МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Федоров Филипп Станиславович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Зависимость вольт-амперной характеристики PIN-диода от энергии синхротронного излучения**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20305

**Научный руководитель:**

\_\_\_\_\_\_\_\_\_Я. В. Ракшун\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Оценка научного руководителя

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_20\_\_\_г.

**Преподаватель практикума**

\_\_\_\_\_\_\_\_А. С. Кудрявцев\_\_\_\_\_\_\_

Оценка преподавателя практикума

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_20\_\_\_г.

**Куратор практикума:**

\_\_к.т.н. В.Т. Астрелин\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Итоговая оценка

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_20\_\_\_г.

Новосибирск 2021

**Зависимость вольт-амперной характеристики PIN-диода в зависимости от энергии синхротронного излучения**

**Федоров Филипп Станиславович**

Физический факультет. Электромагнитный практикум. Курсовая работа.

Группа № 20305, 3 семестр, 2021 год.

Научный руководитель:

к. ф.-м. н. **Ракшун Яков Валерьевич**

**Аннотация**

Целью данной работы являлось получение зависимости ВАХ (вольт-амперной характеристики) PIN-диода от энергии синхротронного излучения, получение зависимости квантовой эффективности данного диода, определение возможности использования данного PIN-диод для детектирования синхротронного излучения.

Рабочей установкой являлась специализированная Технологическая станция ВЭПП-4, размещенная на поворотном магните. Ключевыми элементами установки являлись входные щели, задававшие геометрические размеры пучка излучения и монохроматор, задававший энергию излучения, подающего на PIN-диод. В процессе работы измерялась ВАХ при различных энергиях, выбранных при помощи монохроматора. В результате была определена зависимость ВАХ от энергии излучения и квантовая эффективность, исследуемого им PIN-диода.

Ключевые слова: ВАХ, синхротронное излучение, PIN-диод, монохроматическое излучение

**Оглавление**

[Теоретическая часть 5](#_Toc91225389)

[Полупроводники 5](#_Toc91225390)

[Рис.1 Строение полупроводника 5](#_Toc91225391)

[Проводимость 5](#_Toc91225392)

[Собственнаяпроводимость 5](#_Toc91225393)

[Примеснаяпроводимость 6](#_Toc91225395)

[Диод 6](#_Toc91225396)

[PIN-диод 7](#_Toc91225397)

[PIN- фотодиод 7](#_Toc91225398)

[Описание экспериментальной установки 8](#_Toc91225399)

[Сценарий эксперимента 9](#_Toc91225401)

[Расчеты 9](#_Toc91225402)

[Вывод 12](#_Toc91225405)

[Литература 13](#_Toc91225406)

**Введение**

С развитием источников СИ значительно расширились применения на них полупроводниковых приборов в частности, PIN-диода стали использоваться не только как детекторы, но и ка устройства для диагностики пучков, львиная доля экспериментальных станций на синхротронах используют монохроматическое излучение в различных диапазонах, именно поэтому представляет интерес исследования отклика PIN-диода в зависимости от значения энергии. В настоящей работе был исследован PIN-диод , изготовленный в ИФП СОРАН, который в дальнейшем планируется применять в качестве одного из элементов квадрантного монитор пучка кремниевые кристаллы детекторы на основе

# 

# Теоретическая часть

## Полупроводники

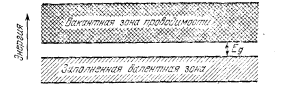
****Полупроводники -  вещества электросопротивление при комнатной температуре лежит в интервале от 10-2 до 109 Ом\*см. (в проводниках порядка106Ом\*см, в изоляторах порядка 1014-1022Ом\*см )  Запрещенная зона в полупроводниках намного меньше, чем в изоляторах, что позволяет электронам переходить с заполненного валентного уровня на свободную зону проводимости.

Рис.1 Строение полупроводника

## Проводимость

Различают разные виды проводимости в полупроводниках, одна из них это собственная проводимость.

**Собственная проводимость**

Существует температурная область собственной проводимости, это область в которой примеси в кристалле не влияют на электрические свойства полупроводника. При абсолютном нуле температуры, все уровни зоны проводимости свободны. Заполненная валентная зона отделена энергетической щелью Eg. Эта энергетическая щель равна разнице энергий между верхним уровнем валентной зоны и нижним уровнем зоны проводимости.  При повышении температуры, энергия электронов увеличивается и они могут переходить из валентной зоны в зону проводимости, при этом в валентной зоне образуются дырки (вакантные места, где были электроны), поэтому в полупроводниках носителями заряда, а в следствии источниками электропроводности являются электроны и дырки

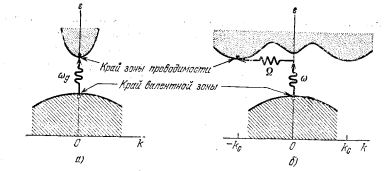


Рис. 2 Процесс перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости

**Примесная проводимость**

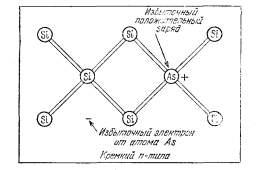
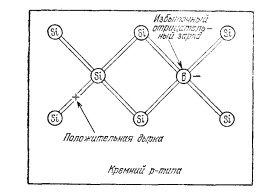
****Примесная проводимость преобладает в полупроводниках при более низких температурах. Добавка примеси к проводнику называется легированием. Во время легирования, атомы других элементов встраиваются в кристаллическую структуру полупроводников, при этом у них либо не хватает валентных электронов для образования достаточного количества связей (бор), либо их переизбыток (мышьяк) в кристаллах кремния. При этом образуются носители заряда, в первом случае “дырка”, во втором электрон. Эти носители заряда будут дальше двигаться по кристаллам, вызывая цепную реакцию и, соответственно, электропроводность

Рис.3 Виды примесной проводимости

## Диод

Диод – это электронный элемент, обладающий различной проводимостью в зависимости от направления электрического тока. Полупроводниковые диоды используют свойство односторонней проводимости p-n перехода – контакта между полупроводниками с разным типом примесной проводимости, либо между полупроводником и металлом ( диод Шотки ). Более высокую радиоактивную стойкость по сравнению с кремниевыми имеют арсенид галлиевые ( Ga As ) диоды. Арсенид галлия – важный полупроводник, находящийся на третьем месте по масштабам использования после кремния и германия.

## PIN-диод

PIN-диод это полупроводниковый прибор, являющийся p-n переходом, в середине которого находится высоколегированный i слой. При прямом смещении электроны и дырки будут двигаться из p и n областей в i область. При этом они не будут быстро рекомбинировать. Из-за этого некоторое количество зарядов все время будет в i области, понижая удельное сопротивление i области. Количество накопленного заряда Q будет зависеть от характерного времени рекомбинации τ и напрямую от тока смещения I

Q = I\*τ (1)

На высоких частотах, когда PIN-код диод находится на нулевом или обратном смещении, он проявляется как конденсатор с параллельными пластинами, по существу не зависит от реверса напряжения, имеющего значение:𝐶= ɛ𝐴𝑊  (2)

где ε - диэлектрическая проницаемость кремния, A - площадь стыка.

Самые низкие частоты, на которых этот эффект начинает преобладать связанны с диэлектрической релаксацией частоты I-области, ƒτ, которая может быть вычислена как:

ƒτ= 𝐼2𝜋𝜌ɛ  (3)

где ρ - удельное сопротивление I-области.

## PIN- фотодиод

Отдельным видом PIN-диода, является PIN- фотодиод. Фотоны вводятся в детектор через окно, имеющее тонкий слой просветляющего покрытия (толщина около λ /4) с показателем преломления, согласующим разные среды – стекловолокно (n=1,46) и полупроводник (n=3,5). На такой диод подается обратное смещение (-U  см), т.е. напряжение плюсом к  n-переходу, минусом к p-переходу. Сильное легирование крайних слоев делает их проводящими, и максимальное значение электрического тока создается в  i-слое. Но поскольку нет свободных носителей в i-слое, нет и электрического тока, так излучения на i-слой, в нем образуется свободные электронно-дырочные пары. Эти пары под действием электрического поля быстро разделяются и двигаются в противоположных направлениях к своим электродам. Таким образом, создается фототок (ток дрейфа).

I = N \* Q (4)

где Q - заряд электрона

N- число электронов.

1.4.2.pngОднако не все фотоны вызывают образование пар «электрон - дырка». По этой причине вводится понятие квантовой эффективности.

(5)

Квантовая эффективность q (безразмерная величина) определяется как:

Величина фототока определяется:

f1.4.2n.pngI = N\**η\*e* (6)

(7)

Учитывая, что число фотонов зависит от мощности излучения

где E = h\*v, а а λ = C/v, то величина фототока может быть представлена:

1.4.2f.pngгде Ри  - полная оптическая мощность излучения на длине волны λ, падающего на фоточувствительную площадку (Вт);

(8)

(5)

е- заряд электрона;

h - постоянная Планка эВ\*с

с- скорость света в воздухе

*η -* квантовая эффективность.

Эффективным является взаимодействие излучения только с i - слоем, так как при попадании фотонов в р+ - и n+ - слои возникает диффузионный ток, который имеет большую инерционность и ухудшает быстродействие. Поэтому при изготовлении фотодиодов стремятся делать р+ - и n+ - слои как можно тоньше, а обедненную область достаточно большой протяженности, чтобы она полностью поглощала весь падающий свет. На рисунке 1.21 показана структура, включение и распределение потенциала p-i-n фотодиода.

# Описание экспериментальной установки

Установка представляла собой источник синхротронного излучения(поворотный магнит, электроны в котором имеют энергию 4,5 ГэВ), монохроматор бабочку из Si (1,1,1), ножи для регулирования профиля пучка, PIN-диод, источник питания для диода, ПК на который приходил сигнал с диода через АЦП.

# Рис.4 Строение установки

# Сценарий эксперимента

Первой задачей, которая стояла передо мной была калибровка монохроматора. Для калибровки монохроматора использовалась медная фольга. Калибровка осуществлялась по К-краю меди 8960 эВ, зная нулевое положение гониометра.

Второй задачей при заданных значениях энергии были измерены ВАХ фотодиода, использованные значения энергий

1)4,5 кэВ

2)6,6 кэВ

3)8,7 кэВ

4)10,8 кэВ

5)12,9кэВ  
 6)15 кэВ

7)17,1 кэВ

8)19,2 кэВ

9)21,3 кэВ

10)23,4 кэВ

# Расчеты

Во время работы над курсовой были рассчитаны такие значения, как: средние значения фототока, для построения ВАХ, среднеквадратичное токов, для учета ошибки, при вычислении среднего значения тока, поток фотонов, попадающий на диод, мощность излучения, квантовую эффективность.

Для расчета всех этих значений было необходимо было написать программу на языке программирования Python.

Результаты и их обсуждение

Мною были получены ВАХ PIN-диода при различных энергиях излучения, отнормировав которые по току пучка и спектру, мы получили зависимость, которая соотноситься с теоритической.

Также я получил зависимость квантовой эффективности от энергии излучения.

# 

# http://v4.inp.nsk.su/status/history/v4IE.php?big=1&date=2021-12-19&duty=2Рис. 5 результаты измерений

# На первых 4 графиках мы видим зависимость ВАХ PIN-диода от тока в пучке.

# Вывод

Согласно полученным результатам данный PIN-диод можно использовать как часть квадрантного детектора.

# Литература