$ -перехода чувствительной и контактной мез равны по величине, т.к. их площади близки. Площадь чувствительной мезы $S_{фч.м.} \approx 1.96 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$, площадь контактной мезы $S_{к.м.} \approx 3.5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$, но эквивалентная ёмкость контактной мезы – это сумма ёмкостей, образованных диэлектрическими слоями и $p-n$ -

переходом гетероструктуры. Ёмкость, образованная диэлектрическими слоями связана с площадью металлического контакта размерами 40×60 мкм, поэтому $S_{\text{диэл}} \approx 2.4 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$.

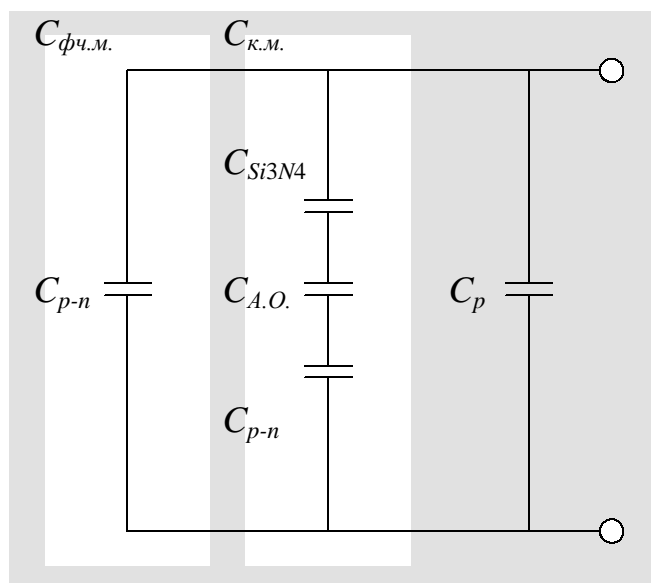


Рис. 25. Эквивалентная ёмкостная схема $p-i-n$ -фотодиода меза-конструкции с разделёнными чувствительной и контактной мезами, соединёнными металлическим мостиковым контактом.

Эквивалентная ёмкость, образованная анодным окислом полупроводникового материала $C_{A.O.}$ будет сравнима с $C_{Si_3N_4}$. Следовательно их емкостной эквивалент

$$C_{\text{диэл}} = \frac{C_{Si_3N_4} C_{A.O.}}{C_{Si_3N_4} + C_{A.O.}} \approx \frac{C_{Si_3N_4}}{2}. \quad (57)$$

Подставляя (57) в формулу (56), получим эквивалентную ёмкость контактной мезы:

$$C_{\text{к.м.}} = \frac{C_{p-n} C_{Si_3N_4}}{2C_{p-n} + C_{Si_3N_4}}. \quad (58)$$

Эквивалентная ёмкость ФД с разделёнными мезами (рис. 25):

$$C = C_{\text{фч.м.}} + C_{\text{к.м.}} + C_p. \quad (59)$$

Подставляя в формулу (59) выражение (58) получим:

$$C = C_{\text{фч.м.}} + \frac{C_{p-n} C_{\text{Si}_3\text{N}_4}}{2C_{p-n} + C_{\text{Si}_3\text{N}_4}} + C_p, \quad (60)$$

где ёмкость $C_{\text{фч.м.}}$ определяется только барьерной ёмкостью C_{p-n} ,

$$C = C_{p-n} + \frac{C_{p-n} C_{\text{Si}_3\text{N}_4}}{2C_{p-n} + C_{\text{Si}_3\text{N}_4}} + C_p. \quad (61)$$

Паразитная ёмкость для широкополосного фотоприёмника $C_p \leq 0.1 \text{ пФ}$.

В реальном случае можно рассмотреть два случая:

$$1) C_{p-n} \approx C_{\text{Si}_3\text{N}_4},$$

$$2) C_{p-n} > C_{\text{Si}_3\text{N}_4}.$$

В случае 1 формулу (61) можно записать в виде:

$$C = C_{p-n} + \frac{C_{p-n}}{3} + C_p \approx 1.33C_{p-n} + C_p.$$

В случае 2 вторым членом можно пренебречь:

$$C \approx C_{p-n} + C_p.$$

На практике наиболее благоприятным является второй случай, т.к. ёмкостью контактной мезы $C_{\text{к.м.}}$ можно пренебречь.

Были изготовлены фотодиодные чипы с разделёнными фоточувствительной и контактной мезами на основе полупроводниковой гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb. Перед началом постростовой обработки пластина была разделена на две части. На одной части были созданы $p-i-n$ -ФД с диэлектрическим слоем Si_3N_4 толщиной $l=0.3$ мкм между контактной площадкой и опорной «контактной» мезой. На другой части пластины у ФП отсутствует диэлектрическая изоляция Si_3N_4 между металлической контактной площадкой и «контактной» мезой. Эквивалентная ёмкостная схема быстродействующего ФД с двумя мезами, мостиковым контактом и диэлектрическим слоем представлена на рис. 25.

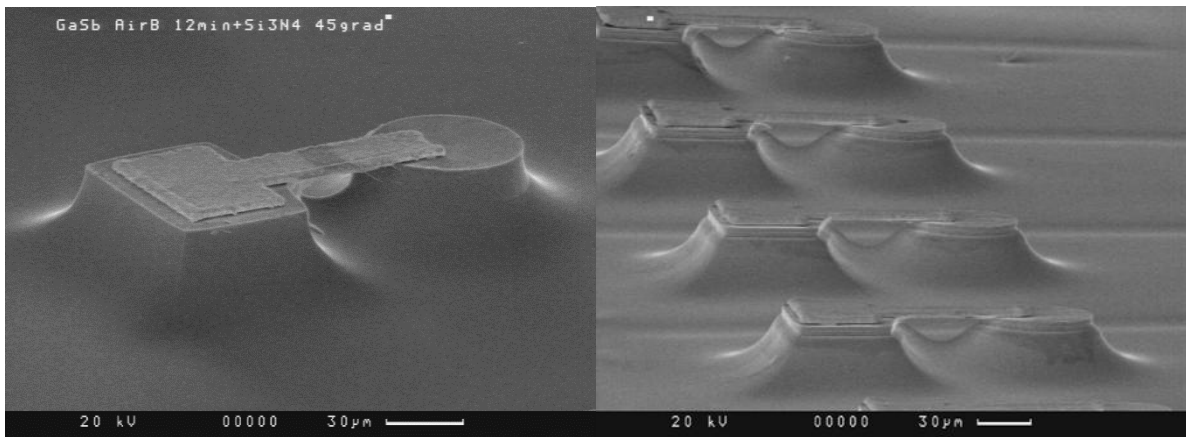


Рис. 26. Сверхбыстродействующие фотодиодные чипы с разделенными чувствительной (диаметр $d=50$ мкм) и контактной мезами, мостиковым фронтальным контактом (СЭМ-фото).

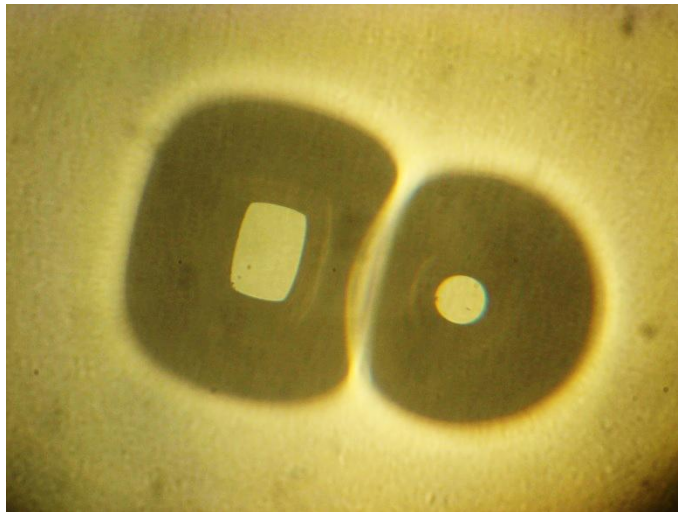


Рис. 27. Микрофотография двух разделённых мез — контактной и фоточувствительной, без металлического контакта.

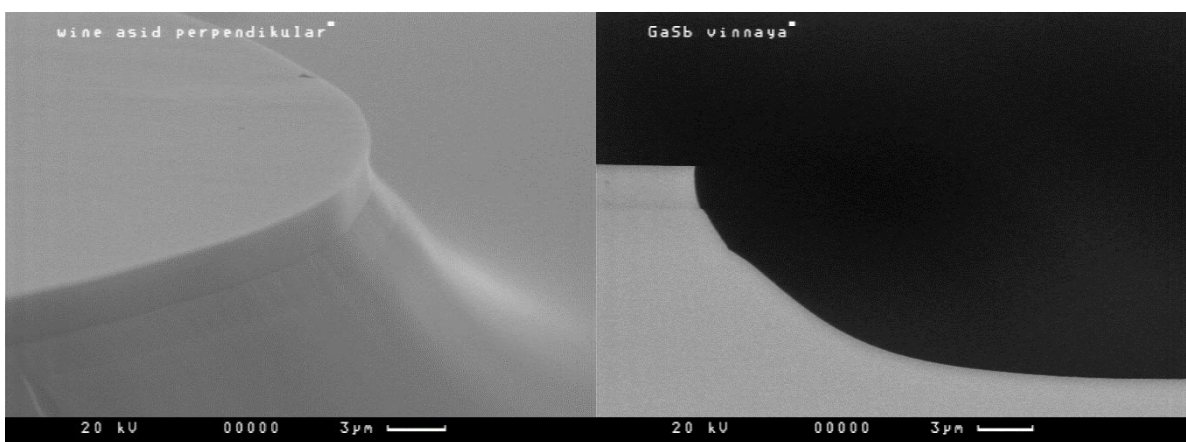


Рис. 28. Профиль фоточувствительной мезы сверхбыстродействующего фотодиодного чипа, образованного мокрым травлением (СЭМ-фото).

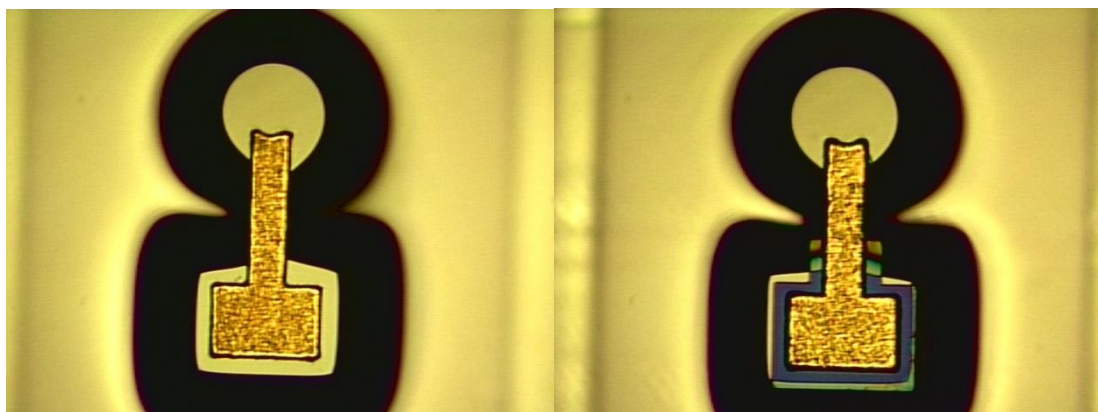


Рис. 29. Микрофотографии сверхбыстродействующих фотодиодных чипов с разделёнными фоточувствительной и контактной областями, без подслоя и с диэлектрическим подслоем Si_3N_4 под контактной областью, соответственно.

Важное требование к контакту – высокая механическая прочность. Сильная адгезия металла к полупроводнику обеспечит удержание контакта при соприкосновении с ним флюса, а также при резком нагреве. Проведено исследование профиля контакта в области протравленного полупроводника. Исследование показало, что металлический контакт имеет профильную структуру в сечении, т.е. в середине толщина меньше чем по краям, что вероятнее всего обеспечивает ему высокую механическую прочность. На рис. 30 изображены фоточувствительная меза с диаметром $d=50$ мкм, фронтальный металлический контактный мостик и контактная меза.

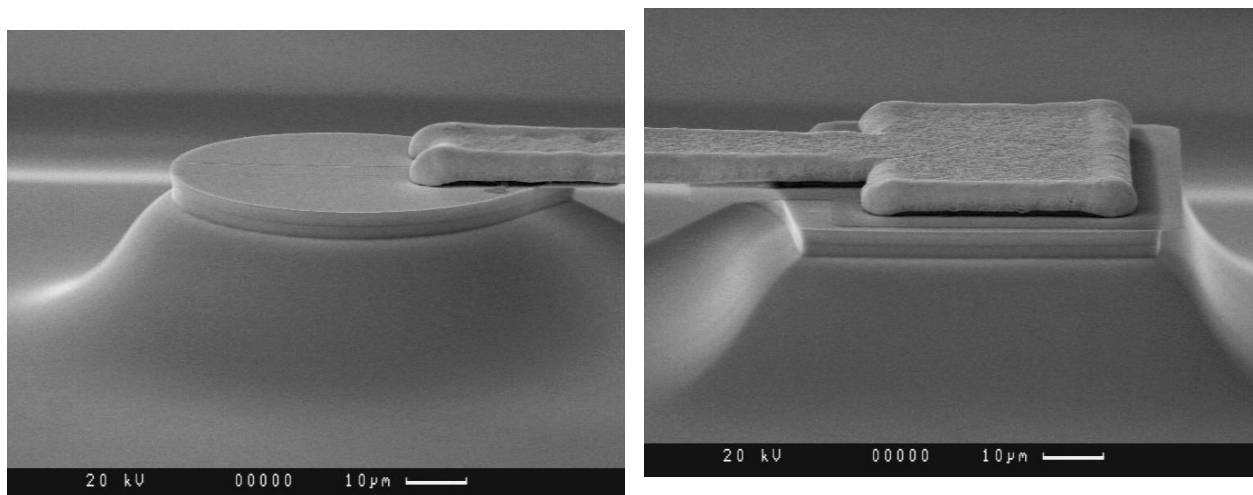


Рис. 30. Сверхбыстродействующий фотодиодный чип с разделёнными чувствительной (диаметр $d=50$ мкм) и контактной мезами, мостиковым металлическим контактом (СЭМ-фото), вид сбоку.

3.3.2. Электрические свойства фотодиодов

В работе были проведены измерения ВАХ двух видов приборов, созданных на основе одной гетероструктуры — ФД с разделёнными мезами, соединёнными металлическим мостиковым контактом, в конструкции с диэлектриком Si_3N_4 и без диэлектрика в подконтактной области. Для этого были измерены по 50 образцов каждого типа на пластине с помощью установки с контактными щупами. Результаты представлены на рис. 31 и рис. 32, соответственно.

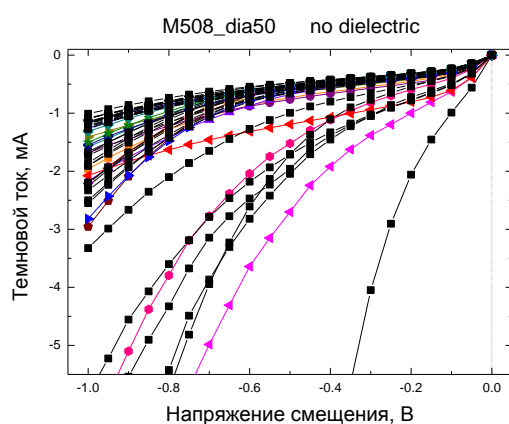


Рис. 31. ВАХ фотодиодов с разделёнными фоточувствительной и контактной мезами без диэлектрического слоя Si_3N_4 под контактной площадкой.

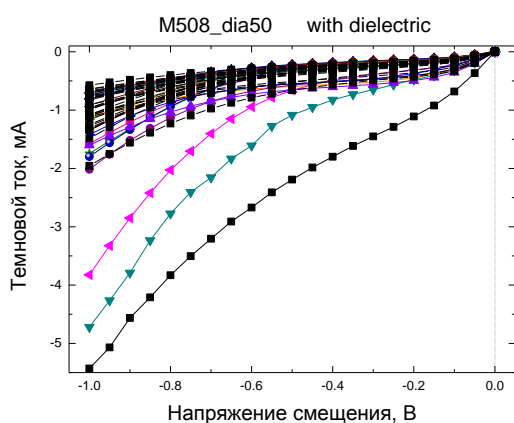


Рис. 32. ВАХ фотодиодов с разделёнными фоточувствительной и контактной мезами с диэлектрическим слоем Si_3N_4 под контактной площадкой.

Как видно из рис. 31 и рис. 32, где приведены обратные ветви ВАХ, приборы с диэлектрическим слоем в среднем имеют меньшие темновые токи, чем приборы без диэлектрического подслоя. При этом видно, что только 3

прибора из 50 показывают высокие значения темновых токов, что говорит о большей надежности данной конструкции прибора. Для ФД без диэлектрика под контактной площадкой разброс величины темновых токов при различных смещениях намного больше. Это также хорошо иллюстрируют рис. 33, рис. 34 и рис. 35, где приведены гистограммы распределения количества приборов с различными значениями темновых токов при напряжениях смещения $U = -0.2$, -0.5 и -1 В. Как видно из гистограмм, для каждой величины обратного напряжения смещения максимальное количество ФД с диэлектриком в подконтактной области имеет величину обратных темновых токов в интервале токов, меньше, чем для ФД без диэлектрика. Так, 26 ФД с диэлектриком при напряжении $U = -0.2$ В имеют значения темнового тока $I_d < 0.4$ мкА, в то время как без диэлектрика ни одного. В следующий диапазон, $I_d = 0.4-0.6$ мкА, попадает еще 17 ФД с диэлектриком и 35 ФД без него. Похожая ситуация при значениях напряжения $U = -0.5$ и -1 В. Максимальное количество ФД в распределении по величине тока для приборов с диэлектриком сдвинуто на одну ступень по сравнению с максимальным количеством приборов без диэлектрика. Диэлектрический подслоя Si_3N_4 обеспечил препятствие прохождению тока через контактную мезу, понижая общий уровень темнового тока ФД. Величина обратного темнового тока для лучших образцов ФД составила $I_d = 200-500$ нА при обратном напряжении $U = -(0.5-1.0)$ В.

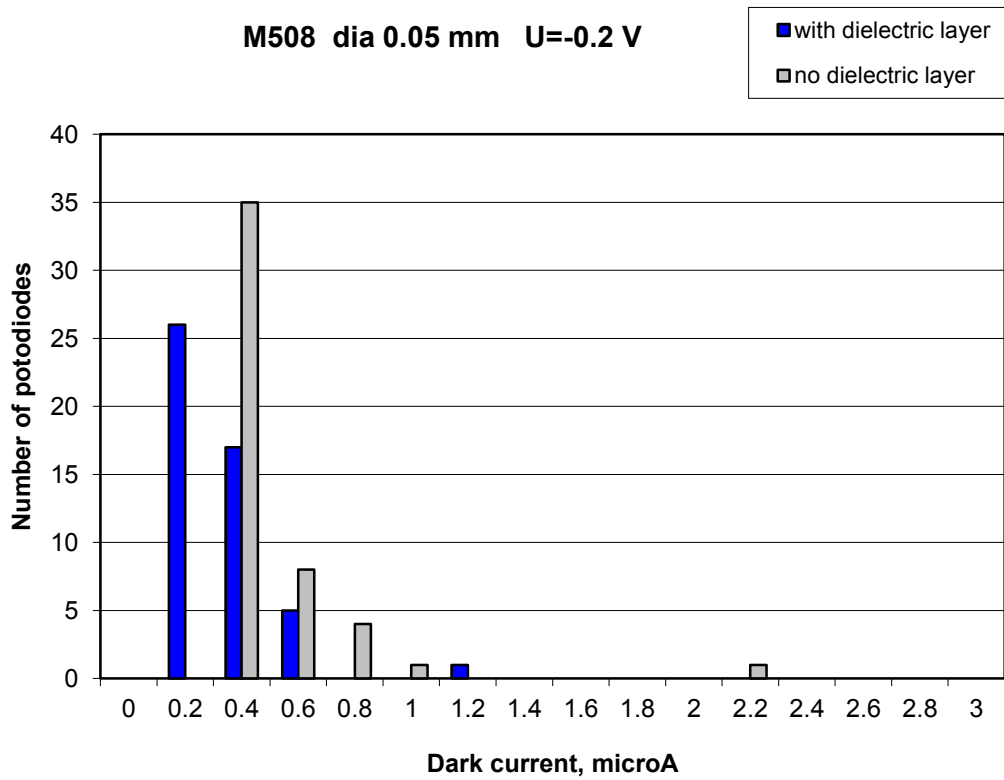


Рис. 33. Гистограмма распределения количества фотодиодов с темновыми токами заданного диапазона при значениях напряжения смещения $U = -0.2$ В.

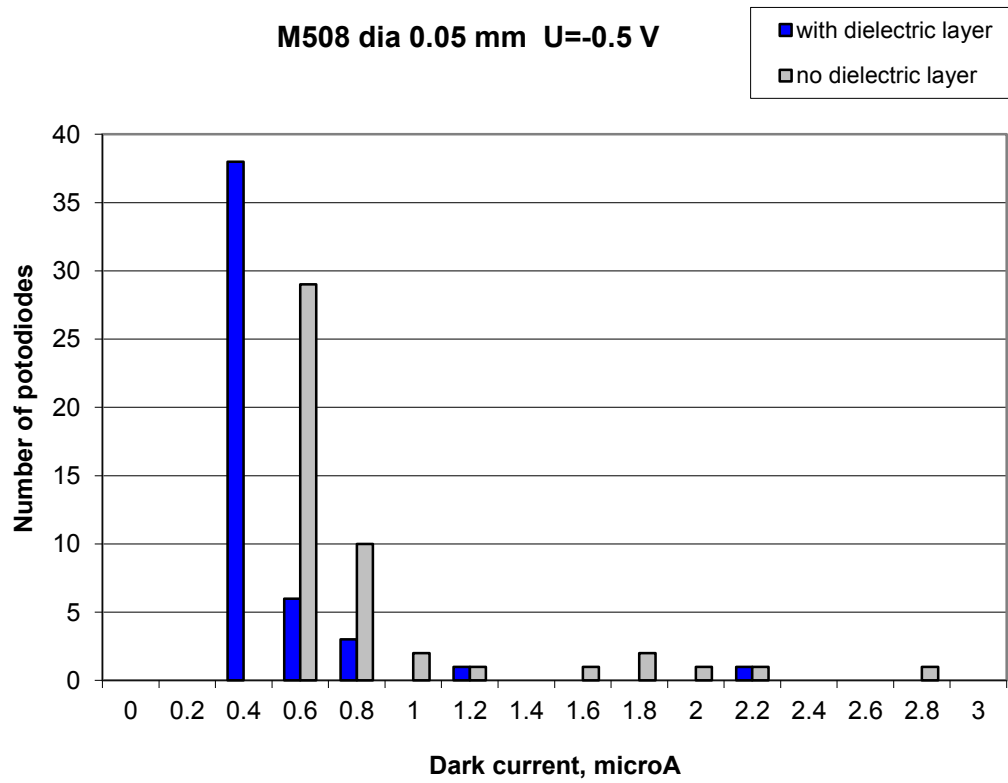


Рис. 34. Гистограмма распределения количества фотодиодов с темновыми токами заданного диапазона при значениях напряжения смещения $U = -0.5$ В.

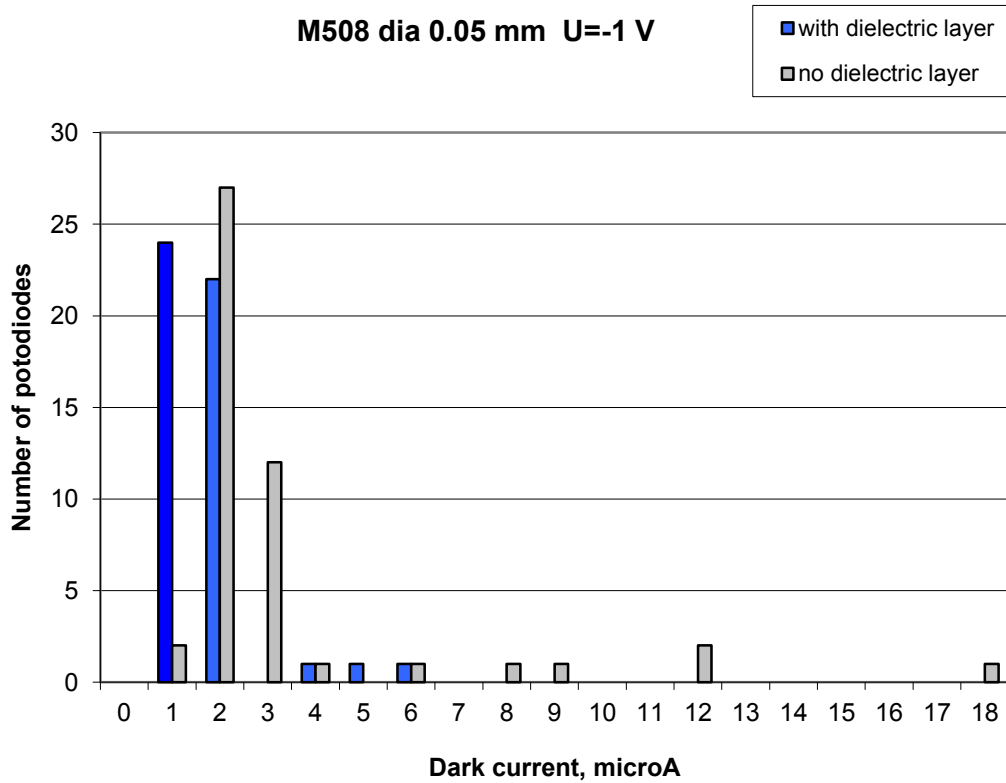


Рис. 35. Гистограмма распределения количества фотодиодов с темновыми токами заданного диапазона при значениях напряжения смещения $U = -1$ В.

На рис. 36 и рис. 37 представлены результаты измерения вольт-фарадных характеристик двух типов ФД. Как видно, при использовании «мостиковой» технологии с созданием диэлектрического подслоя между опорной мезой и контактной площадкой ёмкость $p-i-n$ -ФД при нулевом смещении в 2 раза ниже, чем на аналогичном приборе без диэлектрической площадки: $C = 12$ пФ и $C = 6$ пФ (пластина М508). При напряжении смещения $U = -3$ В ёмкость ФД снижалась до $C = 1.5$ пФ и $C = 1$ пФ соответственно. Эффект снижения ёмкости ФД при создании диэлектрической изоляции между контактной площадкой и «контактной» мезой наблюдался на всех исследуемых фотодиодных пластинах. Для исследуемых ФД концентрация в активном слое составила $n_i = 5 \cdot 10^{15} - 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ для различных образцов.

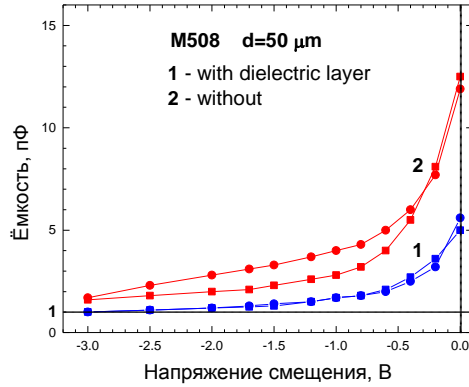


Рис. 36. ВФХ фотодиодов с разделёнными фоточувствительной и контактной мезами с диэлектрическим слоем Si_3N_4 под контактной площадкой.

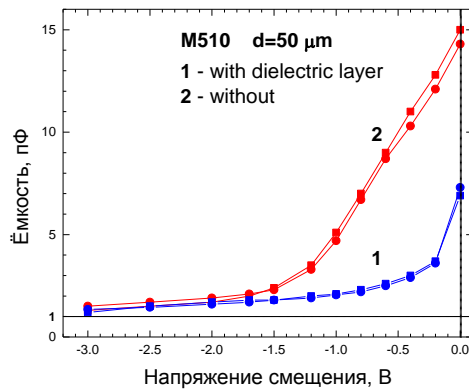


Рис. 37. ВФХ фотодиодов с разделёнными фоточувствительной и контактной мезами с диэлектрическим слоем Si_3N_4 под контактной площадкой.

3.3.3. Фотоэлектрические свойства фотодиодов

Спектральное распределение чувствительности исследованных фотодиодов при $T=300 \text{ K}$ представлено на рис. 22. Длинноволновая граница спектральной чувствительности для ФД с приёмной площадкой $d=50 \text{ мкм}$ имела такое же значение, как для ФД с диаметром площадки $d=100 \text{ мкм}$ и составляла $\lambda_{cp}=2.4 \text{ мкм}$ при $T=300 \text{ K}$. Все остальные фотоэлектрические параметры имеют близкие значения, т.к. для изготовления ФД применялась гетероструктура $\text{GaSb}/\text{GaInAsSb}/\text{GaAlAsSb}$ с эпитаксиальными слоями того же состава.

Спад чувствительности до 50% от максимальной на длине волны $\lambda = 2.32$ мкм соответствует ширине запрещенной зоны узкозонного твёрдого раствора $\text{Ga}_{0.78}\text{In}_{0.22}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ $E_g = 0.53$ эВ. Коротковолновая граница спектральной чувствительности ФД составила $\lambda = 0.9$ мкм. Токовая монохроматическая чувствительность на длине волны $\lambda_{\text{max}} = 2.1$ мкм составила $S_I = 0.9-1.1$ А/Вт, что соответствует квантовой эффективности $\eta = 0.6-0.7$ без антиотражающего покрытия. Удельная обнаружительная способность фотодиодов в максимуме спектра достигла величины $D^*(\lambda_{\text{max}}, 1000, 1) = 0.9 \cdot 10^{11}$ Вт⁻¹·см·Гц^{1/2}. Нелинейность выходного сигнала не превышала 0.1%.

3.3.4. Быстродействие фотодиодов

ФД были собраны в разрыве микрополосковой линии с волновым сопротивлением $R = 50$ Ом для согласования с измерительным трактом. Быстродействие $p-i-n$ -ФД исследовалось по методу, изложенному в разделе 2.5.

Типичная осциллограмма фотоответа $p-i-n$ -диода приведена на рис. 38.

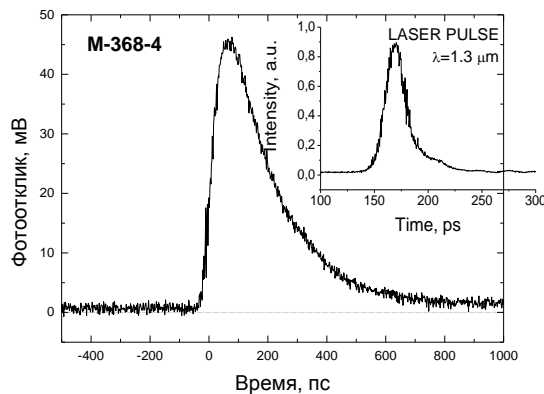


Рис. 38. Осциллограмма импульса фотоотклика $p-i-n$ -гетерофотодиода $\text{GaSb}/\text{GaInAsSb}/\text{GaAlAsSb}$ при воздействии лазерным импульсом с длиной волны $\lambda = 1.3$ мкм (на вставке).

Из рис. 38 видно, что ширина зарегистрированного импульса составляет $\text{FWHM} \sim 220$ пс. Быстродействие ФД, определяемое по времени нарастания импульса фототока на уровне 0.1-0.9, составило величины $\tau_{0.1-0.9} = 50-100$ пс и $\tau_{0.9-0.1} = 200-260$ пс. Частотная полоса пропускания ФД, которая определяется по формуле (55), соответствует значению $\Delta f \approx 2-5$ ГГц. Если сравнить полученный результат с осциллограммой для ФД с диаметром чувствительной площадки $d = 100$ мкм, то здесь прослеживаются: более интенсивный сигнал фотоотклика и меньшее время фотоотклика. Неоптимальная концентрация основных носителей в активной области для данных ФД ($n_i = 5 \cdot 10^{15} - 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) приводила к относительно высокому значению их ёмкости, что в свою очередь ограничивало быстродействие. В соответствии с оценкой времени нарастания/спада импульса фотоответа, приведенной выше, уменьшение концентрации носителей до значения $n_i \sim 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в структуре с диаметром фоточувствительной мезы $d = 50$ мкм позволит ожидать увеличения частотной полосы пропускания рассматриваемых ФД до $\Delta f \approx 10$ ГГц.

3.4. Выводы

В результате проведения исследования по созданию и изучению свойств высокоэффективных быстродействующих $p-i-n$ -ФД для спектрального диапазона 1.0-2.4 мкм на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb. были получены следующие результаты:

1. Проведён анализ факторов, ограничивающих быстродействие $p-i-n$ -ФД, определены требования, которым должны удовлетворять гетероструктуры и меза-конструкции фотодиодных чипов. Построены эквивалентные ёмкостные схемы меза-конструкций $p-i-n$ -ФД. Проведён анализ влияния различных элементов схемы на частотную полосу пропускания. Сделан вывод о том, что среди различных постоянных времён, вносящих вклад в инерционность $p-i-n$ -ФД, преобладает постоянная RC -цепи.

2. Впервые созданы и исследованы сверхбыстродействующие ФД на основе $p-i-n$ гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с разделёнными фоточувствительной (диаметр $d=50$ мкм) и контактной мезами, соединёнными металлическим мостиковым контактом. Показано, что разделение мез позволяет существенно снизить постоянную времени схемной релаксации RC - длительность зарядки-разрядки барьерной ёмкости, главным образом ограничивающей быстродействие ФД. Быстродействие ФД составляет $\tau_{0.1-0.9}=50-100$ пс, что соответствует частотной полосе пропускания $\Delta f \approx 2-5$ ГГц.

3. Показано, что создание дополнительного диэлектрического слоя под контактной площадкой позволяет уменьшить величину темнового тока, а также снизить ёмкость всего прибора, соответственно увеличив его быстродействие. Величина собственной ёмкости ФД с разделёнными фоточувствительной (диаметр $d=50$ мкм) и контактной мезами составляет $C=3-5$ пФ при напряжении смещения $U=0$ В и $C=0.8-1.5$ пФ при $U=-3$ В, а

величина обратного темнового тока $I_d = 200-1500$ нА при обратном смещении $U = -(0.5-3.0)$ В.

4. Впервые созданы и исследованы сверхбыстродействующие фотодиоды $p-i-n$ -структуры с диаметром фоточувствительной площадки $d = 100$ мкм.

Глава 4. Разработка и создание фотодиодов для спектрального диапазона 1.5-3.8 мкм на основе гетероструктур InAs/InAsSbP и для спектрального диапазона 1.0-4.9 мкм на основе гетероструктур InAsSb/InAsSbP.

В главе 4 излагаются результаты работы, направленной на создание и исследование неохлаждаемых быстродействующих InAs/InAsSbP ФД с длинноволновой границей спектральной чувствительности $\lambda_{sp}=3.8$ мкм и InAsSb/InAsSbP ФД с $\lambda_{sp}=4.8$ (4.9) мкм. Значительное внимание в этой главе уделяется результатам исследований, направленных на повышение квантовой чувствительности длинноволновых ФД ($\lambda > 3.8$ мкм).

4.1. Фотодиоды для спектрального диапазона 1.5-3.8 мкм на основе гетероструктуры InAs/InAsSbP

4.1.1. Технология создания фотодиодов

В процессе работы производилось эпитаксиальное выращивание гетероструктуры InAs/InAsSbP, которая состоит из четверного соединения InAsSbP, в качестве широкозонного окна, бинарного соединения InAs (активный слой) на подложке InAs. Для роста структур использовались технологии ЖФЭ и МОГФЭ. При выращивании слоёв InAs по технологии МОГФЭ производилось при атмосферном давлении в плоском реакторе диаметром $d=30$ см. Нагрев подложкодержателя осуществлялся трёхзонным резистивным нагревательным устройством, отделенным от внутреннего объёма камеры кварцевым колпаком. Подача парогазовой смеси осуществлялась с периферии колпака к центру. Подложки вращались относительно центральной оси. Источниками As и In являлись соответственно арсин (AsH_3), разбавленный до 20% в водороде, и триметилиндий (ТМІ). Температура испарителя с ТМІ была $T=+18^\circ\text{C}$. Во избежание паразитных реакций подача AsH_3 и ТМІ в реактор осуществлялась по отдельным каналам и смешение происходило в реакторной камере. Для

уменьшения паразитного осаждения на стенках камеры во всех экспериментах использовался добавочный поток водорода (30 л/мин) из верхней зоны камеры, перпендикулярно подложкам. Во всех экспериментах использовались p -InAs (100) подложки, легированные цинком (концентрация носителей $p = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при $T = 300 \text{ К}$ и $p = 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при $T = 77 \text{ К}$). Перед каждым процессом подложки промывались в четыреххлористом углероде и изопропиловом спирте, обрабатывались в травителе, промывались в дистиллированной воде, просушивались и немедленно загружались в реакционную камеру. Эксперименты проводились в диапазоне температур 450-600°C. Потоки AsH_3 менялись в интервале 10-125 мл/мин, а потоки водорода через испаритель с ТМІ – в интервале 200-400 мл/мин. Отношение мольных долей $\text{AsH}_3/\text{ТМІ}$ составляло от 2.5 до 50. Подача ТМІ осуществлялась спустя 2 минуты после пуска AsH_3 .

При температурах подложек $T < +500^\circ\text{C}$ поверхность слоёв была рыхлой, вероятно из-за слабого разложения арсина при низких температурах. Слои, выращенные при температуре $T \approx +600^\circ\text{C}$, были блестящими. Средняя скорость роста слоёв не превышала 0.5 мкм/ч.

4.1.2. Свойства, параметры и характеристики фотодиодов

Проводились измерения коэффициента Холла. Измерения установили n -тип проводимости. Выращенные p - n -структуры использовались для создания ФД. Чипы были изготовлены методом стандартной фотолитографии по меза-технологии с n -слоем. Диаметр чувствительной площадки варьировал от 100 мкм до 1000 мкм. Впервые изготовлены фотодиодные чипы с диаметром фоточувствительной площадки $d = 100 \text{ мкм}$, технология изготовления и конструкция этого фотодиодного чипа аналогичны фотодиодам на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsS. Были исследованы ВАХ, ВФХ и спектральные характеристики ФД при температурах $T = 77 \text{ К}$ и $T = 300 \text{ К}$.

Зависимость ёмкости от напряжения соответствовала закону $\frac{1}{C^2} \sim U$, что свидетельствовало о наличии резкого $p-n$ -перехода. Величина ёмкости была намного ниже, чем в аналогичных ФД на основе InAs, полученных методом ЖФЭ, и лежала в интервале $C=100-200$ пФ при нулевом смещении для диодов с диаметром площадки $d=1$ мм. Проведены оценки величин концентрации носителей заряда в активном слое. Концентрация составила величину 10^{16} см⁻³ при $T=77$ К, а ширина области объёмного заряда $W=2 \cdot 10^{-5}$ см при $U=0$ В. Исследуемая структура близка к $p-i-n$ -ФД и должна обладать высоким быстродействием $\tau < 1$ нс, определяемым RC -компонентой, где R - последовательное сопротивление $p-n$ -перехода. На рис. 39 показана зависимость ёмкости от приложенного напряжения обратного смещения ФД с диаметром фоточувствительной площадки $d=100$ мкм. Видно, что при нулевом напряжении смещения достигнуто значение ёмкости $C_0=17$ пФ, при напряжении смещения $U \approx -1$ В ёмкость снижается до единиц пикофарад. Столь низкие значения ёмкости позволяют сделать вывод о том, что такие ФД могут обладать высоким быстродействием $\tau < 1$ нс.

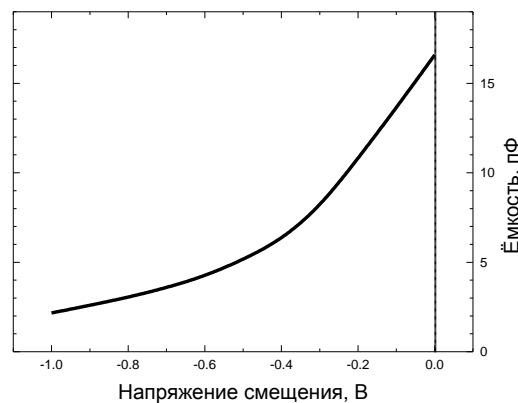


Рис. 39. Вольт-фарадная характеристика фото диода с диаметром фоточувствительной площадки $d=100$ мкм.

При напряжениях $U \leq 100$ мВ (при $T=77$ К) обратные токи составляли несколько наноампер. Напряжение отсечки на оси абсцисс для прямой ветви

составило $U=0.3$ В. Дифференциальное сопротивление при нулевом смещении в исследуемых диодах лежало в интервале $R_0=100-700$ кОм при $T=77$ К и $R_0=30-55$ Ом при $T=300$ К в зависимости от режимов выращивания. При комнатной температуре ФД с диаметром чувствительной площадки $d=300$ мкм имели значение дифференциального сопротивления $R_0=200-1000$ Ом. На рис. 40 показаны типичные ВАХ ФД на основе гетероструктуры InAs/InAsSbP с диаметром чувствительной площадки $d=100$ мкм при $T=-13.5$ °С и $T=+20$ °С. Обратный ток при низких температурах в области до 500 мВ определялся генерацией-рекомбинацией в слое объёмного заряда [79]:

$$I_{G-R} = \frac{qn_iWS_{p-n}}{\tau_{eff}}, \quad (62)$$

где q – заряд электрона, S_{p-n} – площадь $p-n$ -перехода, n_i – собственная концентрация носителей заряда, τ_{eff} – эффективное время жизни. Полученное значение $\tau_{eff}=6 \cdot 10^{-6}$ с хорошо соответствует временам излучательной рекомбинации в p -InAs [25].

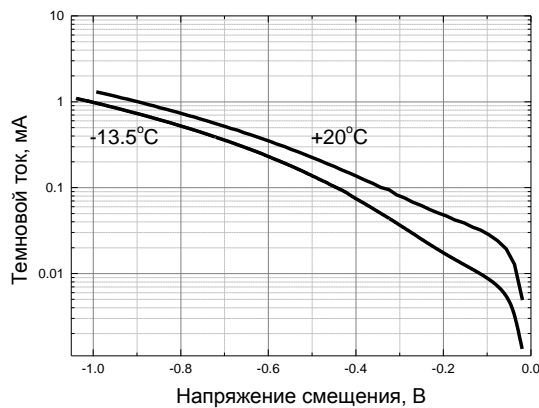


Рис. 40. Вольт-амперные характеристики фотодиода на основе гетероструктуры InAs/InAsSbP с диаметром фоточувствительной площадки $d=100$ мкм при $T=-13.5$ °С и $T=+20$ °С.

На рис. 41 представлены спектры фоточувствительности фотодиодной структуры InAs/InAsSbP при комнатной температуре и неглубоком

охлаждении. Длинноволновая граница спектральной чувствительности при комнатной температуре составляет $\lambda_{zp}=3.8$ мкм, что характерно для ФД с активной областью InAs. Также при комнатной температуре ($T=300$ К) и температуре кипящего азота ($T=77$ К) получены высокие значения токовой монохроматической чувствительности $S_I=1.4$ А/Вт и $S_I=1.6$ А/Вт в максимуме спектральной чувствительности $\lambda_{max}=3.0-3.3$ мкм, соответственно. Полученные значения токовой монохроматической чувствительности соответствует значениям внешней квантовой эффективности $\eta=0.50-0.65$. Были рассчитаны тепловые шумы в исследуемых InAs-ФД по формуле (20), оценена величина удельной обнаружительной способности в максимуме спектральной чувствительности по формуле (26).

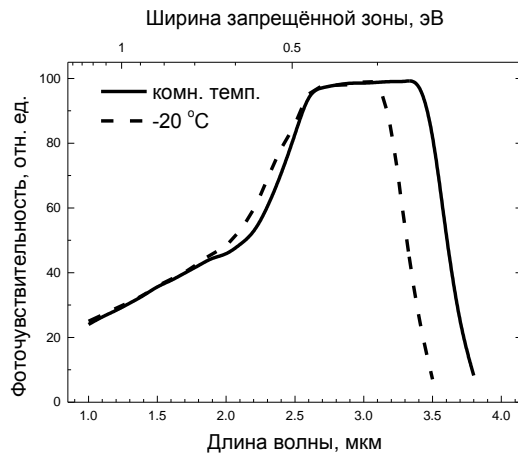


Рис. 41. Спектры фотоочувствительности InAs фотодиодов при комнатной температуре и неглубоком охлаждении ($T=-20^{\circ}\text{C}$).

Величина удельной обнаружительной способности при $T=77$ К имела значение $D_{\lambda_{max}}^*=1.2 \cdot 10^{11}$ Вт⁻¹·Гц^{1/2}·см, при $T=300$ К $D_{\lambda_{max}}^*=10^9$ Вт⁻¹·Гц^{1/2}·см. Полученные значения удельной обнаружительной способности созданных ФД сравнимы с коммерческими InAs-ФД [50].

4.2. Разработка фотодиодов на основе гетероструктур InAsSb/InAsSbP для спектрального диапазона 1.0-4.9 мкм

Твёрдые растворы InAsSb, перспективные для создания ФД в данном спектральном диапазоне, могут выращиваться на подложках GaSb или InAs. Гетерофотодиоды со структурой InAs_{1-x}Sb_x/GaSb (0.10 < x < 0.14) были созданы сотрудниками ФТИ им. А.Ф. Иоффе [66, 67]. При освещении через подложку InAs_{0.86}Sb_{0.14}/GaSb ФД продемонстрировали диапазон спектральной чувствительности 1.7-4.2 мкм. ФД с чувствительностью до $\lambda_{ep} = 4.8$ мкм были созданы также на основе гетероструктуры GaSb/InGaAsSb/AlGaAsSb [89]. Общим недостатком этих ФД являлось низкое значение темнового сопротивления в нуле смещения R_0 - десятки Ом и, как следствие, малая величина обнаружительной способности ФД D^* .

Твёрдый раствор InAsSb имеет большой потенциал для развития длинноволновых ФП, работающих в диапазоне длин волн 2-5 мкм. Наиболее значительные успехи в создании ФД для спектрального диапазона 2-5 мкм продемонстрированы авторами в работах [13, 90]. В работе [90] использовалась гетероструктура InAs/InAs_{0.92}Sb_{0.08}/InAsSbP и флип-чип конструкция приёмника излучения с засветкой через подложку InAs. При использовании активной области InAsSb и освещении через вырожденную подложку позволили получить ФД с диапазоном спектральной чувствительности 2.6-4.6 мкм и максимумом при $\lambda_{max} = 3.8-4.0$ мкм. Высокая токовая монохроматическая чувствительность позволила достигнуть значений удельной обнаружительной способности $D^* = 2.8 \cdot 10^9$ Вт⁻¹·Гц^{1/2}·см на длине волны $\lambda = 4.3$ мкм. Еще более длинноволновый фотодиод ($\lambda_{max} = 4.65$ мкм) продемонстрирован на сайте [91]. Максимум спектральной чувствительности ФД приходится здесь на $\lambda_{max} = 4.55$ мкм при комнатной температуре, а $\lambda_{ep} = 5.1$ мкм. Надо отметить, что описанные ФД обладали значениями токовой чувствительности $S_I = 0.4-0.6$ А/Вт и значениями

дифференциального сопротивления $R_0=10-15$ Ом. Удельная обнаружительная способность ФД достигла значения $D^*=5 \cdot 10^9$ Вт⁻¹·Гц^{1/2}·см при $\lambda_{\max}=4.55$ мкм. Такой впечатляющий результат обусловлен в значительной степени использованием иммерсионной системы, линза которой имеет диаметр $d=3.3$ мм и отражательными свойствами тыльного контакта.

В настоящей части диссертационной работы сообщается о результатах исследований, направленных на создание высокоэффективных ФД на основе неизопериодичной гетероструктуры InAs/InAsSb/InAsSbP/InAsSb/InAsSbP, работающих при комнатной температуре в среднем ИК-диапазоне ($\lambda \geq 3.8$ мкм).

4.2.1. Технология создания фотодиодов

Существенной отличительной особенностью предложенной фотодиодной структуры является введение промежуточного буферного слоя InAs_{0.94}Sb_{0.06} между подложкой InAs и активной областью InAs_{0.88}Sb_{0.12}. Тройной твёрдый раствор такого состава не является изопериодным к подложке. Использование буферного слоя InAs_{0.94}Sb_{0.06} позволяет существенно уменьшить количество дислокаций несоответствия между областями ФД с различными величинами постоянной решётки окружающих твёрдых растворов.

Для решения поставленной задачи были выращены фотодиодные гетероструктуры методом ЖФЭ на подложках InAs (рис. 42). Структуры состоят из подложки InAs (100), с проводимостью n -типа ($n \approx 2 \cdot 10^{17}$ см⁻³), на которой последовательно выращивался широкозонный эмиттерный слой InAsSbP_{0.30} толщиной $l=2.5$ мкм. Далее наращивались активная область InAs_{0.88}Sb_{0.12} толщиной $l=3.5$ мкм и широкозонный эмиттерный слой из твёрдого раствора InAsSbP_{0.30} толщиной $l=2.5$ мкм. Для согласования постоянной решётки между этими слоями и подложкой был выращен слой

$\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$ толщиной $l=5$ мкм.

Было изготовлено два варианта гетероструктуры, как показано на рис. 42 с накрывающим слоем $\text{InAsSbP}_{0.30}$ (вариант *a*), а также в целях повышения качества омического контакта был выращен дополнительный подконтактный слой InAs толщиной $l=0.3$ мкм (вариант *b*). Активный слой $\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$ преднамеренно не легировался, концентрация носителей в нём составила величину $n \approx 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ [38, 92]. Широкозонный эмиттерный слой InAsSbP и слой $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$ легировались Si до концентрации $n=5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, *p*-типа широкозонный эмиттерный InAsSbP и контактный слой легировались цинком до концентрации $p=2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, соответственно. Энергетическая диаграмма структуры (вариант *a*) приведена на рис. 42.

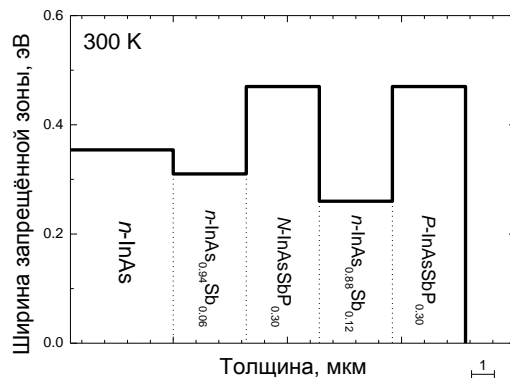


Рис. 42. Энергетическая зонная диаграмма гетероструктуры $\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}$ (вариант *a*).

Из гетероструктур были изготовлены ФД двух конструкций. Фотодиодные чипы размером 500×500 мкм (рис. 43) с размерами фоточувствительной площадки 450×450 мкм и с диаметром фоточувствительной площадки $d=300$ мкм (рис. 44). Все чипы изготавливались методом стандартной фотолитографии с использованием химического травления.

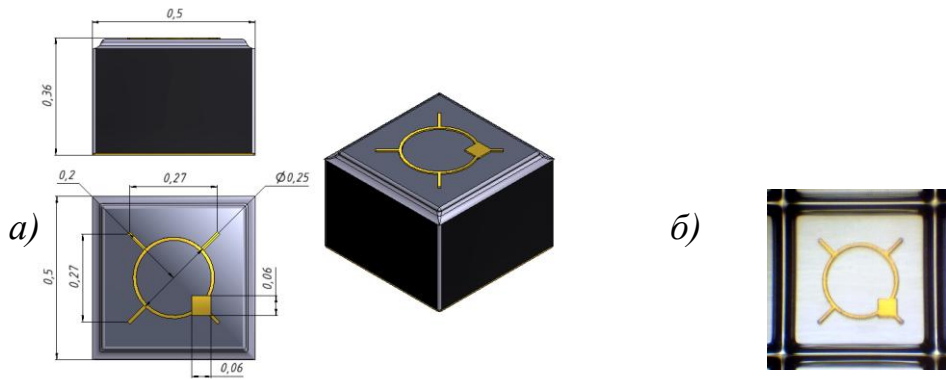


Рис. 43. а) схема фотодиодного чипа с размерами фоточувствительной площадки 450×450 мкм, б) микрофотография фотодиодного чипа.

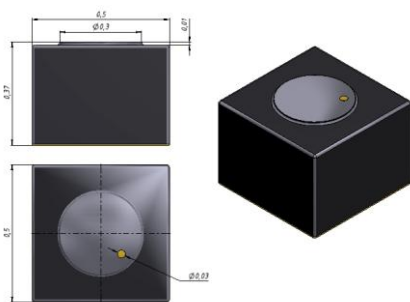


Рис. 44. Схема фотодиодного чипа с диаметром фоточувствительной площадки $d = 300$ мкм.

Фронтальный омический контакт ФП к эпитаксиальному слою создавался методом взрывной фотолитографии и методом вакуумного термического напыления системы металлических плёнок Cr–Au–Ni–Au. Контактная область представляла собой круг диаметром $d = 30$ мкм (рис. 44) или прямоугольник 60×60 мкм с дополнительными ответвлениями (рис. 43). Толщина контактного слоя золота увеличивалась до $l \approx 2$ мкм электрохимическим осаждением. Со стороны подложки наносился сплошной многослойный Cr–Au–Ni–Au контакт методом вакуумного термического напыления. После создания контактов структура подвергалась термообработке в среде водорода для получения омического контакта. Чипы ФД спаивались контактом со стороны подложки на корпус ТО-18. Фотографии собранных ФД приведены на рис. 45. Для повышения эффективности сбора излучения на корпусе ТО-18 размещался параболический отражатель.

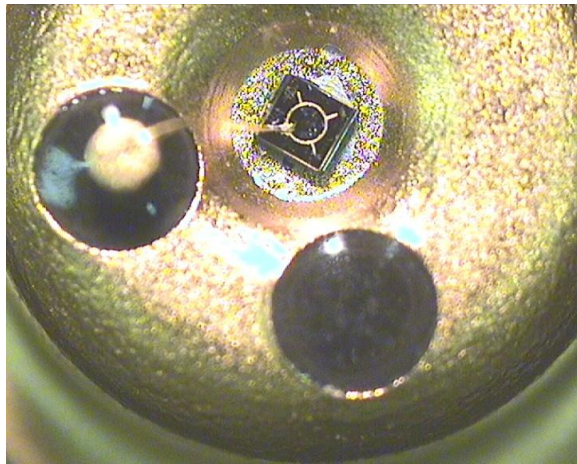


Рис. 45. Фотодиодный чип с размерами фоточувствительной площадки 450×450 на корпусе ТО-18.

4.2.1. Результаты исследования фотодиодной гетероструктуры InAsSb/InAsSbP методом Кельвин-зонд микроскопии

Для определения качества используемых гетероструктур и определения положения $p-n$ -перехода были выполнены исследования по методу сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ). Исследования СЗМ были выполнены совместно с Алексеевым П.А. Шесть вариантов фотодиодных гетероструктур подверглись тщательному изучению. На ростовом этапе создания гетероструктур варьировались технологические параметры. Далее приведены результаты СЗМ исследований гетероструктуры с наилучшими параметрами. На рис. 46, *a* представлена топография поверхности скола исследуемой гетероструктуры. Топография была получена полуконтактным методом. Слева на рис. 46 - край структуры, справа подложка InAs. На топографическом изображении очень чётко различимы три слоя гетероструктуры и подложка. Появление перепадов высот слоёв гетероструктуры после скалывания вызвано различной толщиной естественного окисла, а также возможной релаксацией механических напряжений в слоях, поскольку рассогласование постоянных решёток слоёв достаточно высокое. Перед скалыванием гетероструктура подвергалась шлифованию со стороны подложки до толщины $l \approx 100$ мкм. Без шлифования

поверхность гетерослоёв на сколах имела грубый рельеф, перепады высот достигали значений $\Delta l > 100$ нм.

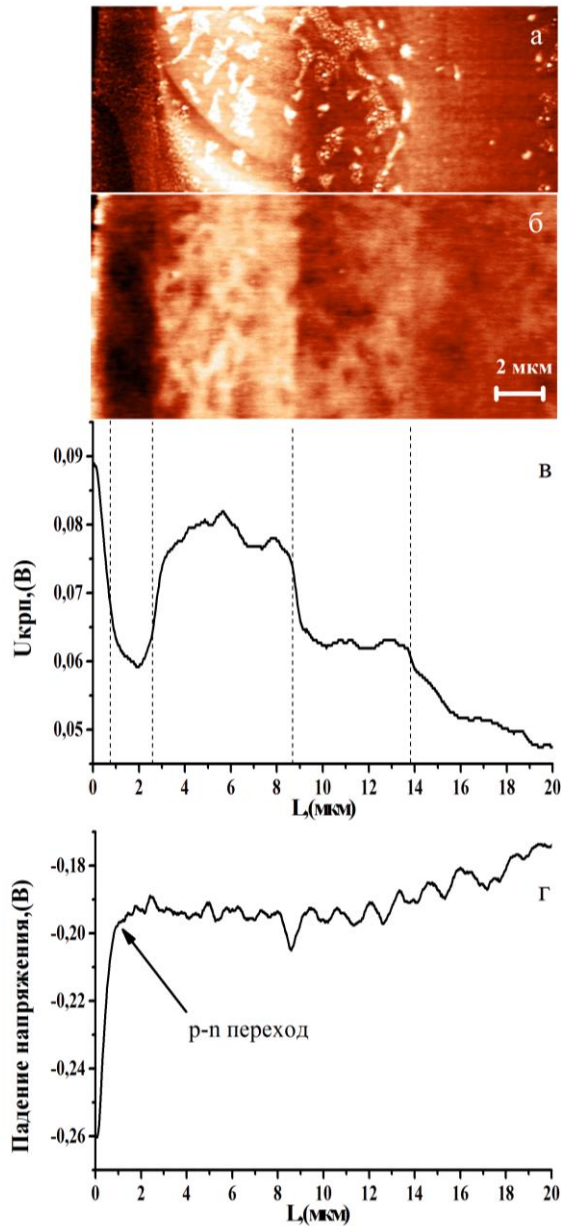


Рис. 46. Топографическое и КЗМ изображения скола гетероструктуры $\text{InAs}/\text{InAs}_{0.95}\text{Sb}_{0.05}/\text{InAsSbP}_{0.30}/\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}/\text{InAsSbP}_{0.30}$.

На рисунке изображены слои справа налево. а) топография поверхности, б) и в) КЗМ изображение и профиль распределения $U_{крп}$ заземлённой структуры, г) разностный профиль распределения поверхностных потенциалов при приложении напряжения смещения $U = -0.6$ В и заземлённой структуры.

На рис. 46, б и в представлено распределение контактной разности

потенциалов $U_{крп}$ на поверхности скола заземлённой структуры и её профиль, полученные методом КЗМ. Измерения проводились в вакууме, подготовленным форвакуумным насосом. Изменение величины $U_{крп}$ связано с различными величинами работ выхода слоёв гетероструктуры. Из рис. 46 видно, что гетероструктура содержит 4 слоя толщинами $l=0.8-1.8-6.0-5.2$ мкм, соответственно. Регистрируемые изменения величины $U_{крп}$ имели относительно малые значения, $\Delta U_{крп} \approx 20$ мВ, хотя величины разрывов энергетических зон (дна зоны проводимости) имеют значения, порядка 100 мВ. Подобное несоответствие связано с поверхностным пиннингом уровня Ферми. Для определения положения $p-n$ -перехода, измерялось распределение $U_{крп}$ при напряжении смещения структуры $U = -0.6$ В. На рис. 46, z представлен разностный профиль, который представляет собой разность распределения поверхностных потенциалов заземлённой структуры и смещённой.

Из измерений следует, что на границе первого и второго слоя находится ОПЗ $p-n$ -перехода, поскольку ОПЗ обладает наибольшим сопротивлением при обратном смещении. На ней падает примерно 10% приложенного напряжения, что говорит о малом сопротивлении, что приводит к тому, что большая часть приложенного напряжения падает в объёме подложки и на омических контактах. Такой результат связан с низким качеством омических контактов. Характерные особенности поведения потенциала показывают место (координаты) положения на сколе как изотипных гетеропереходов, так и $p-n$ -перехода. Эти наблюдения подтверждают точное получение значений толщин и положений переходов в гетероструктуре при измерениях.

В процессе проведения исследований была обнаружена особенность – на некоторых структурах КЗМ-измерения выявляли резкий подъём величины $U_{крп}$ на расстоянии $l=35$ мкм от края структуры. На рис. 47 представлены

профили распределения $U_{крп}$ заземлённой структуры и профили с приложенными напряжениями к подложке $U = +1$ В и $U = -0.6$ В. Приложение положительного напряжения смещения к подложке, т.е. обратного смещения для данной структуры, приводило к возникновению ступеньки в значениях $U_{крп}$ при $l=35$ мкм от края структуры (на глубине $l=20$ мкм в подложке). Приложение прямого смещения с напряжением $U = -0.6$ В к подложке не приводило к возникновению ступеньки в потенциале. Подобная зависимость от полярности приложенного напряжения указывает на вероятное наличие напряжённого слоя. При росте гетероструктуры не производилось диффузии примеси в подложку, а уровень легирования подложки был достаточно высоким $n \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, следовательно перекомпенсация подложки в p -тип на глубину $l=20$ мкм в процессе роста гетерослоёв маловероятна.

Как видно из рис. 47 основное падение приложенного напряжения происходит в области дефекта, и не происходит в области первого и второго гетерослоя. Это приводит к неработоспособности фотодиодной структуры. Отметим, что причина появления резкого подъёма величины $U_{крп}$ на расстоянии $l=35$ мкм окончательно не ясна, поскольку подобное явление наблюдалось примерно в половине исследуемых структур.

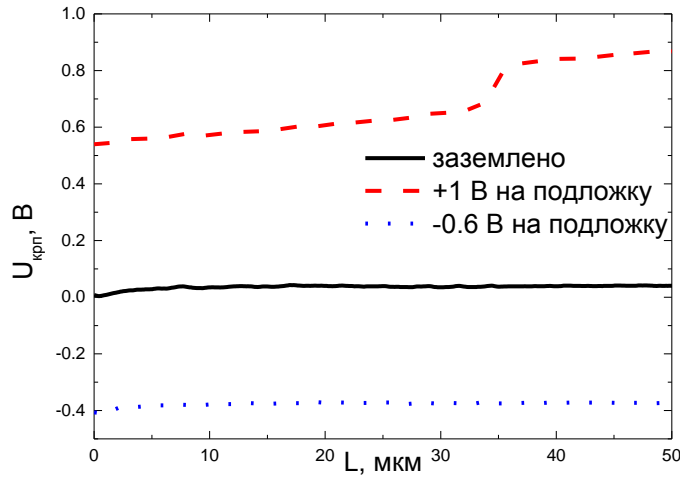


Рис. 47. Профили распределения $U_{крп}$ исследуемой структуры при различных приложенных напряжениях.

Количественные КЗМ исследования гетероструктур были существенно затруднены. Из рис. 47 хорошо видно, что при приложении напряжения смещения $U = +1$ В к подложке, поверхностный потенциал сдвигается на $\Delta U = 0.5$ В в области гетерослоёв, это означает, что 0.5 В падает на электрическом контакте со стороны эпитаксиального слоя, из чего следует, что сам контакт обладает высоким сопротивлением, к тому же более высоким, чем сопротивление, образованное дефектом. Контакты к исследуемым структурам создавались с помощью микропаяльника, без дополнительного вжигания, как при создании ФД. Проводились попытки проводить термообработку, но этот процесс также приводил к загрязнению поверхности скола. После этого структура становилась непригодной для СЗМ-исследований.

Исследования КЗМ фотодиодной гетероструктуры $\text{InAs}/\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}/\text{InAsSbP}_{0.30}/\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}/\text{InAsSbP}_{0.30}$, оказались полезными для оптимизации процесса создания ФД с расширенным диапазоном спектральной чувствительности (1.0-4.8 мкм). Исследования КЗМ позволили определить положение $p-n$ -перехода, а также толщины гетерослоёв. Была получена важная информация о возможном присутствии брака в

использовавшихся при создании структур на основе подложек InAs.

На основе исследуемой гетероструктуры была изготовлена серия ФД, отличительной особенностью которых являлись расширенный диапазон спектральной чувствительности (1.0-4.8 мкм) с токовой монохроматической чувствительностью $S_I=0.5-0.8$ А/Вт и плотностью обратных темновых токов $j=1.0-1.5$ А/см² при напряжении смещения $U=-0.2$ В. Дифференциальное сопротивление в нуле смещения достигает величины $R_0=20-100$ Ом, удельная обнаружительная способность ФД в максимуме спектральной чувствительности составило $D^*=(1-2)\cdot 10^8$ Вт⁻¹·Гц^{1/2}·см.

4.2.2. Электрические свойства фотодиодов на основе гетероструктур InAsSb/InAsSbP

Для исследования электрических свойств ФД была собрана и измерена серия приборов. Все ФД имели диодные характеристики (рис. 48 и рис. 49) с напряжением отсечки $U \approx 0.2$ В при комнатной температуре. Значения дифференциального сопротивления в нуле смещения ФД с диаметром фоточувствительной площадки $d=300$ мкм находились в диапазоне $150 \leq R_0 \leq 700$ Ом, с размером фоточувствительной площадки 450×450 мкм $20 \leq R_0 \leq 100$ Ом. Значения плотности обратных темновых токов при напряжении смещения $U=-0.2$ В не превышали значений $j=(1.0-7.5)\cdot 10^{-2}$ А/см². На рис. 48 продемонстрирована серия прямых ветвей ВАХ ФД с размером чувствительной площадки 450×450 мкм в температурном диапазоне $-25^\circ\text{C} \leq T \leq +22.5^\circ\text{C}$, а на рис. 49 продемонстрирована серия обратных ветвей ВАХ ФД в температурном диапазоне $0^\circ\text{C} \leq T \leq +22.5^\circ\text{C}$.

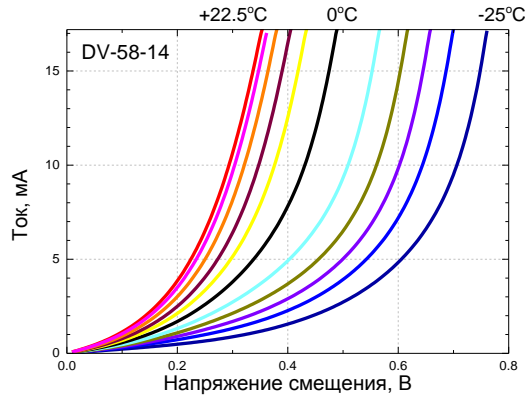


Рис. 48. Серия прямых ветвей ВАХ фотодиода с размером чувствительной площадки 450×450 мкм в температурном диапазоне $-25^\circ\text{C} \leq T \leq +22.5^\circ\text{C}$.

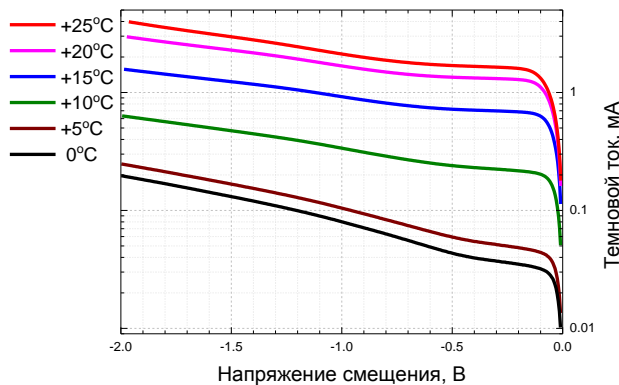


Рис. 49. Серия обратных ветвей ВАХ фотодиода с размером чувствительной площадки 450×450 мкм в температурном диапазоне $0^\circ\text{C} \leq T \leq +22.5^\circ\text{C}$.

4.2.3. Фотоэлектрические свойства фотодиодов на основе гетероструктур InAsSb/InAsSbP

Для изучения спектральных характеристик ФД использовалась методика измерения, описанная в разделе 2.4. На рис. 50 изображены спектры распределения относительной чувствительности фотодиодных гетероструктур InAsSb/InAsSbP с широким спектром (WS, вариант *a*) и узким спектром (NS, вариант *b*) при комнатной температуре ($T = 300$ К). Как видно из рис. 50, диапазон чувствительности по уровню 10% от максимума 2.5-4.9 мкм для NS ФД и 1.0-4.8 мкм для WS ФД. Отсечка длинноволновой чувствительности ФД располагалась на уровне $\lambda_{cp} = 4.9$ мкм (NS). На спектре

присутствуют два провала, обусловленных поглощением излучения CO_2 ($\lambda = 4.25$ мкм) и парами воды ($\lambda = 2.7$ мкм). Максимум чувствительности располагается на длине волны $\lambda_{\text{max}} = 4.4-4.5$ мкм. Измерения показали, что токовая монохроматическая чувствительность этих ФД в максимуме спектра ($\lambda_{\text{max}} = 4.0-4.6$ мкм) достигает значений $S_I = 0.6-0.8$ А/Вт, что соответствует квантовой эффективности $\eta = 0.15-0.20$. Удельная обнаружительная способность ФД в максимуме спектральной чувствительности с учётом токовой монохроматической чувствительности и величиной шумов, обусловленных дробовыми шумами сопротивления в $R_0 = 200-500$ Ом, достигала значения $D^* = (5-8) \cdot 10^8$ Вт⁻¹·Гц^{1/2}·см.

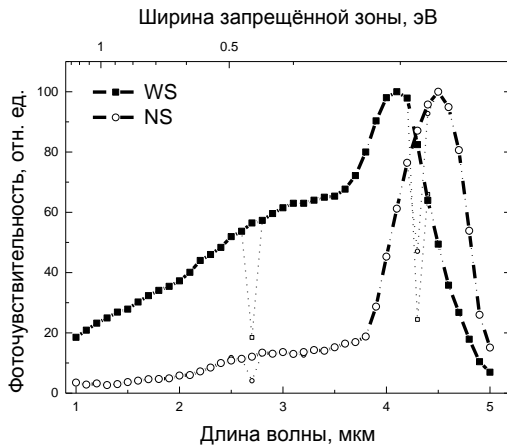


Рис. 50. Спектры относительной чувствительности фотодиодных гетероструктур InAsSb/InAsSbP с широким спектром (WS, вариант а) и узким спектром (NS, вариант б) при комнатной температуре ($T = 300$ К).

4.2.3. Повышение квантовой чувствительности фотодиодов на основе гетероструктуры InAs/InAsSb/InAsSbP

Особенностью ФД, работающих при комнатной температуре в диапазоне длин волн 3-5 мкм, является их низкая квантовая эффективность $\eta = 0.20-0.40$, для увеличения которой применяют различные концентраторы падающего на поверхность ФД излучения в виде полусферических линз, параболических отражателей, линз Френеля и т.д. [93, 94]. Однако эти внешние устройства достаточно дороги и громоздки. Авторы [90] применили

глубокое травление фотодиодной мезы, т.е. создали «встроенный» оптический концентратор, увеличивающий площадь сбора излучения, что позволило улучшить спектральные характеристики ФД.

Фотодиоды для экспериментов были изготовлены из гетероструктуры, показанной на рис. 51, выращенной на подложке n -InAs ориентации (100), легированной оловом до концентрации носителей $n=5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. В подложке с такой высокой концентрацией носителей, согласно [95] происходит сдвиг фундаментального края поглощения в коротковолновую область спектра (сдвиг Бурштейна-Мооса) и она становится прозрачной для излучения с длиной волны $\lambda \geq 2.5 \text{ мкм}$.

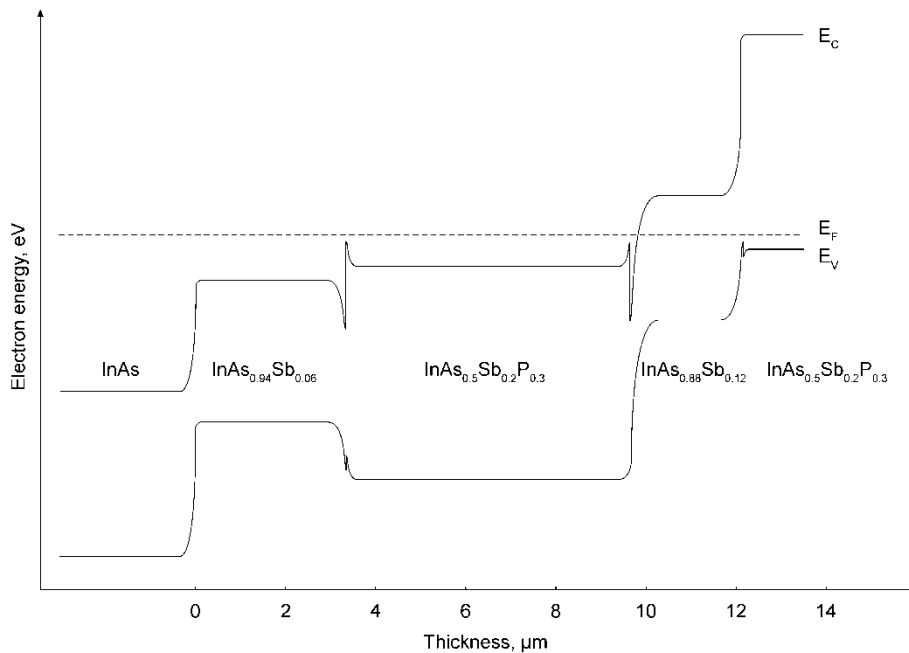


Рис. 51. Энергетическая зонная диаграмма фотодиодной гетероструктуры InAs/InAsSb/InAsSbP.

На подложке методом ЖФЭ был выращен буферный слой n -InAs_{0.94}Sb_{0.06} толщиной $l=3.3 \text{ мкм}$, обеспечивающий уменьшение деформации активной области. Затем последовательно были выращены: широкозонный эмиттерный слой n -InAs_{0.50}Sb_{0.20}P_{0.30} толщиной $l=6.2 \text{ мкм}$, легированный оловом до концентрации электронов $n \approx 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, преднамеренно нелегированный ($n \approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) активный слой n -

$\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$ толщиной $l=2.5$ мкм, широкозонный эмиттерный слой p - $\text{InAs}_{0.50}\text{Sb}_{0.20}\text{P}_{0.30}$, толщиной $l=1.4$ мкм, легированный цинком до концентрации дырок $p \approx 2 \cdot 10^{18}$ см⁻³. После выращивания гетероструктуры подложка была сошлифована до толщины $l=200$ мкм и отполирована. Постростовую технологию обработки фотодиодных гетероструктур проводила Гребенщикова Е.А. Из одной гетероструктуры (серия DV-107) методами контактной фотолитографии и жидкостного химического травления были созданы три варианта фотодиодных чипов, схемы поперечного сечения которых приведены на рис. 52.

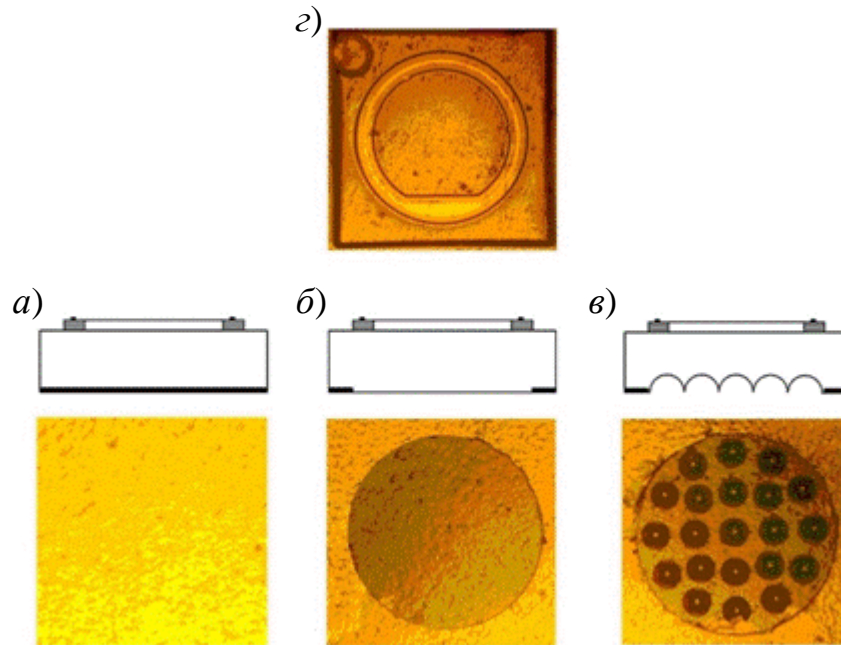


Рис. 52. *а), б), в)* – схемы поперечного сечения фотодиодных чипов и микрофотографии их граней со стороны подложки, различающихся по рельефу и по площади омического контакта к ней; *з)* микрофотография чипа со стороны эпитаксиального слоя.

а) с плоской тыльной поверхностью - сплошной омический контакт,

б) с центральной частью диаметром $d = 880$ мкм свободной от контакта,

в) с полусферическими углублениями на центральной части тыльной стороны подложки.

Омические контакты создавались методом термического вакуумного напыления слоёв Cr/Au-Te/Au к подложке n -InAs и Cr/Au-Ge/Au к p -слою.

Со стороны эпитаксиального слоя все три чипа были идентичны (чертежи на рис. 52, *а*, *б*, *в* и микрофотография на рис. 52, *г*). Они имели форму квадрата со стороной 950 мкм, в центре которого была сформирована кольцевая меза с внешним диаметром $d=770$ мкм, внутренним диаметром $d=600$ мкм и высотой $h=18$ мкм. За пределами мезы, т.е. внутри и снаружи кольца, гетероструктура была стравлена до подложки. Площадь чувствительной площадки составила $S=0.151$ мм², площадь $p-n$ -перехода $S_{p-n}=0.191$ мм², а общая площадь чипа $S_q=0.9$ мм². Площадь поверхности InAs, обнажившейся после стравливания гетероструктуры до подложки, через которую падающее излучение проникает в кристалл и достигает тыльной поверхности фотодиодного чипа, $S_d=0.417$ мм², т.е. значительно больше площади $p-n$ -перехода S_{p-n} , поглощающего часть падающего излучения. Омический контакт, также в форме кольца, с внешним радиусом $r=350$ мкм и шириной 15 мкм располагался в средней части кольцевой мезы. Свободная от металла поверхность чипа (вариант *в*) составила $S_k=2.285$ мм², площадь контактов $S_m=0.335$ мм² и объём кристалла $V=0.184$ мм³.

Таким образом, только часть излучения, падающего на лицевую поверхность чипа, поглощалась фоточувствительной площадкой кольцевой мезы, а остальная часть излучения, падающая за пределами мезы, свободно проникала в подложку InAs толщиной $l=200$ мкм и частично достигала тыльной стороны чипа. Основные различия трёх типов чипов состояли в рельефе тыльных сторон и в размерах площади контакта к подложке. На рис. 52 видно, что меза-ФД первого типа (рис. 52, *а*) имели плоскую поверхность тыльной стороны, при этом омический контакт к подложке полностью закрывал тыльную поверхность фотодиодного чипа площадью $S=0.9$ мм². Такой контакт называется сплошным, традиционно применяется при изготовлении оптоэлектронных приборов. Световой поток, падающий на лицевую поверхность фотодиодного кристалла за пределами мезы, свободно

проникает в прозрачную для длинноволнового излучения подложку, далее достигнув тыльной стороны чипа поглощается на границе раздела подложка - омический контакт в области эвтектики.

Меза-ФД второго типа (рис. 52, б) отличались от первого тем, что часть плоской тыльной стороны подложки (диаметр $d=880$ мкм) была свободна от металлизации. В этом случае излучение, достигшее тыльной стороны, отражается от не металлизированной поверхности подложки и частично попадает в область $p-n$ -перехода, поглощаясь в активной области кольцевой мезы приводил к генерации фототока. Однако в этом случае световые потоки не могут изменять угол падения и отражения от границ кристалла.

Меза-ФД третьего типа (рис. 52, в) имели на не металлизированной тыльной поверхности множество полусферических углублений радиусом $r \approx 60$ мкм. Металлизация была частичной, как у меза-ФД второго типа. В этом случае излучение, проникшее в фотодиодный чип, многократно отражается от сформированной криволинейной отражающей поверхности. В результате световые потоки изменяют свои направления в чипе и частично поглощаются в активной области кольцевой мезы, давая вклад в фототок.

На рис. 53 приведены вольт-амперные характеристики $I(U)$ ФД трёх типов, измеренные при температуре $T=300$ К. Характеристики имеют вид диодных, однако насыщение обратного тока с увеличением обратного напряжения отсутствует. Это можно объяснить наличием инверсионного слоя n -типа проводимости на поверхности p -области. Насыщение отсутствует из-за того, что с увеличением обратного напряжения увеличивается глубина проникновения электронов из n -области в поверхностный инверсионный слой, т.е. площадь области утечки увеличивается. В ряде случаев удаётся выделить ток насыщения $p-n$ -перехода. Величина его составляет $I_d=1-2$ мА ($j=0.5-1$ А/см²), что

соответствует сопротивлению $p-n$ -перехода при нулевом напряжении $R_0 = 13-26$ Ом. Значения плотностей обратного темнового тока при напряжении смещения $U = -0.2$ В составили $j = 4$ А/см², $j = 5$ А/см² и $j = 2$ А/см² для ФД типов a , b , c соответственно. Сопротивление ФД при нулевом смещении составило величину $R_0 = 15-30$ Ом, которое показало, что R_0 определяется в основном сопротивлением $p-n$ -перехода, а не областью поверхностного инверсионного слоя.

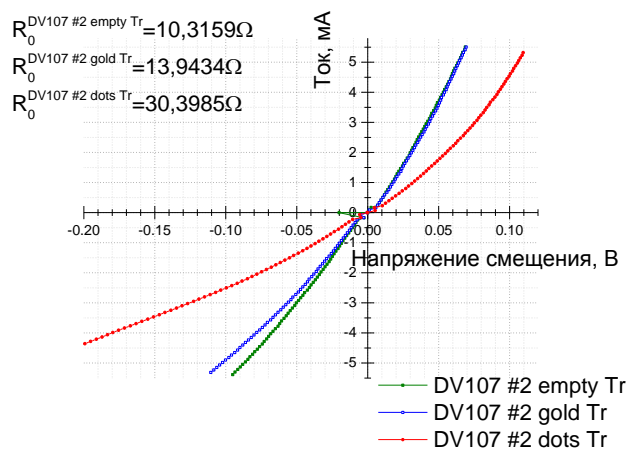


Рис. 53. Вольт-амперные характеристики фотодиодов серии DV107, gold - вариант a , empty – вариант b , dots - вариант c .

Как видно из рис. 53, наклон кривой ВАХ ФД варианта c отличается от кривых исполнения a и b , что вероятно связано с дополнительным последовательным сопротивлением, обусловленным дефектом омического контакта.

На рис. 54 представлены спектры чувствительности ФД трёх типов. Квантовая чувствительность ФД с плоской тыльной стороной чипа (рис. 54, кривые 1, 2) уменьшается с увеличением длины волны. Длинноволновый край фоточувствительности соответствует краю межзонного поглощения наиболее узкозонного слоя $\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$ ($\lambda_{cp} = 4.8$ мкм). Квантовая чувствительность на границе коротковолнового края ($\lambda = 1$ мкм) достигает η

≈ 0.16 (электрон/фотон), т.е. около 130% в пересчёте на освещаемую площадь кольца. В случае криволинейной поверхности тыльной стороны чипа (рис. 54, кривая 3) имеется дополнительная фоточувствительность в интервале длин волн 2.2-4.8 мкм. Квантовая эффективность в области коротковолнового края оказывается такой же большой, как в ФД типов *a* и *б*.

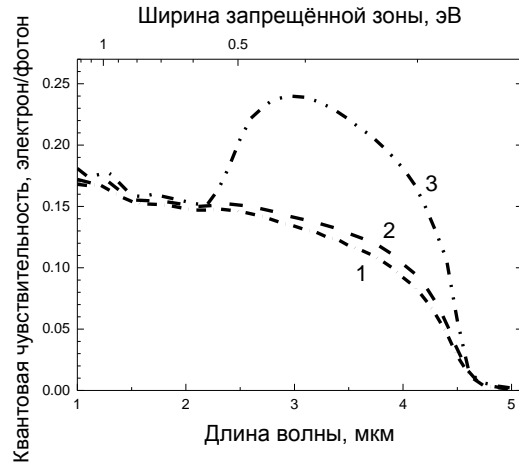


Рис. 54. Спектры квантовой чувствительности фотодиодов трёх типов (см. рис. 52): 1, 2 — с плоской поверхностью со стороны подложки, со сплошным омическим контактом (1, вариант *a*) и с центральной частью, свободной от контакта (2, вариант *б*); 3 — с полусферическими углублениями в центральной части фотодиодного чипа со стороны подложки (вариант *в*).

Проведенные измерения показали, что использование отражательных оптических методов (таких, как создание криволинейной отражающей поверхности в виде множества полусфер на грани фотодиодного чипа со стороны подложки) позволяют перераспределить потоки излучения в фотодиодном чипе и увеличить эффективную площадь сбора излучения. Из рис. 54 (кривая 3) видно, что квантовая эффективность в области длин волн 2.5-4.5 мкм возрастает почти в 2 раза по сравнению с ФД с поглощающим омическим контактом на тыльной стороне чипа (рис. 54, кривая 1) или с частично не металлизированной стороной чипа (рис. 54, кривая 2). Для серии ФД с криволинейной поверхностью на тыльной стороне чипа достигнута величина квантовой чувствительности $\eta = 0.24$ электрон/фотон в максимуме спектра на длине волны $\lambda_{\max} = 3.1$ мкм в расчёте на площадь чипа $S = 0.9$ мм²,

или существенно больше единицы ($\eta = 1.43$) в расчёте на площадь $p-n$ -перехода ($S = 0.151 \text{ мм}^2$). При этом квантовая чувствительность ФД на длине волны $\lambda = 4.0 \text{ мкм}$ составила $\eta = 0.18$ (электрон/фотон). В области длин волн $1 \leq \lambda \leq 2 \text{ мкм}$, где InAs сильно поглощает и не может внести вклад в фототок, получена квантовая эффективность $\eta \approx 0.16$ электрон/фотон в расчёте на площадь чипа, или около единицы ($\eta = 0.95$ электрон/фотон) в расчёте на освещаемую площадь кольцевой мезы. Эти данные показывают, что в фотоэффекте участвует не только освещаемая площадь кольца, но и другие участки чипа.

Фоточувствительность в области длин волн 1-2.2 мкм больше, чем в длинноволновой, что заставляет предположить участие других физических явлений в генерации носителей. В качестве объяснения этого факта можно предположить наличие явления ударной ионизации при межзонном поглощении фотонов, способное дать квантовый выход — число электронно-дырочных пар на один фотон больше единицы, увеличивающийся с уменьшением длины волны [96].

Во-первых, фотоны с длиной волны $\lambda < 2.6 \text{ мкм}$ создают в накрывающем слое $p\text{-InAs}_{0.50}\text{Sb}_{0.20}\text{P}_{0.30}$ электронно-дырочные пары, которые при разделении их $p-n$ -переходом дают первичный вклад в фототок, при этом кинетическая энергия части электронов, попавших в узкозонный слой $n\text{-InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$, оказывается достаточной для ударной ионизации. В процессе акта ударной ионизации рождается еще одна электронно-дырочная пара, которая даёт вклад во вторичный фототок. Эта составляющая фототока должна плавно увеличиваться с уменьшением длины волны из-за роста поглощения в лицевом слое. В самом накрывающем слое ударная ионизация возможна для длин волн $\lambda < 1.2 \text{ мкм}$. Во-вторых, фотоны с $\lambda < 2.1 \text{ мкм}$, поглотившись в узкозонном слое $\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$, могут также вызывать ударную ионизацию, вероятность которой увеличивается с уменьшением длины волны. При длинах волн $\lambda < 1.5 \text{ мкм}$ возможна двукратная, а при λ

<1.1 мкм — трёхкратная ударная ионизация. На этих длинах волн в экспериментальных спектрах действительно видны ступеньки роста квантовой чувствительности с уменьшением длины волны (рис. 54), что является доводом в пользу осуществления ударной ионизации преимущественно в узкозонном слое.

4.2.4. Оценка быстродействия фотодиодов на основе гетероструктур InAsSb/InAsSbP

Фотодиодная гетероструктура InAs/InAs_{0.94}Sb_{0.06}/InAsSbP_{0.30}/InAs_{0.88}Sb_{0.12}/InAsSbP_{0.30} подобна $p-i-n$ -структуре, т.к. активный слой InAs_{0.88}Sb_{0.12} при выращивании преднамеренно не легировался, концентрация носителей в нём составила величину $n \approx 1 \cdot 10^{15}$ см⁻³, прилегающий широкозонный эмиттерный слой InAsSbP легировался Si до концентрации $n = 5 \cdot 10^{17}$ см⁻³, а накрывающие слои InAsSbP и InAs легировались цинком до концентрации $p = 2 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Если принять во внимание, что быстродействие фотодиодов, изготовленных на основе указанной гетероструктуры определяется главным образом RC -компонентой, то величина собственной ёмкости ФД будет ограничивать его быстродействие.

Было проведено исследование ВФХ ФД на основе гетероструктур InAsSb/InAsSbP. На рис. 55 продемонстрирована типичная ВФХ ФД на основе гетероструктуры InAs/InAs_{0.94}Sb_{0.06}/InAsSbP_{0.30}/InAs_{0.88}Sb_{0.12}/InAsSbP_{0.30} с размером фоточувствительной площадки 450×450 мкм. По характеру кривой видно, что собственная ёмкость ФД стремительно падает и уже при напряжении смещения $U = -0.6$ В составляет несколько единиц пикофарад. Без смещающего напряжения ФД имеют собственную ёмкость $C_0 = 30-60$ пФ.

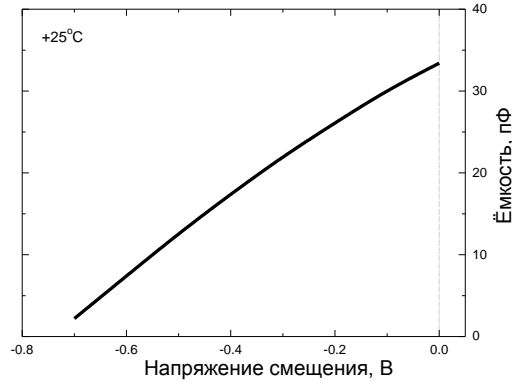


Рис. 55. Вольт-фарадная характеристика фотодиода на основе гетероструктуры $\text{InAs}/\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}/\text{InAsSbP}_{0.30}/\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}/\text{InAsSbP}_{0.30}$ с размером фоточувствительной площадки 450×450 мкм.

Быстродействие ФД при полученных значениях собственной ёмкости можно оценить значением $\tau = 1-10$ нс, что является типичным для приборов на основе A^3B^5 .

4.3. Выводы

Обобщая изложенные результаты в главе 4 можно сделать следующие выводы:

1. Впервые созданы ФД на основе изопериодной гетероструктуры $\text{InAs}/\text{InAsSbP}$ с диаметром фоточувствительной площадки $d=100$ мкм, исследованы ВАХ, ВФХ и спектральные характеристики ФД при температурах $T=77$ и $T=300$ К. Фоточувствительность ФД лежала в диапазоне $1.0 \leq \lambda \leq 3.8$, токовая монохроматическая чувствительность в максимуме спектра $\lambda_{\text{max}}=3.0-3.4$ мкм достигала значения $S_f=1.4$ А/Вт при комнатной температуре. Величина удельной обнаружительной способности при $T=77$ К имела значение $D_{\lambda_{\text{max}}}^*=1.2 \cdot 10^{11}$ $\text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{см}$, при $T=300$ К $D_{\lambda_{\text{max}}}^*=10^9$ $\text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{см}$. Полученные значения удельной обнаружительной способности исследуемых ФД сравнимы с коммерческими ФД на основе InAs .

2. Впервые созданы ФД на основе гетероструктур $\text{InAs}/\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}/\text{InAsSbP}/\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}/\text{InAsSbP}$ с диаметром фоточувствительной площадки $d=300$ мкм, с размером фоточувствительной площадки 450×450 мкм, работающие при комнатной температуре в диапазонах 2.5-4.9 мкм и 1.0-4.8 мкм. Для уменьшения количества дислокаций несоответствия между постоянной решётки подложки и активной областью ФД введён буферный слой $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$. Низкая токовая монохроматическая чувствительность ФД $S_I=0.6-0.8$ А/Вт в максимуме спектра $\lambda_{\text{max}}=4.0-4.6$ мкм связана с дефектами, вызванными неизопериодностью гетероструктуры.

3. В ФД на основе гетероструктуры $\text{InAs}/\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}/\text{InAs}_{0.50}\text{Sb}_{0.20}\text{P}_{0.30}$ с узкозонной активной областью ($E_g=0.2-0.3$ эВ) достигнуто увеличение квантовой эффективности и удельной обнаружительной способности в 1.5-1.7 раза в интервале длин волн 2.2-4.8 мкм благодаря сформированной криволинейной отражающей поверхности, образованной селективным травлением, со стороны подложки фотодиодного чипа, позволяющей изменять направление оптического излучения внутри фотодиодного чипа в сторону активной области. Квантовая эффективность этих ФД достигла значения $\eta=0.24$ (электрон/фотон) на длине волны $\lambda=3$ мкм.

Глава 5. Разработка и создание фотодиодов на основе квантово-размерных гетероструктур узкозонных соединений A^3B^5 для спектрального диапазона 1.6-5.0 мкм

В главе 5 будут изложены результаты исследования параметров и характеристик ФД на основе квантово-размерных гетероструктур узкозонных соединений A^3B^5 для спектрального диапазона 1.6-5.0 мкм. Для создания описанных в этой главе ФД, создавались квантово-размерные гетероструктуры по технологии МОГФЭ.

Фотодиоды на основе гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) на основе InGaAs/AlGaAs, выращенные методом МПЭ на подложках GaAs и InP, интенсивно разрабатываются и исследуются в последние два десятилетия [97].

Глава 5 состоит из двух частей. В разделе 5.1 описаны результаты исследований направленных на создание ФД для среднего ИК диапазона на основе асимметричной гетероструктуры II типа p -InAs/AlSb/InAs_{0.84}Sb_{0.16}/AlSb/ p -GaSb, с глубокой одиночной и тремя КЯ AlSb/InAs_{0.84}Sb_{0.16}/AlSb в активной области на гетерогранице, выращенной методом МОГФЭ на подложке p -InAs.

В разделе 5.2 описаны ФД, работающие в спектральном диапазоне 0.9-1.6 мкм, созданные на основе гетероструктуры с глубокой КЯ и узкозонным твёрдым раствором в активной области Al(As)Sb/InAs_{0.84}Sb_{0.16}/Al(As)Sb. Наногетероструктура была выращена на подложке n -GaSb. В работах [98, 99] были описаны электролюминесцентные характеристики и параметры таких гетероструктур.

5.1. Фотодиоды на основе квантово-размерных гетероструктур InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/GaSb с глубокими квантовыми ямами

В последние годы значительное внимание уделяется созданию новых типов ФП для среднего ИК-диапазона на основе гетероструктур с

квантовыми ямами [97], на основе сверхрешёток [100, 101], с целью улучшения их параметров (снижения темновых токов, улучшение быстродействия, расширения спектрального диапазона и др.). Работы по созданию и разработке таких ФП ведутся свыше 15 лет, однако в России такие исследования ранее не проводились.

5.1.1. Технология создания фотодиодов

Наногетероструктуры содержали одну или три КЯ $\text{AlSb}/\text{InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}/\text{AlSb}$, толщина слоёв составляла соответственно 20 нм/5 нм/20 нм, накрывающим был слой p -GaSb толщиной $l=0.5$ мкм. Гетероструктуры были выращены на p -подложках $\text{InAs}(100):\text{Mn}$ методом МОГФЭ (MOVPE) низкого давления на установке AXTRON-200 при температуре $T=500^\circ\text{C}$ в атмосфере водорода в лаборатории MOVPE Института физики Чешской академии наук [102]. Схематические зонные диаграммы структур с одной и тремя КЯ представлены на рис. 56 и рис. 57, соответственно. Накрывающий слой GaSb был преднамеренно не легирован, тогда как подложка InAs была легирована акцепторной примесью Mn до концентрации $p=10^{17}\text{ см}^{-3}$ при $T=300\text{ К}$. В структурах с одной или тремя КЯ, содержащих AlSb-барьеры толщиной $l=20$ нм, ширина КЯ InAsSb составляла 5 нм. Для более глубокого понимания физических процессов переноса носителей изучались магнитотранспортные свойства интерфейса. При $T < 100\text{ К}$ подложка становилась полуизолятором, что позволяло исследовать магнитотранспортные свойства.

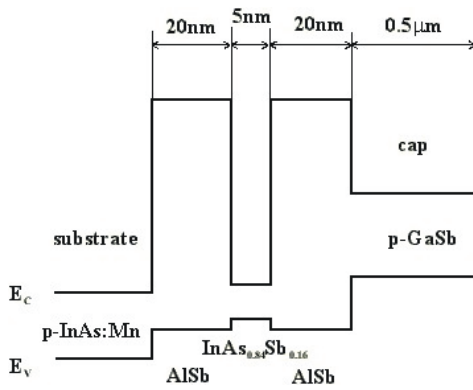


Рис. 56. Схематическая зонная диаграмма асимметричной гетероструктуры II типа p -InAs/AlSb/InAs_{0.84}Sb_{0.16}/AlSb/ p -GaSb с одной квантовой ямой AlSb/InAs_{0.84}Sb_{0.16}/AlSb.

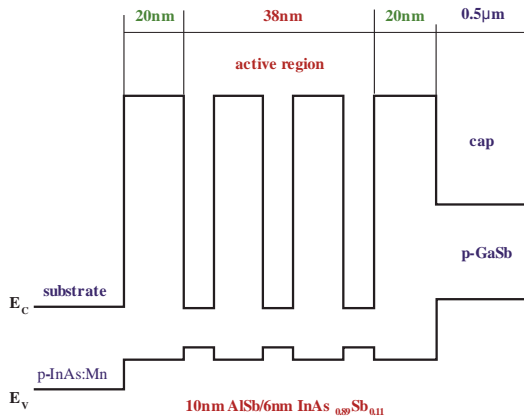


Рис. 57. Схематическая зонная диаграмма асимметричной гетероструктуры II типа p -InAs/AlSb/InAs_{0.84}Sb_{0.16}/AlSb/ p -GaSb с тремя квантовыми ямами AlSb/InAs_{0.84}Sb_{0.16}/AlSb.

5.1.2. Исследование магнитотранспортных свойств слоёв гетероструктур с глубокими квантовыми ямами AlSb/InAsSb/AlSb

Магнитотранспортные свойства полученных структур исследовались на прямоугольных образцах холловской геометрии с шестью омическими контактами в полях до 5 Тл при температуре $T=77$ К. Величина холловской подвижности в образце с одиночной КЯ AlSb/InAs_{0.84}Sb_{0.16}/AlSb шириной 5 нм, выращенной на подложке p -InAs(100):Mn, составляла $\mu=5000$ см²/В·с. Данные измерений показали, что на границе II типа p -InAs/AlSb существует электронный канал, аналогичный наблюдаемому в работе [103]. Величина

транспортного уширения [104] $2\Gamma = \frac{2\hbar}{\tau_{tr}}$, где $\tau_{tr} = \frac{\mu \cdot m^*}{e} = 10^{-13}$ с была оценена при значении эффективной массы электронов в твёрдом растворе InAsSb $m^* = 0.016 \cdot m_0$. Значение $2\Gamma = 16$ мэВ было получено при учёте того факта, что подвижность определяется рассеянием на неоднородностях интерфейса [105]. Как отмечено в работе [104], для двойной гетероструктуры InAs/AlSb величина 2Γ связана с шириной линии межподзонных переходов, что хорошо согласуется с данными для исследуемой структуры с КЯ, толщиной $d = 5$ нм, рассчитанными из полуширины спектра люминесценции такой структуры $\Delta E_{nv} = 21$ мэВ при $T = 77$ К, полученной из данных работы [106]. Эти результаты свидетельствуют о высоком качестве гетерограницы исследуемых структур с КЯ, выращенными методом МОГФЭ.

5.1.3. Электрические свойства фотодиодов

Для исследования электролюминесцентных, электрических и фотоэлектрических свойств, образцы меза-диодов с диаметром чувствительной площадки $d = 300$ мкм были приготовлены методом стандартной фотолитографии и химического травления. Спектры ЭЛ регистрировались с помощью монохроматора Digikrom-480, синхронного детектора Stanford S-580 и охлаждаемого InSb-фотодиода (Judson Ltd.). Для стабилизации измерений при температурах выше комнатной диоды монтировались на специальном держателе с термоохладильником.

Исследования спектров ЭЛ в диапазоне температур $77 \leq T \leq 300$ К показали высокую интенсивность как положительной, так и отрицательной ЭЛ при прямом и обратном смещении (минус на подложке p -типа), соответственно, в интервале энергий фотонов $E_{nv} = 0.3-0.4$ эВ [106].

На рис. 58 представлены спектры положительной и отрицательной ЭЛ гетероструктуры p -InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/ p -GaSb при температурах $T = +28^\circ\text{C}$ и $T = +106^\circ\text{C}$. Температурная зависимость оптической мощности

положительной и отрицательной ЭЛ в интервале высоких температур $300 \leq T \leq 380$ К при токе накачки $I = 200$ мА показана на рис. 59. Как видно из рис. 59, мощность отрицательной ЭЛ возрастает, а положительной — падает с ростом температуры. Высокая эффективность отрицательной ЭЛ обусловлена падением величины оже-рекомбинации с увеличением температуры, $R_{Auger} \sim \frac{1}{T}$. Кроме того, как показано в [106], оже-рекомбинация может быть подавлена на гетерогранице II типа [107]. Это позволяет использовать предложенную структуру, переключая её в режим светоизлучающего диода или ФД при высоких температурах.

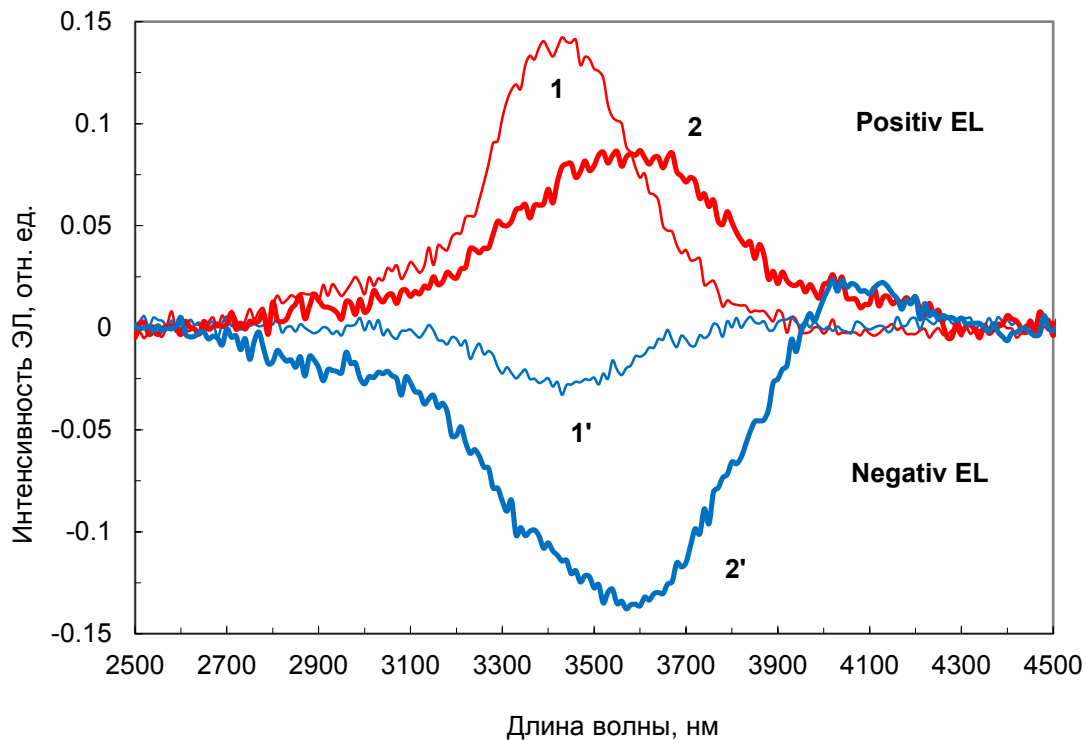


Рис. 58. Спектры положительной и отрицательной электролюминисценции гетероструктуры p -InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/ p -GaSb при прямом («+» на p -InAs) и обратном («-» на p -InAs) смещении, при токе накачки $I = 50$ мА и двух температурах: 1, 1' — $T = +28^\circ\text{C}$, 2, 2' — $T = +106^\circ\text{C}$.

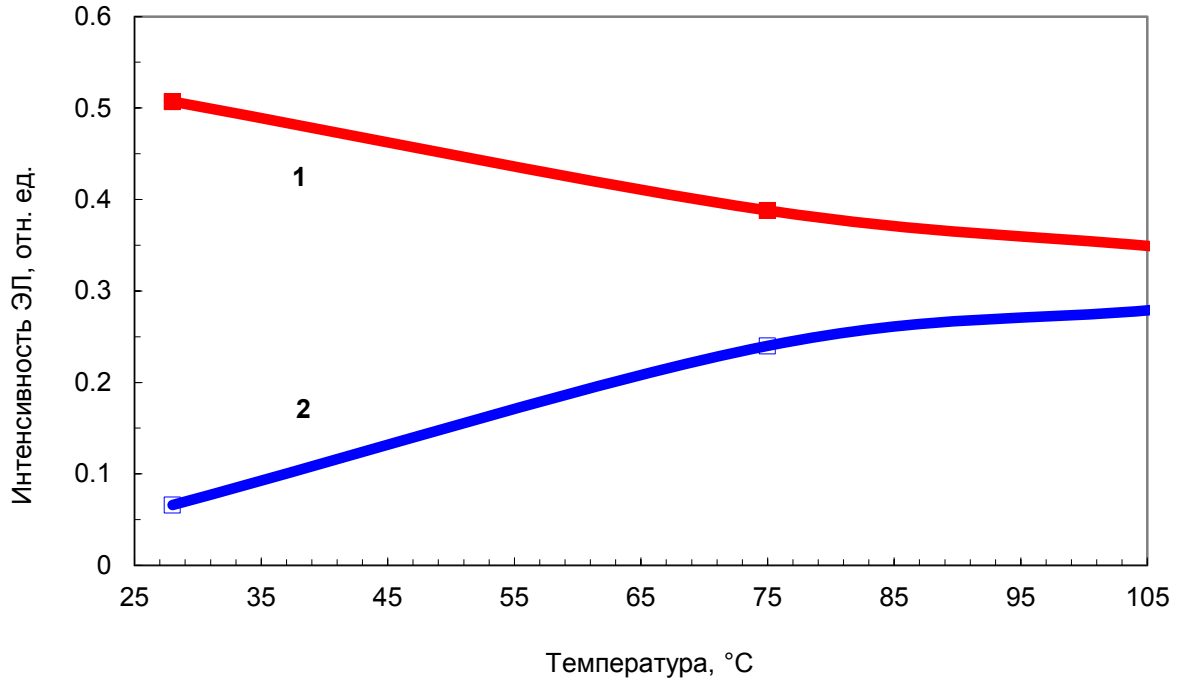


Рис. 59. Температурные зависимости интенсивности положительной (кривая 1) и отрицательной (кривая 2) электролюминесценции для гетероструктуры p -InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/ p -GaSb с одной КЯ. 1 – положительная ЭЛ (прямое смещение), 2 – отрицательная ЭЛ (обратное смещение). Ток накачки $I = 200$ мА.

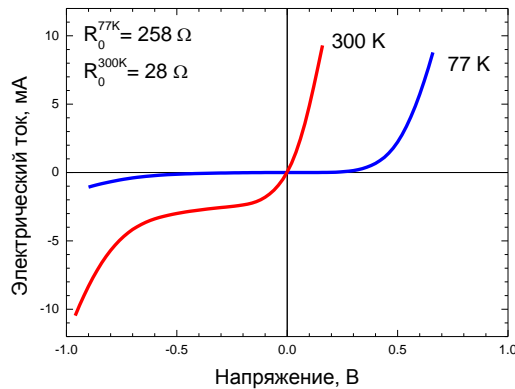


Рис. 60. ВАХ фотодиода на основе исследуемой гетероструктуры AlSb/InAsSb/AlSb с тремя КЯ.

ВАХ исследуемой структуры с тремя КЯ, представленные на рис. 60, имели выпрямляющий характер и соответствовали резкому гетеропереходу. Значения темновых токов для структуры с тремя КЯ в 1.5-2.5 раза ниже, чем для одноямной (таблица 3). Дифференциальное сопротивление было

рассчитано из измерений ВАХ при малых смещениях вблизи нуля для структур с одной и тремя КЯ при $T=77$ К и $T=300$ К. Результаты измерений приведены в таблица 3. Также указано значение произведения R_0S , где S – площадь чувствительной площадки меза-конструкции ФД.

Таблица 3. Темновые токи и дифференциальное сопротивление в нуле смещения для структур с одной и тремя КЯ на гетерогранице.

Параметр	Структура N 1322 (с одной КЯ)		Структура N 1323 (с тремя КЯ)	
	$T=300$ К	$T=77$ К	$T=300$ К	$T=77$ К
Дифференциальное сопротивление R_0 , Ω , при $U=-10^{-2}$ В	28	$26 \cdot 10^3$	42	$3.3 \cdot 10^3$
$R_0 \cdot S$, Ом·см ²	$2.0 \cdot 10^{-2}$	1.8	$3.0 \cdot 10^{-2}$	2.4
Темновой ток I_d , А, при \downarrow	-	-	-	-
$U=-0.2$ В	$2.4 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$
$U=-0.6$ В	$2.8 \cdot 10^{-3}$	$7.2 \cdot 10^{-5}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$5.0 \cdot 10^{-5}$

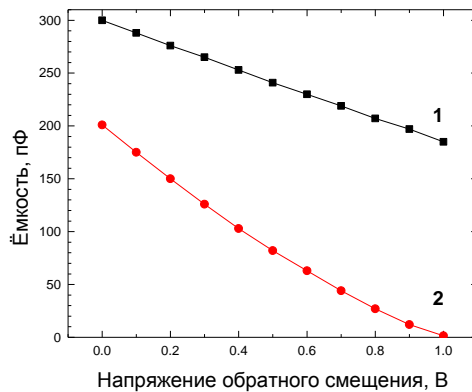


Рис. 61. ВФХ фотодиодов на основе наногетероструктуры с одной – 1 и тремя КЯ AlSb/InAsSb/AlSb – 2.

Исследование ВФХ показало значительную разницу в параметрах структур с одной и тремя КЯ на гетерогранице (рис. 61). В одноямной структуре при изменении обратного смещения от $U=0$ до $U=-1$ В ёмкость слабо менялась в интервале $200 \leq C \leq 300$ пФ по сравнению с трёхямной. Особенностью ФД с тремя КЯ являлось резкое уменьшение ёмкости в нуле

смещения от $C_0=200$ пФ до $C=1.5$ пФ при $U=-1$ В.

5.1.4. Оценка быстродействия фотодиодов

Низкое значение ёмкости $C=1.5$ пФ при $U=-1$ В позволяет говорить о том, что такие ФД могут обладать высоким быстродействием. Данное значение соответствует быстродействию $R_L C=75$ пс при нагрузке $R_L=50$ Ом, если полагать, что в таких фотодиодах быстродействие ограничено только релаксационной компонентой RC . Такое поведение ёмкости можно объяснить тем фактом, что меза-конструкция представляет собой последовательно соединённые конденсаторы, образованные слоями разной проводимости.

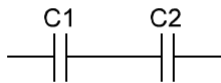


Рис. 62. Эквивалентная ёмкостная схема гетероструктуры на основе p -InAs с одной глубокой КЯ $\text{InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}$, выращенной методом МОГФЭ.

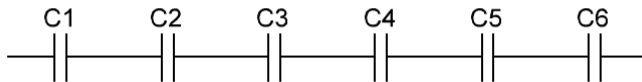


Рис. 63. Эквивалентная ёмкостная схема гетероструктуры на основе p -InAs с тремя глубокими КЯ $\text{InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}$, выращенной методом МОГФЭ.

На рис. 62 и рис. 63 показаны эквивалентные ёмкостные схемы гетероструктуры на основе p -InAs с одной и тремя глубокими КЯ $\text{InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}$. Так C1 образовано слоями p -AlSb и n -InAsSb, а C2 слоями n -InAsSb и p -AlSb и т.д. Когда конденсаторы соединены последовательно, эквивалентная ёмкость всегда меньше ёмкости любого конденсатора, входящего в соединение. Действительно, в трёхъянном образце есть несколько последовательно соединённых p - n -переходов, образованных

слоями p -AlSb и n -InAsSb. При этом в первом приближении быстродействие в таком ФД не должно зависеть от размера площади образца. Таким образом, используя набор КЯ можно получить быстродействующий ФД с частотной полосой пропускания порядка $\Delta f \approx 5-6$ ГГц. В главе 3 описаны быстродействующие ФД на основе объёмных гетероструктур GaSb/GaInAsSb/AlGaAsSb для спектрального диапазона 1.0-2.4 мкм с частотной полосой пропускания $\Delta f \approx 2-5$ ГГц, быстродействующие лавинные ФД для диапазона 2-4 мкм описаны в работе [108].

5.1.5. Фотоэлектрические свойства фотодиодов

Нормализованные спектральные характеристики фоточувствительности при $T=77$ К и $T=295$ К представлены на рис. 64 для структур с одной КЯ. Спектры фоточувствительности располагались в интервалах длин волн 1.0-3.4 мкм при $T=77$ К и 1.2-3.8 мкм при $T=295$ К. Характер спектра исследуемого ФД соответствует спектру гетероперехода p -InAs/(p , n)-GaSb. В одноямной структуре наблюдается добавочный слабый пик в области 4.0-4.5 мкм. Отметим, что аналогичный длинноволновой пик ранее наблюдался также в спектрах отрицательной ЭЛ, его спектральное положение не изменялось с изменением полярности смещения [106]. Можно предположить, что этот пик обусловлен переходом с поверхностного состояния акцептора Mn, расположенного вблизи интерфейса [99]. Абсолютная чувствительность в максимуме спектра для образца с тремя КЯ на гетерогранице была в 1.5 раза выше, чем в одноямных гетероструктурах в фотовольтаическом режиме. При приложении небольшого положительного смещения сигнал фотоответа слабо возрастал. Как видно из рис. 64 и таблица 3, при увеличении температуры от $T=77$ К до $T=300$ К фоточувствительность падала на 3 порядка в соответствии с изменением дифференциального сопротивления R_0 . Темновые токи в трёхъямных структурах были меньше, чем в одноямных. Так, при $T=77$ К плотность

обратного тока при $U = -0.4$ В составляла $j_1 = 5.5 \cdot 10^{-2}$ А/см² и $j_3 = 3.4 \cdot 10^{-2}$ А/см² для одноямных и трёхъямных гетероструктур, соответственно.

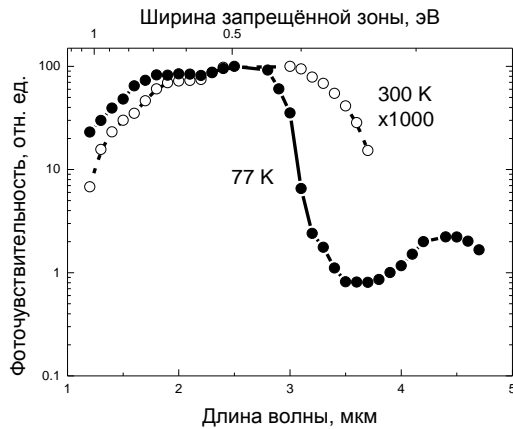


Рис. 64. Нормализованные спектральные характеристики фотодиода с одной КЯ при $T = 77$ и $T = 295$ К.

В фотовольтаическом режиме токовая монохроматическая чувствительность и квантовая эффективность были оценены как $S_j = 0.9-1.4$ А/Вт и $\eta = 0.6-0.7$, соответственно. Эквивалентная мощность шума (при учёте только темновых шумов) и удельная обнаружительная способность для одноямного ФД были рассчитаны в максимуме спектра при $\lambda_{\max} = 3$ мкм и $T = 77$ К по соотношениям (24), (25) и (26).

Были получены значения эквивалентной мощности шума $NEP = 6 \cdot 10^{-14}$ Вт/Гц^{1/2}, удельной обнаружительной способности $D^* = 3.5 \cdot 10^{11}$ Вт⁻¹·см·Гц^{1/2}. Удельная обнаружительная способность в интервале температур $T = 77-200$ К располагалась в диапазоне $D^* = 3.5 \cdot 10^{11}-10^{10}$ Вт⁻¹·см·Гц^{1/2}. Полученное высокое значение удельной обнаружительной способности фотовольтаического детектора на основе асимметричной гетероструктуры II-типа p -InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/ p -GaSb с глубокой КЯ на гетерогранице, выращенной методом МОГФЭ, сравнимо с параметрами ФД на основе сверхрешеток p - n -InAs и квантово-размерных детекторов на основе двойных гетероструктур GaAlAs/GaAs и InGaAs/InP [97], выращенных методом МПЭ, работающих в спектральном диапазоне 2-3 мкм, а также с

параметрами коммерческих ФД на основе InAs.

5.2. Фотодиоды на основе GaSb с глубокой квантовой ямой Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb

Раздел 5.2 посвящён исследованиям фотоэлектрических и люминесцентных свойств гетероструктур, выращенных методом МОГФЭ на подложке *n*-GaSb с глубокой КЯ и узкозонным твёрдым раствором в активной области Al(As)Sb/InAs_{0.84}Sb_{0.16}/Al(As)Sb, а также созданию на основе этой гетероструктуры ФД, работающих в ИК-диапазоне.

Фотодетекторы на основе гетероструктур с квантовыми ямами на основе InGaAs/AlGaAs и GaAs/AlGaAs, выращенных методом МПЭ на подложках GaAs и InP, интенсивно разрабатываются и исследуются в последние годы [97, 109, 110, 111]. Основное внимание при этом уделяется созданию ФП ближнего (0.9-2.0 мкм) и среднего (3-5 мкм) ИК-диапазонов, перспективных как для систем волоконно-оптических линий связи (1.30-1.55 мкм), так и для задач газового анализа и экологического мониторинга. Фотодетекторы на основе квантово-размерных структур на основе GaAs и InP с узкозонными слоями InGaAs в квантовой яме работают главным образом в режиме фотопроводимости при достаточно низких температурах $T=60-200$ К [97, 109, 110]. Преимуществом этих ФП являются низкие шумы и высокое быстродействие, что важно для гетеродинного приёма излучения квантово-каскадных лазеров и для информационных технологий.

В разделе 5.1 описаны технология выращивания квантово-размерных гетероструктур методом МОГФЭ на подложках InAs [112] и результаты исследований люминесцентных и фотоэлектрических свойств указанных гетероструктур. В работе [105] в наногетероструктурах с одной и тремя КЯ AlSb/InAsSb/AlSb, выращенных на подложках *p*-InAs:Mn, была обнаружена высокоинтенсивная положительная и отрицательная ЭЛ. В разделе 5.1 изложены результаты исследований, направленных на создание ФД на

основе этих наногетероструктур для среднего ИК-диапазона 2-4 мкм, работающие при температурах $T = 77-250$ К.

5.2.1. Технология создания фотодиодов

Двойные симметричные наногетероструктуры были выращены на установке AIXTRON-200 методом МОГФЭ при низком давлении и температуре $T = 520^\circ\text{C}$, в работе [98] подробно изложены технология создания и результаты исследований ЭЛ структуры при комнатной температуре. Структура состояла из подложки n -GaSb:Te, нелегированного буферного слоя p -GaSb толщиной $l = 0.5$ мкм, затем выращивались квантовая яма AlSb (20 нм)/InAs_{0.84}Sb_{0.16} (5 нм)/AlSb (20 нм) на основе нелегированного материала и покрывающий слой p -GaSb толщиной $l = 0.5$ мкм (рис. 65). Узкозонный твёрдый раствор InAs_{0.84}Sb_{0.16} имел ширину запрещённой зоны $E_g = 0.294$ эВ, подвижность $\mu = 38000$ см²/В·с при $T = 77$ К) и концентрацию электронов $n = 2.6 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Предполагалось, что при выращивании на границе с барьером AlSb образуется интерфейс AlAs, поскольку атомы As замещают атомы Sb на границе As/Sb. Поэтому в исследуемой структуре действительно присутствует тонкий высокий барьер для дырок Al(As)Sb [113]. Выращивание таких наногетероструктур на подложках GaSb позволяет получить ненапряжённую границу гетероструктуры между GaSb и AlSb. Оба эти соединения A^3B^5 принадлежат к так называемому семейству “6.1 Å family” (InAs–GaSb–AlSb), в котором постоянные кристаллической решётки практически одинаковы [34].

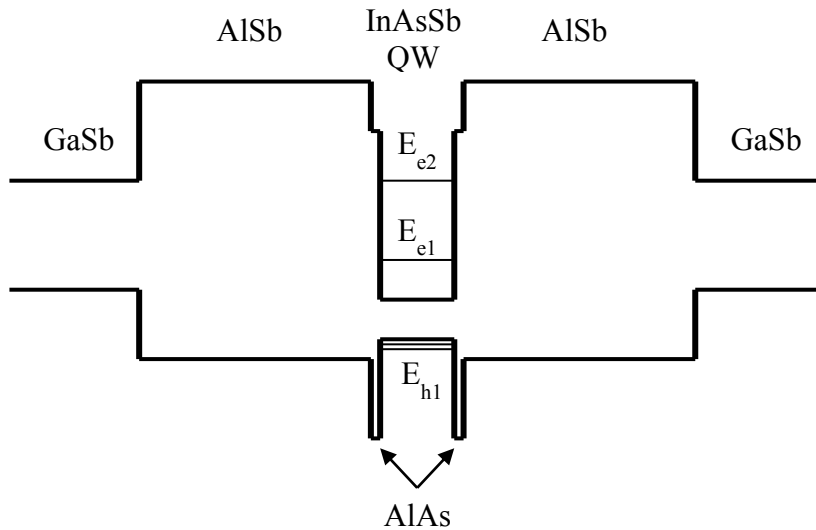


Рис. 65. Энергетическая зонная диаграмма гетероструктуры на основе GaSb с глубокой КЯ Al(As)Sb/InAs_{0.84}Sb_{0.16}/Al(As)Sb, выращенной методом МОГФЭ.

Образцы для исследований были изготовлены в виде чипов меза-конструкции методом стандартной фотолитографии. Чипы обладали диаметром чувствительной площадки $d \approx 500$ мкм, точечным контактом диаметром 50 мкм со стороны накрывающего слоя p -GaSb. Исследуемая структура схематически представлена на рис. 66. Омические контакты были сформированы вакуумным напылением сплавов Cr/Au+Te/Au и Cr/Au+Ge/Au на подложке n -GaSb и верхнем p -слое, соответственно.

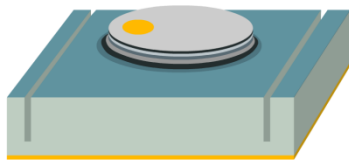


Рис. 66. Схема меза-конструкции фотодиода на основе GaSb с глубокой квантовой ямой Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb, диаметр фоточувствительной площадки $d \approx 500$ мкм и контакта $d = 50$ мкм, соответственно.

5.2.2. Электрические свойства фотодиодов

На полученных меза-ФД были изучены ВАХ и ВФХ, спектры и интенсивность ЭЛ в зависимости от тока накачки, спектры чувствительности в фотовольтаическом и фотодиодном режимах в температурном интервале T

=77-300 К.

Кривые ВАХ $I(U)$ меза-ФД (рис. 67) были получены в температурном диапазоне $T=77-300$ К и соответствовали резкому гетеропереходу. Значения плотностей темнового тока были низкими по сравнению с таковыми в ФД на основе объёмных гетероструктур GaSb/GaInAsSb/AlGaAsSb [114] и составляли $j=2 \cdot 10^{-5}$ А/см² и $j=2 \cdot 10^{-2}$ А/см² при $T=77$ К и $T=300$ К, соответственно. Сопротивление в нуле смещений составляло $R_0=2-6$ кОм при $T=300$ К и $R_0=10-60$ МОм при $T=77$ К. Прямые ветви ВАХ структур слабо зависели от температуры. Отсечка по оси абсцисс составляла $U=0.5-0.6$ В. В интервале напряжений смещения $U=0.1-0.9$ мВ прямые ветви ВАХ (рис. 67) аппроксимировались выражением:

$$I = I_0 \cdot \exp\left(\frac{qU}{nkT}\right), \quad (63)$$

где параметр неидеальности образца с КЯ $l=5$ нм составлял ~ 27 при $T=77$ К и ~ 7 при $T=300$ К, что соответствовало туннельному механизму протекания темнового тока в структурах.

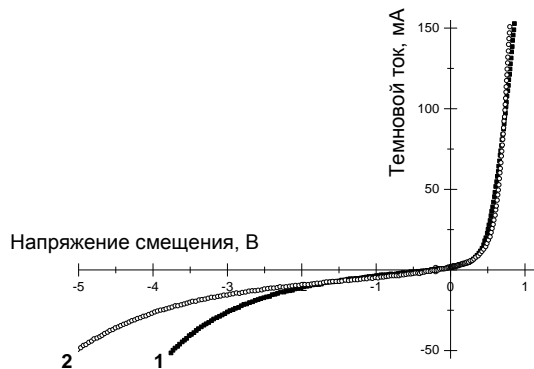


Рис. 67. ВАХ меза-фотодиодов на основе GaSb с глубокой квантовой ямой Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb при $T=300$ К (кривая 1) и $T=77$ К (кривая 2).

5.2.3. Электролюминесцентные и фотоэлектрические свойства фотодиодов

Спектры ЭЛ были получены совместно с Ивановым Э.В. Для получения спектров использовалась автоматизированная установка на базе монохроматора МДР-2 с дифракционной решёткой 300 штр/мм. Излучение, выходящее из структуры со стороны накрывающего слоя p -GaSb, проходило через монохроматор и регистрировалось охлаждаемым InSb-ФП от Judson Ltd. Методика измерений ЭЛ детально описана в работе [105]. При исследовании ЭЛ на образцы подавались прямоугольные импульсы тока с коэффициентом заполнения 50% и частотой повторения $f=610$ Гц. Амплитуда импульсов тока варьировалась в интервале $I=\pm(0-200)$ мА.

ЭЛ меза-ФД на основе GaSb с глубокой КЯ Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb исследовалась в интервале энергий фотонов $E_{hv}=0.6-0.8$ эВ в зависимости от тока накачки. Теоретические расчёты положения квантово-размерных уровней для электронов и дырок методом четырехзонной модели Кейна проведены в работе [115]. В исследуемой структуре при комнатной температуре в глубокой яме шириной $l=5$ нм имеются два электронных уровня с энергиями $E_{e_1}=0.394$ эВ и $E_{e_2}=1.22$ эВ. Для дырок в такой яме имеются пять энергетических уровней, энергии двух из них $E_{h_1}=0.029$ эВ и $E_{h_2}=0.047$ эВ.

Излучательная рекомбинация происходит при переходе носителей между уровнями E_{e_1} и E_{e_2} . Энергия излучаемого фотона составляет:

$$E_{hv} = E_{e_1} + E_g^{InAsSb} + E_{h_1}, \quad (64)$$

которая при $T=300$ К равна $E_{hv}=0.669$ эВ. При температуре $T=77$ К, энергия максимума люминесценции составляет $E_{hv}=0.717$ эВ. Особенность исследуемой гетероструктуры с высоким барьером Al(As)Sb на гетерогранице состояла в большой величине разрыва в зоне проводимости на

гетерогранице между барьером и первым электронным уровнем $E_{e_1} : \Delta E_c = 1.27$ эВ.

В работе [113] детально исследовалась ЭЛ этих квантово-размерных гетероструктур, впервые были обнаружены суперлинейная люминесценция и возрастание оптической мощности излучения в зависимости от тока накачки в интервале $I=25-200$ мА при $T=77$ и $T=300$ К. На рис. 68 представлены спектры ЭЛ. При комнатной температуре и прямом смещении («+» на p -GaSb) спектры ЭЛ имели симметричную форму с максимумом при энергии фотона $E_{hv}=0.634$ эВ ($\lambda_{\max}=1.96$ мкм) и шириной на полувысоте 55-60 мэВ (рис. 68). Экспериментальные значения энергии максимумов спектров ЭЛ согласовывались с проведёнными в [115] расчётами. Так, экспериментальные значения положения максимумов ЭЛ для $T=300$ К и $T=77$ К составили $E_{hv}=0.634$ и $E_{hv}=0.718$ эВ, соответственно.

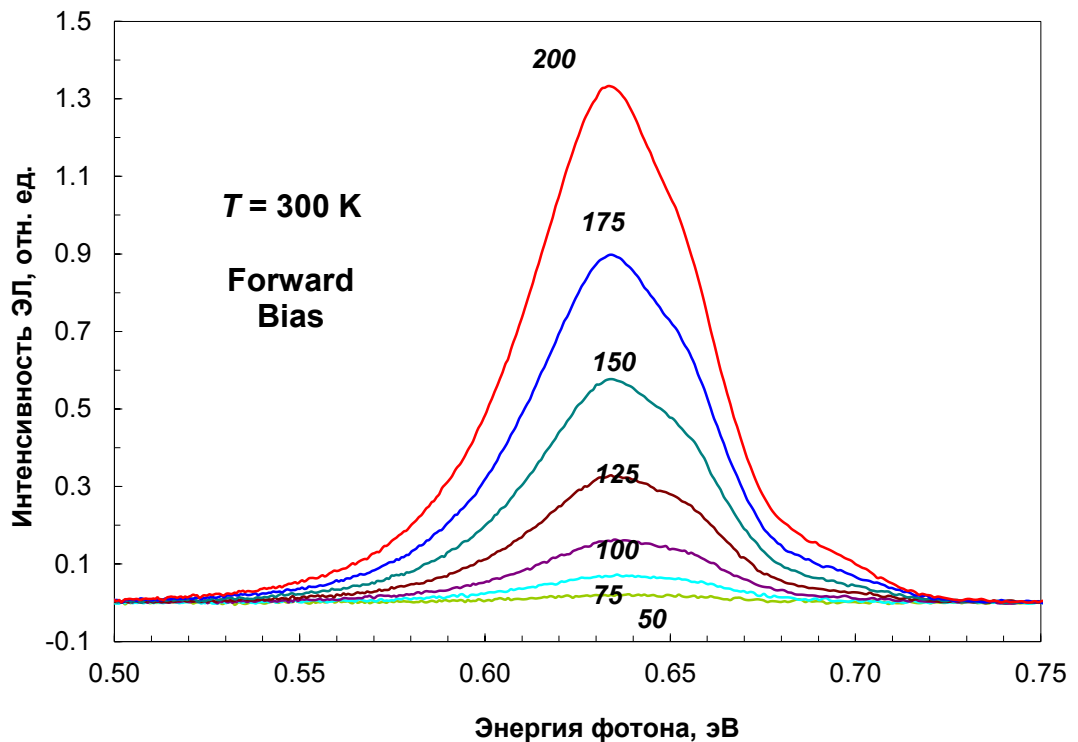


Рис. 68. Спектры ЭЛ гетероструктуры n -GaSb/Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb/ p -GaSb при $T=300$ К при прямом смещении. Величина тока накачки $I=50-200$ мА.

При $T=77$ К интенсивность излучения в максимуме спектра была выше в 1.5 раза. Интегральная оптическая мощность излучения P в зависимости от тока накачки изменялась суперлинейно и могла быть описана законом:

$$P = A \cdot I^B, \quad (65)$$

где A — подгоночный параметр, I — ток накачки, B — показатель степени, который менялся от $B=3$ при $T=300$ К до $B=2$ при $T=77$ К. Наблюдаемые эффекты можно объяснить вкладом в излучательную рекомбинацию электронно-дырочных пар, созданных в результате ударной ионизации горячими электронами, разогретыми на скачке потенциала в зоне проводимости на гетерогранице со слоем Al(As)Sb и первым электронным уровнем E_{e_1} ($\Delta E_c=1.27$ эВ). Энергия таких разогретенных электронов превышала значение пороговой энергии ионизации для электронов внутри ямы: $\Delta E_c - E_{e_1} = 0.876$ эВ $\gg E_{e_1} + E_g^{InAsSb} + E_{h_1} > 0.669$ эВ [113].

В работе [115] авторы показали, что оже-рекомбинация в глубоких КЯ должна быть существенно подавлена. Теоретические оценки возможных случаев ударной ионизации в зависимости от разрыва зон на гетерогранице и ширины квантовых ям, проведенные в [113], хорошо согласовывались с экспериментом. При обратном смещении зависимость интенсивности ЭЛ от тока накачки была практически линейной в полулогарифмическом масштабе. Высокая интенсивность излучательной рекомбинации, обнаруженная в интервале энергий фотонов $E_{hv} = 0.6-0.8$ эВ, позволила исследовать возможность создания эффективных ФД на основе наногетероструктур, выращенных на подложках n -GaSb.

Спектры фоточувствительности были исследованы в спектральном диапазоне 0.8-2.0 мкм как в фотовольтаическом режиме, так и при приложении обратного напряжения смещения. Нормированные спектры фототока, измеренные в фотовольтаическом режиме при $T=300$ и $T=77$ К, приведены на рис. 69, также показан спектр ЭЛ наногетероструктуры с

одионочной КЯ при токе накачки $I=200$ мА, $\lambda_{\max} \approx 2$ мкм. Фоточувствительность в структуре с КЯ появляется за счёт переходов между заполненным электронным уровнем $E_{e_1}=0.394$ эВ и пустым уровнем $E_{e_2}=1.22$ эВ (внутризонный переход) $E_{e_2}-E_{e_1}=0.826$ эВ, что соответствует длине волны $\lambda \approx 1.55$ мкм. Такой результат достаточно хорошо согласуется с данными эксперимента по спектральному распределению фоточувствительности. Максимум фотоответа находится при $\lambda_{\max} \approx 1.55$ мкм при $T=300$ К и $\lambda_{\max} \approx 1.3$ мкм при $T=77$ К, соответственно. Абсолютные значения фототока в максимуме были близкими при этих температурах. Эти данные резко контрастируют с характеристиками исследованных ФД с КЯ, которые были выращены методом МОГФЭ на подложках p - и n -InAs (раздел 5.1), чувствительность в таких ФД максимуме спектра при $T=77$ К и $T=300$ К различалась приблизительно в 10^3 раз [116]. При комнатной температуре токовая монохроматическая чувствительность на длине волны $\lambda_{\max}=1.55$ мкм составила величину $S_I=0.6-0.7$ А/Вт, а удельная обнаружительная способность в максимуме спектра достигала величины $D^*=(5-7) \cdot 10^{10}$ Вт $^{-1}$ ·см·Гц $^{1/2}$.

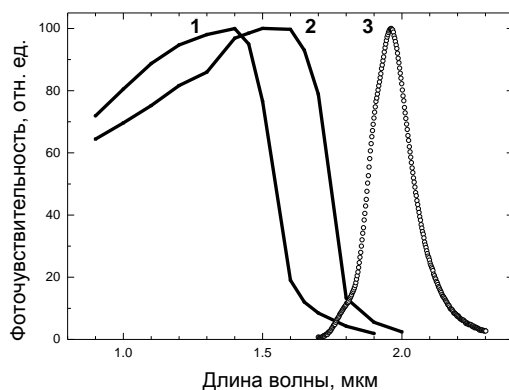


Рис. 69. Спектры фоточувствительности: 1 – при $T=77$ К, 2 – при $T=300$ К, 3 – спектр электролюминесценции (ЭЛ), ток накачки $I=200$ мА.

5.2.4. Лавинное умножение в фотодиодах за счёт ударной ионизации носителей на скачке потенциала

Были исследованы характеристики ФД при обратном смещении до $U = -3$ В. При малых напряжениях $-1 < U < 0$ В, что соответствовало напряжённости поля $E < 10^4$ В/см, и при воздействии излучения с длинами волн $\lambda = 1.1$ мкм и $\lambda = 1.6$ (1.55) мкм наблюдалось увеличение фототока в 15 раз. Предложено объяснение наблюдаемому явлению – лавинное умножение носителей с коэффициентом $M = 15$ фотогенерированными носителями дополнительно разогретыми на скачке потенциала в зоне проводимости. Лавинное умножение появлялось при обратных смещениях $U \approx -0.5$ В (рис. 70). Обнаруженное явление лавинного умножения в гетероструктуре на основе GaSb с глубокой КЯ Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb подтвердило предположение о наличии ударной ионизации, которая приводит к суперлинейному росту оптической мощности ЭЛ.

В работе [117], при исследовании ЭЛ в светодиодных узкозонных гетероструктурах n -GaSb/ n -AlGaAsSb/ n -In_{0.934}Ga_{0.066}AsSb и n -GaSb/ n -In_{0.956}Ga_{0.044}AsSb/ p -AlGaAsSb с высокими потенциальными барьерами обнаружен суперлинейный рост интенсивности и оптической мощности излучения в 1.5-2 раза в диапазоне тока накачки $I = 20$ -220 мА в гетероструктуре. Данный эффект был объяснён авторами, как образование дополнительных электронно-дырочных пар, которые вносят вклад в излучательную рекомбинацию, образованных за счёт эффекта ударной ионизации носителями заряда, разогретыми на большом скачке потенциала в зоне проводимости ΔE_c на гетерогранице, превышающими ширину запрещённой зоны узкозонной области.

Пороговая энергия ионизации для электронов в исследуемой КЯ была оценена значением $E_{ie} = 0.67$ эВ в работе [115]. При дальнейшем увеличении напряжения этот коэффициент M практически не менялся. Вероятно, это связано с туннелированием электронов с уровня E_{e_2} через треугольный

барьер, образуемый стенкой ямы и AlSb при приложении электрического поля. Разумеется, что такой механизм увеличения ещё требует дальнейшего изучения.

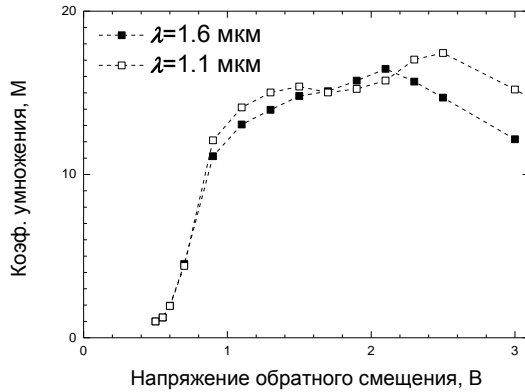


Рис. 70. Зависимость коэффициента умножения M от напряжения обратного смещения U .

5.2.5. Оценка быстродействия фотодиодов

Исследовались ВФХ меза-ФД при $T = 300$ К, было обнаружено низкое значение ёмкости в интервале напряжения смещения до $U = -1$ В. Как видно из рис. 71, ёмкость падала от $C_0 = 50$ пФ до единиц пФ, что возможно приведёт к высокому быстродействию таких ФД. При нагрузке $R_L = 50$ Ом можно оценить время отклика ФД как $\tau = 100-200$ пс, учитывая, что быстродействие ограничено только релаксационной компонентой RC . Значение частотной полосы пропускания оценённому быстродействию будет соответствовать значение $\Delta f = 2-3$ ГГц.

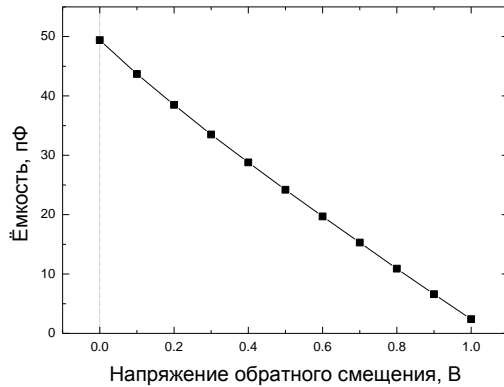


Рис. 71. ВФХ фотодиода на основе гетероструктуры на основе p -GaSb с глубокой КЯ Al(As)Sb/InAs_{0.84}Sb_{0.16}/Al(As)Sb.

Такое низкое значение электрической ёмкости C при относительно большом диаметре фоточувствительной площадки d , а также поведение зависимости ВФХ, где C понижается почти до нуля при напряжении смещения $U = -1$ В, связано с особенностями гетероструктуры. Эквивалентная ёмкостная схема гетероструктуры, изображённой на рис. 65 может быть представлена в виде цепочки последовательно соединённых конденсаторов (рис. 72).

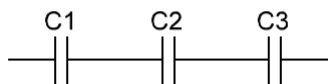


Рис. 72. Эквивалентная ёмкостная схема гетероструктуры на основе p -GaSb с глубокой квантовой ямой Al(As)Sb/InAs_{0.84}Sb_{0.16}/Al(As)Sb, выращенной методом МОГФЭ.

На рис. 72 показано, что $C1$ образовано $p-n$ -переходом между p -AlSb и КЯ n -InAsSb, $C2$ - n -InAsSb и p -AlSb, $C3$ - p -AlSb и n -GaSb, соответственно. Такое объяснение позволяет сделать вывод о том, что применение КЯ в ФД позволяет понизить величину его общей ёмкости, что может служить ещё одним путём повышения быстродействия.

Такие ФД сравнимы с ФП на основе структур с КЯ InGaAs/GaAs и AlSb/InGaAs/AlSb, выращенных методом МПЭ на подложках GaAs и InP,

работающих на межподзонных переходах [111, 118] в спектральном диапазоне 1.3-1.8 мкм. Такие ФП работают при обратном смещении $U = -(5-20)$ В, их спектральные характеристики чувствительности располагаются в диапазоне 0.5-1.8 мкм, удельная обнаружительная способность составляет величину порядка $D^* \approx 10^{10}$ Вт⁻¹·см·Гц^{1/2} при достаточно низких температурах, $T = 60-210$ К [97].

Созданные и исследованные ФД работают без смещения, в фотовольтаическом режиме, в спектральном диапазоне 0.5-2.0 мкм при комнатной температуре, имеют слабую температурную зависимость спектральной чувствительности в диапазоне $T = 77-300$ К, а также обладают низкими величинами ёмкости, что возможно делает их быстродействующими ($\tau = 100-200$ пс), сравнимыми с ФП на основе InGaAs/GaAs от Hamamatsu Photonics [50]. Более того, улучшение характеристик ФД с КЯ в фотовольтаическом режиме по сравнению с режимом фотопроводимости приводит к уменьшению шумов, к возрастанию отношения сигнал/шум и увеличению D^* .

5.3. Выводы

Представленные в главе 5 ФД на основе наногетероструктур с КЯ в активной области перспективны для гетеродинного детектирования квантово-каскадных лазеров, информационных сетей, медицинской диагностики, экологического мониторинга.

В работе, направленной на создание и исследование ФД на основе квантово-размерных гетероструктур узкозонных полупроводниковых соединений A^3B^5 с глубокими КЯ для спектрального диапазона 1.6-5.0 мкм получены следующие результаты:

1. Впервые на основе асимметричных гетероструктур II-типа p -InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/ p -GaSb с одной и тремя глубокими КЯ на гетерогранице изготовлены фотодиоды меза-конструкции с диаметром d

≈ 300 мкм. При исследовании зависимости положительной и отрицательной электролюминесценции в интервале температур $T=77-300$ К в диапазоне длин волн 1-4 мкм обнаружено, что описанные в работе приборы могут работать при высоких температурах в режиме светодиод-ФД при переключении прикладываемого напряжения смещения.

2. У ФД, на основе асимметричных гетероструктур II-типа p -InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/ p -GaSb с одной и тремя глубокими КЯ AlSb/InAsSb/AlSb в активной области, обнаружены высокая токовая монохроматическая чувствительность $S_I=0.9-1.4$ А/Вт и удельная обнаружительная способность $D^*=3.5 \cdot 10^{11}-10^{10}$ Вт $^{-1}$ ·см·Гц $^{1/2}$ при $T=77-200$ К с $\lambda_{\max}=3$ мкм. Наблюдалось резкое падение электрической ёмкости диода в зависимости от приложенного обратного напряжения смещения ($C=1.5$ пФ при напряжении смещения $U=-1$ В, $T=300$ К) ФД с тремя КЯ в активной области, что соответствует оценки быстродействия $\tau=75$ пс и частотной полосе пропускания $\Delta f \approx 5-6$ ГГц.

3. На основе гетероструктур с одной глубокой КЯ Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb, выращенных на подложках n -GaSb методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений, изготовлены меза-ФД с диаметром чувствительной площадки $d=300$ мкм. Проведены исследования люминесцентных и фотоэлектрических свойств меза-ФД, их ВАХ и ВФХ. При исследовании фотоответа ФД в фотовольтаическом режиме обнаружен максимум чувствительности при комнатной температуре на длине волны $\lambda_{\max}=1.55$ мкм. Квантовая эффективность и обнаружительная способность в максимуме спектра при комнатной температуре достигали величин $\eta=0.6-0.7$ и $D^*=(5-7) \cdot 10^{10}$ Вт $^{-1}$ ·см·Гц $^{1/2}$, соответственно.

4. Показано, что в наногетероструктуре p -InAs/AlSb/InAs $_{0.84}$ Sb $_{0.16}$ /AlSb/ p -GaSb с глубокими КЯ увеличение их числа приводит к пропорциональному уменьшению удельной ёмкости структуры за счёт

последовательного соединения емкостей $p-n$ -переходов.

5. ЭЛ в наногетероструктуре, выращенной на подложке n -GaSb, с одной глубокой электронной КЯ Al(As)Sb/InAs_{0.84}Sb_{0.16}/Al(As)Sb осуществляется при переходе носителей между первым электронным $E_{e_1} = 0.394$ эВ и первым дырочным $E_{h_1} = 0.029$ эВ уровнями с энергией излучаемого фотона $E_{h\nu} = 0.669$ эВ ($\lambda \approx 1.85$ мкм), а фоточувствительность в фотовольтаическом режиме обеспечивается за счёт переходов между двумя электронными уровнями $E_{e_2} = 1.22$ эВ и $E_{e_1} = 0.394$ эВ, что соответствует энергии фотона в максимуме спектральной чувствительности $E_{h\nu} = 0.826$ эВ ($\lambda \approx 1.55$ мкм).

6. Проведённые исследования показали, что в ФД на основе наногетероструктуры n -GaSb/Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb/ p -GaSb с глубокой КЯ Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb в активной области лавинное умножение в слабом электрическом поле ($E < 10^4$ В/см) обеспечивается за счёт ударной ионизации электронами, дополнительно разогретыми на скачке потенциала в зоне проводимости $\Delta E_c = 1.27$ эВ между потенциальным барьером AlSb и первым электронным уровнем $E_{e_1} = 0.394$ эВ.

Заключение

Подробно результаты проведённой диссертационной работы приведены в конце глав 3, 4 и 5.

Основные результаты проделанной работы, направленной на создание и исследование высокоэффективных ФД для средней ИК-области спектра (2-5 мкм) на основе гетероструктур узкозонных полупроводниковых соединений A^3B^5 :

1. Созданы и исследованы быстродействующие и сверхбыстродействующие $p-i-n$ -ФД на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с диаметрами фоточувствительных площадок $d=100$ и $d=50$ мкм. В ФД с диаметром фоточувствительной площадки $d=50$ мкм реализовано разделение фоточувствительной и контактной областей, при этом мезы соединены между собой фронтальным металлическим мостиковым контактом. Такой подход к проектированию фотодиодного чипа позволил существенно снизить постоянную времени схемной релаксации RC - времени зарядки-разрядки барьерной ёмкости, главным образом ограничивающей быстродействие ФД. Достигнуто высокое быстродействие ФД на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb $\tau=50-100$ пс.

2. Созданы и исследованы ФД на основе гетероструктуры InAs/InAs_{0.94}Sb_{0.06}/InAsSbP/InAs_{0.88}Sb_{0.12}/InAsSbP/InAs с диаметрами фоточувствительной площадки $d=300$ мкм, работающие при комнатной температуре в среднем ИК-диапазоне спектра 2.5-4.9 мкм.

3. Созданы и исследованы ФД на основе гетероструктуры InAs/InAs_{0.94}Sb_{0.06}/InAsSbP/InAs_{0.88}Sb_{0.12}/InAsSbP с размером фоточувствительной площадки 0.45×0.45 мкм, работающие при комнатной температуре в среднем ИК-диапазоне спектра 1.0-4.8 мкм.

4. В ФД на основе гетероструктуры InAs/InAs_{0.88}Sb_{0.12}/InAs_{0.50}Sb_{0.20}P_{0.30} с узкозонной активной областью ($E_g=0.2-0.3$ эВ) достигнуто увеличение квантовой эффективности и удельной обнаружительной способности в 1.5-

1.7 раза в интервале длин волн 2.2-4.8 мкм благодаря сформированной криволинейной отражающей поверхности, образованной селективным травлением, со стороны подложки фотодиодного чипа, позволяющей изменять направление оптического излучения внутри фотодиодного чипа в сторону активной области. Квантовая эффективность этих ФД достигла значения $\eta=0.24$ (электрон/фотон) на длине волны $\lambda=3$ мкм.

5. Параметры исследованных в данной работе ФД, на основе асимметричных гетероструктур II-типа p -InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/ p -GaSb с одной и тремя глубокими КЯ на гетерогранице в активной области, сравнимы с характеристиками квантоворазмерных ФП на основе InGaAs/InP, GaAlAs/GaAs, полученных методом МПЭ, а также с параметрами коммерческих ФД $p-n$ -InAs/InAsSbP, но по выполненным оценкам могут превосходить их по быстродействию.

6. Проведены исследования люминесцентных, транспортных и фотоэлектрических свойства гетероструктур II-типа p -InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/ p -GaSb с одной и тремя глубокими квантовыми ямами на гетерогранице. При исследовании зависимости положительной и отрицательной электролюминесценции в интервале температур $T=77-300$ К в диапазоне длин волн 1-4 мкм обнаружено, что описанные в работе приборы могут работать при высоких температурах в режиме светодиод-ФД при переключении прикладываемого напряжения смещения.

7. Обнаружено, что в наногетероструктуре, выращенной на подложке n -GaSb, с глубокой КЯ Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb электролюминесценция осуществляется при переходе носителей между первым электронным $E_{e_1}=0.394$ эВ и первым дырочным $E_{h_1}=0.029$ эВ уровнями с энергией излучаемого фотона $E_{h\nu}=0.669$ эВ ($\lambda \approx 1.85$ мкм), а фоточувствительность в фотовольтаическом режиме обеспечивается за счёт переходов между двумя электронными уровнями $E_{e_2}=1.22$ эВ и $E_{e_1}=0.394$ эВ, что соответствует

энергии фотона в максимуме спектральной чувствительности $E_{hv} = 0.826$ эВ ($\lambda \approx 1.55$ мкм).

8. Проведённые исследования показали, что в ФД на основе наногетероструктуры n -GaSb/Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb/ p -GaSb с глубокой КЯ Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb в активной области лавинное умножение в слабом электрическом поле ($E < 10^4$ В/см) обеспечивается за счёт ударной ионизации электронами, дополнительно разогретыми на скачке потенциала в зоне проводимости $\Delta E_c = 1.27$ эВ между потенциальным барьером AlSb и первым электронным уровнем $E_{e_1} = 0.394$ эВ. Также наличие этого факта подтвердило предположение о суперлинейной зависимости оптической мощности электролюминесценции от возбуждающего тока в гетероструктуре на основе GaSb с глубокой КЯ Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb в активной области причиной которой являлась ударная ионизация носителей на скачке потенциала.

Все поставленные задачи в начале работы решены в полном объёме, главная цель диссертационной работы достигнута.

Основные положения диссертации отражены в следующих научных публикациях изданий, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, рекомендованные Высшей аттестационной комиссией.

- 1А. Андреев И.А., Серебренникова О.Ю., Соколовский Г.С., Куницына Е.В., Дюделев В.В., Гаджиев И.М., Дерягин А.Г., Гребенщикова Е.А., Коновалов Г.Г., Михайлова М.П., Ильинская Н.Д., Кучинский В.И., Яковлев Ю.П. Быстродействующие $p-i-n$ -фотодиоды для спектрального диапазона 0.9-2.4 μm // *Письма в ЖТФ*. 2010 г., Т. 36, 9, стр. 43-49.
- 2А. Шерстнев В.В., Старостенко Д.А., Андреев И.А., Коновалов Г.Г., Ильинская Н.Д., Серебренникова О.Ю., Яковлев Ю.П. Фотодиоды на основе гетероструктур $\text{InAs}/\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}/\text{InAsSbP}$ для спектрального диапазона 2.5-4.9 μm // *Письма в ЖТФ*. 2011 г., Т. 37, 1, стр. 11-17.
- 3А. Старостенко Д.А., Шерстнев В.В., Алексеев П.А., Андреев И.А., Ильинская Н.Д., Коновалов Г.Г., Серебренникова О.Ю., Яковлев Ю.П. Фотодиоды с расширенным спектральным диапазоном 1.5-4.8 μm на основе гетероструктур $\text{InAs}/\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}/\text{InAsSbP}$, работающие при комнатной температуре // *Письма в ЖТФ*, 2011 г., Т. 37, 19 стр. 95-103.
- 4А. Михайлова М.П., Андреев И.А., Моисеев К.Д., Иванов Э.В., Коновалов Г.Г., Михайлов М.Ю., Яковлев Ю.П. Фотовольтаический детектор на основе гетероструктуры II типа с глубокой квантовой ямой $\text{AlSb}/\text{InAsSb}/\text{AlSb}$ в активной области для среднего инфракрасного диапазона // *ФТП*, 2011 г., Т. 45, 2. стр. 251-255.
- 5А. Konovalov G.G., Mikhailova M.P., Andreev I.A., Moiseev K.D., Ivanov E.V., Mikhailov M.Yu., Yakovlev Yu.P. Photovoltaic Detector Based on Type II Heterostructure with Deep $\text{AlSb}/\text{InAsSb}/\text{AlSb}$ Quantum Well in the Active Region for the Mid-Infrared Spectral Range // *J. Phys.:*

- Conf. Ser.*, v.461 ArtNo: #012026 (2013) IOP PUBLISHING ISSN: 1742-6588 15th Russian Youth Conference on Physics and Astronomy (Physica.SPb) 23–24 October 2012, St Petersburg, Russia
- 6А. Гребенщикова Е.А., Старостенко Д.А., Шерстнев В.В., Коновалов Г.Г., Андреев И.А., Серебренникова О.Ю., Ильинская Н.Д., Яковлев Ю.П. Повышение квантовой эффективности фотодиодов за счёт изменения направления световых потоков в гетероструктуре InAs/InAsSb/InAsSbP // *Письма ЖТФ*, 2012 г., Т. 38, 10, стр. 43-49.
- 7А. Андреев И.А., Серебренникова О.Ю., Соколовский Г.С., Дюделев В.В., Ильинская Н.Д., Коновалов Г.Г., Куницына Е.В., Яковлев Ю.П. Быстродействующие фотодиоды для средней инфракрасной области спектра 1.2-2.4 мкм на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с полосой пропускания 2-5 ГГц // *ФТП*, 2013 г., Т. 47, 8, стр. 1109-1115.
- 8А. Михайлова М.П., Андреев И.А., Иванов Э.В., Коновалов Г.Г., Гребенщикова Е.А., Яковлев Ю.П., Hulicius E., Hospodkova A., Pangrac Y. Фотоэлектрические и люминесцентные свойства наногетероструктур на основе GaSb с глубокой квантовой ямой Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb, выращенных методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений // *ФТП*, 2013 г., Т. 47, 8, стр. 1037-1042.
- 9А. Именков А.Н., Гребенщикова Е.А., Старостенко Д.А., Шерстнев В.В., Коновалов Г.Г., Андреев И.А., Яковлев Ю.П. Повышение квантовой чувствительности фотодиодов на основе гетероструктуры InAs/InAsSb/InAsSbP // *ФТП*, 2013 г., Т. 47, 5 стр. 690-695.

Материалы конференций

- 1Б. Коновалов Г.Г., Андреев И.А., Кижаяев С.С., Куницына Е.В., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П. «Высокоэффективные GaInAsSb/GaAlAsSb и InAs/InAsSbP *p-i-n* фотодиоды для спектрального диапазона чувствительности 1.1-4.0 мкм» Конференция по физике и астрономии для молодых учёных Санкт-Петербурга и Северо-Запада «Физика.СПб» : тезисы докладов. 27-28 октября 2010 года. – СПб.: Из-во Политехн. ун-та, 2010. 143 с. ISBN 978-5-7422-2771-7
- 2Б. Коновалов Г.Г., Андреев И.А. «Высокоэффективные GaInAsSb/GaAlAsSb и InAs/InAsSbP *p-i-n* фотодиоды для спектрального диапазона чувствительности 1.1-4.0 мкм» 12-я Всероссийская молодёжная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике : тезисы докладов. 25-29 октября 2010 года. – СПб.: Из-во Политехн. ун-та, 2010. 116 с.
- 3Б. Андреев И.А., Коновалов Г.Г., Старостенко Д.А., Шерстнёв В.В., Яковлев Ю.П. «Высокоэффективные и быстродействующие фотодиоды для спектрального диапазона 2.5-4.8 мкм» Конференция по физике и астрономии для молодых учёных Санкт-Петербурга и Северо-Запада «Физика.СПб» : тезисы докладов. 26-27 октября 2011 года. – СПб.: Из-во Политехн. ун-та, 2011. 192 с. ISBN 978-5-7422-3213-1
- 4Б. Коновалов Г.Г., Старостенко Д.А., Андреев И.А. «Высокоэффективные фотодиоды для спектрального диапазона 2.5-4.8 мкм» 13-я Всероссийская молодёжная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике : тезисы докладов. 21-25 ноября 2011 года. – СПб.: Из-во Политехн. ун-та, 2011. 116 с.
- 5Б. Коновалов Г.Г., Андреев И.А., Серебренникова О.Ю., Ильинская

- Н.Д., Куницына Е.В., Дюделев В.В., Соколовский Г.С., Яковлев Ю.П. «Быстродействующие фотодиоды с длинноволновой границей 2.4 мкм и полосой пропускания до 2-3 ГГц» Т79 Сборник трудов Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2012». Санкт-Петербург. 15-19 октября 2012 года / Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова. – СПб: НИУИТМО, 2012. – 571 с.: с ил. ISBN 978-5-7577-0413-5
- 6Б. Коновалов Г.Г., Михайлова М.П., Андреев И.А., Моисеев К.Д., Иванов Э.В., Михайлов М.Ю., Яковлев Ю.П. «Фотовольтаический детектор на основе гетероструктуры II типа с глубокой квантовой ямой AlSb/InAsSb/AlSb в активной области для среднего инфракрасного диапазона» Российская молодёжная конференция по физике и астрономии «Физика.СПб» : тезисы докладов. 24-25 октября 2012 года. – СПб.: Из-во Политехн. ун-та, 2012. 184 с. ISBN 978-5-7422-3673-3
- 7Б. Коновалов Г.Г., Андреев И.А. «Фотовольтаический детектор на основе гетероструктуры II типа с глубокой квантовой ямой AlSb/InAsSb/AlSb в активной области для среднего инфракрасного диапазона» 14-я Всероссийская молодёжная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике : тезисы докладов. 26-30 ноября 2012 года. – СПб.: Из-во Политехн. ун-та, 2012. 96 с.
- 8Б. G.G. Konovalov, I.A. Andreev, M.P. Mikhailova, K.D. Moiseev, Yu.P. Yakovlev “Photovoltaic Detector Based on Asymmetric Type *p*-InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/*p*-GaSb Heterostructure With a Single Quantum Well For The 1.5-3.6 μm Spectral Range” Abstracts of the 15th International Symposium on Ultrafast Phenomena in Semiconductors, Vilnius, Lithuania, August 25-28, 2013. P. 86. ISBN 978-609-95511-1-1.
- 9Б. Коновалов Г.Г., Андреев И.А., Серебренникова О.Ю., Ильинская

Н.Д., Куницына Е.В., Шерстнёв В.В., Яковлев Ю.П.
«Быстродействующие фотодиоды для спектрального диапазона 1.7-3.8 мкм» VIII международная конференция молодых учёных и специалистов «Оптика – 2013» Т79 Сборник трудов Международной конференции и семинаров. Т.1. «Оптика-2013» Т.2. «Терагерцовая оптика и спектроскопия», «Оптические метаматериалы, фотонные кристаллы и наноструктуры». Санкт-Петербург. 14-18 октября 2013 / Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова.– СПб: НИУИТМО, 2013. – Т.1. 389 с., Т.2. 53 с.: с ил. ISBN 978-5-7577-0442-5.

Список литературы

1. **Государственный стандарт Союза ССР.** Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства - Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик. официальное [ред.] В. П. Огурцов. *ГОСТ 17772-88 (СТ СЭВ 3789-82)*. [Документ]. Москва, СССР : Издательство стандартов, 1 Июль 1988 г.
2. —. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства - термины и определения. официальное [ред.] Р. Г. Говердовская. *ГОСТ 21934-83*. [Документ]. Москва, СССР : Издательство стандартов, 1985 г.
3. **Kavaya, M.** Coherent laser radar provides eye-safe operation. *Laser focus world*. 1991, 1, pp. 27-28.
4. **Hitam, Salasiah, et al., et al.** Impact of increasing threshold level on higher bit rate in free space optical communications. *Journal of Optical and Fiber Communications Research*. August 27, 2009, Vol. 6, 1-6, pp. 22-34. doi: 10.1007/s10297-009-9004-6.
5. **Majumdar, Arun K.** Free-space laser communication performance in the atmospheric channel. [ed.] Arun K. Majumdar and Jennifer C. Ricklin. *Journal of Optical and Fiber Communications Reports*. October 2005, Vol. 2, 4, pp. 345-396. doi: 10.1007/s10297-005-0054-0.
6. **Martini, R. and Whittaker, E. A.** Quantum cascade laser-based free space optical communications. [ed.] Arun K. Majumdar and Jennifer C. Ricklin. *Journal of Optical and Fiber Communications Reports*. October 2005, Vol. 2, 4, pp. 279-292. doi: 10.1007/s10297-005-0052-2.
7. **Kelemen, Márk T., et al., et al.** Diode laser systems for 1.8 to 2.3 μm wavelength range. *Proc. of SPIE*. 2010, Vol. 7686, 20, pp. 76860N-1-76860N-8. doi: 10.1117/12.850745.

8. **Chen, J., et al., et al.** Type-I GaSb based diode lasers operating at room temperature in 2 to 3.5 μm spectral region. *Proc. of SPIE*. May 4, 2010, Vol. 7686, pp. 76860S-1-76860S-5. doi: 10.1117/12.852208.

9. **Mu, Xiaodong, Meissner, Helmuth and Lee, Huai-Chuan.** High-efficiency high-power 2.097- μm Ho:YAG laser pumped mid-infrared ZGP optical parametric oscillation. *Proc. of SPIE*. May 4, 2010, Vol. 7686, pp. 76860T-1-76860T-7. doi: 10.1117/12.851507.

10. **Bowers, J. E., et al., et al.** High-speed GaInAsSb/GaSb pin-photodetectors for wavelengths to 2.3 μm . *Electr.Let.* 1986, Vol. 22, 3, pp. 137-139.

11. **Srivastava, A. K., et al., et al.** High performance GaInAsSb/GaSb p-n photodiodes for the 1.8-2.3 μm wavelengths. *Applied Physics Letters*. April 7, 1986, Vol. 48, 14, pp. 903-904. doi: 10.1063/1.96653.

12. **Shellenbarger, Zane, et al., et al.** GaInAsSb and InAsSbP photodetectors for mid-Infrared wavelengths. *Proc. of SPIE*. 1997, Vol. 2999, pp. 25-33. doi: 10.1117/12.271198.

13. **Gao, H. H., Krier, A. and Sherstnev, V. V.** Room-temperature InAs_{0.89}Sb_{0.11} photodetectors for CO detection at 4.6 μm . *Applied Physics Letters*. August 7, 2000, Vol. 77, 6, pp. 872-874. doi: 10.1063/1.1306656.

14. **Bach, Heinz-Gunter.** Ultrafast photodetectors and receivers. [ed.] Hans-Georg Weber and Masataka Nakazawa. *Journal of Optical and Fiber Communications Reports*. October 2005, Vol. 2, 4, pp. 293-344. doi: 10.1007/s10297-005-0038-0.

15. **Joshi, Abhay, Datta, Shubhashish and Lange, Mike.** 2.2 Micron, Uncooled, InGaAs Photodiodes and Balanced Photoreceivers up to 25 GHz Bandwidth. [ed.] Bjørn F. Andresen, et al., et al. *Proc. of SPIE*. 2013, Vol. 8704, pp. 87042G-1-87042G-8. doi: 10.1117/12.2015593.

16. **Аксененко, М. Д., Бараночников, М. Л. и Смолин, О. В.** *Микроэлектронные устройства*. Москва : Энергоатомиздат, 1984.

17. **Smith, R. G.** Photodetectors and receivers - An update. [ed.] Dr. Henry Kressel Ph.D. *Semiconductor Devices for Optical Communication_Topics in Applied Physics*. Springer Berlin Heidelberg. 1982, Vol. 39, pp. 293-303.
18. **Шестов, Н. С.** *Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех*. Москва : Советское радио, 1967.
19. **Киес, Р. Дж., и др., и др.** *Фотоприемники видимого и ИК диапазонов*. [ред.] Р. Дж. Киес. Москва : Радио и связь, 1985.
20. **Kingston, R. H.** *Detection of Optical and Infrared Radiation*. Second Printing 1979. Berlin : Springer, 1978. ISBN 354008617X, 9783540086178.
21. **Borrello, S. R.** *Infrared Physics*. 1972, Vol. 12, 267.
22. **Ghione, G.** *Semiconductor Devices for High-Speed Optoelectronics*. Torino : Cambridge University Press, 2009. p. 481. ISBN-13 978-0-521-76344-8.
23. **Филачев, А. М., Таубкин, И. И. и Трищенко, М. А.** *Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды*. Москва : Физматкнига, 2011. ISBN 978-5-89155-203-6.
24. **Трищенко, М. А.** *Фотоприёмные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов*. Москва : Радио и Связь, 1992. ISBN 5-256-01057-3.
25. **Levinshtein, M., Rumyantsev, S. and Shur, M., [ed.]**. *Handbook Series on Semiconductor Parameters*. Danvers : World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1999. p. 300. Vol. 2. ISBN 981-02-1420-0 (Set), 981-02-2935-6.
26. **Chang, J. J.** Frequency response of pin avalanche photodiodes. *IEEE Trans. El. Dev.* 1967, Vol. VI, 14, pp. 139-145.
27. **Аксененко, М. Д. и Бараночников, М. Л.** *Приёмники оптического излучения (Справочное издание)*. Москва : Радио и связь, 1987.
28. **Прохоров, Ю. В., [ред.]**. *Физика: Энциклопедия*. Москва : Научное издательство "Большая Российская энциклопедия", 2003. ISBN 5-85270-306-0.

29. **Nasr, Ashraf S. A.** Infrared Radiation Photodetectors. [ed.] Vasyl Morozhenko. *Infrared Radiation*. s.l.: InTech, 2012, 5, pp. 85-126. www.intechopen.com.

30. **Norton, P.** *Opto-Electron. Rev.* 2002, Vol. 10, pp. 159-174.

31. **Piotrowski, Józef.** Alternative Uncooled Long-Wavelength IR Photodetectors. [book auth.] Jozef Piotrowski and Antoni Rogalski. *High-Operating-Temperature Infrared Photodetectors*. 2007. doi: 10.1117/3.717228.ch9.

32. **Vasiliev, V. V., et al., et al.** LWIR Photodiodes and Focal Plane Arrays Based on Novel HgCdTe/CdZnTe/GaAs Heterostructures Grown by MBE Technique. [ed.] Ilgu Yun. *Photodiodes - From Fundamentals to Applications*. s.l.: InTech, 2012, 4, pp. 133-172. doi: 10.5772/50822.

33. **Kim, Jiseok and Fischetti, Massimo V.** Electronic band structure calculations for biaxially strained Si, Ge, and III–V semiconductors. *Journal of Applied Physics*. 2010, Vol. 108, 013710, pp. 013710-1-013710-15. doi: 10.1063/1.3437655.

34. **Kroemer, Herbert.** The 6.1 Å family (InAs, GaSb, AlSb) and its heterostructures: a selective review. *Physica E*. 2004, Vol. 20, pp. 196-203. Available online at www.sciencedirect.com.

35. **Баранов, А. Н., и др., и др.** Получение твёрдых растворов InGaAsSb, изопериодных к GaSb, вблизи границы области несмешиваемости. *Письма в ЖТФ*. 1990 г., Т. 16, 5, стр. 33-38.

36. **Васильев, В. И., и др., и др.** Исследование свойств слоев узкозонных (0.3-0.48 eV) твердых растворов A3B5, полученных методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. *Письма в ЖТФ*. 2012 г., Т. 38, 9, стр. 23-30.

37. **Воронина, Т. И., и др., и др.** Электрические свойства твёрдых растворов на основе GaSb (GaInAsSb, GaAlAsSb) в зависимости от состава. *ФТП*. 1998 г., Т. 32, 3, стр. 278-284.

38. **Воронина, Т. И., и др., и др.** Электрофизические свойства эпитаксиального арсенида индия и узкозонных твердых растворов на его основе. [ред.] В. В. Чалдышев. *ФТИ*. 1999 г., Т. 33, 7, стр. 781-788.

39. **Vurgaftman, I., Meyer, J. R. and Ram-Mohan, L. R.** Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys. *Journal of Applied Physics*. June 1, 2001, Vol. 89, 11, pp. 5815-5875. doi: 10.1063/1.1368156.

40. **Pierson, R. H., Fletcher, A. N. and Cantz, E. St. C.** *Analytical chemistry*. 1956, Vol. 28, 8, pp. 1218-1239.

41. **Головин, А. С., и др., и др.** Светодиоды на основе гетероструктур InAs/InAsSb для спектроскопии CO₂ ($\lambda=4.3 \mu\text{m}$). *Письма в ЖТФ*. 2010 г., Т. 36, 1, стр. 105-110.

42. **Дианов, Е. М.** Волоконные световоды для оптической связи. *Справочник по лазерам*. Москва : б.н., 1978, Т. 2.

43. **Девятых, Г. Г. и Дианов, Е. М.** Волоконные световоды с малыми оптическими потерями. *Вестник АН СССР*. 1981 г., 10, стр. 54.

44. **Odubanjo, Babatunde, Wang, Chen-Show and Wang, Wen I.** High Performance Guard Ring P-i-N Photodetectors for Digital Fiber Optic Communications. *Proc. of SPIE*. 1997, Vol. 2999, pp. 414-423. doi: 10.1117/12.271175.

45. **Nunna, K. C., et al., et al.** Short-Wave Infrared GaInAsSb Photodiodes Grown on GaAs Substrate by Interfacial Misfit Array Technique. *IEEE Photonics Technology Letters*. February 1, 2012, Vol. 24, 3, pp. 218-220. <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2011.2177253>.

46. **Masini, Gianlorenzo, et al., et al.** High-Speed Near Infrared Optical Receivers Based on Ge Waveguide Photodetectors Integrated in a CMOS Process. [ed.] Pavel Cheben. *Advances in Optical Technologies*. Volume 2008, April 4, 2008, p. 5 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2008/196572>.

47. **Feng, Dazeng, et al., et al.** Horizontal p-i-n High-Speed Ge Waveguide Detector on Large Cross-section SOI Waveguide. *Optical Society of America*. 2010.

48. **Nam, E., Oh, M. S. and Jung, D. Y.** 100 GHz Long Wavelength Low Capacitance Waveguide InGaAs/InP p-i-n Photodiode with Multimode Waveguide Structure. *Journal of the Korean Physical Society*. December 2004, 45, pp. 917-920.

49. **Dmitruk, Nikolas L., et al., et al.** MSM-photodetectors with corrugated metal-semiconductor interface based on III-V semiconductors. *Pros. of SPIE*. 1997, Vol. 2999.

50. **Hamamatsu Photonics.** [Online] 2013. [Cited: February 1, 2014.] <http://hamamatsu.com>.

51. **Андреев, И. А., и др., и др.** Сверхбыстродействующий p-i-n фотодиод на основе GaInAsSb для спектрального диапазона 1.5-2.3 мкм. *Письма в ЖТФ*. 1989 г., Т. 15, 7, стр. 15-19.

52. **Андреев, И. А., и др., и др.** Фотодиоды на основе твердых растворов GaInAsSb/GaAlAsSb. *Письма в ЖТФ*. 1986 г., Т. 12, 21, стр. 1311-1315.

53. **Андреев, И. А., и др., и др.** Лавинное умножение в фотодиодных структурах на основе GaInAsSb. *Письма в ЖТФ*. 1987 г., Т. 13, 8, стр. 481-486.

54. **Андреев, И. А., и др., и др.** Малошумящие лавинные фотодиоды с разделёнными областями поглощения и умножения для области спектра 1.6-2.4 мкм. *Письма в ЖТФ*. 1998 г., Т. 15, 17, стр. 71-76.

55. **Ru, Guoping, Zheng, Yanlan and Li, Aizhen.** The wavelength shift in GaInAsSb photodiode structures. *Journal of Applied Physics*. June 15, 1995, Vol. 77, 12, pp. 6721-6723. doi: 10.1063/1.359088.

56. **Андреев, И. А., и др., и др.** Высокоэффективные фотодиоды на основе GaInAsSb/GaAlAsSb для спектрального диапазона 0.9-2.55 мкм с

большим диаметром чувствительной площадки. *ФТП*. 2003 г., Т. 37, 8, стр. 974-979.

57. **Ahmetoglu(Afrailov), M., и др., и др.** Электрические свойства фотодиодов на основе p-GaSb/p-GaInAsSb/N-GaAlAsSb гетеропереходов. *Письма в ЖТФ*. 2008 г., Т. 34, 21, стр. 67-75.

58. **Андреев, И. А., и др., и др.** Сульфидная пассивация фотодиодных гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb. [ред.] Л. В. Шаронова. *ФТП*. 1997 г., Т. 31, 6, стр. 653-657.

59. *Development and characterization of GaInAsSb and InAsSbP mid-infrared photodetectors. Mauk, M., et al., et al.* 2000. Microelectronics, 1999. ICM '99. The Eleventh International Conference on. pp. 31-34. INSPEC Accession Number: 6804065; Digital Object Identifier: 10.1109/ICM.2000.884798. ISBN 0-7803-6643-3.

60. **Nadezhdinski, A. I. and Prohorov, A. M.** Application Tunable Diode Lasers. *SPIE*. 1992, 1724, p. 2.

61. **Данилова, Т. Н., и др., и др.** Светодиоды на основе твёрдых растворов GaSb для средней инфракрасной области спектра 1.6-4.4 мкм (Обзор). *ФТП*. 2005 г., Т. 39, 11, стр. 1281-1311.

62. **Михайлова, М. П., и др., и др.** Неохлаждаемые фотодиоды на основе InAsSbP/InAs для спектрального диапазона 3-5 мкм. *Письма в ЖТФ*. 1996 г., Т. 22, 16, стр. 63-66.

63. **Choi, H. K., Turner, G. W. and Eglash, S. J.** *IEEE Photonics Technol. Lett.* 1994, Vol. 6, 7.

64. **Biefeld, R. M., Baucom, K. C. and Kurtz, S. R.** *J. Crystal Growth.* 1994, Vol. 137, 231.

65. **Duncan, W., et al., et al.** *J. Crystal Growth.* 1994, Vol. 143, 155.

66. **Андреев, И. А., и др., и др.** Неохлаждаемые фотодиоды на основе InAs/InAsSbP для спектрального диапазона 2-3.5 мкм. *Письма в ЖТФ*. 1990 г., Т. 16, 04, стр. 27-32.

67. **Андреев, И. А., и др., и др.** Неохлаждаемые фотодиоды на основе InAsSbP и GaInAsSb для спектрального диапазона 3-5 мкм. *Письма в ЖТФ*. 1992 г., Т. 18, 17, стр. 50-53.

68. **Капассо, Ф., и др., и др.** *Техника оптической связи: Фотоприёмники: Пер. с англ.* [ред.] М. Тришенков. [перев.] А. В. Кулыманов, и др., и др. Москва : Мир, 1988. стр. 526. Т. 38. ISBN 5-03-001233-8.

69. **Браер, М. А., и др., и др.** Планарные PIN-фотодиоды на основе гетероструктур In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y/InP. *Письма в ЖТФ*. 1990 г., Т. 16, 18, стр. 8-11.

70. **Ишанин, Г. Г., и др., и др.** *Источники и приёмники излучения: Учебное пособие для студентов оптических специальностей вузов.* Санкт-Петербург : Политехника, 1991. ISBN 5-7325-0164-9.

71. **Joshi, Abhay M, Heine, Frank and Feifel, Thomas.** Rad-hard, Ultra-fast, InGaAs Photodiodes for Space Applications. [ed.] Richard T. Howard and Robert D. Richards. *Proc. of SPIE*. 2006, Vol. 6220, pp. 622003-1-622003-14. doi: 10.1117/12.666055.

72. **Harder, C., et al., et al.** 5.2-GHz bandwidth monolithic GaAs optoelectronic receiver. *IEEE Electron. Dev. Lett.* 1988, Vol. 9, pp. 171-173.

73. **Park, Ki-Sung, et al., et al.** An InGaAs/InP p-i-n-JFET OEIC with a Wing-Shaped p⁺-InP Layer. *IEEE Photonics Tech. Lett.* April 1992, Vol. 4, 4, pp. 387-389.

74. **Михеев, Г. М., и др., и др.** Быстродействующий фотоприемник мощного лазерного излучения на основе нанографитной пленки. *Приборы и техника эксперимента*. 2005 г., 3, стр. 84-89.

75. **Межгосударственный стандарт.** Диоды полупроводниковые - Методы измерения емкости. официальное [ред.] Л. В. Коретникова. *ГОСТ 18986.4-73*. [Документ]. Москва : Издательство стандартов, Июнь 2000 г.

76. **Венус, Г. Б., и др., и др.** Получение режима модуляции добротности в лазерах на основе одинарной гетероструктуры и генерация

сверхмощных пикосекундных оптических импульсов. *Письма в ЖТФ*. 1997 г., Т. 23, 4, стр. 11-16.

77. **Волков, Л. А., и др., и др.** Генерация и регистрация пикосекундных оптических импульсов в InGaAsP/InP ($\lambda=1.5-1.6$ мкм) лазерах с пассивной модуляцией добротности. *Письма в ЖТФ*. 1989 г., Т. 15, 13, стр. 6-9.

78. **Dennis, P. N. J.** *Photodetectors*. [ed.] 1986. s.l. : Photodetectors: An Introduction to Current Technology, 1986.

79. **Зи, С.** *Физика полупроводниковых приборов*. Москва : Мир, 1984.

80. **Шевцов, Э. А. и Белкин, М. Е.** *Фотоприемные устройства волоконно-оптических систем передачи*. Москва : Издательство "Радио и связь", 1992. стр. 224. ISBN 5-256-00993-1.

81. **Куницына, Е. В.** *Создание и исследование фотодиодных гетероструктур на основе узкозонных твердых растворов GaInAsSb*. ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Санкт-Петербург : б.н., 1999. Кандидатская диссертация.

82. **Воронина, Т. И., и др., и др.** Влияние примеси теллура на свойства твердых растворов Ga_{1-X}In_XAs_{1-Y}Sb_{1-Y} ($X>0.22$). [ред.] Т. А. Полянская. *ФТП*. 2002 г., Т. 36, 8, стр. 917-924.

83. **Sokolovskii, G. S., et al., et al.** Picosecond InP photoconductors produced by deep implantation of heavy ions. *Proc. of SPIE*. 1996, Vol. 2816, pp. 106-109. doi: 10.1117/12.255158.

84. **Очиай, М., и др., и др.** Пикосекундные InP фотоприемники, полученные методом глубокой имплантации тяжелых ионов. *Письма в ЖТФ*. 1995 г., Т. 21, 22, стр. 72-77.

85. **ООО "АИБИ"**. PD24-01-NS. [В Интернете] 2014 г. [Цитировано: 1 Февраль 2014 г.] www.ibsg.ru.

86. **Андреев, И. А., и др., и др.** 2469438 Россия, 16 Июня 2011 г. Изобретение.

87. **Li, Xian-Jie, et al., et al.** *Chin. Phys. Lett.* 2003, Vol. 20, 2, p. 311.

88. **Notargiacomo, A., et al., et al.** *Microelectronic Engin.* 2011, Vol. 88, 8, p. 2714.
89. **Именков, А. Н., и др., и др.** Фотодиоды для спектрального диапазона 1.1-2.4 μm на основе двойной гетероструктуры n-GaSb/n-GaInAsSb/p-AlGaAsSb, выращенной с использованием редкоземельных элементов. *Письма в ЖТФ.* 2009 г., Т. 35, 2, стр. 29-35.
90. **Закгейм, А. Л., и др., и др.** Неохлаждаемые широкополосные флип-чип фотодиоды на основе InAsSb ($\lambda_{\text{cut off}}=4.5$ мкм). [ред.] Л. В. Беляков. *ФТП.* 2009 г., Т. 43, 3, стр. 412-417.
91. Optically Immersed 4.7 μm Photodiode. *Mid-IR Diode Optopair Group (MIRDOG)*. [Online] IoffeLED, Ltd. [Cited: February 3, 2014.] <http://www.mirdog.spb.ru>.
92. **Krier, A., Gao, H. H. and Sherstnev, V. V.** Purification of epitaxial InAs grown by liquid phase epitaxy using gadolinium gettering. *Journal of Applied Physics.* 1999, Vol. 85, 12, pp. 8419-8422. doi: 10.1063/1.370691.
93. **R. Clark Jones.** *Appl. Optics.* 1962, Vol. 1, 607.
94. **Remennyi, M. A., et al., et al.** InAs and InAs(Sb)(P) (3-5 μm) immersion lens photodiodes for portable optic sensors. [ed.] Francesco Baldini, Jiri Homola and Robert A. Lieberma. *Proc. of SPIE.* 2007, Vol. 6585, pp. 658504-1-658504-8. doi: 10.1117/12.722847.
95. **Burstein, E.** *Phys.Rev.* 1954, Vol. 83, p. 632.
96. **Tauc, J. and Abraham, A.** *Czech. J. Phys.* 1959, Vol. 9, 95.
97. **Haywood, S. and Missons, M.** QWIP Detectors for the MWIR. [ed.] Anthony Krier. *Mid-Infrared Semiconductor Optoelectronics.* s.l.: Springer-Verlag London Limited, 2006, pp. 429-452.
98. **Moiseev, K. D., et al., et al.** Room-temperature electroluminescence of AlSb/InAsSb single quantum wells grown by metal organic vapor phase epitaxy. *Applied Physics Letters.* 2006, Vol. 88, 132102. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2189572>.

99. **Moiseev, K., et al., et al.** *Phys. Procedia*. Vol. 3, p. 1189.
100. **Hoang, A. M., et al., et al.** Demonstration of high performance bias-selectable dual-band short-/mid-wavelength infrared photodetectors based on type-II InAs/GaSb/AlSb superlattices. *Applied Physics Letters*. 2013, Vol. 102, 011108, pp. 011108-1-011108-4. doi: 10.1063/1.4773593.
101. **Pusz, W., et al., et al.** MWIR type-II InAs/GaSb superlattice interband cascade photodetectors. [ed.] Paul D. LeVan, et al., et al. *Proc. of SPIE*. 2013, Vol. 8868, pp. 1-11. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2035499>.
102. **Hulicius, E., et al., et al.** *Abstracts of 8th Int. Conf. MIOMD*. May 4-16, 2007, p. 184.
103. **Sasa, S., et al., et al.** *Conf. Ser.* 2005, Vol. 187, 363.
104. **Mikhailova, M. P., et al., et al.** Interface roughness scattering in type II broken-gap GaInAsSb/InAs single heterostructures. *Journal of Applied Physics*. December 7, 2007, Vol. 102, 113710. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2817813>.
105. **Михайлова, М. П., и др., и др.** Электролюминесценция в гетероструктурах II типа p-InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/p(n)-GaSb с глубокими квантовыми ямами на гетерогранице. [ред.] Л. В. Беяков. *ФТП*. 2010 г., Т. 44, 1.
106. **Зегря, Г. Г., и др., и др.** Подавление оже-рекомбинации в диодных лазерах на основе гетеропереходов II типа InAsSb/InAsSbP и InAs/GaInAsSb. [ред.] Л. В. Шаронова. *ФТП*. 1999 г., Т. 33, 3, стр. 351-356.
107. **Михайлова, М. П., и др., и др.** Гетеропереходы II типа GaInAsSb/InAs. [ред.] В. В. Чалдышев. *ФТП*. 1995 г., Т. 29, 4, стр. 678-686.
108. **Mikhailova, M. P. and Andreev, I. A.** *Mid-Infrared Semiconductor Optoelectronics*. s.l. : Springer-Verlag London Limited, 2006.
109. **Levine, B. F.** Quantumwell infrared photodetectors. *Journal of Applied Physics*. October 15, 1993, Vol. 74, 8, pp. 1-81. <http://dx.doi.org/10.1063/1.354252>.

110. **Luna, E., Gusman, A. and Sanches-Rocha, J.** *Infr. Phys. Technol.* 2003, Vol. 44, 383.
111. **Georgiev, N., et al., et al.** Short-wavelength intersubband absorption in strain compensated InGaAs/AlAs quantum well structures grown on InP. *Applied Physics Letters*. July 14, 2003, Vol. 83, 2, pp. 210-2012.
112. **Kindl, D., et al., et al.** Influence of growth rate on charge transport in GaSb homojunctions prepared by metalorganic vapor phase epitaxy. *Journal of Applied Physics*. February 15, 2004, Vol. 95, 4. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1640794>.
113. **Mikhailova, M. P., et al., et al.** Superlinear electroluminescence due to impact ionization in GaSb-based heterostructures with deep Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb quantum wells. *Journal of Applied Physics*. 2012, Vol. 112, 023108. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4739279>.
114. **Yakovlev, Yu. P., et al., et al.** High-speed photodiodes for 2.0-4.0 μm spectral range. [ed.] A. M. Filachev, V. P. Ponomarenko and A. I. Dirochka. *Proc. of SPIE*. 2007, Vol. 6636, pp. 66360D-1-66360D-13. doi: 10.1117/12.742322.
115. **Данилов, Л. В. и Зегря, Г. Г.** Теоретическое исследование процессов оже-рекомбинации в глубоких квантовых ямах. *ФТП*. 2008 г., Т. 42, 5, стр. 566-572.
116. **Mikhailova, M. P., et al., et al.** Photovoltaic detector based on type II p-InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/p-GaSb heterostructures with a single quantum well for mid-infrared spectral range. [ed.] Pavel Tománek, Dagmar Senderáková and Miroslav Hrabovský. *Proc. of SPIE*. 2008, Vol. 7138, pp. 713813-1-713813-6. doi: 10.1117/12.818007.
117. **Калинина, К. В., и др., и др.** Суперлинейная электролюминесценция в гетероструктурах на основе GaSb с высокими потенциальными барьерами. [ред.] Л. В. Шаронова. *ФТП*. 2013 г., Т. 47, 1, стр. 75-82.

118. **Smet, J. H., et al., et al.** Electron intersubband transitions to 0.8 eV (1.55 μm) in InGaAs/AlAs single quantum wells. *Applied Physics Letters*. February 21, 1994, Vol. 64, 8, pp. 986-987. <http://dx.doi.org/10.1063/1.111960>.