

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра физической электроники (ФЭ)

Санько Сергей Александрович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ИК-ФОТОДИОДА**

по направлению 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника»
Магистерская программа «Твердотельная электроника»

Диссертация на соискание
степени магистра

Консультант:

Начальник лаборатории №2

АО «НИИПП»

_____ Д. Д. Каримбаев

Научный руководитель:

д-р техн. наук, проф. каф. ФЭ

_____ С. В. Смирнов

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ

УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра физической электроники (ФЭ)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ФЭ

д-р техн. наук., проф.

_____ П.Е. Троян

« ____ » _____ 2020 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

на магистерскую диссертацию

Выдано студенту 318-М факультета электронной техники

Санько Сергею Александровичу

1. Тема: «Разработка и исследование полупроводникового ИК-фотодиода».

Утверждена приказом по вузу № _____ от « ____ » _____ 2020 г.

2. Исходные данные: техническое задание на ИК фотодиод.

3. Содержание (перечень подлежащих разработке вопросов):

3.1 Принцип работы фотодиода;

3.2 Анализ применяемых материалов;

3.3 Разработка эпитаксиальной структуры для изготовления фотодиода;

3.3 Экспериментальная часть;

4. Заключение по диссертационной работе и формулировка рекомендаций.

ЗАДАНИЕ СОГЛАСОВАНО

Консультант по нормам и требованиям ЕСКД:

Каранский В.В., старший преподаватель каф. ФЭ

« ____ » _____ 2020 г.

Подпись _____

Руководитель работы:

Смирнов С.В., д-р техн. наук, проф. каф. ФЭ

« ____ » _____ 2020 г.

Подпись _____

Консультант:

Каримбаев Д.Д., начальник лаборатории №2, АО «НИИПП»

« ____ » _____ 2020 г.

Подпись _____

Задание принято к исполнению:

Санько С.А., студент группы 318 – М

« ____ » _____ 2020 г.

Подпись _____

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	9
1.1 Принцип и режимы работы фотодиодов.....	9
1.3 Основные параметры фотодиодов	13
1.4 Описание структуры фотодиода	22
1.5 Выбор материала обоснование выбранной структуры	26
Вывод к главе 1	29
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ.....	31
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МАРШРУТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОДИОДА. МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФОТОДИОДА.....	31
2.1 Технология изготовления фотодиода из полученной структуры.....	31
2.1 Методика измерения ВАХ фотодиода	35
2.2 Методика измерения ВФХ фотодиода.....	37
2.3 Описание методики измерения чувствительности с помощью монохроматора и опорного фотодиода.....	41
2.4 Описание методики измерений дискретным способом	45
2.5 Методика измерения частотных и временных характеристик фотодиода	52
Вывод к главе 2	55
ГЛАВА 3 ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ИК-ФОТОДИОДОВ.....	56
3.1 Исследование ВАХ фотодиода.....	56
3.2 Исследование ВФХ фотодиода	57
3.3 Измерение абсолютной чувствительности дискретным способом	61

3.4 Результаты измерений спектральной чувствительности фотодиодов в на специализированном оборудовании.	67
3.5 Проведение измерений времени нарастания и спада.....	69
Вывод к главе 3	73
ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	75
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	76

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Фотодиоды применяют в различных областях науки и техники. Их широкое применение обусловлено высокой чувствительностью в видимой, ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра. Фотодиоды обладают возможностью работы при небольшом напряжении и малом токе, имеют слабые шумы, большой срок службы, а также простую схему применения. Так, в вычислительной технике фотодиоды используют в устройствах ввода и вывода информации. Широкое применение фотоприемники находят в военной технике. Так, применение фотоприемников в головках наведения ракет, было одним из первых применений фотоприемников в военной технике.

Широко используют фотодиоды в регистрирующих и измерительных приборах фотометрии, в киноаппаратуре и фототелеграфии. В последние годы фотодиоды стали применять для автоматизации производственных процессов. Широкое применение фотодиоды должны найти в быстро развивающейся оптоэлектронике. В основном фотодиоды используют в фотодиодном режиме, т.е. при обратном смещении *p-n*-перехода. Однако в некоторых случаях целесообразно применять вентильный режим, в котором шумы значительно меньше, например, при регистрации малых световых потоков, когда сигнал сравним с уровнем шумов и изменения темнового тока сравнимы с фототоком [1].

Цель работы. Целью магистерской диссертации является разработка и исследование характеристик полупроводникового ИК-фотодиода.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. провести анализ современных литературных источников, в которых освещена рассматриваемая проблематика;

2. разработать эпитаксиальную структуру и на ее основе изготовить опытные образцы ИК-фотодиодов соответствующего техническим требованиям:

диапазон длин волн: 0,65–0,89 мкм;

максимальный темновой ток: не более 5 нА;

время нарастания и спада импульса: 10 нс;

емкость кристалла при обратном смещении 10 В: не более 20 пФ;

абсолютная чувствительность: не менее 0,3 А/Вт;

напряжение пробоя: более 20 В.

3. подготовить измерительное оборудование и образцы для проведения измерений;

4. разработать методики проведения измерений.

Научная новизна работы состоит в том, что:

1. Разработана эпитаксиальная структура ИК-фотодиода с максимальной чувствительностью в диапазоне длин волн 850 - 870 нм;

2. Разработан технологический маршрут изготовления ИК-фотодиода.

3. Разработана методика измерения абсолютной чувствительности

Практическая значимость.

1. Продемонстрирована технология изготовления ИК фотодиодов на основе соединений A_3B_5 ;

2. Исследованы эксплуатационные характеристики и параметры ИК фотодиода необходимые для его производства и внедрения;

3. После оптимизации структуры, возможно ее использование в составе оптопары.

Положения, выносимые на защиту.

1) Разработанная эпитаксиальная структура позволяет получить фотодиод с максимальной чувствительностью на длине волны 865 нм;

2) Разработанная методика определения абсолютной чувствительности фотодиода, позволяет достоверно определить значение данного параметра.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 81 страницу машинного текста, включая 34 рисунка, 14 формул, 9 таблиц и списка литературы из 45 наименований. В соответствии с поставленными задачами вся диссертационная работа разделена на три главы.

Первая глава посвящена обзору литературы, в которой рассмотрен принцип и режимы работы полупроводниковых фотодиодов. В представленной главе рассмотрены основные полупроводниковые материалы применяемые для изготовления фотодиодов. Также в данной главе представлены основные параметры фотодиодов и их зависимость от выбранного материала. На основании проведенного литературного обзора и технического задания на изготовление фотодиода, произведен выбор материала и дизайна разрабатываемой эпитаксиальной структуры. В конце главы сформулированы основные цели и задачи диссертационной работы, основанные на анализе исследованной литературы.

Во **второй главе** рассмотрена технология изготовления фотодиодного кристалла на основе разработанной эпитаксиальной структуры.

Составлены методики измерения основных параметров фотодиодов, вольт-амперных, вольт-фарадных, временных параметров, а также методики измерения чувствительности. Для измерения абсолютной чувствительности фотодиода разработана методика измерения дискретным способом, обеспечивающая погрешность измерения чувствительности 11%.

Также в главе были представлены схемы измерения и технические параметры измерительного оборудования, а также, разработанное для выполнения измерений оборудование и оснастка.

В **основной части** диссертации приводятся результаты измерений параметров фотодиодов. В частности результаты измерения параметров указанных в техническом задании и проводится оценка их соответствия данным требованиям. В конце главы сделано заключение о соответствии параметров изготовленных фотодиодов требованиям ТЗ.

ГЛАВА 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Фотодиод представляет собой полупроводниковый диод, обратный ток которого зависит от его освещенности. Фотодиод сконструирован таким образом, чтобы его активная структура была способна воспринимать оптическое излучение. Для этого корпус фотодиода имеет специальное прозрачное окно, за которым размещена фоточувствительная площадка полупроводникового кристалла. Фотодиоды различают как по структуре, так и по функциональному назначению. Параметры фотодиода определяются неосновными носителями. Концентрация неосновных носителей в фотодиоде может меняться в широких пределах, в отличие от основных.

1.1 Принцип и режимы работы фотодиодов

Основным элементом фотодиода является *p-n*-переход. При его освещении происходит генерация электронно-дырочных пар вблизи потенциального барьера на расстоянии меньше чем диффузионная длина, и разделение этих носителей в области объемного заряда. Это достигается за счет возникновения вентильного фото-ЭДС, что приводит к увеличению обратного тока диода при его освещении рисунок 1.1.

Таким образом, фотодиод является прибором с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Причем в рабочем интервале обратных напряжений значение обратного тока освещенного фотодиода слабо зависит от приложенного напряжения.

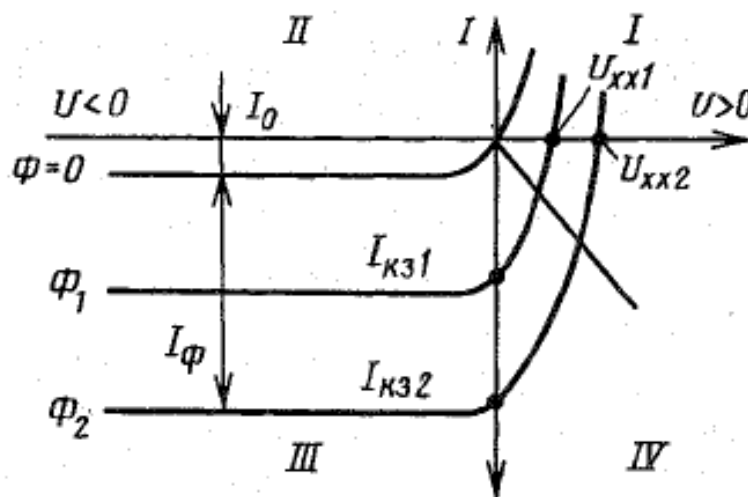
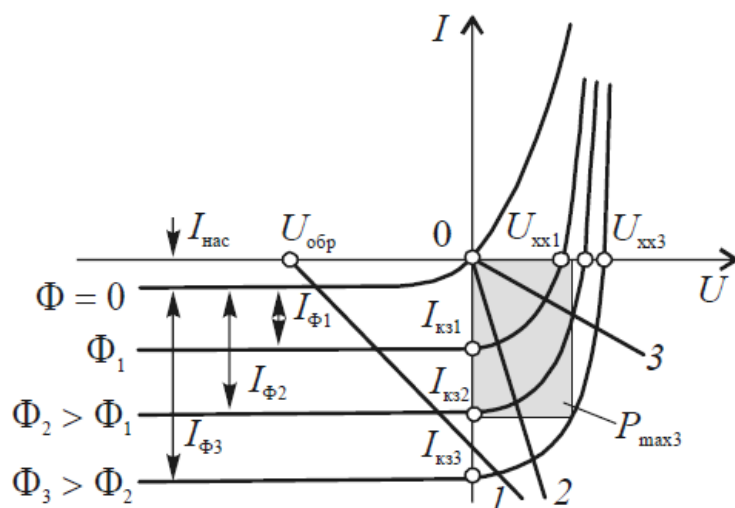


Рисунок 1.1 – ВАХ $p-n$ перехода без освещения ($\Phi=0$)
и при освещении (Φ_1 и Φ_2)

Различают 2 режима работы освещенного фотодиода – это фотодиодный, когда фотодиод работает при обратном смещении (рисунок 1.2 линия нагрузки 1), и вентильный или фотовольтаический.

В вентильном режиме фотодиод работает без внешнего смещения (рисунок 1.2 линии нагрузки 2, 3), а фотосигналом является напряжение на контактах, которое возникает под действием излучения. Точки пересечения вольт-амперной характеристики фотодиода, освещаемого потоком Φ , с осью токов соответствуют токам короткого замыкания $I_{кз}$, а точки пересечения с осью напряжений – напряжению холостого хода $U_{хх}$.

Оптимальному режиму работы фотодиода в фотовольтаическом режиме, когда в нагрузку отдается наибольшая мощность P_{max} , соответствует наибольшая площадь прямоугольника с вершиной, расположенной на вольт-амперной характеристике, как показано на рисунке 1.2. При этом сопротивление нагрузки соответствует внутреннему сопротивлению фотодиода.



U_{xx} – напряжение холостого хода, $I_{кз}$ – ток короткого замыкания, I_{Φ} – фототок.

Рисунок 1.2 – Типичные ВАХ фотодиодов

при различных световых потоках (Φ): линии нагрузки:

1 – с напряжением обратного смещения $U_{зв}$ (фотодиодный режим); 2,3 – без внешнего напряжения (вентильный режим) с малым и большим сопротивлением нагрузки соответственно

Таким образом, из анализа различных режимов работы фотодиодов можно сделать вывод, что фотодиодный режим характеризуется определенными преимуществами по сравнению с фотовольтаическим – это более высокое быстродействие, лучшая стабильность характеристик, больший динамический диапазон линейности характеристик, повышенная фоточувствительность в длинноволновом диапазоне. Тем не менее, недостатком фотодиодного режима является то, что при отсутствии облучения через фотодиод протекает темновой ток. Избыточный шум и шум, обусловленный температурными колебаниями напряжения смещения, исчезают, если диод работает в вентильном режиме [2, 3].

1.2 Материалы для изготовления фотодиодов

Для изготовления фотодиодов сегодня используется широкий спектр полупроводниковых материалов, благодаря чему возможно получать фотодиоды с различной чувствительностью во всех участках спектра – от ультрафиолетового до далекого инфракрасного. Спектральный диапазон чувствительности фотодиодов на основе различных полупроводниковых материалов, которые используются для изготовления фотодиодов, приведены на рисунке 1.3.

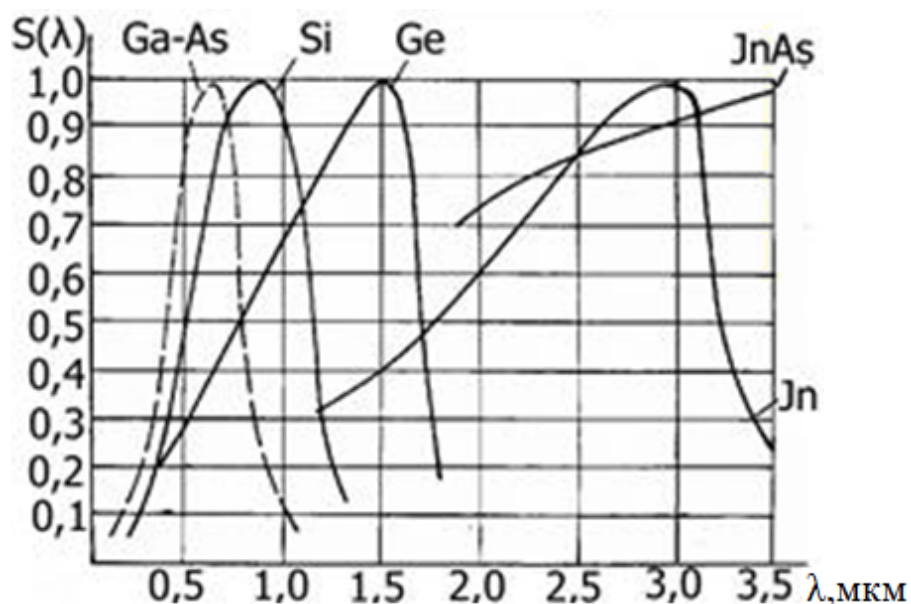


Рисунок 1.3– Спектральный диапазон чувствительности фотодиодов на основе различных полупроводниковых материалов

Из рисунка 1.3 видно, что для разных диапазонов длин волн используются различные материалы, позволяющие обеспечить лучшие характеристики приборов в требуемом спектральном диапазоне.

В таблице 1.1 представлены некоторые параметры фотодиодов нескольких типов изготовленных из различных материалов:

Таблица 1.1 – Параметры фотодиодов в зависимости от материала и типа диода

Материал, тип диода	$T_{\text{раб}}$, К	Рабочий диапазон, мкм	λ_{max} , мкм	D , см·Гц ^{1/2} /Вт	τ , мс	Примеры приборов
Si p-n p-i-n ЛФД	295	0,4–1	0,85 0,9 0,9	$3 \cdot 10^{12}$ $3 \cdot 10^{13}$ 10^{14}	1–10 0,002– 0,01 0,002– 0,01	ФДК, ФД-10КП, ФД-256
Ge p-n ЛФД	295	0,5–1,8	1,55	$5 \cdot 10^{10}$ 10^{12}	1–10 <0,1	ФД-1, ФД-4Г
GaAs	300	0,5–0,9	0,8	10^{12}	0,1	–
InSb	80	2,2–5,4	5,2	$5 \cdot 10^{10}$	5	ФДО-117
$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$	300	1,3–1,6	1,5	10^{11}	0,005	–
$\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$	80	2–30	8–14	10^{10}	0,01	–

Из таблицы 1.1 видно, что для изготовления фотодиодов в ближнем ИК диапазоне наиболее подходящими являются материалы кремний (Si) и химические соединения элементов 3 и 5 групп периодической системы химических элементов Менделеева. Также в последнее время обозначилась тенденция к производству фотодиодов на основе гетероэпитаксиальных структур на основе соединений 3 и 5 групп. Поскольку они обладают высоким быстродействием, что является актуальным на сегодняшний день. В качестве быстродействующих фотоприемников в диапазоне частот до нескольких ГГц наиболее эффективно использование *p-i-n*- и лавинного фотодиодов.

1.3 Основные параметры фотодиодов

Большинство основных параметров фотодиода определяется материалом, из которого он изготовлен. Среди параметров фотодиода,

определяемых материалом, одним из наиболее важных является **квантовая эффективность**. Она представляет собой число генерированных электронно-дырочных пар, отнесенных к числу падающих фотонов.

Квантовую эффективность определяет **коэффициент поглощения материала** α , который зависит от длины волны λ падающего излучения и материала фотоиода. На рисунке 1.4 и 1.5 приведены зависимости коэффициентов поглощения α от длины волны λ измеренные для различных материалов [3].

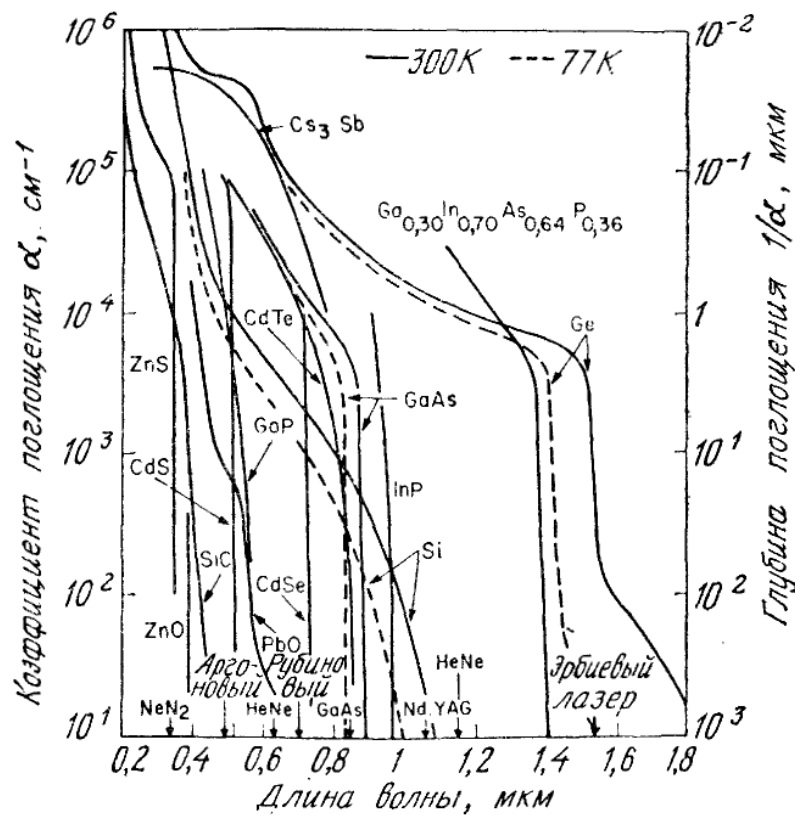


Рисунок 1.4 - Зависимость коэффициента поглощения от длины волны излучения для различных фоточувствительных материалов

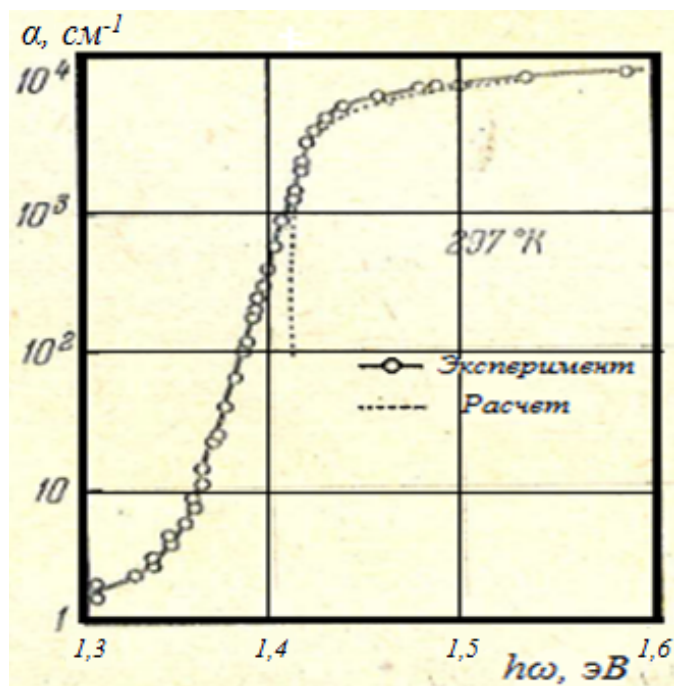


Рисунок 1.5 - Спектральная зависимость коэффициента поглощения для не легированного арсенида галлия

Поскольку α сильно зависит от длины волны, для одного материала полупроводника, область длин волн в которой можно получить заметный фототок ограничена. Длинноволновая граница λ_c зависит от ширины запрещенной зоны полупроводника в соответствии с уравнением (1.1). Излучение и длинами волн меньше λ_c поглощаются полупроводником и образуют электронно-дырочные пары.

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = \frac{1,24}{E_g(\text{эВ})}, \quad (1.1)$$

где λ_c – длина волны соответствующая ширине запрещенной зоны E_g .

Для того чтобы обеспечить заметное поглощение, длина волны излучения должна быть меньше чем λ_c , в этом случае значительная часть излучения будет поглощаться материалом [3, 4].

При этом толщина области поглощения фотодиода выбирается с учетом отношения $1/\alpha$. На коротких длинах волн фотоответ обусловлен тем, что в области коротких волн коэффициент α очень велик, порядка 10^5 см^{-1} и излучение поглощается в непосредственной близости к поверхности, где

времена рекомбинации малы. В результате этого фотоносители рекомбинируют раньше, чем уходят из поверхностного слоя.

На рисунке 1.6 представлены характерные зависимости квантовой эффективности от длины волны для некоторых фотодиодов из разных материалов.

Еще одним важным параметром фотодиода является такой параметр как *чувствительность*, которая напрямую зависит от квантовой эффективности. Под чувствительностью принято понимать отношение изменения электрического сигнала на его выходе к падающему потоку излучения. Так как на фотодиоде может меняться и ток и напряжение, то существует 2 вида чувствительности, вольтовая и токовая. Отличие токовой чувствительности от вольтовой заключается лишь в том, по какому параметру оценивать сигнал, возникающий при освещении фотодиода [5].

Также различают интегральную и абсолютную чувствительность.

Абсолютная чувствительность это реакция фотоприемника на монохроматическое излучение. Она зависит от длины волны падающего излучения и измеряется в абсолютных единицах (А/Вт или В/Вт). Поскольку определение абсолютной чувствительности затруднительно, то используют понятие относительной спектральной чувствительности. Спектральную относительную чувствительность принято приводить в относительных единицах в виде графиков, по которым можно приблизительно определить возможность согласования источника и приемника излучения. Она определяется как отношение чувствительности на заданной длине волны ($S(\lambda)$) к максимальной чувствительности фотоэлемента ($S(\lambda_{max})$).

Интегральная чувствительность определяется для стандартных источников излучения (например, абсолютно черное тело (АЧТ) при какой-то стандартной температуре). Она характеризует способность фотоэлемента реагировать на световой поток сложного состава. Это означает, что фотоэлемент освещается белым (близким к солнечному спектру) а не

монохроматическим пучком света. По этому интегральная чувствительность определяется в А/лм[6].

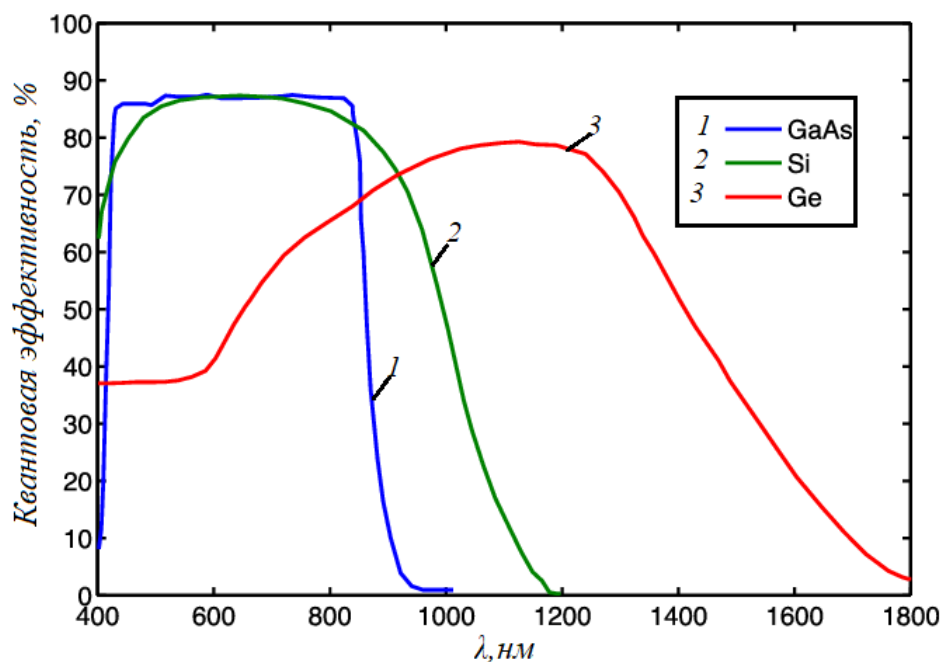


Рисунок 1.6 - Зависимость квантовой эффективности (сплошная линия) фотодетекторов из различных материалов от длины волны излучения

Из зависимости (рисунок 1.6) видно, что в диапазоне длин волн 0,4 – 0,9 мкм высокой квантовой эффективностью обладают фотодиоды на основе кремния (*Si*) и арсенида галлия (*GaAs*). Их квантовая эффективность в указанном диапазоне превышает 80 % [7].

Следующим важным параметром фотодиода является **темновой ток**. Под темновым током понимают ток утечки, возникающий при приложении обратного напряжения смещения к фотодиоду. Этот параметр зависит от температуры и увеличивается с ее ростом. Также он зависит от материала из которого изготовлен фотоприемник[8]

В таблице 1.1 приведены типовые значения темнового тока фотоприемников, а также **времени нарастания фотоимпульса**, еще одной важной характеристики фотодиода [9].

Таблица 1.1 - Типовые характеристики фотоприемников

Фотоприемник	Токовая чувствительность, А/Вт	Темновой ток, нА	Время нарастания, нс
<i>p-i-n</i> фотодиод (<i>InGaAs</i>)	0,8	0,1-3	0,01-5
Фотодиод (<i>GaAs</i>)	0,5	5	0,1-5
Лавинный фотодиод (<i>InGaAs</i>)	20-60	30	0,3
Лавинный фотодиод (<i>Ge</i>)	20-60	400	0,3-1
Фотодиод (КНС)	0,47	146	
Фотодиод (<i>Si</i>)	0,7	10	2500

Из таблицы 1.1 видно, что лучшее значение темнового тока принадлежит фотоприемникам на основе соединений элементов 3 и 5 групп. Также видно, что для них характерно меньшее время нарастания импульса, еще одного важнейшего параметра фотоприемников отвечающего за быстродействие прибора.

Время нарастания (спада) является самой важной динамической характеристикой фотоприемных устройств. Этот параметр характеризует быстродействие фотоприемника и определяется как время необходимое выходному сигналу, чтобы возрасти от уровня 0,1 до уровня 0,9 (упасть от 0,9 до 0,1 для характеристики спада) от установившегося максимального значения при условии, что на вход фотоприемника подается строго прямоугольный импульсы света большой длительности. Этот параметр зависит от геометрических параметров фотоприемника, материала из которого он изготовлен, напряженности электрического поля в слабелегированной области прибора и температуры [9, 10, 11]

Если в момент времени $t = 0$ на фотодиод подать прямоугольный импульс света, то ток через диод появится лишь после того, как возбужденные светом носители заряда дойдут до перехода, т.е. через время, равное времени диффузии носителей через базу толщиной w_B . Поэтому в начальный момент времени неравновесные носители заряда диффундируют через базу быстрее, чем впоследствии, а значит, носители заряда возбужденные в конце импульса света ($t \geq \tau_{\text{имп}}$) диффундируют медленнее (рисунок 1.7, *в*). В результате этого фотоны нарастания и спада импульса фототока размываются (рисунок 1.7, *б*). Чем больше толщина базы, тем больше размытие импульса. Если длительность интервалов между импульсами света намного больше времени диффузии (τ_d), то фототок имеет вид разделенных между собой импульсов тока.

С увеличением частоты повторения импульсов света длительность интервалов между ними уменьшается, и при достаточно высоких частотах следующий импульс фототока начинается, когда предыдущий импульс еще не успел закончиться (рисунок 1.7, *г*). В этом случае фототок имеет постоянную \bar{I}_i переменную составляющие \tilde{I} . Поэтому при больших частотах повторения импульсов света фотодиод не успевает реагировать на каждый импульс и импульсы сливаются между собой [11].

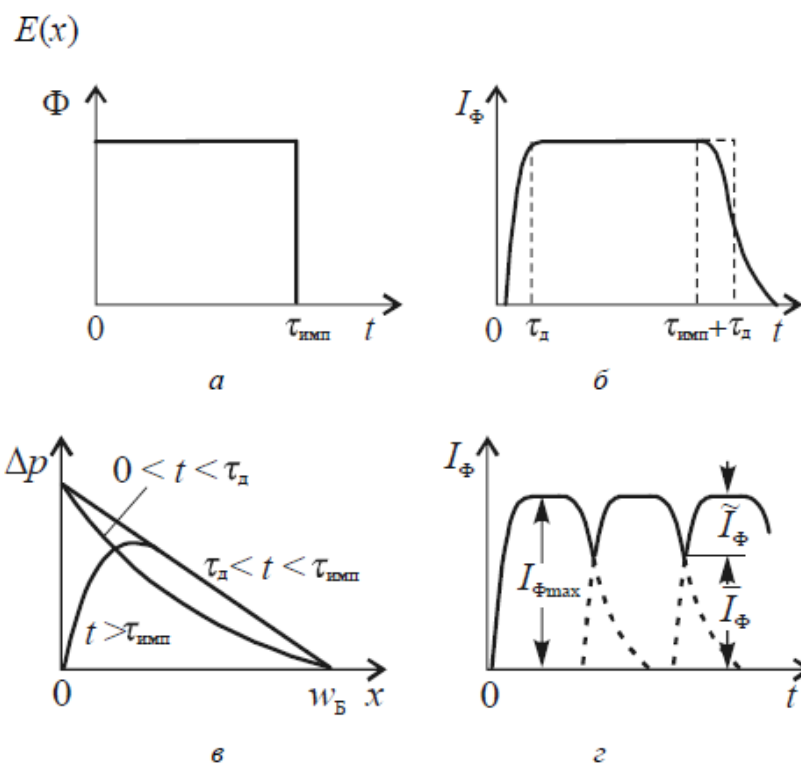


Рисунок 1.7 – Процессы в фотодиоде при импульсном освещении:
a – импульс света, *б* – импульс фототока, *в* – распределение концентрации избыточных носителей заряда в базе, *г*– импульсы фототока в случае большой частоты повторения световых импульсов

Кроме полезного сигнала на выходе фотодиода возможно появление хаотичного сигнала со случайной амплитудой и спектром, такой сигнал называется шумом фотодиода. Шум является паразитным сигналом и не дает регистрировать очень малые полезные сигналы. Все шумы можно разделить на 2 группы. Главную роль в шумах играет дробовой шум, который является низкочастотным и лежит в диапазоне от нескольких сотен герц до нескольких килогерц. Второй тип шумов – это тепловой шум омического сопротивления базы фотодиода. Этот шум обычно вносит малый вклад и чаще всего его можно не учитывать.

Таким образом, основными параметрами, зависящими от материала изготовления фотодиода являются:

- квантовая эффективность;
- коэффициент поглощения (определяет квантовую эффективность);

- спектральная чувствительность;
- темновой ток;
- время нарастания (спада) фотоимпульса;
- емкость кристалла.

Еще одним параметром для фотодиодов является их **радиационная стойкость**. Данный параметр имеет весомое значение при производстве приборов, среда использования которых, обладает повышенным уровнем радиации. При разработке перспективных приборов, а также приборов военного назначения этот параметр необходимо учитывать.

Радиационное воздействие приводит к снижению подвижности носителей заряда, и их времени жизни и как следствие к снижению их быстродействия. Кроме того, радиационное воздействие приводит к смещению уровня *p-n*-перехода и как следствие к увеличению емкости *p-n*-перехода, что так же отражается на быстродействии прибора.

Для повышения радиационной стойкости необходимо обеспечить высокие концентрации примеси в областях прибора, что приведет помимо повышенной радиационной стойкости, еще и к более высокому быстродействию. Использование материалов с большой шириной запрещенной зоны и малым временем жизни носителей заряда также увеличивает радиационную стойкость готовых приборов [12].

Для того чтобы повысить радиационную стойкость приборов на основе кремния, используют технологию кремний на сапфире, которая довольно дорогостоящая. При этом она обеспечивает радиационную стойкость на порядок выше, чем у объемного кремния.

Фотодиоды на основе *GaAs* обладают более высокой радиационной стойкостью, по сравнению с кремниевыми фотодиодами, за счет большей ширины запрещенной зоны, на порядок большей подвижностью носителей заряда и меньшим временем жизни носителей заряда [12 - 14].

1.4 Описание структуры фотодиода

После выбора материала необходимо определить структуру и параметры слоев этой структуры. Для этого необходимо описать типовые слои фотодиодов и их свойства.

Структура фотодиода обычно состоит из следующих слоев (помимо перечисленных слоев возможно добавление других):

- подложка (основание структуры);
- буферный слой (необходим для уменьшения рассогласования подложки и последующих слоев структуры);
- обедненный слой (i - слой или область поглощения);
- широкозонный слой (пропускает излучение без потерь к активной области, является контактным слоем с малым последовательным сопротивлением).

Типичная конструкция $p-i-n$ -фотодиода, состоящего из n^+ -основы, толстой i -области и тонкого p^+ -слоя, показана на рисунке 1.8.

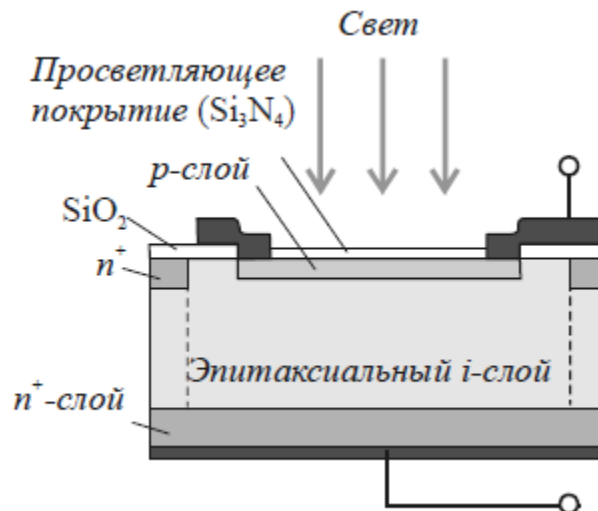


Рисунок 1.8 – Конструкция $p-i-n$ -фотодиода

В i - слое свободные носители заряда практически отсутствуют. И силовые линии электрического поля, начинающиеся от заряженных доноров

n -слоя без экранирования, проходят через i -слой и заканчиваются на заряженных акцепторах p -слоя (рисунок 1.9).

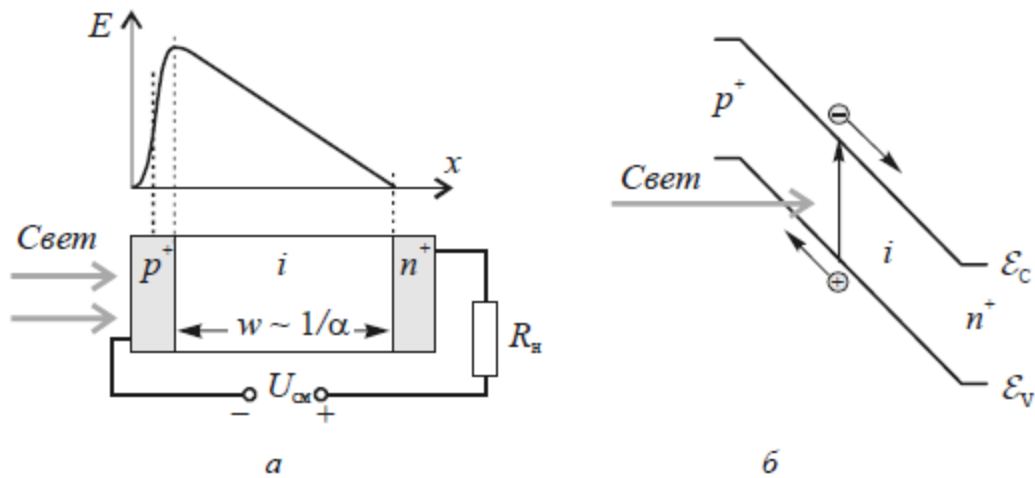


Рисунок 1.9 – Схема p - i - n -фотодиода и распределение электрического поля (а), энергетическая диаграмма фотодиода в случае освещения при обратном смещении(б)

Электроны и дырки, возбужденные излучением в i -области, разделяются и под действием сильного электрического поля обратного смещения быстро дрейфуют к соответствующим областям диода [15].

Поскольку толщина i -области может быть достаточно большой, то p - i - n -фотодиоды характеризуются малой барьерной емкостью, которая обуславливает уменьшение RC – постоянной времени, а это также важно для повышения быстродействия.

В результате образования контакта между полупроводниками, изготовленными на основе одних и тех же химических элементов с разным типом электропроводности, получают p - n -переходы. На рисунке 1.10 представлена типичная энергетическая диаграмма p - n -перехода в равновесном состоянии (без внешнего электрического поля). На рисунке 1.10 показано распределение носителей заряда. Поскольку электронные средства и ширина запрещенной зоны контактирующих материалов одинаковые,

разрыв зон в плоскости металлургического контакта равен нулю; потенциальных барьеров здесь два и они одинаковые по величине

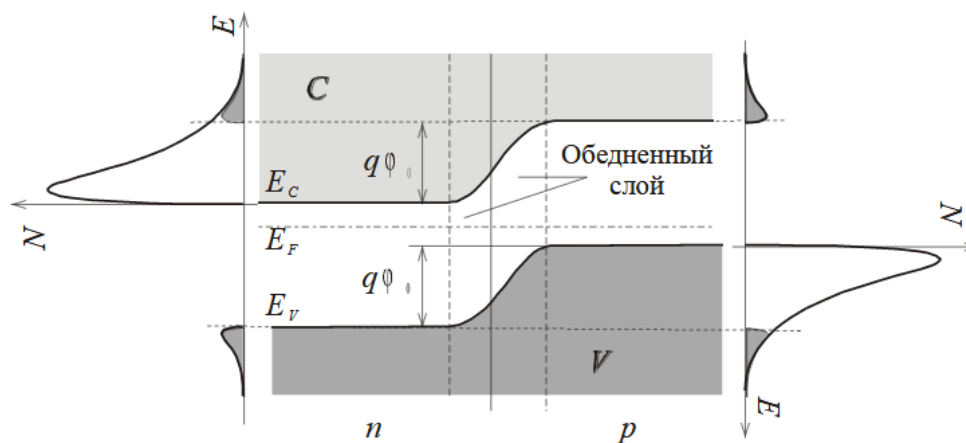


Рисунок - 1.10 - Энергетическая диаграмма и концентрация носителей заряда в равновесном *p-n*-переходе

Как видно, для основных носителей заряда (дырок для *p*-области и электронов для *n*-области) существует потенциальный барьер высотой φ_0 , для неосновных же носителей потенциального барьера не существует, и они проходят через *p-n*-переход беспрепятственно. Рассмотренная емкость получила название барьерной емкости. Её величина определяется неподвижными зарядами ионов легирующих примесей, без учета подвижных носителей заряда (электронов и дырок).

Толщина *i*-слоя, как правило, составляет 500–700 мкм, вместе с тем легированные слои очень тонкие. Это сделано для того, чтобы все оптическое излучение поглощалось в *i*-слое и сокращалось время переноса зарядов из *i*-слоя в легированные области. Вследствие этого поглощенные фотоны возбуждают ток во внешней цепи эффективнее и с меньшей задержкой. Носители заряда, образованные внутри обедненной области, мгновенно перемещаются в сильном электрическом поле соответственно в *p*- и *n*-области диода. Кроме того, благодаря толстой *i*-области *p-i-n*-фотодиоды характеризуются высокой фоточувствительностью в длинноволновой области спектра.

Если обедненный слой тонкий емкость перехода будет большой, а значит, будет велика постоянная времени RC . А если обедненный слой большой толщины, то время переноса носителей будет ограничивать скорость фотоответа. Оптимальной толщиной обедненного слоя является толщина примерно равная половине периода модуляции излучения. Компромисс быстродействия и квантовой эффективности достигается при значениях ширины области поглощения от $1/\alpha$ (в этом случае время пролета равно времени дрейфа носителей через i -область в $p-i-n$ фотодиоде) до $2/\alpha$ [16].

Быстродействие фотодиода напрямую зависит от скорости фотоответа. Она же, в свою очередь, ограничивается тремя факторами: диффузией носителей, временем дрейфа через обедненную область и емкостью обедненной области. Носители, генерированные за пределами обедненной области, должны диффундировать к переходу, что существенно увеличивает время задержки.

Чтобы уменьшить влияние диффузии необходимо формировать переход вблизи поверхности.

Также фотодиод может иметь просветляющие покрытия для увеличения квантовой эффективности.

Кроме того, структуры, основанные на гетеропереходе, имеют более высокую квантовую эффективность и дают возможность получения структуры с довольно однородной величиной чувствительности в широкой области спектра. Для того чтобы получить гетеропереход в котором токи утечки будут малы. Необходимо обеспечить хорошее согласование постоянных решеток обоих полупроводников.

Например, тройные полупроводниковые соединения $Al_xGa_{1-x}As$ (с прямой зоной при $x < 0,4$), выращенные в виде эпитаксиальных слоев на подложке $GaAs$, формируют гетеропереходы с совершенным согласованием решеток, с постоянной решетки равной 5,653 Å. Эти переходы играют

важную роль в оптоэлектронных приборах, работающих в спектральном диапазоне 0,65 - 0,85 мкм. Фотодетектор с двойным гетеропереходом ($n\text{-Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{As}/p\text{-GaAs}/p\text{-Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{As}$) снабженный просветляющим покрытием и работающий на длине волны $\lambda = 0,8075$ мкм, имеет квантовую эффективность, равную 92% [17, 18].

1.5 Выбор материала обоснование выбранной структуры

При разработке эпитаксиальной структуры для фотодиода необходимо руководствоваться требованиями технического задания, согласно которому необходимо разработать базовую технологию изготовления фотодиодов совместимых со светодиодами, изготавливаемыми на предприятии АО «НИИПП» для комплектования оптронной пары.

В процессе выполнения работы должны быть решены следующие задачи:

- Разработка эпитаксиальной структуры;
- Разработка технологии изготовления фотодиодного кристалла;
- Разработка методик измерения параметров фотодиодов:
 - диапазона рабочих длин волн;
 - времени нарастания и спада фотоимпульса;
 - чувствительности фотодиода (спектральная чувствительность);
 - темнового тока;
 - вольт-фарадной характеристики;
 - вольт-амперной характеристики.
- Выбор корпуса фотодиода.

Параметры разрабатываемых фотодиодов, согласно техническому заданию представлены в таблице 1.2

Таблица 1.2 - Параметры разрабатываемого фотодиода, согласно технического задания

Условное обозначение ФД	Длина волны излучения λ_d , мкм	Макс. темновой ток при $U_{обр}=10В$, нА	Емкость кристалла при $U_{обр}=10В$ и $f_{изм}=1$ МГц, пФ	Напряж. пробоя, В	Время нарастания, нс	Чувствительность, А/Вт
FTN-7	0,65 – 0,89	≤ 5	< 20	> 20	≤ 10	$> 0,3$

Российскими аналогами являются фотодиоды (ФД) – Квадратный фотодиод QPD150 (АО «Восход КРЛЗ»), кремниевые фотодиоды серии ФДУК (ЗАО «Техноэксан»), фотодиоды серии PD24, PD25 (ООО «АИБИ»), InGaAs p-i-n-фотодиод ДФД1000ТО-К (НПФ «ДИАЗ»), InGaAs p-i-n-фотодиод ТМС 8D31-000 (ФТИ-ОПТРОНИК)[19 - 21].

Согласно с требованиями технического задания, необходимо разработать кристалл фотодиода совместимый с изготавливаемыми на АО «НИИПП» светодиодами. Перечень изготавливаемых светодиодов на предприятии представлен в таблице 1.3.

Таблица 1.3 - Перечень светодиодов выпускаемых АО «НИИПП»

Светодиод	ЗЛ107	ЗЛ115	ЗЛ118	ЗЛ119	ЗЛ123	ЗЛ124	ЗЛ129	ЗЛ139	ЗЛ153
λ , нм	940- 965	900- 1000	820- 900	930- 960	920- 960	840- 900	830- 890	830- 890	840- 960

Из таблицы 1.3 видно, что все светодиоды работают в ближнем ИК диапазоне. Следовательно, и фотодиод должен работать в области ближнего ИК диапазона согласно требованиям ТЗ (см.табл. 1.2)[22].

При этом основной диапазон длин волн, для указанных в таблице 1.2 светодиодов, находится в диапазоне 850 нм - 870 нм и фотодиод необходимо разрабатывать преимущественно под данный диапазон.

По совокупности перечисленных параметров наиболее оптимальным материалом для изготовления фотодиода является арсенид галлия. Поскольку по основным параметрам фотодиода, между соединениями на основе *GaAs* и кремнием наблюдается равенство, но по параметру быстродействие и радиационная стойкость *GaAs*, превосходит *Si*, что является значительным преимуществом при разработке фотодиода для оптопары. По критерию радиационной стойкости однозначно выигрывает *GaAs* поскольку изначально имеет лучшую радиационную стойкость чем кремний, для повышения радиационной стойкости которого необходимо использовать дорогостоящую технологию кремний на сапфире. Кроме того для *GaAs* возможно применение технологии гетероструктур, которая позволяет эффективно изменять параметры фотодиодов путем изменения структуры.

Таким образом, целесообразнее выбрать в качестве основы для производства фотодиодов соединение *GaAs*.

Анализируя данные представленные выше, необходимо разработать структуру фотодиода, для этого первым делом необходимо выбрать толщину и концентрацию обедненного *i*-слоя.

Согласно литературным данным концентрация примесей должна быть минимальна, а толщина обедненного *i*-слоя должна обеспечить баланс между быстродействием и квантовой эффективностью согласно отношению $1/\alpha$ [23]

По этому, согласно рисунку 1.5, коэффициент поглощения α арсенида галлия на длине 870 нм составляет 1000 см^{-1} , а значит, для полного поглощения излучения на данной длине волны, необходимо чтобы толщина обедненного *i*-слоя составляла 10 мкм ($\alpha = 1/1000 \text{ см}$).

Согласно литературным источникам, толщины обкладочных слоев делают минимальными, а концентрации примеси порядка 10^{18} см^{-3} , для повышения быстродействия структуры.

Для формирования контактов к структуре и пропускания излучения без потерь в обедненный i -слой, необходимо наличие широкозонного слоя с высокой концентрацией примеси и малым сопротивлением.

Анализируя описанные выше параметры фотодиода, была разработана структура на основе $GaAs$ которая должна обеспечить требуемые параметры фотодиода. Разработанная структура фотодиода представлена в таблице 4.

Таблица 1.4 – Паспорт разработанной структуры фотодиода

Материал слоя	Концентрация слоя, см^{-3}	Толщина слоя, мкм
Подложка $GaAs$ (n -тип)	$1 \cdot 10^{18}$	200
Буферный слой (n^+ -тип)	$1 \cdot 10^{18}$	3
Обкладочный слой (n^+ -тип)	$8 \cdot 10^{17}$	2
Обедненный i -слой (v -тип)	$2 \cdot 10^{14}$	10
Обкладочный слой (p^+ -тип)	$1 \cdot 10^{18}$	0,1
Широкозонный слой (p^+ -тип)	$2 \cdot 10^{18}$	3
Контактный слой p^+ -слой	$1 \cdot 10^{18}$	0,5

Структура выращивается согласно паспорту (см. табл. 1.4), после чего, уже из готовой эпитаксиальной структуры изготавливается фотодиодный кристалл. Разработанная структура была выращена в отделе полупроводникового материаловедения АО "НИИПП", методом жидкостной эпитаксии.

Вывод к главе 1

В данной главе были рассмотрены основные режимы и принцип работы фотодиодов.

Были рассмотрены основные параметры фотодиодов, которые определяются выбранным материалом. Рассмотрена зависимость основных параметров фотодиодов от выбранного материала, а также выполнено

сравнение основных характеристик фотодиодов различных конструкций изготовленных из разных материалов.

Были рассмотрены типовые слои эпитаксиальных структур и зависимость конечных параметров фотодиодов от выбранных толщин слоев и концентраций примеси в этих слоях.

На основании рассмотренной литературы был выбран материал для изготовления эпитаксиальной структуры, арсенид галлия, поскольку обладает рядом преимуществ перед другими материалами, в частности перед кремнием. Также был разработан дизайн эпитаксиальной структуры для обеспечения параметров фотодиода согласно требованиям технического задания.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МАРШРУТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОДИОДА. МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФОТОДИОДА

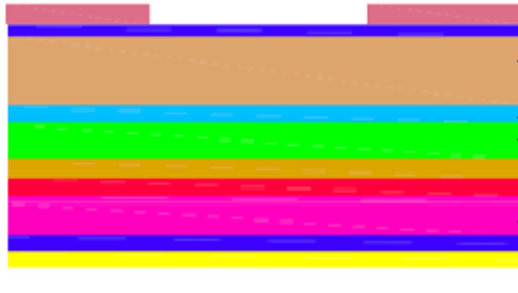
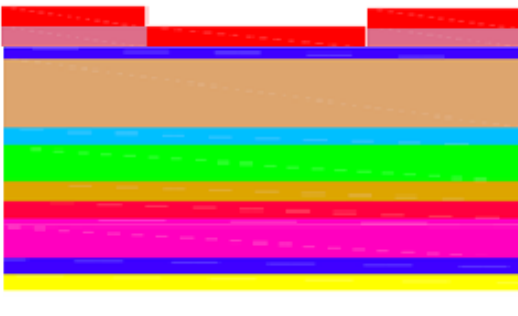
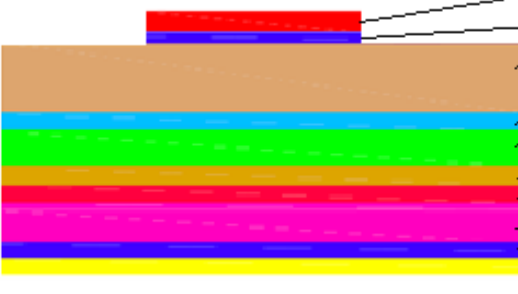
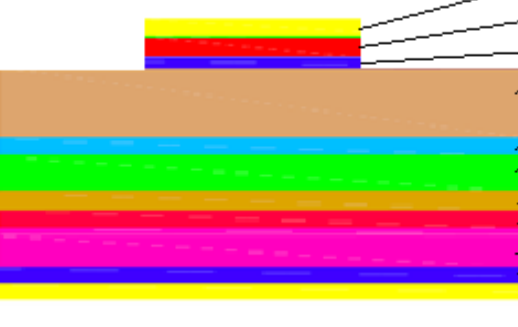
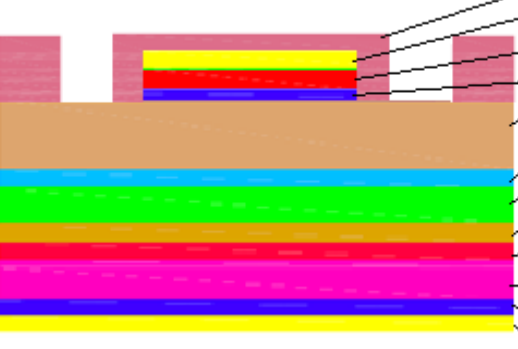
В данной главе рассмотрен технологический маршрут изготовления фотодиодного кристалла на основе разработанной эпитаксиальной структуры разработанной для обеспечения требований ТЗ на ИК-фотодиод.

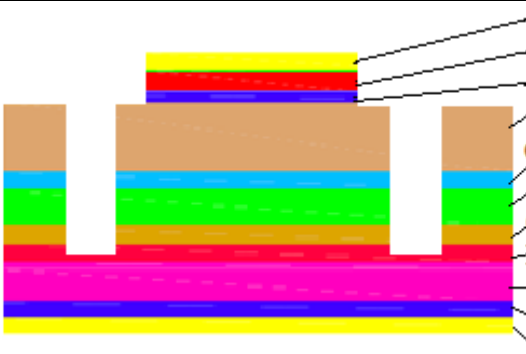
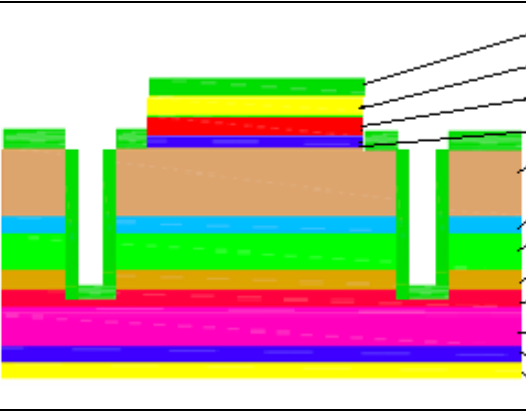
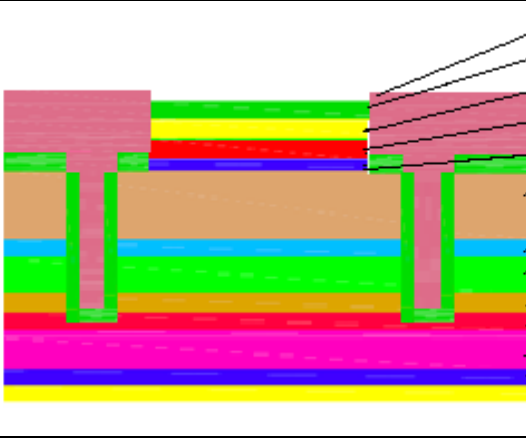
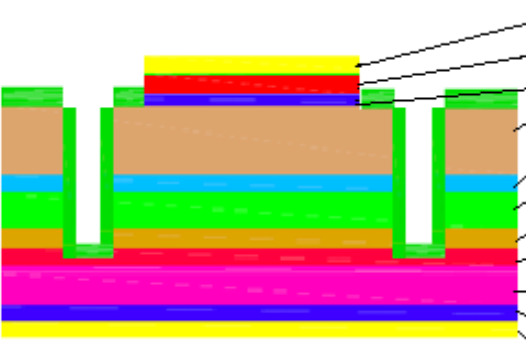
Представлены методики измерения основных параметров фотодиодов, вольт-амперных, вольт-фарадных, временных параметров, а также методики измерения чувствительности. Также в главе представлены схемы измерения и технические параметры измерительного оборудования, а также, разработанное для выполнения измерений оборудование и оснастка.

2.1 Технология изготовления фотодиода из полученной структуры

Для разработанной эпитаксиальной структуры был разработан технологический маршрут изготовления фотодиодных кристаллов, который представлен ниже.

	<ul style="list-style-type: none"> r+-слой(контактный) Широкозонное окно Обкладочный слой p i-слой(обедненный) Обкладочный слой n Буферный слой(n-GaAs) GaAs - подложка 	Подготовка эпитаксиальной структуры
	<ul style="list-style-type: none"> r+-слой(контактный) Широкозонное окно Обкладочный слой p i-слой(обедненный) Обкладочный слой n Буферный слой(n-GaAs) GaAs - подложка GeAu Au 	Напыление на поверхность подложки из GaAs слоя металлизации AuGe толщиной 0,35 мкм и отжиг при температуре 435 °C

	<p>ФРМ p⁺-слой(контактный) Широкозонное окно Обкладочный слой p i-слой(обедненный) Обкладочный слой n Буферный слой(n-GaAs) GaAs - подложка GeAu Au</p>	<p>Нанесение фоторезиста и формирование маски для формирования контакта к контактному p⁺-слою (ФЛГ-1).</p>
	<p>Контакт ФРМ p⁺-слой(контактный) Широкозонное окно Обкладочный слой p i-слой(обедненный) Обкладочный слой n Буферный слой(n-GaAs) GaAs - подложка GeAu Au</p>	<p>Напыление пленки ZnAu и Au толщиной 0,4 мкм</p>
	<p>Контакт p⁺-слой(контактный) Широкозонное окно Обкладочный слой p i-слой(обедненный) Обкладочный слой n Буферный слой(n-GaAs) GaAs - подложка GeAu Au</p>	<p>Удаление фоторезиста взрывом и отжиг при температуре 465 °С</p>
	<p>Контакт p⁺-слой(контактный) Широкозонное окно Обкладочный слой p i-слой(обедненный) Обкладочный слой n Буферный слой(n-GaAs) GaAs - подложка GeAu Au</p>	<p>Умощнение контакта к p⁺- слою и контакта к подложке Au толщиной 2 мкм и отжиг</p>
	<p>ФРМ Au Контакт p⁺-слой(контактный) Широкозонное окно Обкладочный слой p i-слой(обедненный) Обкладочный слой n Буферный слой(n-GaAs) GaAs - подложка GeAu Au</p>	<p>Создание ФРМ для травления мезы (ФЛГ-2)</p>

 <p>Au Контакт p+-слой(контактный) Широкозонное окно Обкладочный слой p i-слой(обедненный) Обкладочный слой n Буферный слой(n-GaAs) GaAs - подложка GeAu Au</p>	Травление мезы на глубину 15 мкм
 <p>SiO2 Au Контакт p+-слой(контактный) Широкозонное окно Обкладочный слой p i-слой(обедненный) Обкладочный слой n Буферный слой(n-GaAs) GaAs - подложка GeAu Au</p>	Защита открытых участков диэлектриком SiO_2 толщиной 200 нм
 <p>ФРМ SiO2 Au Контакт p+-слой(контактный) Широкозонное окно Обкладочный слой p i-слой(обедненный) Обкладочный слой n Буферный слой(n-GaAs) GaAs - подложка GeAu Au</p>	Формирование ФРМ для удаления диэлектрика с контакта
 <p>Au Контакт p+-слой(контактный) Широкозонное окно Обкладочный слой p i-слой(обедненный) Обкладочный слой n Буферный слой(n-GaAs) GaAs - подложка GeAu Au</p>	(Итоговая структура кристалла) Удаление ФРМ. Контроль параметров и резка на кристаллы

После завершения операций формирования кристаллов и выполнения проверок электрических параметров производится резка пластины на кристаллы, и последующий монтаж кристаллов в корпус [24].

Для полученных кристаллов ИК-фотодиодов был выбран корпус для поверхностного монтажа SMD 3528 (рисунок 2.1). Выбор корпуса для

поверхностного монтажа продиктован требованиями ТЗ на фотодиод. Корпус фотодиода для поверхностного монтажа должен обеспечивать беспрепятственное проникновение оптического излучения на всю поверхность кристалла. Корпус должен обеспечивать защиту от кристалла внешнего от внешнего воздействия, а также простоту и надежность монтажа кристалла в корпус. По этому, допускается установка прибора в любой другой корпус, обеспечивающий требуемые параметры.

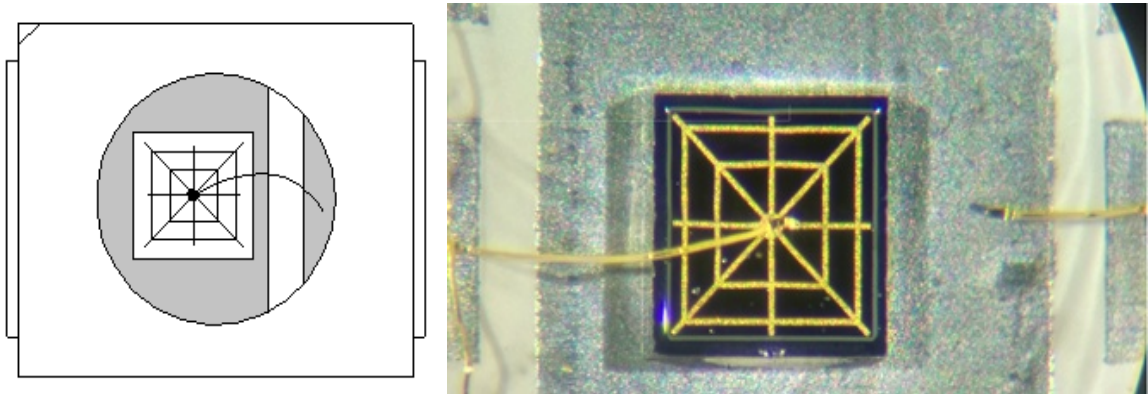


Рисунок 2.1 - Кристалл фотодиода, разваренный в корпусе SMD 3528

После монтажа фотодиодов в корпус, была выполнена плоская заливка фотодиодов специальным оптически прозрачным силиконом. После этого был произведен их монтаж методом пайки на специальные монтажные площадки, изготовленные из алюминия, (далее шайбы). Фотография фотодиода монтированного на шайбу представлена на рисунке 2.2:

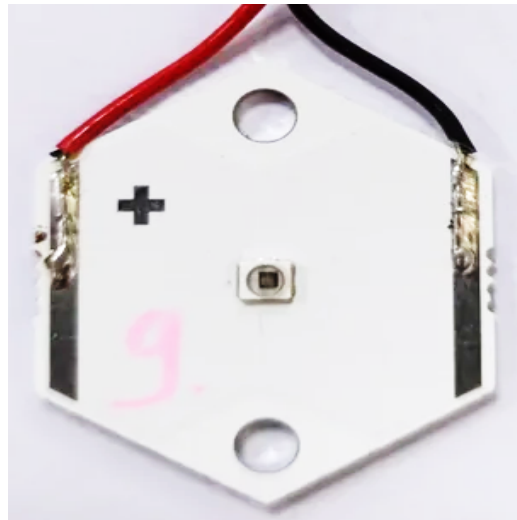


Рисунок 2.2 – Кристалл фотодиода в корпусе SMD 3528 монтированный на алюминиевую шайбу, обеспечивающую надежный электрический контакт

Монтаж диодов в корпуса и последующая их пайка на специальные шайбы требуется для того чтобы обеспечить стабильный и надежный электрический контакт во время проведения измерений параметров фотодиодов, а также для удобства проведения операций по измерению параметров фотодиодов.

2.1 Методика измерения ВАХ фотодиода

Согласно ТЗ необходимо выполнить измерение и построение прямой и обратной вольт-амперной характеристики (ВАХ) изготовленных образцов фотодиодов.

Методика измерения ВАХ фотодиода следующая:

- фотодиод включается в электрическую схему, представленную на рисунке 2.3

- подается напряжение с помощью ИП;

- фиксируется ток при помощи измерителя тока.

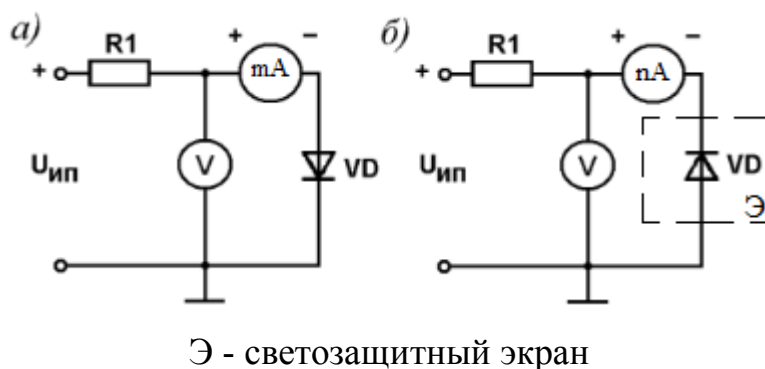


Рисунок 2.3 – Схема для снятия прямой (а) и обратной (б) ветвей ВАХ фотодиода

Согласно схеме, на фотодиод подается напряжение и фиксируется значение тока. При этом фотодиод изолирован от источников освещения.

Поскольку токи протекающие в фотодиоде имеют порядок мкА и нА, для проведения данных исследований необходимо использовать высокоточный измеритель тока. В данном случае используется двухканальный калибратор измеритель напряжения и силы тока *Keithley 2612*, технические характеристики которого представлены в таблице 2.1, который позволяет задавать напряжение и измерять силу постоянного тока [24 - 27]

Таблица 2.1 - Технические параметры калибратора измерителя напряжения и силы тока *Keithley 2612*

Измерение силы постоянного тока	
Предел измерений	Пределы допускаемой основной погрешности измерений, А [при температуре окружающего воздуха (23 ± 5) °С]
100 нА	$\pm(6 \cdot 10^{-4} I + 1 \cdot 10^{-10})$
1 мкА	$\pm(2,5 \cdot 10^{-4} I + 5 \cdot 10^{-10})$
10 мкА	$\pm(2,5 \cdot 10^{-4} I + 1,5 \cdot 10^{-9})$
100 мкА	$\pm(2 \cdot 10^{-4} I + 2,5 \cdot 10^{-8})$
1 мА	$\pm(2 \cdot 10^{-4} I + 2 \cdot 10^{-7})$
10 мА	$\pm(2 \cdot 10^{-4} I + 2,5 \cdot 10^{-6})$
100 мА	$\pm(2 \cdot 10^{-4} I + 2 \cdot 10^{-6})$

Продолжение таблицы 2.1

Воспроизведение напряжения постоянного тока	
Предел измерений	Пределы допускаемой основной погрешности измерений, В [при температуре окружающего воздуха (23 ±5) °С]
0,2	$\pm(0,0002 U + 0,000375)$
2	$\pm(0,0002 U + 0,000600)$
20	$\pm(0,0002 U + 0,005)$
200	$\pm(0,0002 U + 0,05)$

При измерении обратной ветви ВАХ фотодиода, выполняется измерение темнового тока фотодиода. Методика измерения ВАХ и темнового тока и оборудование соответствует требованиям, указанным в ГОСТ 17772-88[28].

2.2 Методика измерения ВФХ фотодиода

При работе в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах диоды обычно смещаются в обратном направлении с помощью сравнительно большого обратного напряжения, чтобы уменьшить время пролета носителей и снизить барьерную емкость перехода [29]

Измерение барьерной емкости и ее зависимости от напряжения позволяет определить толщины *p-n*-перехода и распределение концентрации примеси в нем. Важной особенностью такого метода является его высокая чувствительность и возможность его использования без повреждения полупроводникового прибора. Для начала необходимо разобраться, что же такое барьерная емкость и как она образуется. Поскольку в области *ni* *p*-носители заряда имеет разную работу выхода, то между этими областями возникает электрическое поле и контактная разность потенциалов. За счет действия электрического поля между областями *p* и *n* образуется тонкий обедненный (запорный) слой, а в областях *ni* *p*, образуются соответственно положительный заряд и отрицательный заряд, равные по величине. При

подаче напряжения на *p-n*-переход происходит изменение высоты потенциального барьера на величину приложенного напряжения, а также изменение электрического заряда областей. Таким образом, изменение напряжения приводит к изменению заряда в *p-n*-переходе, т.е. *p-n*-переход действует как емкость, которую называют барьерной емкостью.

Емкостные методы измерения применяют для определения концентрации легирующей примеси в активном слое, высоты потенциального барьера, толщины *p-n*-перехода. Для ее определения необходимо построить зависимость $1/C_{\delta}^2=f(U)$, если данная зависимость ложится на прямую, то считается что переход резкий и угол наклона этой прямой дает значение концентрации примеси, а пересечение данной прямой с осью напряжений дает значение контактной разности потенциалов. Когда зависимость $1/C_{\delta}^2=f(U)$, не ложится на прямую, то требуется построить зависимость $1/C_{\delta}^3=f(U)$.

Если зависимость $1/C_{\delta}^3=f(U)$ ложится на прямую, это говорит о том, что переход плавный и угол наклона дает значение градиента концентрации. Поскольку в данной работе измерения выполняются для прибора с резким переходом по этому, данная зависимость не строится [30].

Метод измерения вольт-фарадной характеристики позволяет определить такие параметры как контактная разность потенциалов (U_{κ}), концентрация примеси (N) и ее распределение ($N(x)$) в кристалле, а также размер области обеднения (x). Для этого необходимо произвести обработку полученных данных, зависимости барьерной емкости кристалла от напряжения. Для этого воспользуемся методикой расчета представленной в [30]

Измерив зависимость $1/C_{\delta}^2$, и получив прямую, наклон которой определяет значение концентрации примеси в *p-n*-переходе, можно определить эту концентрацию из формулы:

$$\left(\frac{1}{C_{\delta}}\right)^2 = \frac{2 \cdot (U_{\text{обп}} + U_{\kappa})}{q \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot N_0 \cdot S^2}, \quad (2.1)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума ($8,85 \cdot 10^{-14}$ Ф/см²);

ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды (для GaAs $\varepsilon = 13,1$);

q – заряд электрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл);

U_k – контактная разность потенциалов ($\approx 1,4$ В для GaAs);

$U_{обр}$ – поданное напряжение смещения фотодиода (В).

Выразив из данной формулы значение концентрации, получим:

$$N_0 = \frac{2}{q \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S^2 \cdot \tan(\text{накл})}, \quad (2.2)$$

где $\tan(\text{накл})$ – тангенс угла наклона зависимости $1/C^2$ ($1/(В \cdot \Phi^2)$);

Далее используя формулу 2.1 можно построить зависимость концентрации от ширины ОПЗ. Ширину ОПЗ можно рассчитать по формуле:

$$x = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{C_0}, \quad (2.3)$$

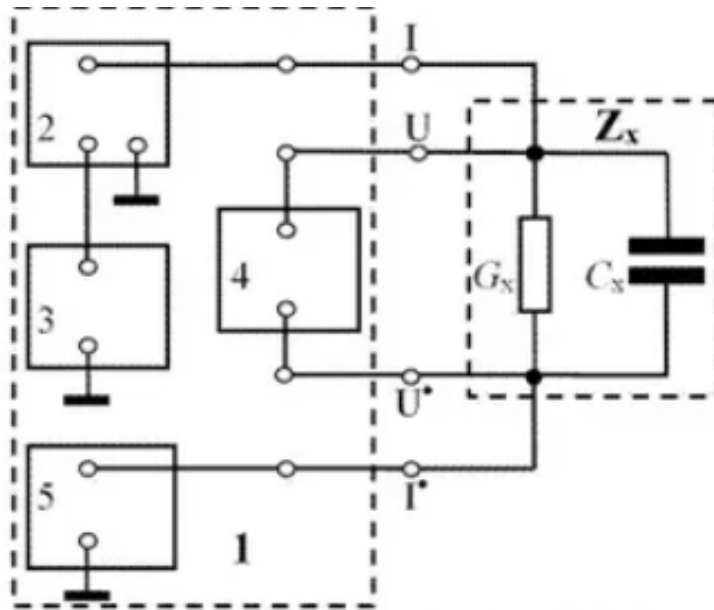
Формула для построения зависимости концентрации от ширины ОПЗ представлена ниже:

$$N_0(x) = \frac{2(U_{обр} + U_k)}{q \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S^2 \cdot \left(\frac{1}{C_0}\right)^2}, \quad (2.4)$$

Методика измерения ВФХ следующая:

- фотодиод подключают в электрическую схему (C_x) представленную на рисунке 2.4;
- подается синусоидальное (измерительное) напряжение с помощью генератора 2;
- подается постоянное напряжение смещения с помощью генератора 3 с заданной частотой;
- фиксируется значение емкости при заданной частоте синусоидального сигнала и напряжения смещения;
- изменяется напряжение смещения и фиксируется установившееся значение емкости.
- В случае если фотодиод помещен в корпус, производится измерение емкости корпуса без кристалла на заданной частоте измерительного сигнала

и полученный результат вычитают из результата измерения фотодиода в корпусе [28, 32].



- 1 – R, L, C измеритель (мост переменного тока с автобалансировкой);
 2 – генератор синусоидального напряжения; 3 – генератор постоянного напряжения;
 4 – микровольтметр, 5 – микроамперметр.

Рисунок 2.4 – Упрощенная схема измерения ВФХ фотодиода

В качестве измерителя емкости в данной работе использовался прибор Е7-20, технические характеристики которого представлены в таблице 2.2[32]

Таблица 2.2 - Технические характеристики измерителя иммитанса Е7-20

Наименование параметра	Значение
Диапазон измерения:	
Емкость, Ф	$10^{-15} - 1$
Индуктивность, Гн	$10^{-11} - 10^4$
Активное сопротивление, Ом	$10^{-5} - 10^9$
Проводимость, См	$10^{-11} - 10$
Модуль комплексного сопротивления, Ом	$10^{-5} - 10^9$
Реактивное сопротивление, Ом	$10^{-5} - 10^9$
Угол фазового сдвига	$-90,0^\circ - +90,0^\circ$

Продолжение таблицы 2.2

Добротность, фактор потерь	$10^{-4} - 10^4$
Ток утечки, А	$10^{-8} - 10^{-2}$
Базовая погрешность:	
L, C, R	$\pm 0,1 \%$
D, Q	$\pm 0,001\%$
Рабочие частоты (свыше 1975 фиксированных частот)	25 Гц - 1 МГц
Время одного измерения:	
Быстро, с	0,1
Норма, с	1
Уровни измерительного сигнала, В	0,04 - 1
Напряжение смещения:	
Внутреннее, В	0 - 40
Внешнее, В	0 - 120
Усреднение	за 10 и за 100единичных измерений

Методика измерения ВФХ и оборудование соответствует требованиям указанным в ГОСТ 17772-88.

2.3 Описание методики измерения чувствительности с помощью монохроматора и опорного фотодиода

Одним из основных параметров фотодиода является его спектральная чувствительность. Для ее определения существуют специальные установки, позволяющие подавать оптическое излучение определенной мощности на фотодиод и регистрировать фототок. После чего, строить зависимость спектральной чувствительности фотодиода.

Измерения следует проводить на установке, структурная схема которой приведена на рисунке 2.5

Метод измерения, согласно ГОСТ 17333-80 основан на сравнении спектральных чувствительностей исследуемого фотоэлемента с опорным приемником излучения, относительная спектральная чувствительность которого известна.

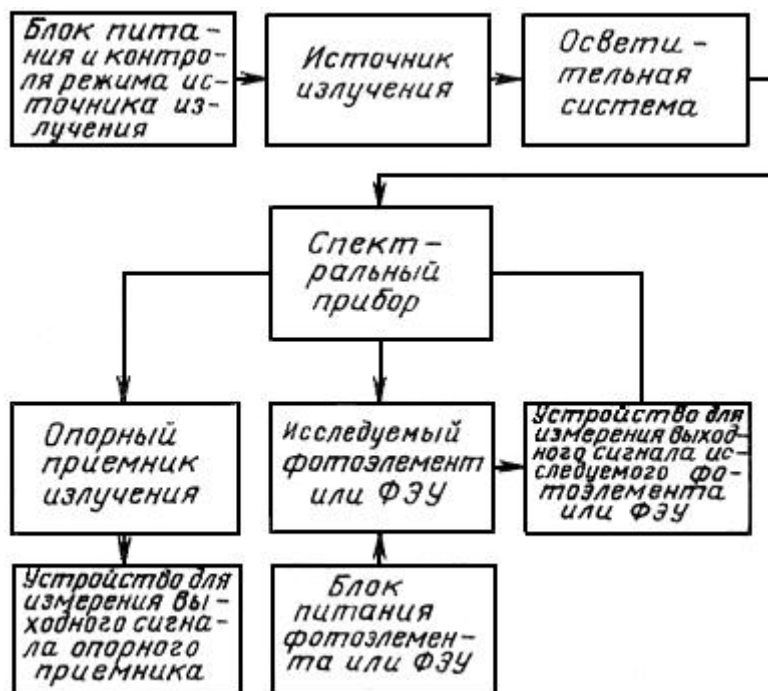


Рисунок 2.5 - Структурная схема установки для измерения относительной спектральной чувствительности

Источники питания источников излучения и измерительные приборы, контролирующие режим питания источников излучения, должны соответствовать требованиям ГОСТ 17616-82.

Источники излучения

При измерении спектральной чувствительности фотокатодов следует использовать источники излучения, имеющие сплошной спектр.

При работе с монохроматорами или аналогичными спектральными приборами следует применять лампы со светящим телом, имеющим форму, удобную для проецирования на входную щель (лента, прямая вертикальная спираль).

Если необходимо измерить чувствительность на длинах волн, излучаемых данным источником, то следует использовать источники излучения с линейчатым спектром.

Для работы в видимой и инфракрасной областях спектра (диапазон 360-1500 нм) в качестве источников излучения следует применять

ленточную лампу накаливания типа СИ-10-300у или прожекторную лампу с вертикальной спиралью типа ПЖ-70.

Осветительная система

Осветительная система фокусирует светящее тело источника излучения на входную щель монохроматора с помощью конденсора или линзы.

Для устранения рассеянного света следует использовать двойную монохроматизацию или вспомогательные светофильтры.

Спектральный прибор

Для выделения узкого спектрального интервала следует использовать двойные монохроматоры или аналогичные спектральные приборы.

Рассеянный свет в измеряемом диапазоне спектра не должен превышать 1%.

Опорный приемник излучения

В качестве приемников, принимаемых за опорные при измерении относительной спектральной чувствительности фотокатодов, следует применять тепловой приемник излучения - термоэлемент типа РТН-20С, с отклонением от не селективности не более 2% в используемом спектральном диапазоне.

Подготовка и проведение измерений

- фотоэлемент или ФЭУ устанавливают в светонепроницаемой камере у выходной щели монохроматора таким образом, чтобы поток излучения не выходил за пределы фотокатода;

- за выходной щелью монохроматора в светонепроницаемой камере устанавливают последовательно опорный и измеряемый приемники излучения и регистрируют показания соответствующего прибора, сменяя приемники либо на каждой длине волны, либо после прохождения всего спектрального диапазона.

- в зависимости от характера кривой измеряемой спектральной чувствительности измерения проводят с интервалом 5-20 нм в

ультрафиолетовой области и 10нм-30 нм в видимой и инфракрасной областях спектра;

- Полуширина спектрального интервала, выделяемого монохроматором, не должна превышать интервала 5нм-20 нм.

Обработка результатов измерения

- При использовании в качестве опорных неселективных приемников относительную спектральную чувствительность измеряемого фотокатода $S_{k \text{ отн}}(\lambda)$ определяют по формуле:

$$S_{k \text{ отн}}(\lambda) = \left(\frac{n_k(\lambda)}{n_0(\lambda)} \right) \div \left(\frac{n_k(\lambda)}{n_0(\lambda)} \right)_{\text{max}}, \quad (2.5)$$

где $n_k(\lambda)$ – выходной сигнал измеряемого фотоприемника;

$n_0(\lambda)$ – выходной сигнал опорного фотоприемника;

- При использовании в качестве опорных селективных приемников с известным значением относительной спектральной чувствительности относительную спектральную чувствительность измеряемого фотокатода определяют по формуле:

$$S_{k \text{ отн}}(\lambda) = \left(\frac{n_k(\lambda)}{n_0(\lambda)} \cdot S_{0 \text{ отн}} \right) \div \left(\frac{n_k(\lambda)}{n_0(\lambda)} \cdot S_{0 \text{ отн}} \right)_{\text{max}}, \quad (2.6)$$

где $S_{0 \text{ отн}}$ - относительная спектральная чувствительность опорного приемника.

- При использовании в качестве опорных селективных приемников в сочетании с люминесцирующими экранами относительную спектральную чувствительность измеряемого фотокатода определяют по формуле:

$$S_{k \text{ отн}}(\lambda) = \left(\frac{n_k(\lambda)}{n_0(\lambda)} \cdot \lambda \right) \div \left(\frac{n_k(\lambda)}{n_0(\lambda)} \cdot \lambda \right)_{\text{max}}, \quad (2.7)$$

Показатели точности измерения

Среднее квадратическое отклонение погрешности измерения относительной спектральной чувствительности фотокатодов в видимой области спектра (380-780 нм) находится в интервале $\pm 10\%$, в ближней инфракрасной области (780-1200 нм) - $\pm 12\%$, в ближней ультрафиолетовой области (220-380 нм) - $\pm 16\%$ [33].

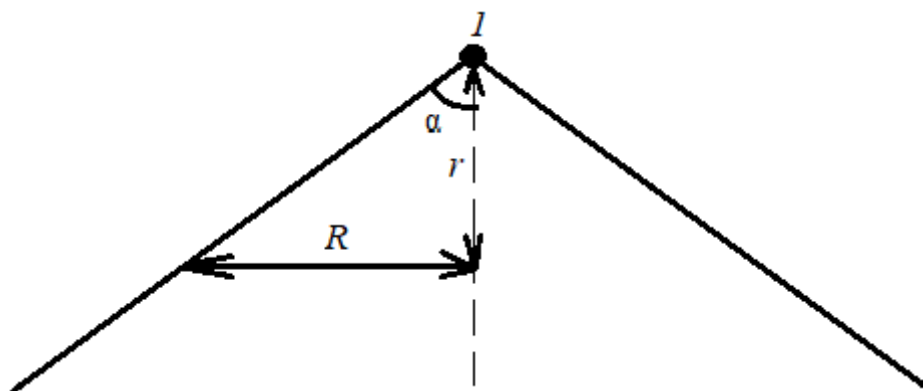
2.4 Описание методики измерений дискретным способом

В основу методики измерения спектральной чувствительности положен принцип распространения оптического излучения в пространстве.

Согласно законам оптики, мощность излучения (P_e) уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния (r^2) от источника излучения.

Для проведения данного измерения необходимо измерить мощность светодиода, угол распространения его излучения и длину волны этого излучения, все измерения необходимо проводить при неизменном токе светодиода.

Распространение излучения в пространстве показано на рисунке 2.6:



I – светодиод, как точечный источник излучения; α – угол распространения излучения от источника света; R – радиус основания конуса на которую падает оптическая мощность; r – Расстояние между фотодиодом и светодиодом.

Рисунок 2.6 - Схема распространения оптического излучения согласно законам оптики

Поскольку мощность оптического излучения, от точечного источника распространяясь в пространстве, образует конус, площадь основания этого конуса определяется углом α и расстоянием r , то энергетическая освещенность основания составит:

$$E_e = P_e \cdot \frac{1}{\pi \cdot R^2} \quad (2.8)$$

При этом радиус R определяется как:

$$R = r \cdot \tan(\alpha),$$

Выразив энергетическую освещенность основания конуса через расстояние r получим:

$$E_e = P_e \cdot \frac{1}{\pi \cdot r^2 \tan(\alpha)^2},$$

В формуле присутствует безразмерная составляющая, которую обозначим k_α :

$$k_\alpha = \pi \cdot \tan(\alpha)^2$$

Тогда энергетическая освещенность определяем как:

$$E_e = P_e \cdot \frac{1}{k_\alpha \cdot r^2},$$

В случае, когда r , величина переменная энергетическая освещенность определяется как:

$$E_e(r) = P_e \cdot \frac{1}{k_\alpha \cdot r^2}, \quad (2.9)$$

Тогда мощность излучения, которая падает на фотодиод определяется по формуле:

$$P_{e\phi}(r) = P_e \cdot \frac{1}{k_\alpha \cdot r^2} \cdot A_{\phi\text{д}}, \quad (2.10)$$

где $A_{\phi\text{д}}$ – площадь фотодиода.

Поскольку фототок I_ϕ , возникающий в фотодиоде под воздействием оптического излучения P_e , будет определяться мощностью излучения поглощенной фотодиодом $P_{e\phi}$, и чувствительностью фотодиода S_ϕ как:

$$I_\phi = P_{e\phi} \cdot S_\phi,$$

То зависимость фототока от расстояния между фотодиодом и светодиодом $I_\phi(r)$, можно найти, если подставить вместо $P_{e\phi}$ зависимость $P_{e\phi}(r)$:

$$I_\phi(r) = P_{e\phi}(r) \cdot S_\phi = \frac{P_e}{k_\alpha \cdot r^2} \cdot A_{\phi\text{д}} = \left(\frac{P_e \cdot A_{\phi\text{д}} \cdot S_\phi}{k_\alpha} \right) \cdot \frac{1}{r^2} \quad (2.11)$$

Если построить зависимость фототока от обратного квадрата расстояния, то получим прямую, угол наклона которой характеризует:

$$\tan(\text{накл}) = \frac{\Delta I_{\phi}(r)}{\Delta \frac{1}{r^2}} = \frac{P_e \cdot A_{\text{фд}} \cdot S_{\phi}}{k_{\alpha}}, \quad (2.12)$$

Тогда, чувствительность фотодиода можно определить как:

$$S_{\phi} = \frac{\tan(\text{накл}) \cdot k_{\alpha}}{P_e \cdot A_{\text{фд}}}, \quad (2.13)$$

Методика проведения измерений фототока от расстояния между фотодиодом и светодионом, для определения чувствительности фотодиода, к источникам с различными длинами волн представлена ниже:

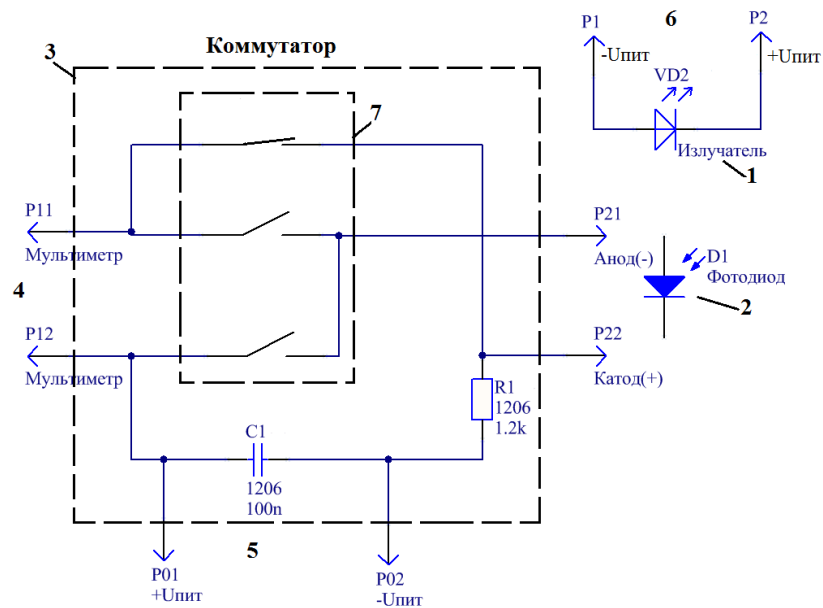
- 1) Закрепить в измерительной установке светодиод и подключить к нему источник питания;
- 2) Закрепить в измерительной установке светодиод и подключить его к коммутатору;
- 3) Подключить цифровой мультиметр для измерения тока в разъемы коммутатора;
- 4) Подключить источник питания к коммутатору;
- 5) Подать на светодиод напряжение и задать ток, в данном случае 50 мА;
- 6) Включить цифровой мультиметр в режим измерения тока;
- 7) Подать на фотодиод обратное смещение, в данном случае равное 5 В, расположить фотодиод на минимальном расстоянии от излучателя и корректируя расположение фотодиода относительно светодиода, добиться максимальной величины фототока (регистрируемого цифровым мультиметром);
- 8) Выполнить измерение фототока в точке 0 мм, увеличить расстояние между фотодиодом и светодиодом на 1 мм;
- 9) Измерить значение фототока;
- 10) Увеличить расстояние между фотодиодом и светодиодом на 1 мм и измерить значение фототока;

- 11) Шаги 9-10 повторять до тех пор, пока расстояние между излучателем и приемником не будет равно 10 см;
- 12) Далее заменить фотодиод и повторить пункты 1-11, для каждого из фотодиодов;
- 13) Измерив, все фотодиоды заменить светодиодами и повторить измерения;
- 14) После всех измерений произвести обработку полученных результатов;
- 15) Определить чувствительность фотодиода формуле 2.9.

Для выполнения измерений по данной методике было разработано измерительное оборудование (коммутатор) и оснастка (прибор для изменения расстояния между светодиодом и фотодиодом)[33].

Для того чтобы выполнить измерение зависимости фототока от расстояния между излучателем и приемником излучения была изготовлена специальная установка позволяющая изолировать излучатель и приемник от источников внешнего освещения и изменять расстояние между источником и приемником с шагом 1 мм. Относительная погрешность измерения расстояния равна погрешности измерительной шкалы и составляет 0,1 мм/деление или $\delta_2 = 10 \%$.

Для выполнения измерений параметров и характеристик фотодиодов была изготовлена дополнительная оснастка, обеспечивающая удобство коммутации электрических схем измерения фотодиодов. Так, для подачи напряжения смещения на фотодиод и измерения фототока, был изготовлен коммутатор, позволяющий без труда коммутировать электрические схемы измерения параметров фотодиодов. Электрическая схема коммутатора представлена на рисунке 2.7



1 –излучатель; 2 – ФД;3 – коммутатор;

4 – мультиметр цифровой (в режиме амперметра);

5 – источник питания постоянного тока программируемый;

6 – калибратор-измеритель напряжения и силы тока;

7 - Ключ (режим измерения тока; режим измерения напряжения).

Рисунок 2.7 – Электрическая схема коммутатора для проведения измерений фотодиодов

Погрешность измерения тока с помощью цифрового мультиметра в режиме измерения тока составляет $\delta_3 = 0,07\%$

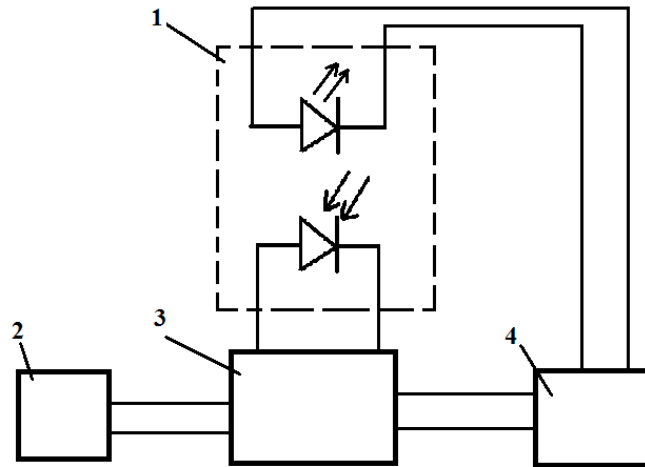
Погрешность задания напряжения обратного смещения фотодиода составляет $\delta_4 = 0,75\%$.

Таким образом суммарная погрешность измерения чувствительности складывается из перечисленных выше погрешностей приборов составляет:

$$\sigma = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2} = \sqrt{0,05^2 + 0,1^2 + 0,0007^2 + 0,0075^2} = 0,11$$

Таким образом, погрешность измерения чувствительности фотодиода составляет 11 %.

Для измерения зависимости фототока от расстояния между источником и приемником излучения исследования была собрана установка, схема которой приведена на рисунке 2.8.

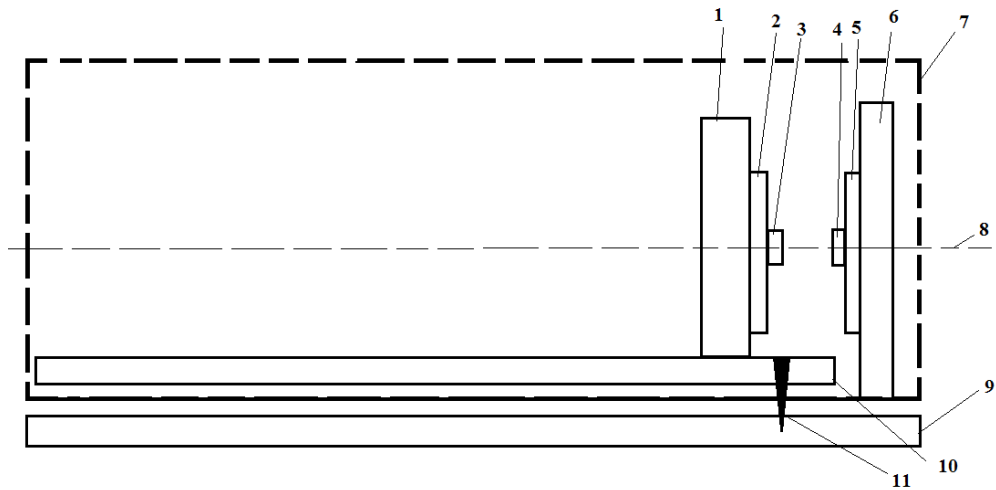


1 - прибор для изменения расстояния между излучателем и фотоприемником;

2 - цифровой мультиметр; 3 - коммутатор; 4 - блок питания.

Рисунок 2.8 – Схема установки для проведения измерений зависимости чувствительности фотодиода от расстояния до излучателя

Для данной установки была изготовлена площадка-держатель для шайбы, с фотодиодом. А также площадка-держатель шайбы со светодионом. Для выполнения совмещения оптической оси фотодиода и светодиода, шайба со светодиодом крепится неподвижно, а шайбу с фотодиодом возможно перемещать, для совмещения на одной оптической оси источника излучения и приемника. На рисунке 2.9 приведена схема прибора для изменения расстояния между излучателем и приемником излучения:



- 1 - подвижный держатель шайбы; 2 - шайба;
 3 - фотодиод в корпусе SMD 3528; 4 - светодиод в корпусе SMD 5050;
 5 - шайба; 6 - неподвижный держатель шайбы; 7 - корпус прибора;
 8 - оптическая ось; 9 - шкала измерения расстояния;
 10 - устройство перемещения подвижного держателя шайбы;
 11 - указатель положения фотодиода.

Рисунок 2.9 - Схема прибора для изменения расстояния между излучателем и фотоприемником

Внешний вид собранной установки измерения чувствительности представлен на рисунке 2.10:

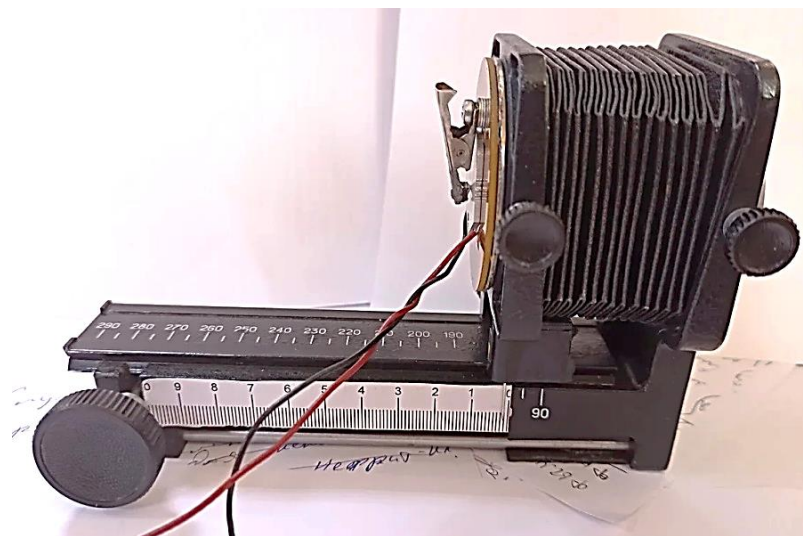


Рисунок 2.10 - Фотография прибора для изменения расстояния между излучателем и фотоприемником

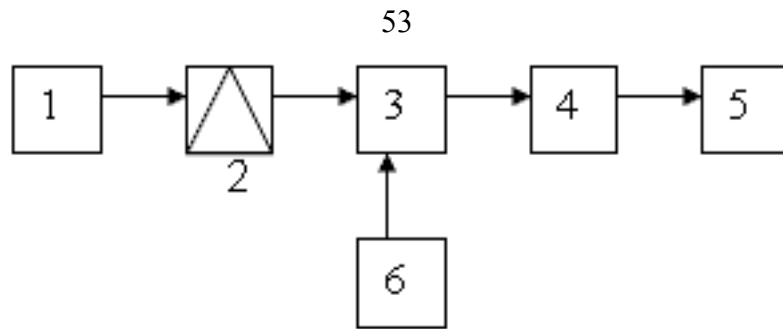
Корпус прибора (7) обеспечивает защиту системы (излучатель - фотоприемник) от воздействия внешних источников излучения, также он обеспечивает поглощение излучение светодиода, которое распространяется в пространство (не засвечивает фотодиод). Указатель положения фотодиода (11) перемещается вместе с фотодиодом по оптической оси, благодаря устройству перемещения (10).

2.5 Методика измерения частотных и временных характеристик фотодиода

Для проведения измерений временных характеристик была использована методика, приведенная в ГОСТ 17772—88.

Согласно данной методике, для определения частотных характеристик фотоприемников применяют установки, структурные схемы которых представлены на рисунке 2.11, а, б.

Установка должна иметь селективный измерительный тракт, резонансная частота которого может перестраиваться в необходимом диапазоне частот. В установках, предназначенных только для определения частотной характеристики интегральной чувствительности, допускается применять широкополосный усилитель. Устанавливая частоту модуляции потока излучения и резонансную частоту измерительного тракта, соответствующими определёнными значениями внутри исследуемого диапазона, измеряют напряжение (ток) шума $U_w(I_w)$ и напряжение (ток) фотосигнала $U_c(I_c)$. Для определения частотной характеристики интегральной чувствительности на установке, выполненной по схеме рисунка 2.11, б перестраивается по частоте только модулятор [28, 34].



1 - источник излучения; 2 - модулятор; 3 - фотоприемник;
 4 -усилительное устройство; 5 - регистрирующее устройство;
 6 - источник питания фотоприемника.

Рисунок 2.11 - Структурная схема установки для определения временных характеристик

Источник излучения (модулятор) должен формировать трапецеидальные импульсы излучения.

Время нарастания ($t_{0,1-0,9}$) или время спада ($t_{0,9-0,1}$) импульса потока излучения в секундах должно удовлетворять условию:

$$t_{0,1-0,9} \leq 0,3 t; t_{0,9-0,1} \leq 0,3 t,$$

где t - минимальное значение собственной постоянной времени фотоприемника, с, указанное в ТУ на фотоприемник конкретного типа.

Время нарастания и спада импульса потока излучения следует проводить по формулам:

$$\tau_{0,1-0,9} = \sqrt{\tau_{0,1-0,9\text{изм}}^2 - \tau_{0,1-0,9\text{пот}}^2}, \quad (2.12)$$

$$\tau_{0,9-0,1} = \sqrt{\tau_{0,9-0,1\text{изм}}^2 - \tau_{0,9-0,1\text{пот}}^2}, \quad (2.13)$$

где $t_{0,1-0,9 \text{ изм}}$, $t_{0,9-0,1 \text{ изм}}$ – измеренное значение времени нарастания и времени спада переходной характеристики;

На рисунке 2.12 наглядно представлено определение времени нарастания и спада переходной характеристики:

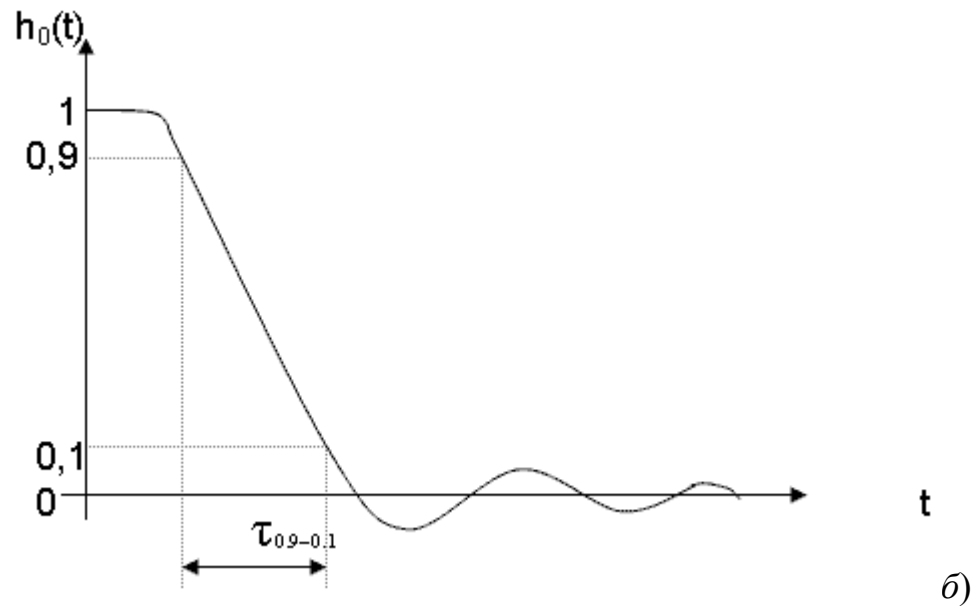
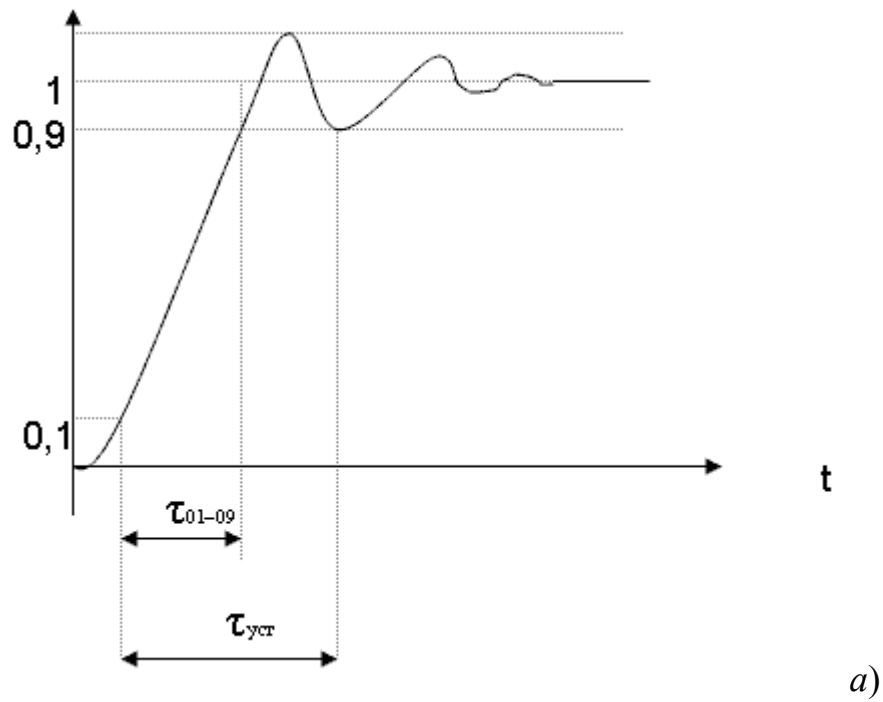


Рисунок 2.12 - Переходная характеристика фотоприемника, (а) прямая, (б) обратная

Методика измерения временных характеристик приведена ниже:

На фотоприемник подают импульсный поток излучения и с помощью регистрирующего прибора регистрируют фотосигнал испытуемого фотоприемника.

При помощи отметок времени или масштаба развёртки на экране осциллографа определяют собственную постоянную времени по уровню 0,63 от максимального значения, время нарастания и время спада по уровню 0,1 – 0,9 (0,9 – 0,1)

Вывод к главе 2

В данной главе был рассмотрен технологический маршрут изготовления фотодиодного кристалла на основе разработанной эпитаксиальной структуры разработанной для обеспечения требований ТЗ на ИК-фотодиод.

Были представлены методики измерения основных параметров фотодиодов, вольт-амперных, вольт-фарадных, временных параметров, а также методики измерения чувствительности. Для измерения чувствительности фотодиода была разработана методика измерения дискретным способом, обеспечивающая погрешность измерения чувствительности 11%.

Также в главе были представлены схемы измерения и технические параметры измерительного оборудования, а также, разработанное для выполнения измерений оборудование и оснастка.

ГЛАВА 3 ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ИК-ФОТОДИОДОВ

3.1 Исследование ВАХ фотодиода

Для построения ВАХ фотодиода, было измерено 10 фотодиодов. Результаты измерений для всех приборов представлены в виде одной усредненной кривой, рисунок 3.1 для прямой ветви ВАХ, рисунок 3.2 для обратной ветви ВАХ [24 - 28].

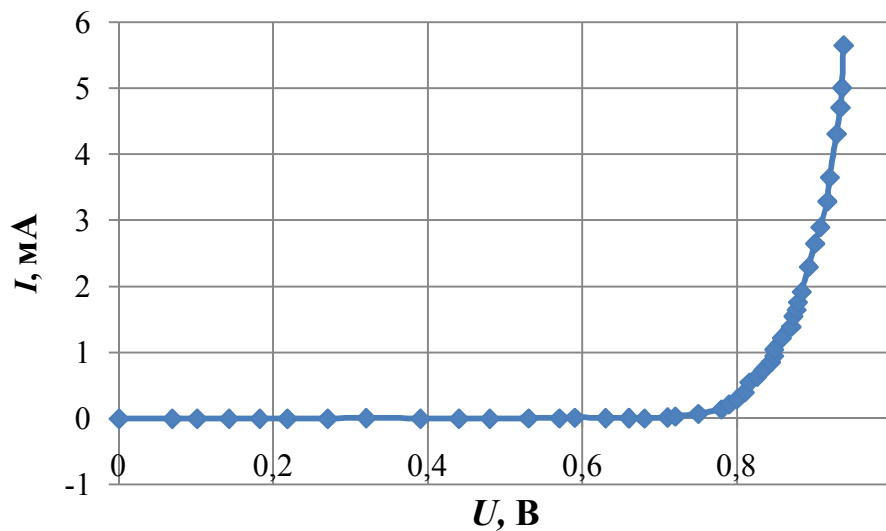


Рисунок 3.1 - Прямая вольт-амперная характеристика фотодиода

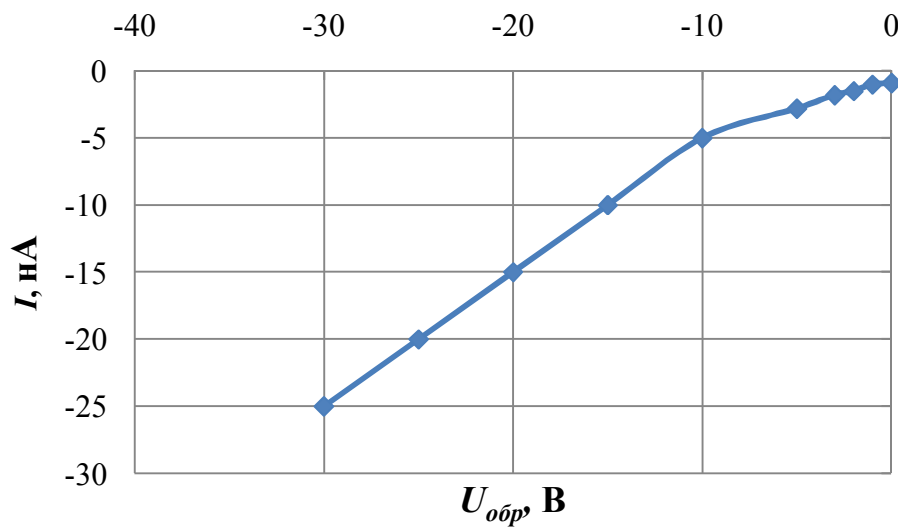


Рисунок 3.2 - Обратная вольт-амперная характеристика фотодиода

Из рисунка 3.2 видно, что пробой фотодиода отсутствует даже при подаче обратного смещения 30 В., следовательно, по параметру пробивное напряжение, он превышает 20 В указанных в ТЗ, а значит, фотодиод по данному параметру соответствует требованиям ТЗ. Для наглядности, измеренные значения темнового тока представлены в таблице 3.1:

Таблица 3.1 - Значение темнового тока при подаче обратного смещения

$U_{обр}, В$	0	1	2	3	5	10	15	20	25	30
$I, нА$	0,9	1	1,5	1,8	2,8	5	10	15	20	25

Из таблицы 3.1 видно, что значение темнового тока фотодиода составляет 5 нА, при смещении 10 В, следовательно по данному параметру фотодиод удовлетворяет требованиям ТЗ, в котором указано что данный параметр не должен превышать величины 5 нА.

3.2 Исследование ВФХ фотодиода

Зная общую теорию измерения емкостных параметров полупроводниковых приборов. И методику измерения ВФХ фотодиодов. Были подготовлены образцы кристаллов в корпусе, смонтированные на алюминиевую шайбу.

Поскольку кристаллы установлены в корпус и смонтированы на шайбу, необходимо исключить паразитную составляющую емкости, которая складывается из емкостей корпуса, шайбы и соединительных проводов. Для этого была измерена паразитная емкость на частоте 1 МГц. Она составила 66 пФ. После измерения барьерной емкости кристалла в корпусе при подаче обратного смещения кристалл в диапазоне от 0 В до 35В и исключения из результата измерений значения паразитной емкости (корпуса шайбы и соединительных проводов), была построена зависимость емкости кристалла

от поданного напряжения смещения на частоте измерения 1 МГц, рисунок 3.3

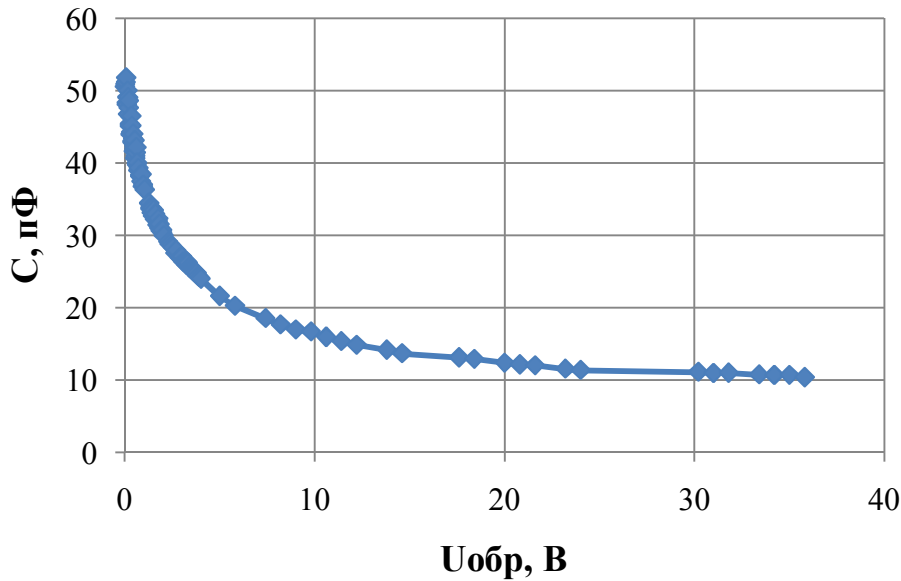


Рисунок 3.3 - ВФХ фотодиодного кристалла площадью 1,25мм²

Из зависимости видно, что с увеличением напряжения происходит резкое снижение величины барьерной емкости и затем ее стабилизация после смещения в 20 В. Также из зависимости видно, что на частоте измерения 1 МГц емкость кристалла при обратном смещении 10 В, составляет 17 пФ.

Согласно техническому заданию емкость кристалла не должна превышать 20 пФ на частоте измерения 1 МГц, измеренное значение составляет 17 пФ, следовательно, по данному параметру кристалл удовлетворяет требованиям ТЗ.

Согласно методике расчета, необходимо выполнить расчет отношения $(1/C_{\phi})^2$ и построение зависимости $(1/C_{\phi})^2 = f(U_{обр})$ и определения характера изменения примеси в кристалле (рисунок 3.4). В случае равномерного распределения примеси по глубине слоя данная зависимость будет иметь линейный вид [29, 30].

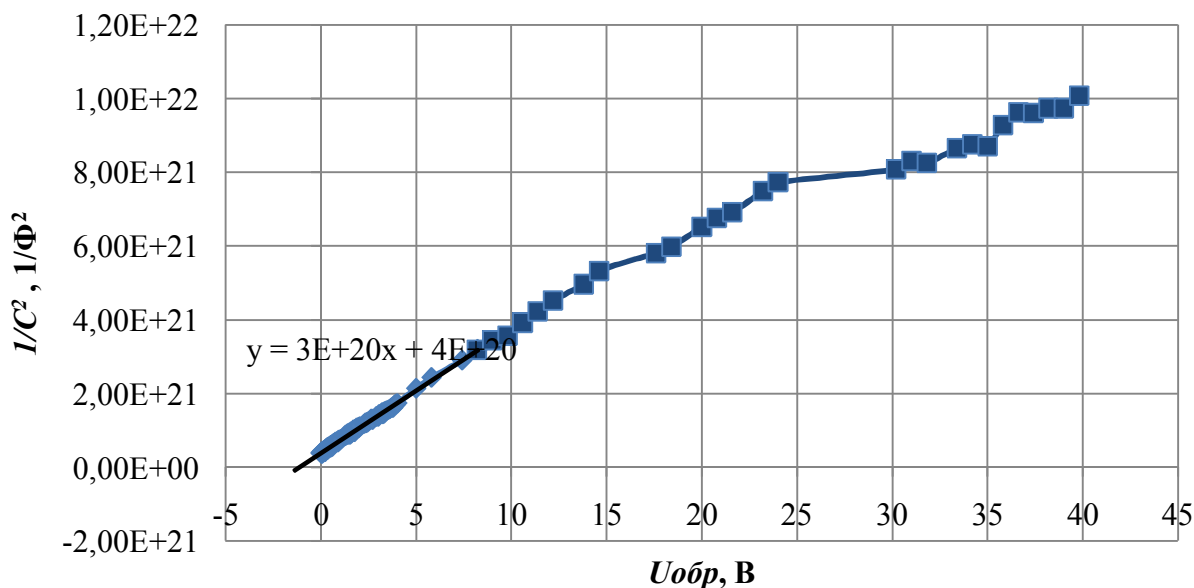


Рисунок 3.4 - Зависимость $(1/C_{\bar{\sigma}})^2$ от напряжения смещения

Поскольку полученная зависимость $(1/C_{\bar{\sigma}})^2 = f(U_{\text{обр}})$ укладывается на прямую (линейна) в диапазоне обратного напряжения от 0 В до 15 В, это говорит о резком характере изменения примеси в p - n -переходе. По этой причине, как сказано выше, наклон этой прямой определяется значением концентрации примеси.

После 15 В обратного смещения (см. рис. 3.4) происходит изменение емкости которое вызвано изменением концентрации примеси в p - n -переходе. Для того чтобы определить концентрацию примеси необходимо подставить значение наклона в формулу 2.2

$$N_0 = \frac{2}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 13 \cdot (1,25 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 3 \cdot 10^{20}} = 2,36 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3},$$

Также из полученной зависимости (см. рис. 3.4) можно определить контактную разность потенциалов, если продолжить прямую до пересечения с осью напряжений.

Таким образом, величина контактной разности потенциалов составляет $U_K = 1,35$ эВ, что также согласуется с теорией и справочной величиной для $GaAs$ (1,4эВ).

Далее используя рассчитанные значения $(1/C_0)^2$, было рассчитано значение концентрации примеси в p - n -переходе (N_0), в зависимости от приложенного напряжения смещения, с помощью формулы 2.4

$$N_0(x) = \frac{2 \cdot (0 + 1,35)}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 13 \cdot (1,25 \cdot 10^{-2})^2 \cdot \left(\frac{1}{5 \cdot 10^{-11}}\right)^2}, = 2,59 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$$

Далее был произведен расчет ширины области объемного заряда p - n -перехода в зависимости от приложенного напряжения с помощью формулы 2.3

$$x = \frac{8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 13 \cdot 1,25 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-11}} = 2,88 \text{ мкм},$$

Далее, используя рассчитанные значения концентрации примесей p - n -переходе и рассчитанные значения ширины области обеднения, была построена зависимость концентрации примеси в p - n -переходе от ширины ОПЗ, $N_0(x)$, рисунок 3.5:

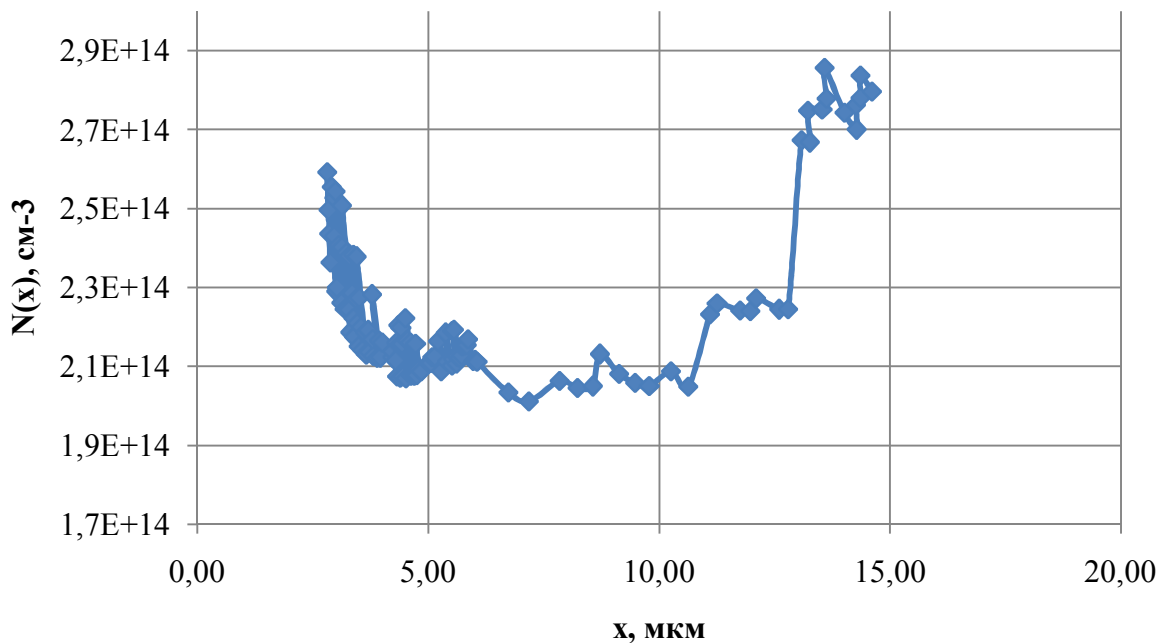


Рисунок 3.5 - Зависимость концентрации примеси в p - n -переходе от ширины области обеднения $N_0(x)$

Из рисунка 3.5 видно, что концентрация примеси в *p-n*-переходе составляет порядка 10^{14} см^{-3} , что согласуется с паспортными значениями разработанной структуры. Кроме того из рисунка 3.5 видно, что в области обедненного слоя (в диапазоне от 3 мкм до 12 мкм) концентрация примеси распределена довольно однородно, значение концентрации обедненного *i*-слоя, согласно результатам исследования составляет порядка $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, точно такое же значение указано в паспорте эпитаксиальной структуры (см. табл. 1.4).

Полученный результат исследования говорит о соответствии глубины залегания обедненного *i*-слоя и концентрации примеси в нем, с паспортом эпитаксиальной структуры.

3.3 Измерение абсолютной чувствительности дискретным способом

Поскольку методика измерения абсолютной чувствительности фотодиодов является довольно сложной задачей. Поскольку предполагает наличие специального оборудования, а именно, источника монохроматического излучения с возможностью изменения длины волны данного излучения и опорного фотоприемника, с известной чувствительностью. Требуется находить решение поставленных задач. Поскольку одним из основных параметров фотодиодов является абсолютная спектральная чувствительность, данный параметр необходимо определить.

В связи с отсутствием возможности использования специализированного измерительного оборудования, была разработана методика измерения абсолютной чувствительности фотодиодов дискретным способом, основанная на принципе распространения оптического излучения (света) в пространстве. Поскольку известно, что мощность света источника излучения, распространяющаяся в пространстве, обратно пропорциональна квадрату расстояния до него (закон обратных квадратов). Следовательно, зная мощность источника излучения и расстояние до источника излучения,

можно определить мощность на заданном расстоянии. В нашем распоряжении имеются монохроматические источники излучения (светодиоды) оптические параметры которых возможно измерить[35].

В качестве измеряемых оптических параметров выступала мощность излучения светодиодов при заданном токе и длина волны излучения светодиода, а так же угол распространения излучения. Данное измерение было выполнено на калиброванном измерительном оборудовании. Для измерения мощности излучения использовался измерительный комплекс IS-2 (далее комплекс), предназначенный для измерения светового потока, спектральной плотности потока излучения, координат цветности, коррелированной цветовой температуры различных источников света. Комплекс состоит из спектрометра CAS-120-151, фотометрического шара ISP500-100, персонального компьютера. Спектрометр CAS-120-151 предназначен для параметров спектра в диапазоне длин волн от 380 нм до 830 нм с абсолютной погрешностью измерения мощности излучения $\delta_1 = \pm 5 \%$. Длина волны излучения, с помощью данного комплекса, определяется без погрешности.

Таким образом, были подготовлены 8 светодиодов, с различной длиной волны, у которых были измерены их оптические параметры. Измеренные параметры светодиодов представлены в таблице 3.2

Таблица 3.2 – Параметры светодиодов для проведения измерений на спектральную чувствительность фотодиодов

Светодиод, №	Длина волны, нм	Ток светодиода, мА	Мощность излучения при заданном токе, мВт	Угол распространения излучения, °
№1	875	50	18	120
№2	863	50	41	120
№3	750	50	25	120
№4	695	50	39	120
№5	620	50	37	120
№6	592	50	16	120
№7	523	50	38	120
№8	457	50	87	120

Данные светодиоды помещены в корпус *SMD 5050* и залиты силиконом для защиты от внешнего воздействия. За счет плоской заливки силиконом, светодиоды обладают углом распространения оптического излучения 120 градусов. Далее, согласно методике, описанной в разделе 2.4 настоящей работы, было подготовлено и измерено 10 фотодиодов изготовленных на одной пластине. Результат измерения зависимости фототока от расстояния между источником и приемником излучения представлен на рисунке 3.6

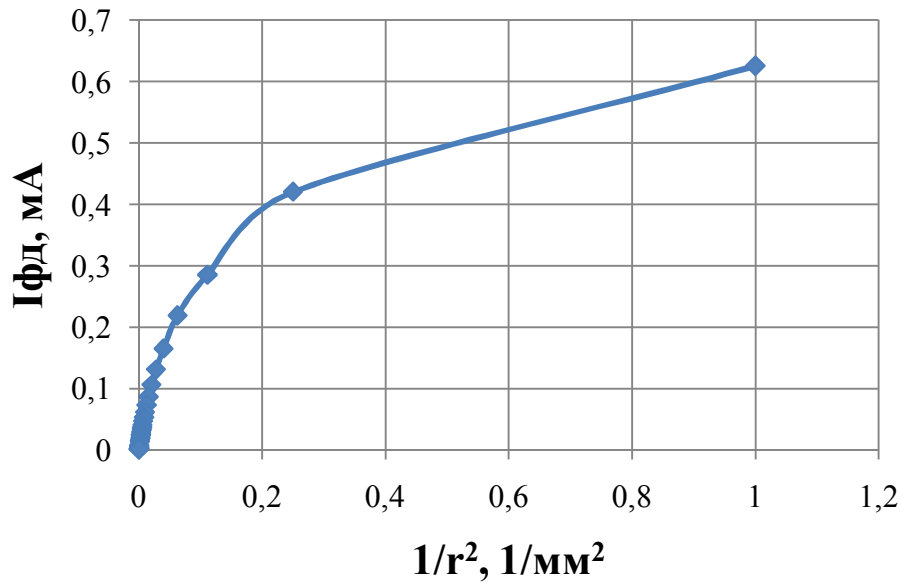


Рисунок 3.6 - Зависимость фототока от обратного квадрата расстояния ($1/r^2$) между фотодиодом и светодионом на длине волны 863нм

Из рисунка 3.6 видно, что зависимость не линейна. Данный результат можно объяснить тем, что на малых расстояниях между излучателем и приемником излучения, зависимость не линейна. Вероятнее всего такое поведение зависимости обусловлено влиянием размерного эффекта на фотодиод. Т.е. закон обратных квадратов нельзя применять, поскольку размер источника и приемника излучения сравнимы, следовательно, светодиод не является точечным источником. Если обеспечить расстояние, между, излучателем и приемником в 40 раз больше размеров излучателя, при условии что размеры источника и приемника близки, то зависимость будет иметь линейных характер, поскольку светодиод будет являться точечным источником излучения, рисунок 3.7.

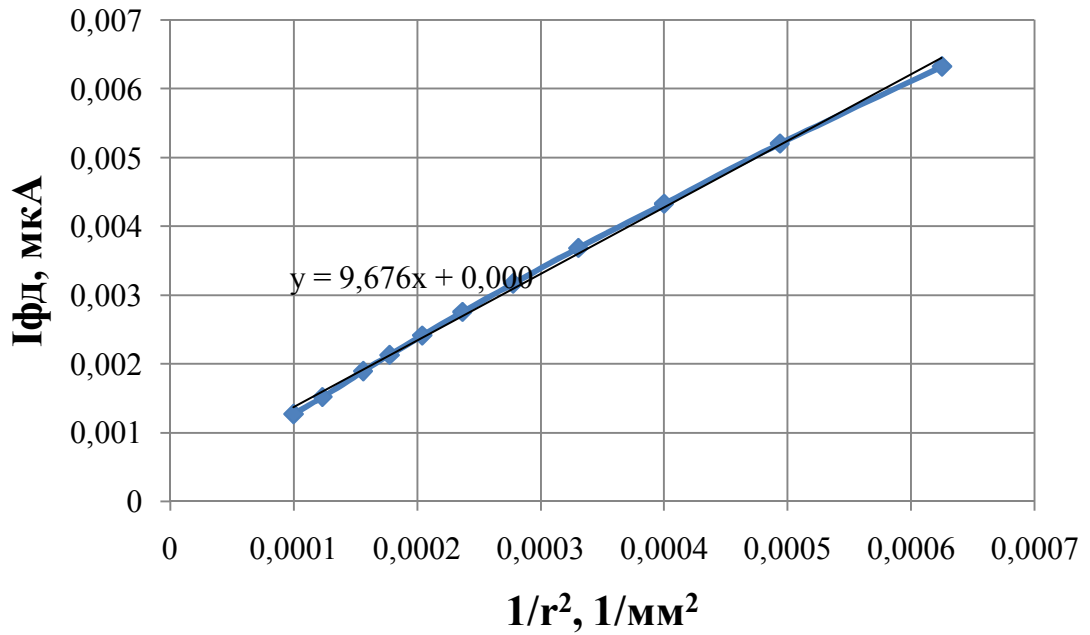


Рисунок 3.6 - Зависимость фототока от обратного квадрата расстояния ($1/r^2$) между фотодиодом и светодионом на длине волны 863нм

Следовательно, согласно методике расчета можно определить чувствительность фотодиода к данной длине волны. Для этого необходимо воспользоваться формулой 2.13 и подставить в нее известные значения.

$$S_{\text{ф}} = \frac{9,67 \text{ А} \cdot \text{мм}^2 \cdot 9,42}{41 \text{ мВт} \cdot 1,254 \text{ мм}^2} = 1,7 \text{ А/Вт}$$

Аналогичным образом было проведено определение чувствительности фотодиода к другим длинам волн. Измеренные значения фототока для расчета и результаты расчетов чувствительности представлены в таблице 3.3

Таблица 3.3 - Данные для расчета и результат расчета чувствительности фотодиода на разных длинах волн

Данные для расчета			Результаты расчета	
Светодиод, №	Длина волны, нм	Мощность излучения при заданном токе, мВт	Тангенс угла наклона	Чувствительность ФД, А/Вт
№1	875	18	2900	1,2
№2	863	41	9670	1,7
№3	750	25	4340	1,3
№4	695	39	4650	0,9
№5	620	37	1270	0,24
№6	592	16	476	0,22
№7	523	38	832	0,16
№8	457	87	1331	0,10

На основании полученных результатов расчета (таблица 3.3) была построена зависимость чувствительности фотодиода от длины волны излучения (рисунок 3.7):

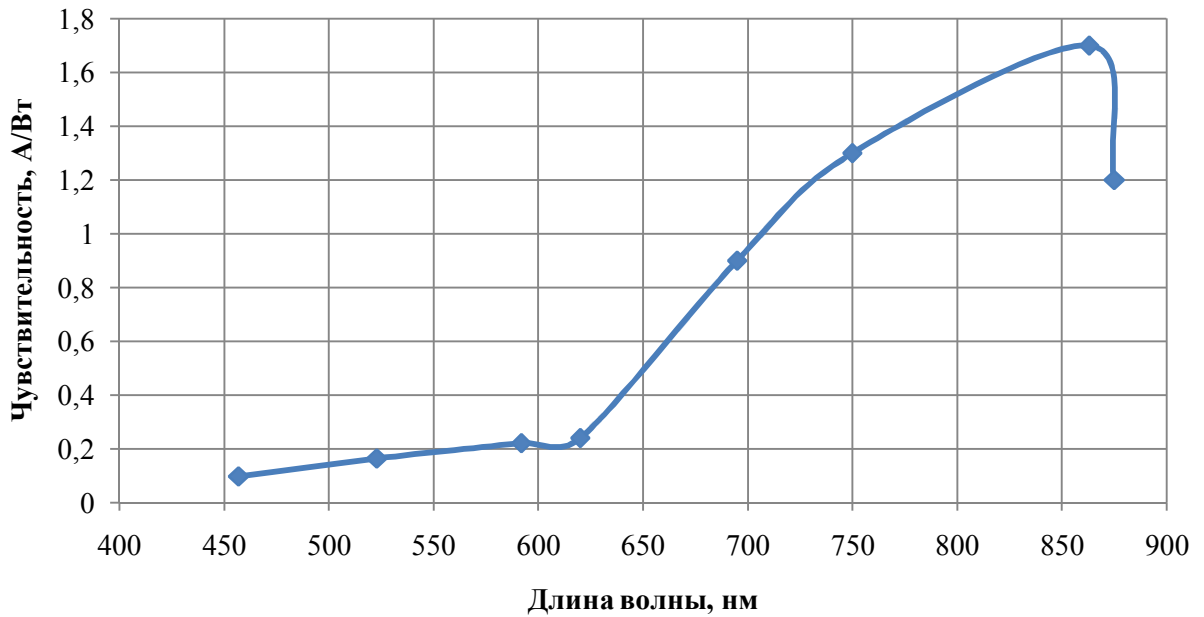


Рисунок 3.7 - Зависимость чувствительности фотодиода от длины волны падающего излучения измеренная дискретным способом

Из полученной зависимости следует что максимум чувствительности фотодиода приходится в диапазоне длин волн 850 нм – 865 нм, полученный результат довольно близок к ожидаемому результату, при этом чувствительность в указанном диапазоне достигает 1,7 А/Вт. Кроме того, полученное значение чувствительности превосходит значение требуемое по ТЗ на 1,4 А/Вт, следовательно удовлетворяет требованиям ТЗ Однако полученный результат требует проверки на специальном оборудовании. Для этих целей измеренные фотодиоды были отправлены в Томский Политехнический Университет (ТПУ) для измерения спектральной чувствительности[33].

3.4 Результаты измерений спектральной чувствительности фотодиодов в на специализированном оборудовании.

Измерения спектральной чувствительности фотодиодов на специализированном оборудовании было проведено согласно методике

представленной в разделе 2.2. Однако результат измерения представлен в относительных единицах. Тем не менее, для оценки диапазона чувствительности этих результатов достаточно. Измеренная относительная спектральная чувствительность фотодиода к излучению в диапазоне длин волн от 750 нм до 900 нм, представлена на рисунке 3.8

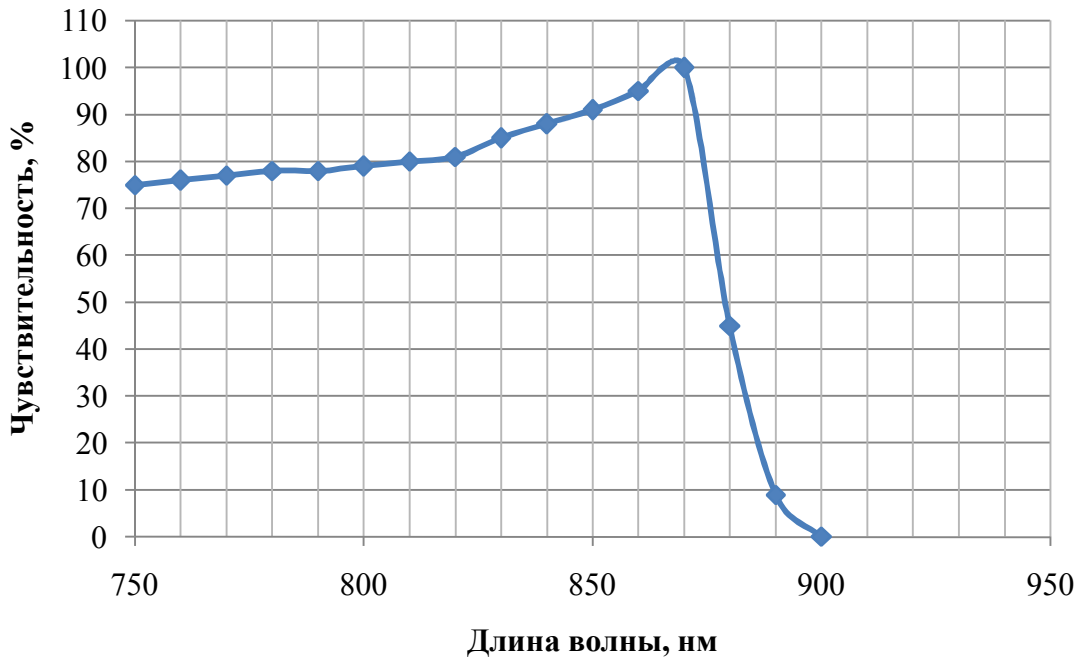


Рисунок 3.8 – Относительная спектральная чувствительность ИК-фотодиода

Из полученной зависимости видно, что максимальная чувствительность приходится на длину волны 870 нм. Но для того чтобы корректно сравнить результаты, необходимо привести результаты измерения абсолютной чувствительности к абсолютной величине и представить полученные точки на зависимости полученной проверенным методом. Поскольку по результатам измерений, дискретным способом, максимальная чувствительность фотодиода оказалась на длине волны 863 нм, ее и возьмем за максимальное значение, и относительно нее проведем расчет и построение расчетных точек на зависимости, полученной по методу, описанному в главе 2.3, результат представлен на рисунке 3.9.

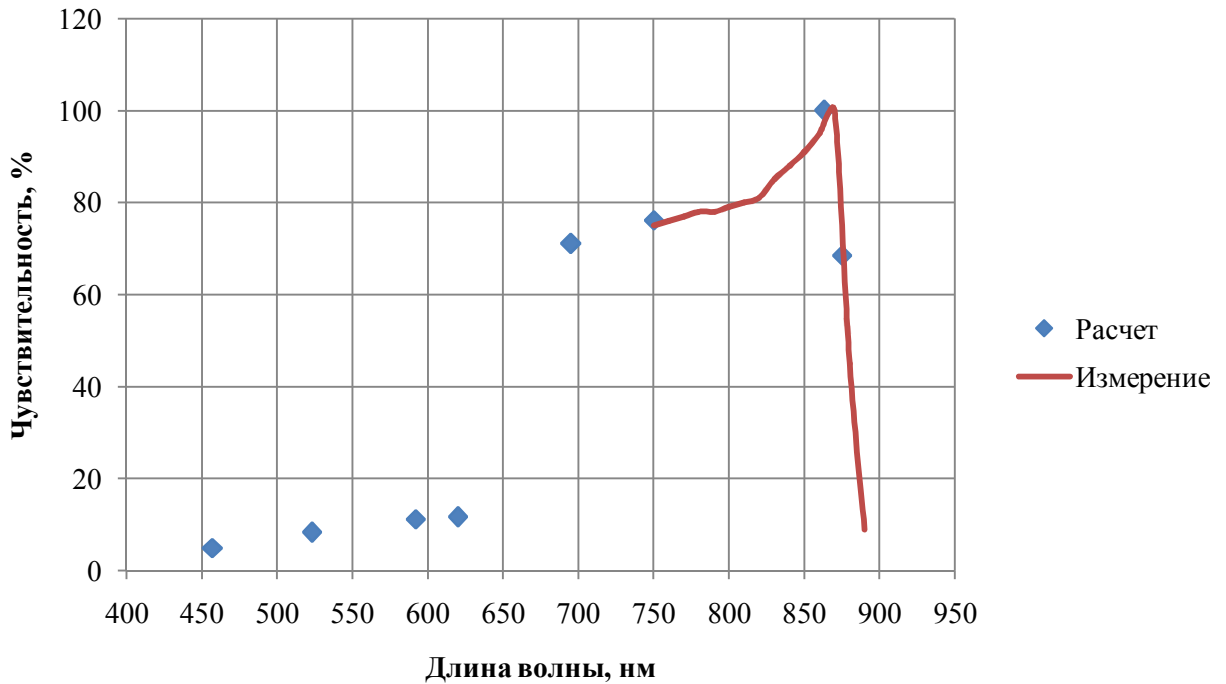


Рисунок 3.9 - Спектральная чувствительность ИК-фотодиода в процентах

Из рисунка 3.9 видно, что точки ложатся на зависимость, следовательно, методика измерения чувствительности фотодиода к оптическому излучению с разной длиной волны, путем измерения зависимости чувствительности фотодиода от расстояния между излучателем и фотоприемником, позволяет получить достоверные результаты измерения.

Однако для большей точности результата измерения необходимо иметь большее число светодиодов с разной длиной волны для более подробного измерения спектральной чувствительности.

3.5 Проведение измерений времени нарастания и спада

Для проведения исследования времени нарастания и спада был подготовлен ИК-светодиод 3Л139, изготавливаемый на предприятии АО «НИИПП» и была измерена его импульсная токовая характеристика, рисунок 3.10, а также импульсная световая характеристика рисунок 3.11.

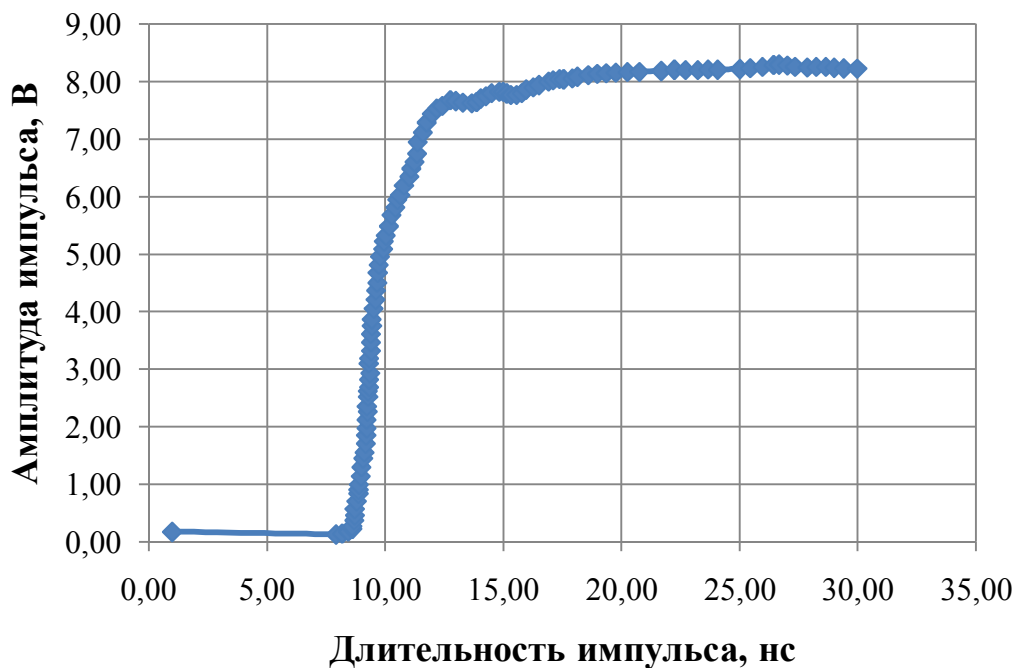


Рисунок 3.10 - Токовый импульс светодиода 3Л139

Согласно методике оценку уровня нарастания импульса необходимо проводить по уровню 0,1 - 0,9. Из рисунка видно, что время нарастания токового импульса по уровню 0,9 составляет 6нс, также из рисунка видно, что присутствует переходной процесс который еще более заметен на световом импульсе (рисунок 3.11) время нарастания светового импульса несколько больше. Переходной процесс характеризуется провалом импульса на зависимости амплитуды импульса от времени.

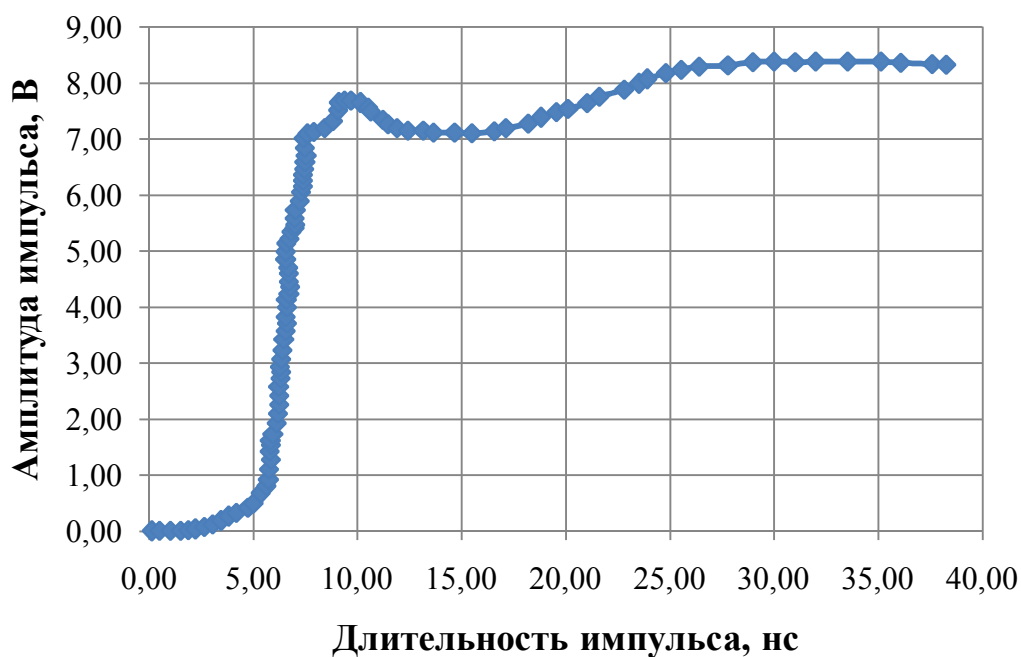


Рисунок 3.11 - Световой импульс светодиода 3Л139

Из рисунка 3.11 видно, что время нарастания светового импульса (потока импульса) составляет около $\tau_{0,1-0,9\text{пот}} = 6$ нс, после чего идет переходной процесс с падением уровня сигнала до уровня 0,89 длительностью около 8 нс, после 8 нс уровень сигнала составляет 0,9, и далее, еще через 7 нс импульс стабилизируется, таким образом можно принять что время нарастания светового импульса составляет $\tau_{0,1-0,9\text{пот}} = 6$ нс но с учетом переходного процесса, установившееся время нарастания составляет $\tau_{\text{уст}} = 14$ нс.

Далее зная импульсную характеристику светодиода, было произведено измерение импульсной характеристики фотодиода с поданным на него обратным смещением в 10 В. В результате получена импульсная характеристика фотодиода представленная на рисунке 3.12.

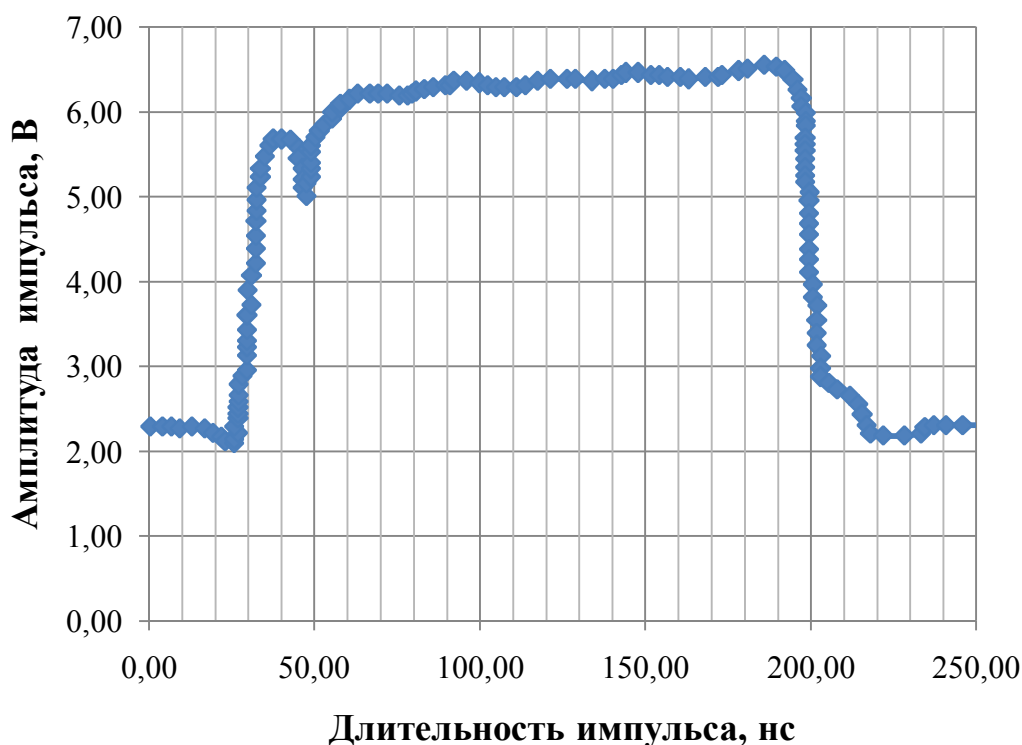


Рисунок 3.12 - Импульсная характеристика фотодиода

Из рисунка 3.12 видно, что измеренное время нарастания импульса фотодиода составляет $\tau_{0,1-0,9\text{изм}} = 8$ нс, после чего идет переходной промежуток спада амплитуды, длительностью около 10 нс, аналогично с импульсом света светодиода, при этом амплитуда падение происходит до уровня 0,81, после чего импульс возрастает в течение 10 нс и стабилизируется. Таким образом, время нарастания фотоимпульса составляет $\tau_{0,1-0,9\text{изм}} = 8$ нс, а с учетом переходного процесса установившееся время нарастания импульса составляет $\tau_{\text{уст}} = 22$ нс. Время спада импульса фотодиода составляет порядка 15 нс, при этом видно что задний фронт импульса сваливается [28, 34].

Используя формулу 2.12 можно рассчитать время нарастания импульса фотодиода:

$$\tau_{0,1-0,9} = \sqrt{8^2 - 6^2} = 5,3 \text{ нс}$$

Из расчета видно, что время нарастания фотоимпульса составляет 10 нс, что меньше значения требуемого по ТЗ

В результате проведенного исследования импульсной характеристики фотодиода, можно увидеть, что время нарастания импульса фотодиода составляет порядка 5,3 нс. Полученный результат удовлетворяет требованиям ТЗ.

Вывод к главе 3

В данной главе были проведены исследования фотодиодов изготовленных фотодиодов на основе разработанной и выращенной в АО «НИИПП» эпитаксиальной структуры, которая была разработана для обеспечения требований ТЗ на ИК-фотодиод.

Были проведены исследования ВАХ фотодиодов и измерен темновой ток, значение которого удовлетворяет заявленным в ТЗ требованиям в 5 нА при обратном смещении фотодиода 10 В, и составляет 5 нА. Также было установлено, что при подаче обратного напряжения смещения более 20 В, пробоя структуры не происходит, следовательно требование ТЗ по данному параметру выполнено.

Была исследована ВФХ фотодиодного кристалла. По результатам исследования получено что при подаче обратного смещения 10 В, барьерная емкость кристалла составляет 17 пФ, что меньше значения указанного в ТЗ, 20 пФ, следовательно по данному параметру фотодиод удовлетворяет требованиям ТЗ.

Была измерена абсолютная спектральная чувствительность фотодиода с помощью разработанного метода измерения данного параметра. Результаты измерения были проверены на специализированном оборудовании и подтверждают достоверность полученных результатов измерения. Из результатов измерения получено, что максимальная чувствительность фотодиода лежит в диапазоне длин волн 850 нм - 865 нм и составляет

1,6 А/Вт - 1,7 А/Вт. Полученный результат значительно превышает требуемое по ТЗ значение 0,3 А/Вт, следовательно данному требованию ТЗ фотодиод так же удовлетворяет.

Была измерена временная характеристика фотодиода, а именно время нарастания фотоимпульса. Результат измерения времени нарастания фотоимпульса фотодиода составляет 5,3 нс, что соответствует требованиям ТЗ, 10 нс. Следовательно фотодиод данному требованию удовлетворяет. Время спада фотоимпульса измерять не требовалось, но оценка данного параметра показывает что оно составляет порядка 15нс.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Проанализировав проведенную работу можно сделать выводы:

В результате проделанной работы были выполнены поставленные задачи:

- разработана эпитаксиальная структура;
- разработан технологический маршрут изготовления фотодиодного кристалла согласно требованиям технического задания на основе разработанной и изготовленной в АО «НИИПП» структуры;
- изготовлены опытные образцы фотодиодных кристаллов на основе эпитаксиальной структуры отечественного производства;
- выбран корпус для кристаллов и выполнен их монтаж для исследования эксплуатационных характеристик опытных образцов фотодиодов;
- на основании проведенных исследований сделан вывод, что опытная партия фотодиодов удовлетворяет требованиям технического задания по всем параметрам:
 - диапазон чувствительности к оптическому излучению;
 - пробивное напряжение при обратном смещении;
 - максимальный темновой ток;
 - емкость кристалла фотодиода при обратном смещении;
 - временная характеристика фотодиода;
 - чувствительность фотодиода.
- разработанная эпитаксиальная структура позволяет получить фотодиод с максимальной чувствительностью на длине волны 865 нм.
- разработана и проверена работоспособность и подтверждена достоверность методики определения абсолютной спектральной чувствительности фотодиодов, с помощью измерения зависимости чувствительности фотодиода от расстояния до источника излучения

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Торшина И.П., Якушенков Ю. Г. /Выбор приемника излучения при проектировании оптико-электронного прибора // учебное пособие. — М.: Изд-во МИИГАиК, 2017. –58 с.
- 2 Формозов Б. Н. / Аэрокосмические фотоприемные устройства в видимом и инфракрасном диапазонах //учеб.пособие. -СПб.: СПбГУАП. 2002. 120 с.
- 3 Зи, С. / Физика полупроводниковых приборов / В 2-х книгах. Кн.1. Пер. с англ.. – 2-е перераб. и доп. изд. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
- 4 Прохоров А.М. / Физический энциклопедический словарь / А.М. Прохоров. –М.: Советская энциклопедия, 1983. – 944 с.
- 5 Aguilar-González, M.A. Synthesis and characterization of barium ferrite – silicananocomposites / M.A. Aguilar-González, G. Mendoza-Suárez, K.P. Padmasree // Materials Characterization. – 2013 – Vol. 84 – P. 175–181.
- 6 Фотодиод [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.azimp.ru/articles/tech/39400/> (дата обращения 03.05.2020).
- 7 Основные характеристики и параметры приемников излучения [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/7675/5/хар%20и%20пар%20прием%20и%20зл.pdf> (дата обращения 05.05.2020).
- 8 Three-Dimensional Point-Focus Spectral Splitting Solar Concentrator System [электронный ресурс] / 2014 //Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/268277454_Three-Dimensional_Point-Focus_Spectral_Splitting_Solar_Concentrator_System / (дата обращения 15.04.2020).
- 9 Фотодиоды и фотопроводники [электронный ресурс].-Режим доступа: https://in-science.ru/library/article_post/fotodiody-i-fotoprovodniki (дата обращения 19.02.2020).

10 Технические характеристики фотоприемников [электронный ресурс]. -Режим доступа: <https://studfile.net/preview/1095663/page:31/> (дата обращения 29.03.2020).

11 Быстродействующие фотодиоды для средней инфракрасной области спектра 1.2–2.4 мкм на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с полосой пропускания 2–5 ГГц [Электронный ресурс] / 2013 /Режим доступа: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/5053> (дата обращения 08.02.2020).

12 Radiation Resistance of Epitaxial Structures Based on GaAs [электронный ресурс] / 2019 / Режим доступа: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-3-41-> (дата обращения 08.05.2020).

13 Radiation resistance of GaAs/GaSb tandem solar cell [электронный ресурс]. / 2001 / Режим доступа: http://pvlab.ioffe.ru/pdf/rad_res.pdf (дата обращения 08.05.2020).

14 Radiation resistance of gaas-based microwave schottky-barrier devices some physico-technological aspects [электронный ресурс] /1998/Режим доступа: https://www.isp.kiev.ua/images/Institute/lab33/Statti/book_Rad_Res_1998.pdf (дата обращения 09.05.2020).

15 Photodiode Theory of Operation [электронный ресурс].-Режим доступа:https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/diode/photodiode-detector-theory-operation.php (дата обращения 12.04.2020).

16 Quantum Efficiency Enhancement by Mie Resonance from GaAs Photocathodes Structured with Surface Nanopillar Arrays [электронный ресурс] / 2018 / Режим доступа: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1912/1912.00348.pdf> (дата обращения 12.04.2020).

17 AlGaAs/GaAs photodetectors for detection of luminescent light from scintillators [электронный ресурс] / 2015 /Режим доступа:https://www.researchgate.net/publication/271711166_AlGaAsGaAs_phot

odetectors_for_detection_of_luminescent_light_from_scintillators(дата обращения 13.04.2020).

18 GaAs/AlGaAs Nanowire Photodetector [электронный ресурс] / 2013 / Режим доступа:<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1601/1601.02312.pdf> (дата обращения 13.04.2020).

19 Квадратный фотодиод [электронный ресурс].- Режим доступа:<http://www.voshod-krlz.ru/files/images/kvadrpd150.pdf> (дата обращения 18.04.2020).

20 *InGaAsp-i-n*-фотодиод ДФД1000ТО-К [электронный ресурс].-Режим доступа: <http://www.dilas.ru/fd/dfd1000to-k.php> (дата обращения 18.04.2020).

21 Фотодиоды серии *PD24*, *PD25* [электронный ресурс].-Режим доступа: <http://www.ibsg.ru/pd24.html> (дата обращения 18.04.2020).

22 Каталог продукции излучающие диоды ИК диапазона Photodetector [электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.niipp.ru/upload/iblock/80d/80d0cbacf1367bf9724260c18470bdaa.pdf> (дата обращения 19.04.2020)

23 Si photodiodes [Электронный ресурс]. - Режим доступа:https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e02_handbook_si_photodiode.pdf (дата обращения 21.04.2020)

24 Данилина, Т. И. / Процессы микро- и нанотехнологии / Т. И. Данилина, К. И. Смирнова. // Учебное пособие – Томск: В–Спектр, 2004. – 259

25 Исследование характеристик фотодиода [Электронный ресурс]. / 2003 / режим доступа:<http://window.edu.ru/resource/421/38421/files/miem2005-28.pdf>(дата обращения 22.04.2020)

26 Keithley 2612B Manuals [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.manualslib.com/products/Keithley-2612b-8711112.html> (дата обращения 22.04.2020)

27 ГОСТ 17333-80. Приборы фотоэлектронные. Методы измерения спектральной чувствительности фотокатодов.

28 ГОСТ 17772-88 Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства.

29 Филиппов С.Н. / Исследование механизмов переноса заряда в фотодиодах на основе эпитаксиальных слоёв твёрдых растворов кадмий-ртуть-теллур // Труды 50-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». — 2007. — Т. 5. —С. 176–178.

30 Берман Л.С. / Емкостные методы исследования полупроводников. Изд-во «Наука», Ленингр. Отд., Л., 1972, стр. 1-104.

31 Методы измерения вольт-фарадных характеристик[электронный ресурс]. -

Режимдоступа:<https://findout.su/10x19930.html>(датаобращения25.04.2020)

32 Измеритель иммитанса E7-20 [электронный ресурс]. -
Режимдопуска:<https://www.mnipi.ru/products.php?group=6&device=0>(датаобра
щения26.04.2020)

33 ГОСТ 17616— 82 Лампы электрические методы измерения электрических и световых параметров

34 On response time of semiconductor photodiodes [электронный ресурс] / 2017 /Режим доступа:

https://www.researchgate.net/publication/319601029_On_response_time_of_semiconductor_photodiodes(дата обращения25.04.2020)

35 Photodiode sensitivity measurement methodology using low light intensity for optically reconfigurable gate arrays[электронный ресурс]. - Режим доступа:<https://www.mnipi.ru/products.php?group=6&device=0> (дата обращения 28.04.2020)

36 Войцеховский А.В., Ижнин И.И., Савчин В.П., Вакив Н.М. / Физические основы полупроводниковой фотоэлектроники // учебное

пособие. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2013. – 560 с.

37 Торшина И.П., Якушенков Ю. Г. / Выбор приемника излучения при проектировании оптико-электронного прибора // учебное пособие. — М.: Изд-во МИИГАиК, 2017. –58 с.

38 Базир Г. И. /Физические основы электроники // учебное пособие – Ф50 Ульяновск: УлГТУ, 2006 – 61 с.

39 Михеев С.В. / Основы инфракрасной техники / – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 127 с.

40 Рогальский А. / Инфракрасные детекторы / — Новосибирск: Наука, 2003.

41 Вареник Ю.А. Средства измерения вольт-фарадных характеристик полупроводниковых структур: диссертация кандидата технических наук: 05.11.01. – Пенза, 2010. – 310 с.

42 Gradoboev A.V., Rubanov P.V. / Degradation of LEDs based on heterostructures AlGaAs by irradiation with electrons. /Izvestiya VUZov. Phizika (Russian Physics Journal).2011;54(1/2):195-197 с

44 D. J. Fisher / Diffusion in GaAs and other III–V Semiconductors. / 10 Years of Research, in Proc..DefectandDiffusionForum.157–159, (1998).

45 Громов, Д. В. / Материаловедение для микро- и нанoeлектроники: учебное пособие / Д. Г. Громов, А. А. Краснюк. – М.: МИФИ, 2008. – 156 с.