

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ)
ФИЗТЕХ-ШКОЛА ЭЛЕКТРОНИКИ, ФОТОНИКИ
И МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

Кафедра вакуумной электроники
Отчет по лабораторной работе
Диод Шоттки

Работу выполнили

_____ А.И.Белостоцкий
_____ Д.Е.Вовк
_____ Е.Ионидис
_____ С.Розенталь

Работу принял, оценка

Долгопрудный, 2022 г.

Содержание

1 Аннотация

В данной работе изучается изготовление и принципы работы диода Шоттки. Диод представляет собой часть пластины из pSi, на которую был напылен тонкий слой Au – для омического контакта и Al – для контакта Шоттки. Исследуются вольтамперные характеристики изготовленных образцов.

2 Применение диодов Шоттки

Диоды Шоттки имеют достаточно широкое применение в современной жизни, в особенности в приборах, где требуется минимальное прямое падение напряжения. Чаще всего диод Шоттки можно встретить в компьютерных блоках питания, а также в импульсных стабилизаторах напряжения. Помимо этого, диод Шоттки можно увидеть в таких приборах, как приемники альфа и бета излучения, детекторы нейтронного излучения и солнечные батареи.

3 Процесс изготовления

3.1 Напыление слоя металла

Для изготовления диода необходимо было напылить на пластину из pSi тонкий слой – 300 нм – алюминия и золота. Напыление проводилось на установках MEB 550S и Nanomaster NEE-4000, используя метод электронно-лучевого напыления.

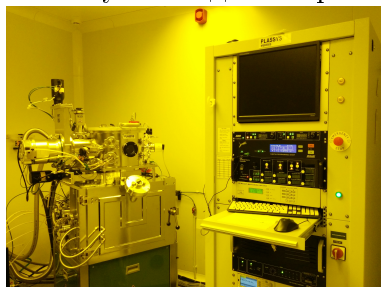


Рис. 1: MEB 550S

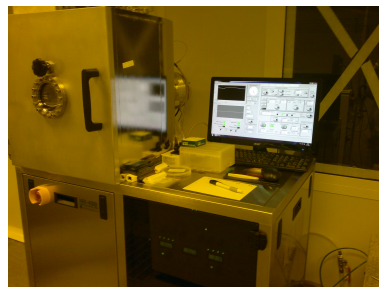


Рис. 2: Nanomaster NEE-4000

Как было сказано ранее, напыление производилось с помощью электронно-лучевого испарителя. Кратко обсудим принцип его действия. Сущность электронно-лучевого воздействия состоит в том, что кинетическая энергия электронного пучка превращается в зоне обработки в тепловую.

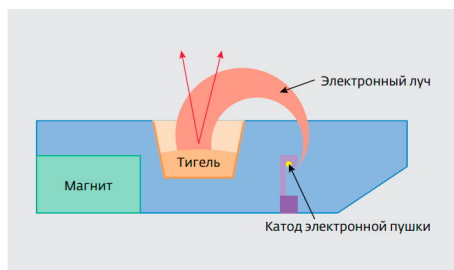


Рис. 3: Схема электронно-лучевого испарителя

Для формирования потока электронов предназначена электронная пушка, состоящая из вольфрамового термокатода и фокусирующей системы. Эмитируемые электроны проходят эту систему, ускоряются за счет разности потенциалов до 10 кВ между катодом и анодом и формируются в электронный луч. Отклоняющую систему создает магнитное поле, перпендикулярное направлению движения выходящих из фокусирующей системы электронов. Это поле направляет электронный луч в центральную часть водоохлаждаемого тигля, причем в месте падения луча создается локальная зона разогрева и испарения вещества из жидкой фазы. Поток испарившегося материала осаждается в виде тонкой пленки на подложке, которая обычно располагается на определенном расстоянии над испарителем.

3.2 Нанесение контактов

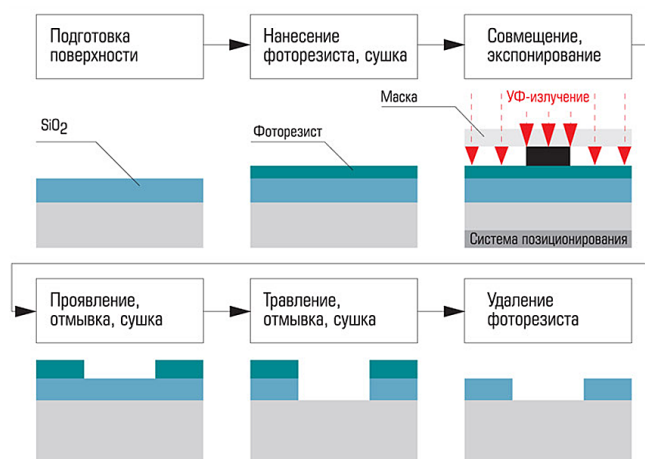


Рис. 4: Технологический процесс фотолитографии

Для изучения вольтамперной характеристики диода необходимо нанести на него контакты, с помощью которых будет измерена зависимость.

Для нанесения рисунка на пластину pSi используется фотолитография. Сначала на пластину наносится тонкий слой фоточувствительной полимерной пленки (фоторезист) с помощью центрифугирования.

После, фоторезист засвечивается через фотошаблон, содержащий желаемый рисунок, светом видимого или ультрафиолетового диапазона. В результате под действием энергетического воздействия (излучения) ультрафиолета изменяются свойства резиста.

Далее, при проявлении, части засвеченного фоторезиста удаляются специальной жидкостью – проявителем.

4 Теоретические сведения

4.1 Зонные диаграммы

Для объяснения физики процессов, происходящих в полупроводниковых диодах, обратимся к зонным диаграммам. На рис. 1 представлены зонные диаграммы для металла, полупроводника и диэлектрика



Рис. 5: Зонные диаграммы металла, полупроводника и диэлектрика

На шкале энергии можно отметить различные зоны и уровни

- Валентная зона – область, состоящая из конечного набора значений энергии (уровней), которые могут занимать электроны.
- Запрещенная зона – область, в которой не могут находиться электроны. У металла чаще всего нет запрещенной зоны.
- Зона проводимости – область разрешенных энергий, в которой при $T = 0$ электроны отсутствуют, однако при повышении температуры они могут туда подняться. Уровень вакуума – это верхний край зоны проводимости.

Уровень Ферми – это верхний заполненный электронами металла уровень при $T = 0$. Более общее определение основывается на уравнении Ферми-Дирака:

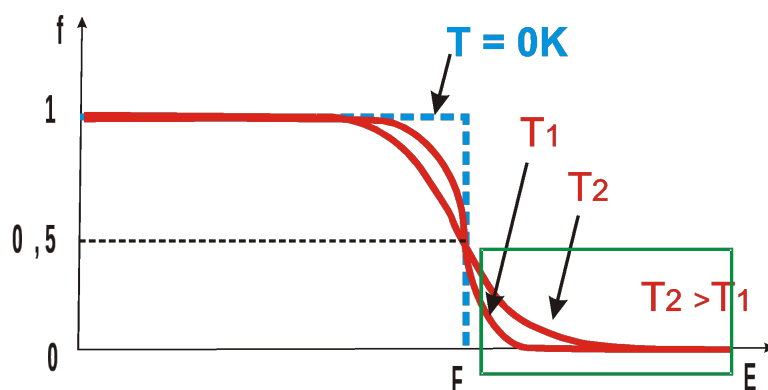


Рис. 6: График функции распределения Ферми-Дирака

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)} \quad (1)$$

Из него видно, что уровень Ферми – это уровень энергии, вероятность попадания электрона на который равна $1/2$ при любой температуре.

4.2 Полупроводники p- и n- типа

Работа выхода - это разность между уровнем вакуума и уровнем Ферми.

Изменить работу выхода полупроводника можно добавив к нему примесные вещества и тем самым изменив его уровень Ферми. Например, если в кремниевый полупроводник добавить атом Сурьмы имеющий 5 валентных электронов на внешнем уровне, то 4 из них образуют связи с электронами кремния, а оставшийся неспаренный электрон займет так называемый донорный уровень. Донорный уровень находится вблизи дна зоны проводимости, поэтому энергия Ферми полупроводника повысится, а работа выхода соответственно уменьшится. Получится полупроводник n-типа

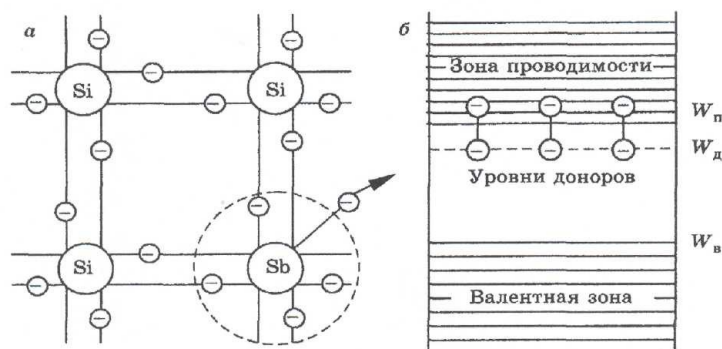


Рис. 7: Полупроводник n-типа

Если же добавить атом с меньшим чем у кремния числом валентных электронов (напр. Индий), то образуется положительная дырка. Положительные заряды займут акцепторный уровень вблизи верха валентной зоны, за счет чего уровень Ферми понизится, а работа выхода – повысится. Это полупроводник p-типа.

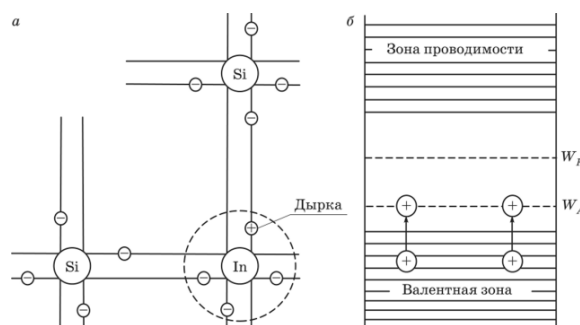


Рис. 8: Полупроводник p-типа

4.3 Виды контактов металл-полупроводник

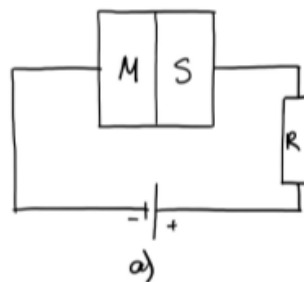
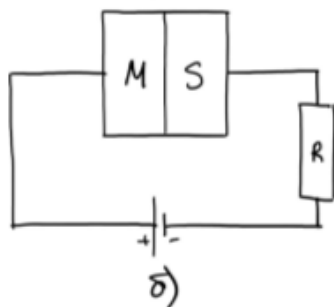
Диод Шоттки – это металл и полупроводник, приведенные в контакт. Из-за того, что работы выхода металла и полупроводника могут отличаться, в месте контакта будет возникать разность напряжений.

Выпрямляющий контакт металл – n-полупроводник может быть реализован, когда работа выхода полупроводника меньше работы выхода металла. В этом случае уровень Ферми металла находится ниже УФ полупроводника и заполненность зоны проводимости полупроводника выше заполненности соответствующих энергетических уровней металла. Поэтому при таком контакте электроны из полупроводника переходят в металл за счёт внутренней термоэлектронной эмиссии. На месте ушедших электронов остаются расположенные в узлах решетки положительные нескомпенсированные ионы донорной примеси, которые формируют в полупроводнике неподвижный объёмный пространственный заряд. Объёмный заряд создаёт в полупроводнике барьерное электрическое поле, направленное из полупроводника в металл. Это запирающее напряжение называется барьером Шоттки.

Уход электронов из полупроводника в металл, сопровождающий процесс выравнивания УФ, снижает их концентрацию в приконтактной области полупроводника. Поскольку концентрация электронов однозначно связана с положением УФ, то её уменьшение вызывает изгиб энергетических зон «вверх» вблизи контакта.

Далее, если подключить к такому устройству источник питания, то

- разность напряжений, создаваемая внешним источником, будет увеличивать запирающее поле и ток не пойдёт
- внешнее поле будет уменьшать барьер и в цепи потечёт ток



Выпрямляющий контакт металл – p-полупроводник может быть реализован, когда работа выхода полупроводника больше работы выхода металла. Поэтому направление термоэмиссионных потоков электронов первоначально тоже будет обратным – из металла в полупроводник. В результате этого в приповерхностном слое увеличится концентрация нескомпенсированных ионов, которые формируют отрицательный объёмный заряд. Этот заряд создаст барьерное электрическое поле E направленное из металла в полупроводник.

Омический контакт металл – n-полупроводник (рис. 7б) может быть реализован, когда работа выхода полупроводника больше работы выхода металла. При таком контакте

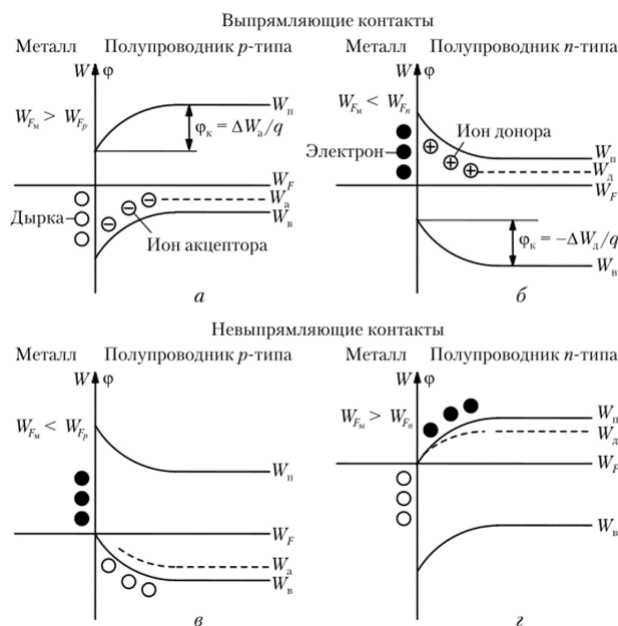


Рис. 9: Выпрямляющий и омический контакт металла с полупроводником

электроны из металла переходят в полупроводник, значит их концентрация в нем увеличивается, а в металле остаются нескомпенсированные положительные ионы – возникает поле, направленное из металла в полупроводник. Контакт обогащается электронами.

Аналогично . при формировании контакта металл – р-полупроводник, электроны из полупроводника уходят в металл - в контакте действует электрическое поле, направленное из полупроводника в металл. Контакт обогащается ОНЗ – дырками

Таким образом, характерной особенностью невыпрямляющих контактов является наличие слоёв, обогащённых основными носителями заряда. Это означает, что в отличие от выпрямляющих контактов, для которых характерно наличие обеднённых слоёв, сопротивление контакта определяется не барьером, а нейтральным слоем полупроводника. Значит, оно не зависит от величины приложенного напряжения. Кроме того, если за счёт выбора металла, работы выхода полупроводника и металла будут близки, то высота барьера будет минимальной. Контакт с минимальной высотой барьера будет иметь большой ток насыщения, значит, малое сопротивление для прямого и обратного смещения, т.е. будет омическим. ВАХи обоих контактов приведены на рисунке

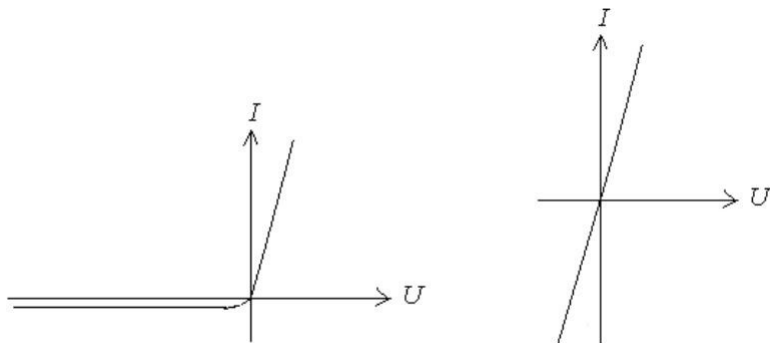


Рис.3.6. Выпрямляющий контакт

Рис.3.7. Омический контакт

Рис. 10: ВАХ выпрямляющего и омического контактов

5 Измерение вольтамперной характеристики

Снятие ВАХ проводилось с готового диода. На зонд, приведенный в контакт с поверхностью диода, подавался потенциал и проводились измерения сопротивления и силы тока. По снятым данным построим графики зависимости тока на диоде от напряжения на нем.

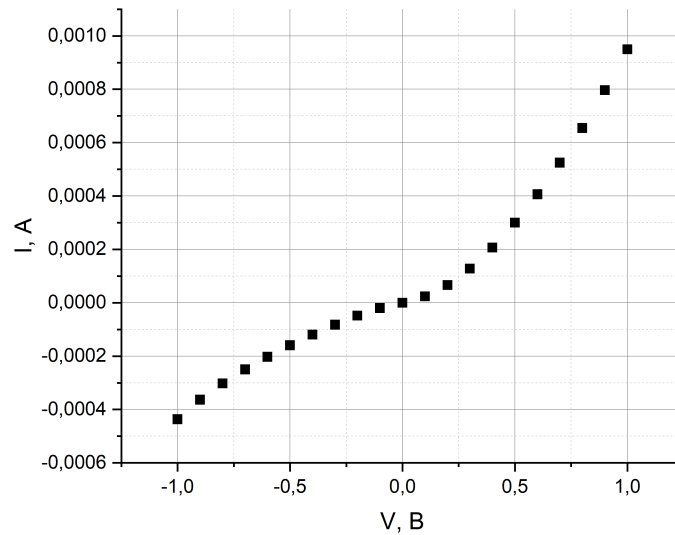


Рис. 11: вольтамперная характеристика омического контакта (Au-pSi)

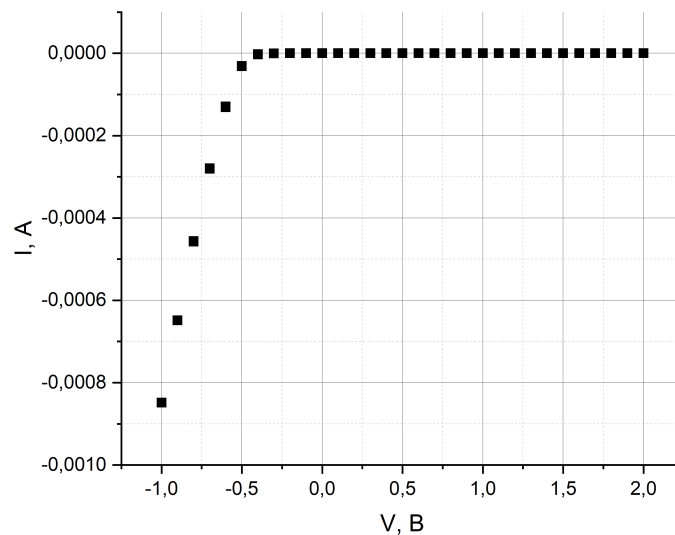


Рис. 12: вольтамперная характеристика диода Шоттки

Из графиков видно, что полученный омический имеет достаточно большое сопротивление ($\sim 10^3$) и зависимость $I(U)$ не является линейной на диапазоне измерений.

6 Выводы

1. В результате работы, были получены представления о принципах работы диода Шоттки и методах его изготовления.
2. Также были получены зависимости $I(U)$ для диода Шоттки (Al-pSi) и омического контакта (Au-pSi)