

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Хлынова Тамара Андреевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Изучение вольт - амперных характеристик арсенида галлия в  
зависимости от освещенности**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19303

**Научный руководитель:**

Д.ф.-м.н., Терещенко О.Е.

студент 5-го курса ФФ Горбунов Е.А.

**Оценка научного руководителя**

\_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума**

К.ф.-м.н., Симонов А. А

Оценка преподавателя практикума

\_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

\_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Новосибирск 2020

## Аннотация

В последние годы все больше внимания уделяется изучению магнитных барьеров Шоттки на основе полупроводниковых структур и ферромагнитного (ФМ) контакта для приложений спинтроники. Одним из важнейших полупроводников является арсенид галлия (GaAs), занимающий третье место по масштабам использования в промышленности. В том числе в создании полупроводниковых фотоэлектронных приборов.

Целью данной работы является изучение вольт - амперных характеристик структуры ФМ/GaAs в зависимости от освещенности с последующим изучением фотоэлектронных и спин-зависимых свойств. Для этого использовалась  $U_p$ -структура арсенида галлия (GaAs) в контакте с кобальтом (Co). Измерения фототока и фотоэдс показали линейную зависимость от интенсивности падающего излучения с коэффициентами пропорциональности  $\sim 9,5$  и  $\sim 22 \cdot 10^{-6}$  соответственно. С помощью формул расчета зависимости тока от напряжения, была построена теоретическая вольтамперная характеристика и вычислена высота барьера Шоттки  $\varphi_b = 0,63$  эВ. При сравнении теоретических и экспериментальных данных было установлено, что коэффициент неидеальности образца  $n=15$ .

## Оглавление

1. Введение .....	4
2. Теоретическая часть .....	5
2.1 Полупроводники. Легирование.....	5
2.2 Барьер Шоттки. Внутренний фотоэффект .....	6
3. Экспериментальная часть.....	8
3.1Образец .....	8
3.2Эксперимент .....	9
4. Результаты.....	10
5. Вывод .....	12
6. Список литературы .....	13

## 1. Введение

В последние годы все больше внимания уделяется изучению магнитных барьеров Шоттки на основе полупроводниковых структур и ферромагнитного (ФМ) контакта для приложений спинтроники. Одним из важнейших полупроводников является арсенид галлия (GaAs), занимающий третье место по масштабам использования в промышленности. В том числе в создании полупроводниковых фотоэлектронных приборов, которые используются в военной технике (головки наведения ракет, тепловизионные системы), в медицине, в приборах общего назначения (например, фототехника), а также в создании научного оборудования для исследования быстропротекающих процессов [1].

Для изготовления этих приборов необходимо знать зависимости фототока и фотоэдс от интенсивности освещения, а также принципы протекания внутреннего фотоэффекта в арсениде галлия.

Таким образом, целью данной работы является изучение вольт – амперных характеристик (ВАХ) контакта металл-арсенида галлия в зависимости от освещенности.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

Во-первых, нужно собрать установку для измерения ВАХ арсенида галлия.

Во-вторых, определить зависимость фототока и фотоэдс от интенсивности освещения.

А также, установить значение основных характеристик потенциального барьера исследуемого образца.

Ключевые слова: внутренний фотоэффект, полупроводник, вольт – амперная характеристика, фототок, фотоэдс, потенциальный барьер.

## 2. Теоретическая часть

### 2.1 Полупроводники. Легирование.

Полупроводники – это широкий класс веществ, в которых концентрация подвижных носителей заряда намного ниже, чем концентрация атомов, и может изменяться под влиянием температуры, освещения, примесей.

С точки зрения теории энергетических зон полупроводники – это вещества, ширина запрещенной зоны ( $\Delta E$ ) которых находится в промежутке 0,1- 3 эВ.



Рис 1. Изображение энергетических зон для различных веществ

Валентная зона – это высшая энергетическая область разрешенных электронных состояний в твердом теле. То есть электроны могут там находиться, а так как валентная зона расположена ниже по энергетическому уровню, чем зона проводимости, то электронам выгоднее находиться в ней. В полупроводниках валентная зона полностью заполнена, поэтому проводимость там отсутствует. Ближайшая свободная зона (зона проводимости) отделена запрещенной зоной  $\Delta E$ . Сама же зона проводимости полностью пуста (в ней нет носителей заряда), поэтому при 0 К в полупроводниках ток течь не может, так как для протекания тока электронам необходимо менять свое состояние, а все состояния в валентной зоне заняты.[2]

Одним из решений проблемы проводимости является легирование – внедрение небольшого количества примесей для изменения электрических свойств полупроводника, в том числе тип его проводимости.

Примеси делятся на два типа: донорные и акцепторные. В полупроводниках n-типа донорный уровень расположен вблизи дна зоны проводимости (рис.2, б), чтобы донорным электронам было легче перейти в зону проводимости. И тогда основными носителями заряда являются электроны. В полупроводниках p-типа акцепторный уровень расположен наоборот вблизи валентной зоны (рис.2, в). Чтобы электроны из этой зоны могли перейти на акцепторный уровень, создавая в валентной зоне дырки. В таком случае говорят про дырочную проводимость. [3]

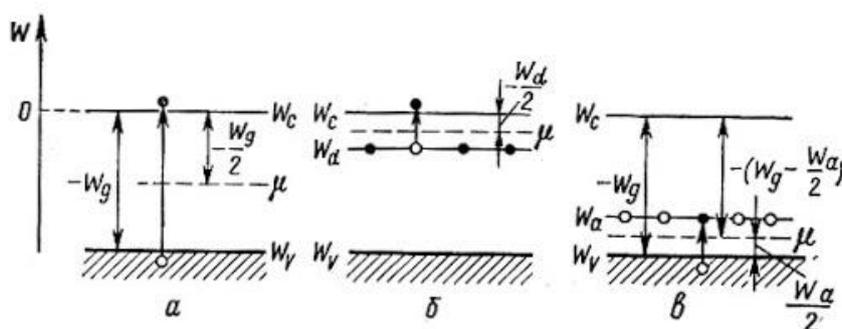


Рис 2. Энергетические зоны полупроводника и уровни примесей

а) без примесей, б) донорная примесь, в) акцепторная примесь

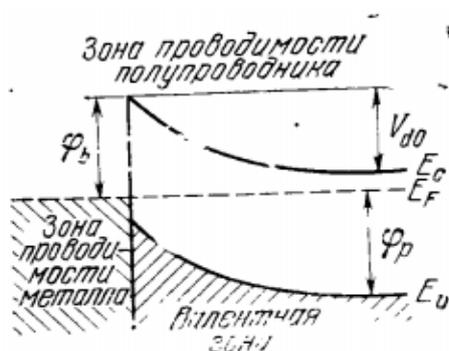
$W_g$  – запрещенная зона,  $\mu$  – уровень Ферми,

$W_c$  - зона проводимости,  $W_v$ -валентная зона,

$W_d$  – донорский уровень,  $W_a$ -акцепторный уровень

## 2.2 Барьер Шоттки. Внутренний фотоэффект

Барьер Шоттки – потенциальный барьер, появляющийся в приконтактном



слое полупроводника, граничащем с металлом.

Возникновение барьера обусловлено разностью

работ выхода металла и полупроводника. При этом

изгиб зон  $V_{d0}$  (рис.3) должен быть равен разности

работ выхода металла ( $\varphi_M$ ) и полупроводника ( $\varphi_P$ ):

$$V_{d0} = \varphi_M - \varphi_P$$

Рис 3. Барьер Шоттки на контакте металла с полупроводником n-типа

а следовательно, высота барьера  $\varphi_b$  со стороны металла равна:

$$\varphi_b = \varphi_m - \chi_n$$

где  $\chi_n$  - это электронное сродство полупроводника.[4]

Изгиб зон  $V_{d_0}$  можно спрямить или усилить, приложив электрическое поле. Спрямить можно, если посвятить лазером с длиной волны больше, чем запрещенная зона  $\Delta E$ , что вызовет появление электронов и дырок, которые, расходясь в разные стороны, создают фото-ЭДС.

Барьер Шоттки обладает выпрямляющими свойствами, из-за чего контакты металл-полупроводник с барьером Шоттки можно считать диодами.

Для изучения вольтамперных характеристик необходимо знать зависимость тока от напряжения. Общая формула для протекания тока может быть записана так:

$$I = I_s (\exp\left(\frac{|e|U}{nkT}\right) - 1) \quad (1)$$

где  $I_s$  - ток насыщения,  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - температура,  $n$  - коэффициент не идеальности. Ток насыщения можно найти, зная высоту потенциального барьера  $\varphi_b$ . Формула для определения тока насыщения:

$$I_s = A^* T^2 \exp\left(-\frac{|e|\varphi_b}{kT}\right) \quad (2)$$

где  $A^*$  - постоянная Ричардсона, определяемая по формуле:

$$A^* = \frac{4\pi m^* e k^2}{h^3} \quad (3)$$

где  $h$  - постоянная Планка,  $m^*$  - эффективная масса. [5]

Внутренняя фотоэмиссия - перераспределение электронов по энергетическим уровням в полупроводниках под действием света. Если энергия кванта  $h\nu$  падающего света больше ширины запрещенной зоны в полупроводнике, то электрон, поглотивший квант, переходит из валентной зоны

в зону проводимости. В результате этого перехода образуется пара носителей: в зоне проводимости электрон, а в валентной зоне - дырка.

Если через полупроводник при отсутствии поглощения фотонов протекает ток, то он называется темновым. Вольт - амперная характеристика в таком случае будет проходить через ноль координат. То есть при нулевом напряжении, через полупроводник не протекает ток. Если мы будем при этом светить на полупроводник, то электроны в валентной зоне начнут захватывать кванты света и переходить в зону проводимости, тем самым создавая дополнительный ток – фототок.

Вольт – амперную характеристику диода можно условно разбить на две части. На ток прямого и обратного смещений. Ток прямого смещения создается основными носителями заряда, в нашем случае дырками, которые, при приложении отрицательного потенциала на металл, начинают туннелировать сквозь потенциальный барьер из полупроводника в металл. Начинается резкое экспоненциальное возрастание тока. Обратный ток создается электронами, которые при приложении положительного потенциала к металлу, туннелируют через барьер из металла в полупроводник. Но из-за потенциального барьера обратный ток невелик.

### 3. Экспериментальная часть

#### 3.1 Образец

На подложке из полуизолирующего полупроводника GaAs выращен сильнолегированный слой p+. Далее методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии были выращены многослойные металлические структуры, состоящие из кобальта и платины.

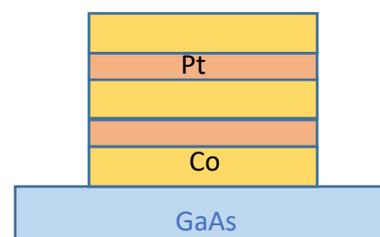


Рис 4. Исследуемая структура

Так как образец с проводимостью р-типа, то его основными носителями заряда являются дырки. Которые возникают при переходе валентных электронов на акцепторный примесный уровень.

Вблизи поверхности полупроводника присутствует изгиб зон. Для того, чтобы потенциал вблизи поверхности был линейным, приповерхностный слой полупроводника не легируют.

Если построить энергетическую диаграмму данной структуры, то можно заметить, что она напоминает барьер Шоттки (рис. 5). Значит данную структуру можно считать диодом Шоттки и использовать в расчетах формулы для данного барьера.

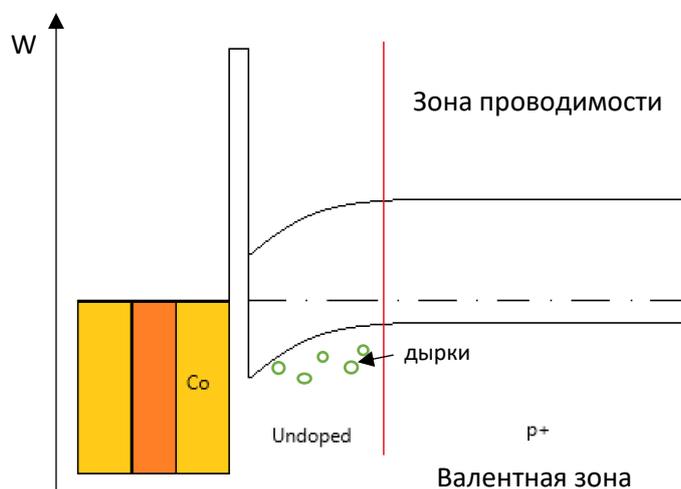


Рис 5. Энергетическая диаграмма образца p+ - GaAs

### 3.2 Эксперимент

В данной работе была собрана установка (рис.6), чтобы изучить вольтамперные характеристики арсенида галлия GaAs. На диод подавалось напряжение  $U$ , то есть создавалось внешнее электрическое поле. В случае, если подавать отрицательную полярность напряжения на металле по отношению к полупроводнику, то это приводит к тому, что потенциальный барьер истончается, и дырки могут туннелировать сквозь него, то есть начинает течь ток  $I$ . Далее ток проходит через предусилитель, который усиливает ток в  $10^4$  раза, и

подается на развилку, с которой этот ток считывает ЦАП (цифро-аналоговый преобразователь) для того, чтобы передать данные компьютеру. Для измерения фототока необходим источник фотонов, в установке для этого использовался лазер. Луч лазера проходит через поляризатор и попадает на полупроводник. С помощью поляризации можно менять интенсивность освещения.

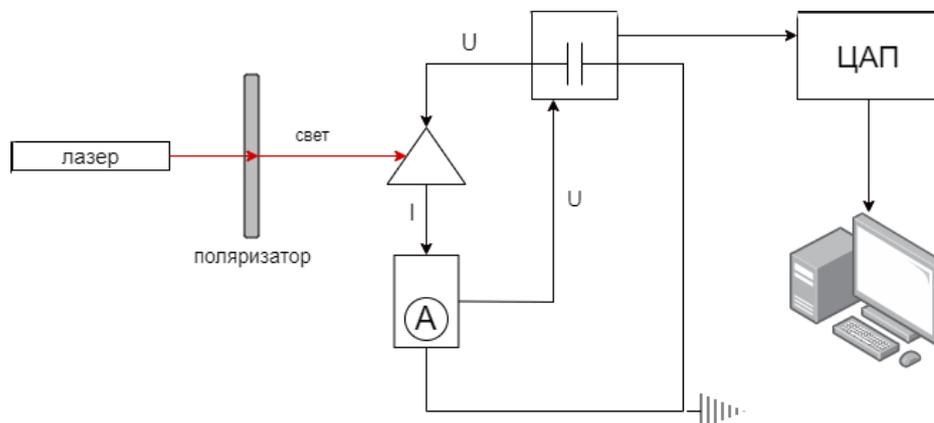


Рис. 6 Схема установки

#### 4. Результаты

Вольт - амперные характеристики арсенида галлия представлены на рисунке 7. В качестве примера зависимости ВАХ полупроводника от освещенности взяты вольт – амперные характеристики при мощности лазера  $P = 1,321$  мВт и при нулевой мощности  $P = 0$ , то есть темновой ток. В поставленном эксперименте напряжение подавалось на металлический контакт, заземлили р-слой. Полученная вольт - амперная характеристика имеет стандартный вид для диодов с барьером Шоттки. При прямом смещении наблюдается экспоненциальный рост тока, при обратном ток насыщения. Что говорит о выпрямляющих свойствах данной структуры. Ток насыщения равен 0,69 мА.

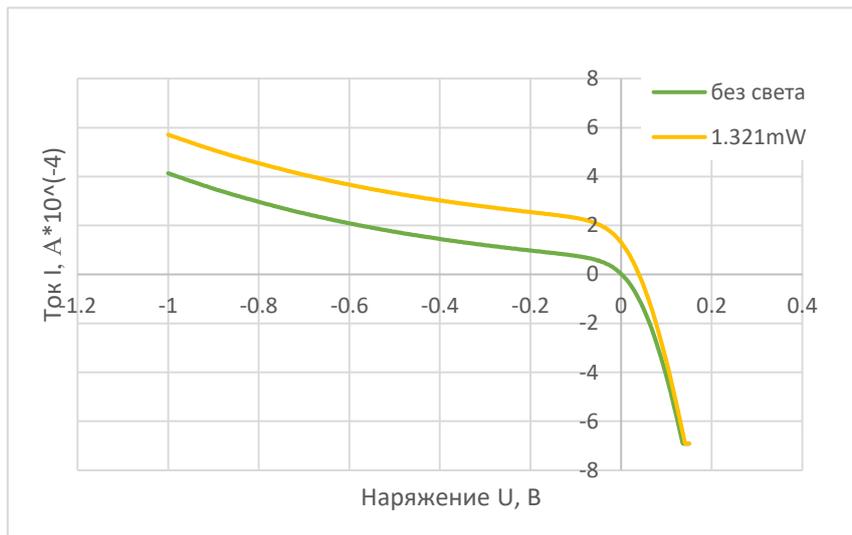


Рис.7 Вольт - амперные характеристики структуры (ФМ)/GaAs темнового тока и тока при мощности 1,321 мВт

Для определения фототока и фото-ЭДС достаточно найти значения напряжения и тока в точках пересечения графика с осями координат.

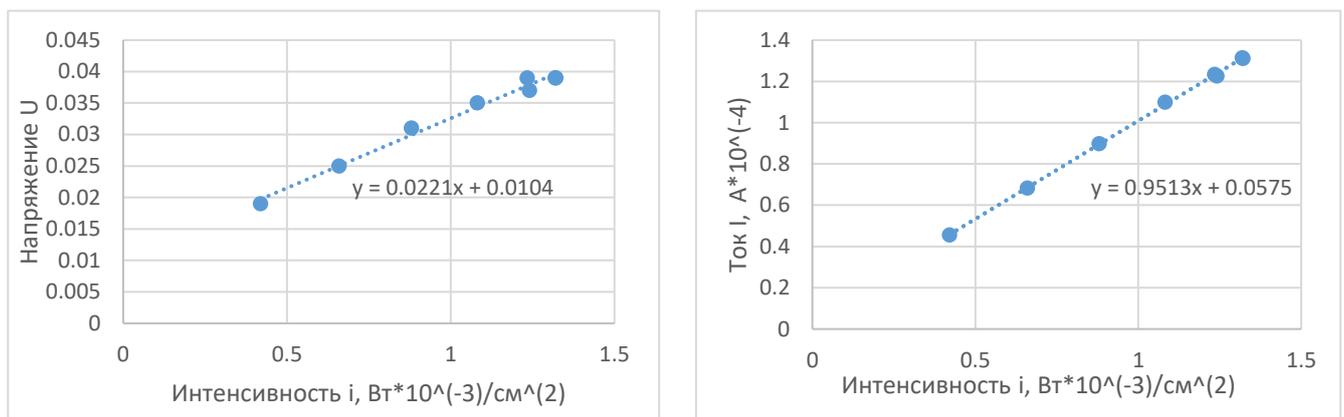


Рис. 8. а) Зависимость фото-ЭДС от интенсивности света  
б) Зависимость фототока от интенсивности света

На рисунке 8 представлены зависимости фототока и фото-ЭДС от интенсивности. Данные линейные зависимости демонстрируют, что фототок и фото-ЭДС возрастают прямо пропорционально мощности с коэффициентами пропорциональности  $\sim 9,5$  и  $\sim 22 \cdot 10^{-6}$  соответственно.

Для вычисления высоты барьера Шоттки воспользуемся формулой (1), (2). Построим теоретическую вольт - амперную характеристику данной структуры. Для вычисления постоянной Ричардсона  $A^*$  в формуле (3) присутствует

эффективная масса  $m^*$  носителей заряда. У дырок разная плотность состояний, и в расчетах используют эффективную массу плотности состояний. Для арсенидгаллия (GaAs) она равна  $0,53m_e$ . Эксперимент проводился при комнатной температуре, примерно равно  $T = 300\text{K}$ .

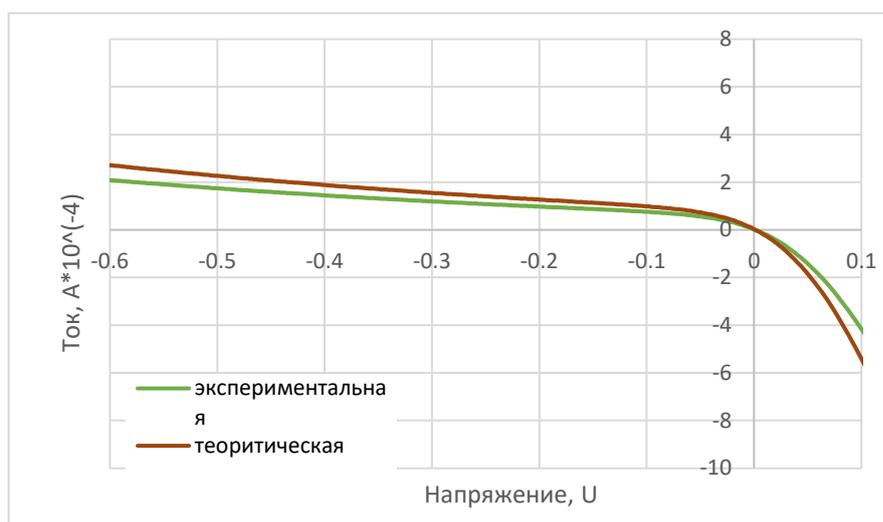


Рис. 9. Сравнение экспериментальной и теоретической вольт – амперных характеристик

На рисунке 9 представлены вольт - амперные характеристики темнового тока. Заметно, что теоретические и экспериментальные данные не совпадают, что говорит о неидеальности образца относительно диода Шоттки. Коэффициент неидеальности равен  $n=15$ . Высота барьера равна  $\varphi_b = 0,63$  эВ.

## 5. Вывод

В результате проведенной работы были измерены вольт - амперные характеристики контакта металл - арсенид галлия при разной освещенности. Установлены зависимости фото-ЭДС и фототока от интенсивности освещения. И оказалось, что фото – ЭДС и фототок линейно возрастают с увеличением интенсивности. С помощью формул расчета зависимости тока от напряжения, была построена теоретическая вольтамперная характеристика и вычислена высота барьера Шоттки  $\varphi_b = 0,63$  эВ. При сравнении теоретических и экспериментальных данных было установлено, что коэффициент неидеальности образца  $n=15$ . Были установлены выпрямляющие свойства структуры.

## **6. Список литературы**

1. А. В. Войцеховский, И. И. Ижнин, В. П. Савчин, Н. М. Вакиев. – Физические основы полупроводниковой фотоэлектроники. – Томск: Издательский дом ТГУ, 2013.
2. В. Ф. Киселев. – Поверхностные явления в полупроводниках и диэлектриках. – М: Наука, 1970.
3. М. Е. Левинштейн, Г. С. Симин. –Барьеры. От кристалла до интегральной схемы. –М: Наука, 1987.
4. E. H. Rhoderick.– Metal–semiconductor contacts.– Oxford: Oxford University press, 1978.
5. М.В. Дорохин, А.В. Здоровейщев. – Диод Шоттки на основе GaAs: Технология получения и диагностика. – Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2013.
6. Н. А. Поклонский, Н. И. Горбачук, Н.М. Лапчук.– Физика электрического контакта металл/полупроводник.– Минск: БГУ, 2003.