

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
(МФТИ)

КАФЕДРА ВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

ОТЧЕТ
ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

ДИОД ШОТТКИ

Работу выполнили студенты
группы Б04-004

Шандра И.
Минаков В.
Ильев С.
Чикан Д.
Грязнова Д.

Работу принял, оценка

(подпись, дата, оценка)

Долгопрудный 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ И ЦЕЛЬ РАБОТЫ	2
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....	3
СВОЙСТВА ДИОДОВ ШОТТКИ.....	8
ПРИМЕНЕНИЕ ДИОДОВ ШОТТКИ	10
ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИОДА	11
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ	13
ВЫВОД.....	14

ВВЕДЕНИЕ И ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель работы. Изучение принципа работы диода Шоттки, его изготовление. Измерение ВАХ полученного устройства и сравнение с характеристиками промышленных диодов.

Введение. Диод Шоттки – полупроводниковый диод, действие которого основано на использовании контакта металл-полупроводник. Устройство диода Шоттки показано на рисунке 1. При его изготовлении на очищенную поверхность ПП кристалла (например, Si, GaAs) наносят тонкий слой металла (Au, Al, Ag и др.). В приконтактной области ПП возникает потенциальный барьер, изменение высоты которого под действием внешнего напряжения приводит к изменению тока через прибор.



Рисунок 1 – Схема устройства диода Шоттки

Отличительные особенности диода Шоттки: быстродействие, возможность получения требуемой высоты потенциального барьера посредством выбора металла, значительная нелинейность ВАХ при малых смещениях, малая инерционность (длительность процессов при переходе диода из открытого состояния в закрытое и обратно), низкий уровень ВЧ шумов, а также возможность работать на более высоких частотах.

Основной недостаток – необратимость пробоя.

Основная задача диода в электрической цепи – выпрямление напряжения, а именно – преобразования переменного тока в пульсирующий ток одной полярности (рис. 2).

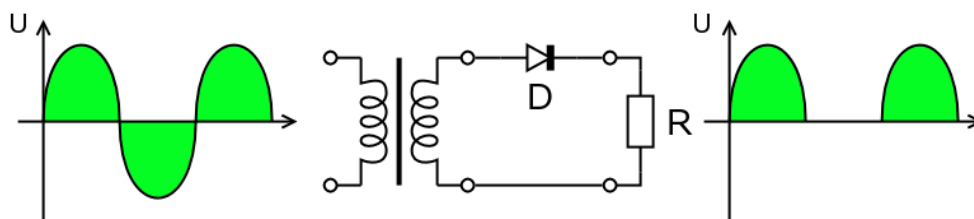


Рисунок 2 – Однополупериодный выпрямитель

Действие выпрямительного полупроводникового диода основано на использовании зависимости электропроводности электронно-дырочного перехода (контакта металл-ПП) от величины и знака приложенного напряжения.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Полупроводники n-типа – обладает донорной примесью (атом с большей валентностью). Она даёт дополнительный уровень в запрещенной зоне, который находится очень близко к зоне проводимости. Следовательно, достаточно приложить малую температуру, чтобы электрон с донорного уровня перешел в зону проводимости. Уровень Ферми при этом сдвигается и находится уже между донорным уровнем и зоной проводимости.

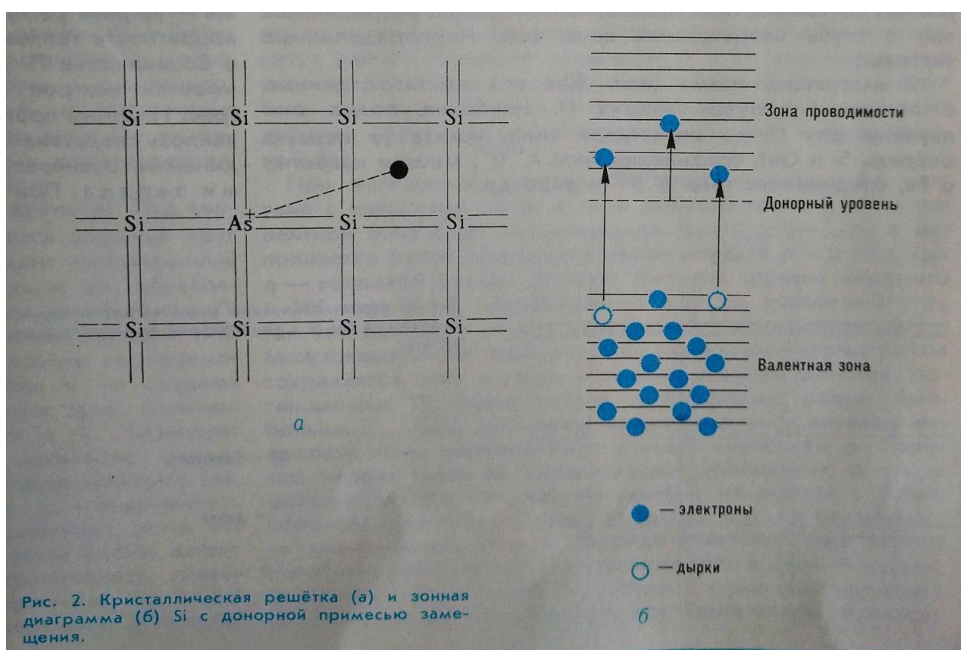


Рисунок 3 –Кристаллическая решетка и зонная диаграмма Si с донорной примесью замещения

Полупроводники р-типа – имеют акцепторную примесь (атом с меньшей валентностью). Благодаря такой примеси возникает дополнительный акцепторный уровень, близкий к зоне валентности, следовательно, достаточно приложить малую температуру, чтобы электрон перешел из зоны валентности на акцепторный уровень. Вследствие этого уровень Ферми смещается уже ближе к зоне валентности и находится между ней и акцепторным уровнем.

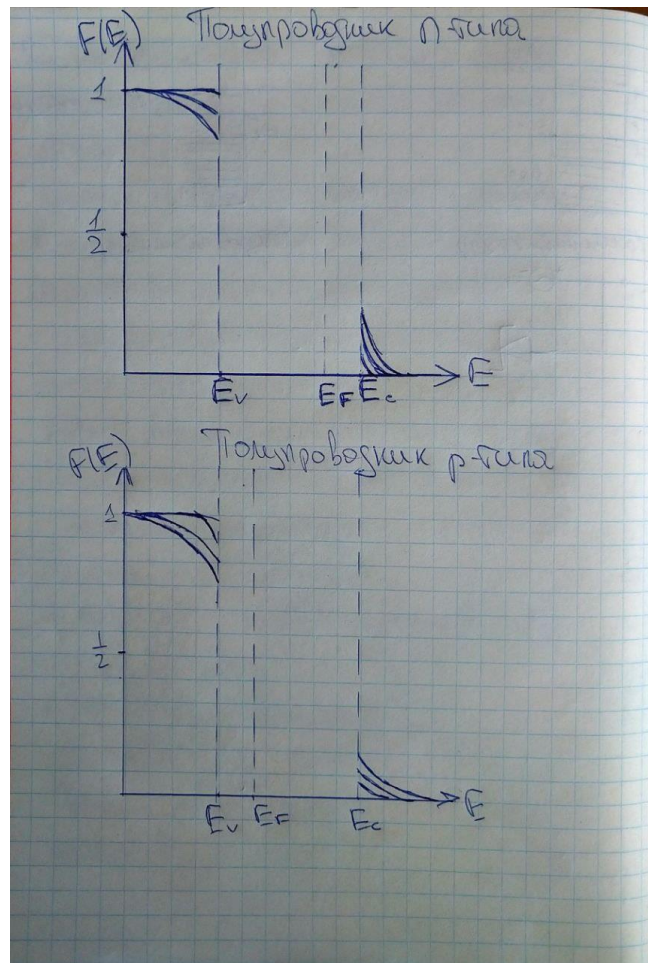
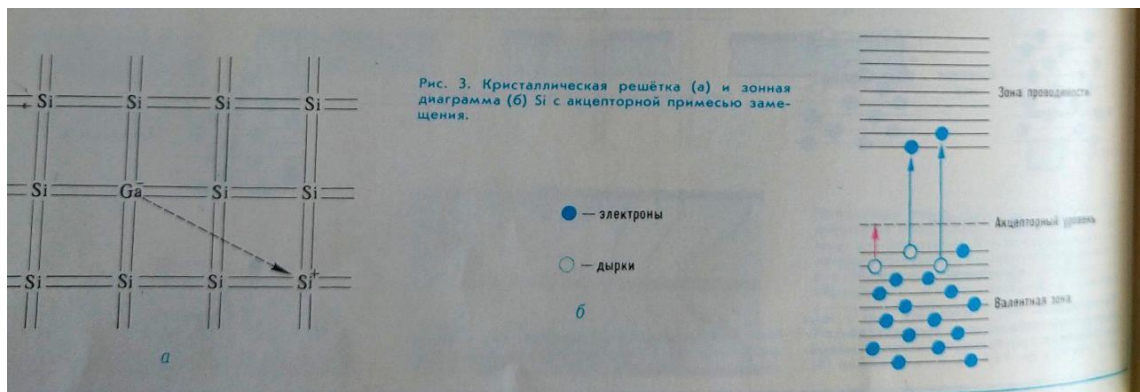


Рисунок 4 – Сравнение распределений электронов

Уровень Ферми – значение энергии, разделяющее при абсолютном нуле температуры свободные и заполненные энергетические уровни системы частиц с полуцелым спином.

Среднее число элементов на одном уровне определяется распределением Ферми-Дирака:

$$F(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{KT}\right) + 1}$$

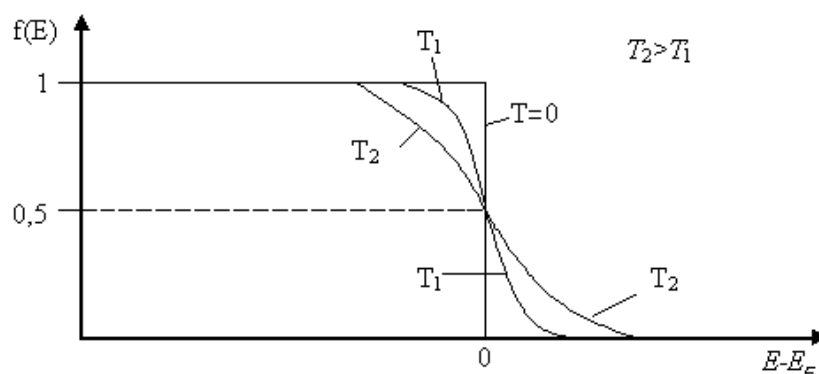


Рисунок 5 – Распределение Ферми-Дирака

Работа выхода – энергия, необходимая для удаления электрона из вещества в вакуум. На диаграмме – разница между энергией вакуума и энергией Ферми.

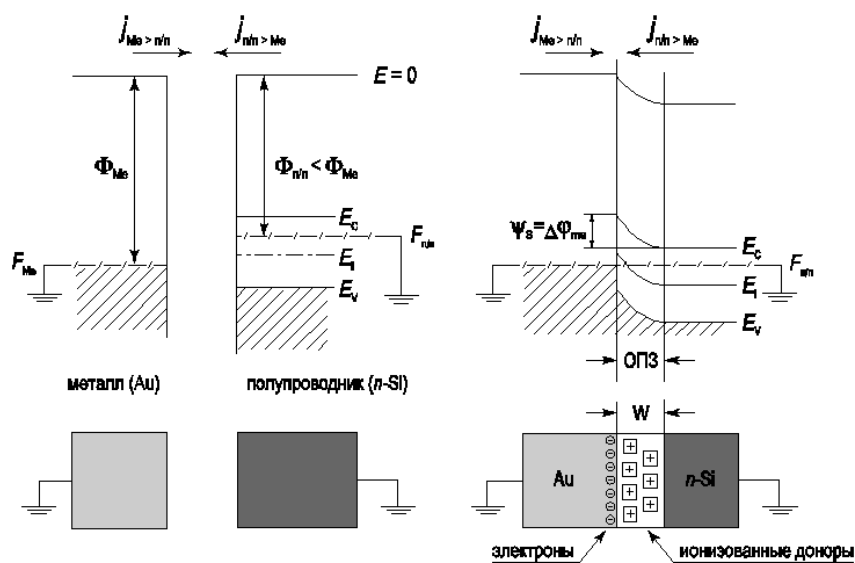


Рисунок 6 – Зонные диаграммы полупроводника и металла

$A_{out} = q\phi_m$ – работа выхода металла

$A_{out} = q\chi + qV_n$ – работы выхода полупроводника, $q\chi$ – энергия сродства

Эффект Шоттки – понижение потенциального барьера под воздействием внешнего напряжения.

$$\Delta\phi = \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_s}}$$

где E – поле в полупроводнике вблизи границы раздела, ϵ_s – диэлектрическая проницаемость полупроводника.

Контакт металл-полупроводник.

При установлении контакта М-ПП вследствие различия в работах выхода электронов материалов возникают встречные диффузионные и дрейфовые потоки, выравнивающие уровни Ферми металла и ПП. В результате вблизи границы соприкосновения образуется двойной электрический слой пространственного заряда и возникает КРП.

$$V_{bar} = \frac{\varphi_m - \varphi_n}{q}$$

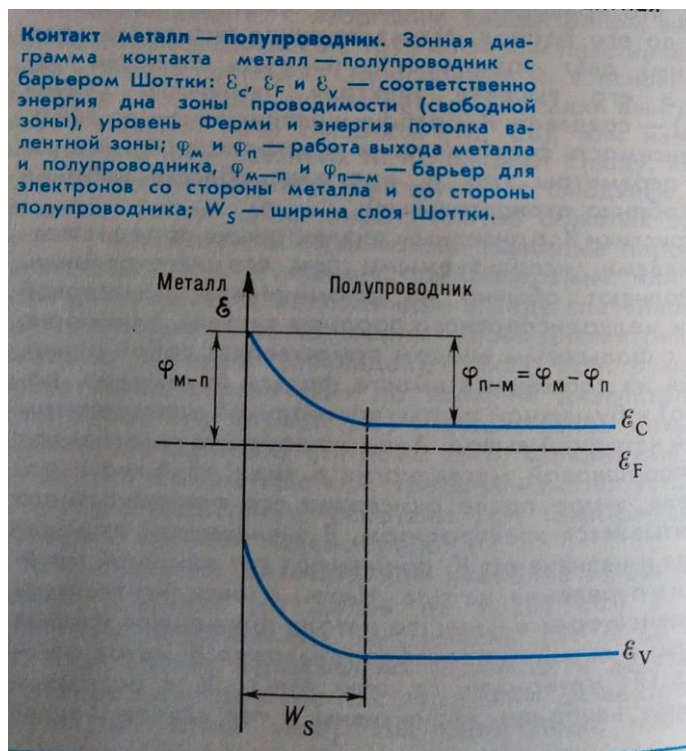


Рисунок 7 – Зонные диаграммы контакта М – ПП

Так как для металлов расстояние, на которое распространяется действие электрических зарядов (дебаевский радиус экранирования), пренебрежимо мало, переходный слой контакта М-ПП практически полностью сосредоточен в приконтактной области полупроводника.

Если в этом слое концентрация основных носителей заряда повышена по сравнению с их концентрацией в остальном объеме ПП, то слой называют обогащенным.

Контакты с обогащенным слоем могут не образовывать потенциального барьера. Такие контакты используют в качестве омических (линейная и симметричная ВАХ).

Для n-полупроводника контакт будем омическим при $\varphi_n > \varphi_m$, для p-типа – при $\varphi_n < \varphi_m$.

Если переходный слой обеднён носителями, то такой контакт называют Шоттки-контактом.

Омический контакт.

Сопротивление омического контакта пренебрежимо мало по сравнению с объемным сопротивлением полупроводника. Наиболее важной характеристикой контакта является удельное сопротивление при нулевом смещении.

$$R_c = \left(\frac{\partial J}{\partial V} \right)_{V=0}^{-1}$$

В контактах М-ПП с низким уровнем легирования преобладает термоэлектронная компонента тока:

$$R_c = \frac{k}{qA * T} \exp\left(\frac{q\varphi_{Bn}}{kT}\right)$$

В контактах М-ПП с более высоким уровнем легирования преобладает туннельная компонента тока:

$$R_c = \frac{k}{qA * T} \exp\left(\frac{q\varphi_{Bn}}{kT}\right) = \exp\left[\frac{2\sqrt{\varepsilon_s m^*}}{\hbar} \left(\frac{\varphi_{Bn}}{\sqrt{N_D}}\right)\right]$$

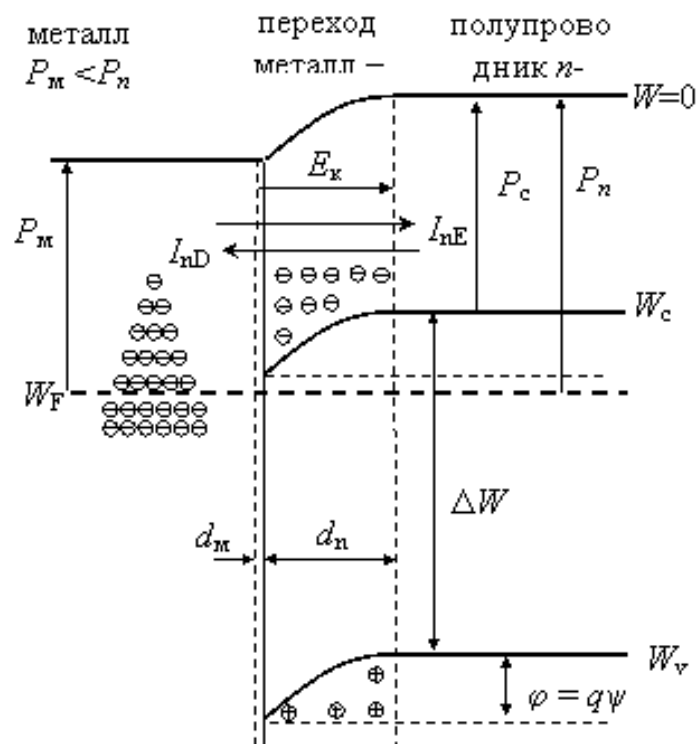


Рисунок 8 – Схема омического контакта

СВОЙСТВА ДИОДОВ ШОТТКИ

Диод Шоттки является представителем полупроводниковых элементов, обладающих барьером и отличающихся малым падением напряжения при прямом введении компонента в электрическую цепь (от 0,2 до 0,4 вольт).

Благодаря:

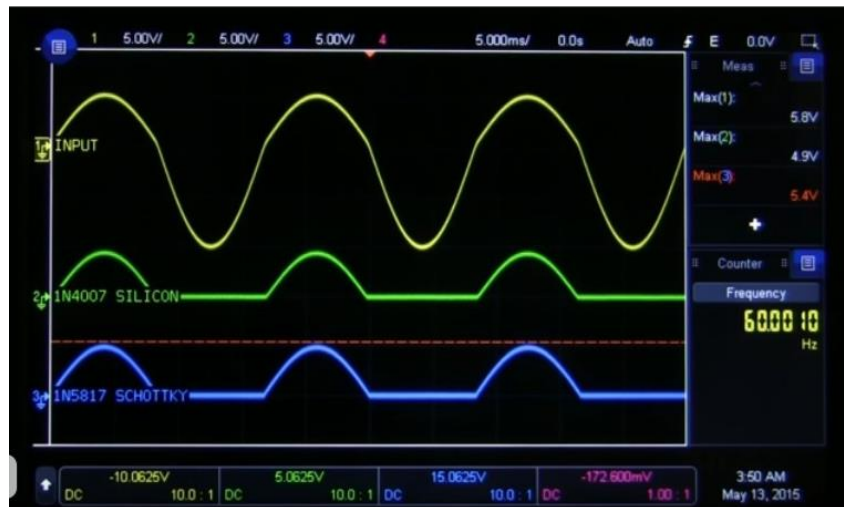
- простоте конструкции;
- оперативной возобновляемости заряда;
- неприхотливости;
- большому значению тока утечки;

барьерный диод активно используется в современной радиоэлектронике.

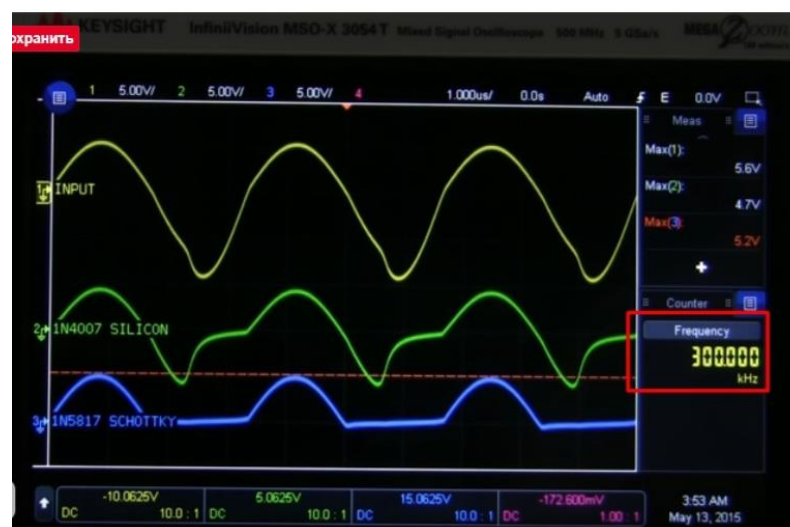
Данный компонент пропускает электрический ток в одном направлении и не пропускает его в другом, как и другие классические диоды, но обеспечивает высокое быстродействие и малое падение напряжения при переходе.

Важнейшая особенность диода Шоттки – вместо привычного электронно-дырочного перехода применяется принцип контакта между металлическими и различными полупроводниковыми материалами, что положительно влияет на повышение рабочей частоты.

А именно. Рассмотрим обычный диод и диод Шоттки, выставим частоту 60 Гц, подключим к простой схеме (переменное напряжение, диод, резистр) и будем снимать с них показания.



Но если мы увеличим частоту до 300 кГц, то



Диод Шоттки справляется с работой, что нельзя сказать об обычном диоде. Простой диод начал пропускать обратный ток.

Таким образом, данные изделия являются СВЧ-диодами различного назначения:

- импульсными;
- лавинно-пролетными;
- смесительными;
- детекторными;
- умножительными;
- параметрическими.

Другая особенность заключается в том, что большая часть диодов Шоттки состоит из низковольтных и чувствительных к статическому напряжению моделей. Однако воспринимать это как категорический недостаток неверно, поскольку это дает возможность использовать данные средства для обработки радиосигналов малой мощности.

Наконец, такие изделия отличаются большей стабильностью при подаче электрического тока, чем прочие аналоги, поскольку в их корпус внедрены кристаллические образования (кремниевая подложка).

Если же подать прямой ток на диод, то на диоде будет «оседать» напряжение (прямым падением напряжения на диоде).

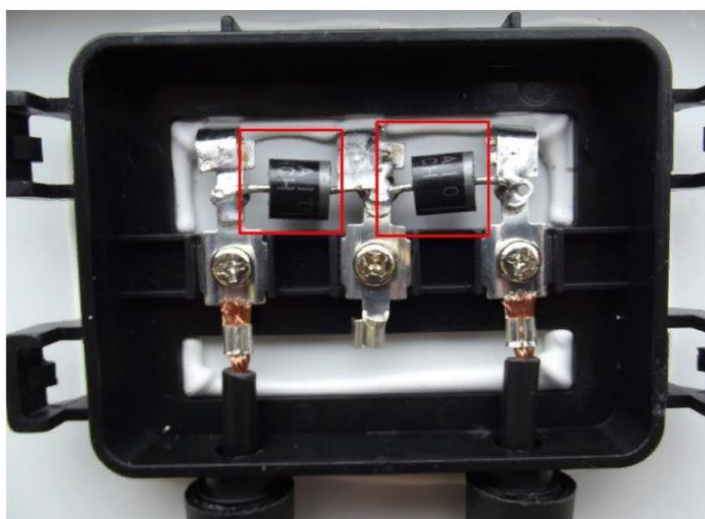
Если пропустить через такой диод прямой ток, то мощность, которая будет на нем рассеиваться, будет определяться формулой: $P = V_f \cdot I$

Поэтому, одним из главных преимуществ диода Шоттки является то, что его прямое падение напряжения намного меньше, чем у простого диода. Следовательно, он будет меньше рассеивать тепло, или простым языком, меньше нагреваться.

ПРИМЕНЕНИЕ ДИОДОВ ШОТТКИ

Компоненты активно эксплуатируются в составе разных приборов и оборудования:

- компьютерная техника и бытовая электроника;
- силовые высокочастотные выпрямители;
- солнечные батареи и приемники излучения;
- радиоаппаратура и телевизионное оборудование;
- усилители звука и МОП-транзисторы;



Изделия эксплуатируются везде, где требуется минимальное прямое падение напряжения. Популярность обусловлена преимуществами диодов Шоттки, которые позволяют восстанавливать обратное сопротивление электрического тока, стабилизировать напряжение, принимать на себя излучения, а также увеличить эффективность конечных приборов.

Недостатки диода Шоттки:

1) Если мы подключим диод в обратном направлении, то он будет блокировать прохождение электрического тока. Это верно, но не совсем. Очень маленький ток все равно будет проходить через диод. В некоторых случаях это не принимают во внимание. Этот маленький ток называется обратным током утечки. С увеличением температуры обратный ток утечки возрастает в разы!

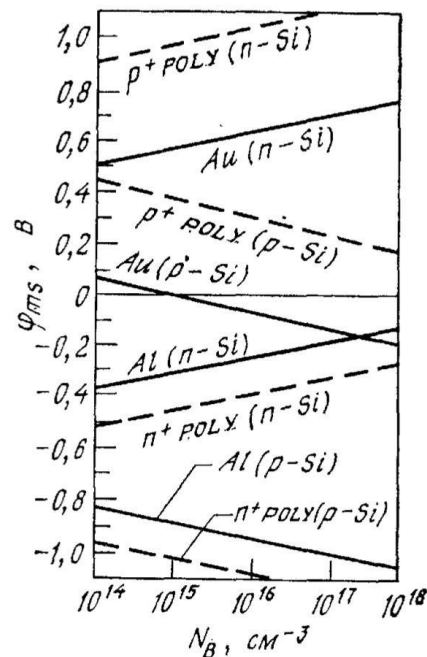
2) Пробой необратим в случаях кратковременного превышения критического напряжения.

ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИОДА

Был изготовлен стек Au(20нм)/pSi (легированный бором)/Al(50нм).

Концентрация примеси в pSi порядка 10^{15} - 10^{16} см⁻³.

Разность работ выхода металл-полупроводник в зависимости от концентрации примеси:



Удельное сопротивление pSi: 1-10 Ом·см.

Напыление было произведено на установках электронно-лучевого напыления Plassys MEB 550S и Nanomaster NEE-4000:



Рисунок 9 – Plassys MEB 550S

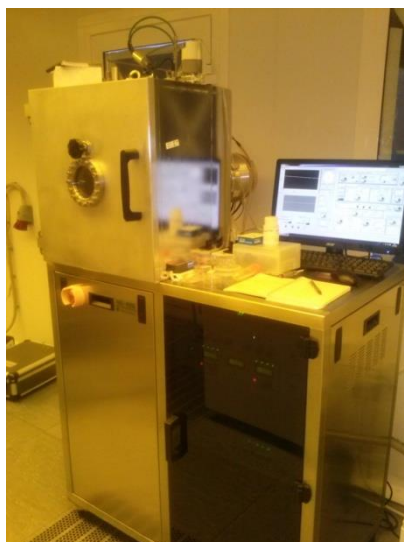


Рисунок 10 – Nanomaster NEE-4000

Электронно-лучевое напыление - метод напыления тонких пленок. В электронной пушке происходит эмиссия свободных электронов с поверхности катода и формирование их в пучок, который выводится в рабочую камеру к тиглю с испаряемым материалом. Из-за этого он нагревается до температуры, при которой испарение происходит с требуемой скоростью. В образовавшемся потоке пара располагается подложка, на которой происходит конденсация.

Установка MEB 550S Plassys предназначена для вакуумного напыления металлических тонких пленок с возможностью подачи кислорода в камеру для получения окислов металлов. Также возможен нагрев подложки до 600 градусов и чистка поверхности подложки в аргоновой плазме. Процесс напыления осуществляется автоматически с помощью ПК по заранее

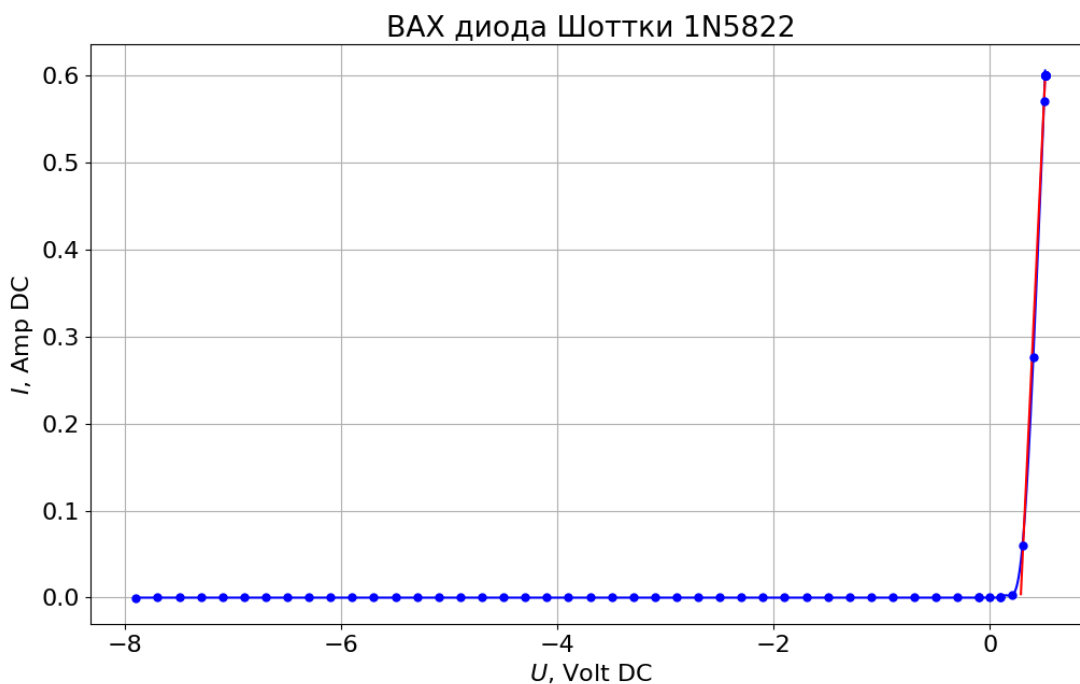
подготовленному рецепту. Одновременно в установке может находиться 4 различных материала для напыления.

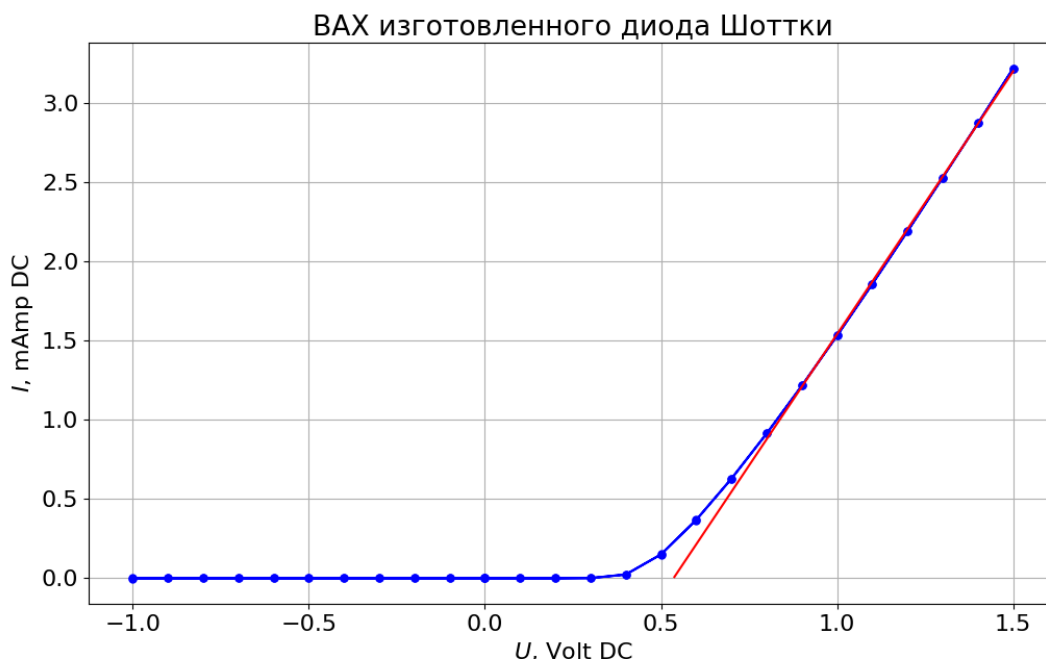
Установка NEE состоит из вакуумной камеры и блока управления электронным лучом с программируемым сканированием. Контроль работы установки осуществляется при помощи ПК с возможностью написания рецепта напыления. Вакуумная камера с ручной загрузкой образцов оснащена турбомолекулярным насосом, позволяющим проводить откачку до рабочего давления ($1 \cdot 10^{-5}$ Торр) за 15 минут. Предельное давление в камере – $5 \cdot 10^{-7}$ Торр. Одновременно в установке можно расположить 4 тигля с навесками испаряемого материала.

Все измерения были произведены на зондовой станции Cascade Microtech Summit 11000M, которая позволяет получить ВАХ диода.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Построили графики по данным, соответствующим измерениям на изготовленном диоде Шоттки и промышленном диоде Шоттки, они приведены ниже.





Предварительные выводы.

- Изготовленный диод Шоттки: при обратном напряжении ~ 1 В пробоя не происходит; открывающее напряжение $\sim 0,4$ В; коэффициент наклона аппроксимирующей прямой $\approx 3,32 \cdot 10^{-3}$ А/В.
- Промышленный диод Шоттки: при обратном напряжении ~ 8 В пробоя не происходит; открывающее напряжение $\sim 0,2$ В; коэффициент наклона аппроксимирующей прямой ≈ 2.65 А/В.
- Таким образом, промышленный диод по всем характеристикам превосходит изготовленный диод (напряжения пробоя \approx в 8 больше, открывающее напряжение меньше в 2 раза, коэффициент наклона прямой больше на 3 порядка).

ВЫВОД

В ходе данной лабораторной работы были изучены: принципы работы диодов, в частности – диода Шоттки; природа взаимодействия полупроводников и металлов; условия получения омического контакта и контакта Шоттки.

Был изготовлен диод Шоттки с помощью электронно-лучевого напылителя. ВАХ полученного диода во много схожа с характеристикой промышленного диода 1N5822, однако, уступает ему по всем основным параметрам. На результаты могло значительно повлиять образование оксида кремния на образце, а также недостаточно высокое значение вакуума при изготовлении.