

Диод Шоттки, фотодиод и транзистор, полученные напылением наноразмерных плёнок в вакууме

Медведев Э.Э.

Физика

11 класс, МБОУ СОШ № 26, МАУ ДО «Центр ДО», г. Владикавказ

Научный руководитель: Радченко Т. И., МБОУ СОШ № 26, МАУ ДО «Центр ДО г. Владикавказа», г. Владикавказ, Республика Северная Осетия - Алания

1. Введение

Выбранная тема достаточно **актуальна**, так как полупроводниковые приборы – основа современной электроники. **Проблема исследования:** в процессе изучения данные приборы остаются абстрактными понятиями. Они хорошо описаны теоретически, хотя при этом сохраняют ореол таинственности своего изготовления, тогда как стратегические принципы обучения специалистов должны заключаться не только в подготовке грамотных пользователей, ремонтников и изготовителей, но и конструкторов, которые способны разбираться в тонкостях технологии. Эти приборы должны быть не «черными ящиками», а простыми изделиями, физические принципы действия которых вполне понятны, что важно для формирования и развития конструкторского типа мышления.

Цель данного проекта – разработать и изготовить действующие модели полупроводниковых приборов: диода Шоттки, фотодиода и биполярного транзистора на базе технологии изготовления, адаптированной к учебному процессу.

Задачи – изучение основ конструирования данных приборов, разработка конструкций действующих моделей, их изготовление с применением нанотехнологий и исследование характеристик полученных изделий.

Объекты исследования – диоды Шоттки, транзисторы и фотодиоды, изготовленные путём нанесения наноплёнок.

Предмет исследования – вольтамперные и другие технические характеристики полученных изделий.

Гипотеза – реальность самостоятельных разработок полупроводниковых приборов в условиях творческого объединения для школьников.

Практическая значимость проекта: материал может быть применён для обучения основам технологии изготовления полупроводниковых приборов. То есть в данном случае произведены адаптация и упрощение реальной технологии изготовления выбранных приборов до уровня, позволяющего обучающемуся понять происходящие процессы и выполнить действия необходимые для создания действующей модели.

Новизна работы: разработана технология изготовления действующих моделей диода Шоттки, фотодиода и биполярного транзистора адаптированная к учебному процессу. При этом процесс изготовления шёл с применением вакуумной техники и основ нанотехнологии.

2. Методы исследования

Для осуществления поставленных задач был изучен соответствующий теоретический материал и проведены серии экспериментов вначале с промышленными аналогами выбранных для изучения и изготовления полупроводниковых приборов. Полученные результаты подвергались анализу с целью создания нового продукта – действующих моделей: диода Шоттки, биполярного транзистора и фотодиода. Изготовленные модели проходили исследования, результаты которых фиксировались с помощью фотографий, рисунков и таблиц. При работе над проектом использованы учебники по общей и прикладной физике, литература по полупроводниковым приборам. Например, «Физико-химические основы и технология получения тонких плёнок резистивным испарением» и «Технология экономного расходования напыляемых материалов при использовании установок термовакuumного испарения» авторов: Силаев И. В., Радченко Т. И., Гергиева Б. Э., Магкоев Т. Т.

3. Использование установки термовакуумного напыления плёнок

Процесс нанесения тонкопленочных покрытий в вакууме состоит из нескольких этапов. Это – получение вакуума необходимой глубины; качественная очистка поверхности подложки; контролируемое создание потока частиц, подлежащих осаждению; перенос частиц от испарителя до подложки; конденсация частиц на поверхности подложки; отжиг подложки для снятия термических напряжений; остывание подложки с пленкой в вакууме для предотвращения термического удара перед извлечением из установки.

На начальном этапе частицы, покинувшие испаритель, движутся с высокими скоростями (порядка сотен и тысяч метров в секунду) через вакуумное пространство и часть из них попадают на подложку. В процессе миграции частицы потеряют избыток энергии и фиксируются на подложке.

На рис.1 показаны плёнки различных металлов на покровных стёклах.



Рис. 1 . Плёнки на покровных стёклах

Испарители изготовлены из молибденовой жести толщиной 0,3 мм. Вакуум около 10^{-4} Па. Расстояние от испарителя до подложки 10 см для получения равномерной по толщине пленки. Процесс напыления: 7 - 10 секунд.

4. Полупроводниковые приборы: диоды, транзистор и фотодиод

Работа по изучению и изготовлению полупроводниковых приборов проходила от простого к сложному. Более простой вариант (устройство с одним p – n- переходом): диод.

Полупроводниковый диод [1] – прибор, который хорошо пропускает ток только одного направления. Это пластинка с областями р- и n-типа и р–n - переходом. **Диод Шоттки (с малым падением напряжения)**. Вместо р–n-перехода используется переход металл – полупроводник [2].

Биполярный транзистор [1] – радиоэлектронный компонент, позволяющий входным сигналам управлять током в цепи. Используется для усиления, преобразования, генерирования сигнала и как электронный ключ [2].

Фотодиод – приёмник оптического излучения, преобразующий свет в электрический заряд за счёт процессов в р–n- переходе. При воздействии света в базе появляются свободные носители заряда. Они устремляются к р–n-переходу. Ток определяется неосновными носителями заряда. **Фотодиод работает в двух режимах: как солнечная батарея и с внешним обратным напряжением (датчик освещенности)**. Существует фотодиод Шоттки [2].

5. Изготовление полупроводниковых структур, используя контактные маски

Предварительно рассмотрим методику оценивания толщины h напыляемых плёнок. На рис. 2 показано а) распределение испаряющегося вещества в пространстве; б) учитывая угол падения вещества на подложку; в) учитывая расстояние до подложки.

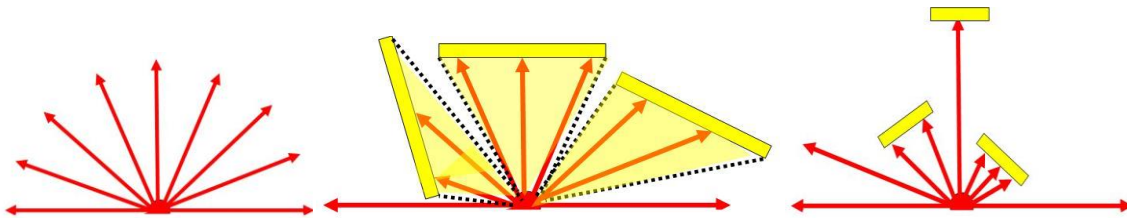


Рис. 2. Распределение испаряющегося вещества в пространстве

При разлёте вещества по полусфере радиуса R толщину плёнки определяют как

$$h = \frac{V}{S} = \frac{m / \rho}{2\pi R^2} = \frac{m}{2\pi \rho R^2}.$$

Из формулы видно, что толщина плёнки обратно пропорциональна квадрату расстояния от испарителя до подложки. И при этом повышается расход материала. Чтобы уменьшить потери можно в одном цикле напылять несколько образцов, располагая их на разных расстояниях [3].

Метод изготовления заключается в напылении наноплёнок через контактные маски. В процессе работы осуществляется контроль результатов. Объём и толщину плёнки распылённого вещества получаем по алгоритму:

- взвешиваем навеску вместе с испарителем до эксперимента – m_1 ;
- взвешиваем навеску вместе с испарителем после эксперимента – m_2 ;
- Масса испарившегося вещества $\Delta m = m_2 - m_1$. Массы испарителей $\approx 0,83$ г. Они изготавливаются из молибденовой жести толщиной 0,3 мм. Навески с массой до 0,2 г.

- зная плотность используемого вещества ρ , вычисляем объём $V = \Delta m / \rho$;
- так как толщина плёнки убывает от середины подложки к краям, необходимо выбрать площадку в центре полученного образца и измерить её площадь S ;
- вычисляем толщину плёнки $h = \Delta m / (\rho S)$.

5.1. Получение выпрямительной полупроводниковой структуры с барьером Шоттки

Процесс изготовления: на полированную пластину низкоомного кремния (10 Ом) p- типа (Si, легированный бором), диаметром 60 мм методом термовакuumного испарения нанести контакты через контактные маски. Контакты: омический – слой серебра и выпрямляющий – слой Ni (толщиной по 0.06 мкм). После изготовления полупроводниковой структуры и установки ее в корпус с нее снята вольтамперная характеристика (ВАХ).

Выводы: Измерением ВАХ установлено, что полученная структура обладает односторонней проводимостью. Прямой и обратный ток отличались в 4 раза. Для области пространственного заряда $R = 256$ Ом.

Внешний вид изделия и схема внутренней структуры на рисунке 3 а - в.



Рис. 3 а, б) изготовленный диод Шоттки (вид со стороны омического контакта и выпрямляющего контакта) ; в) структура Ni, Si-p, Ag

5.2. Изготовление фотодиода

Изготовление структуры кремниевой пластины (диаметр 76 мм).

Установка масок для напыления никеля – рисунок 4 а, б; подготовка вакуумной установки к золочению и полученное изделие – рисунок 4 в, г.

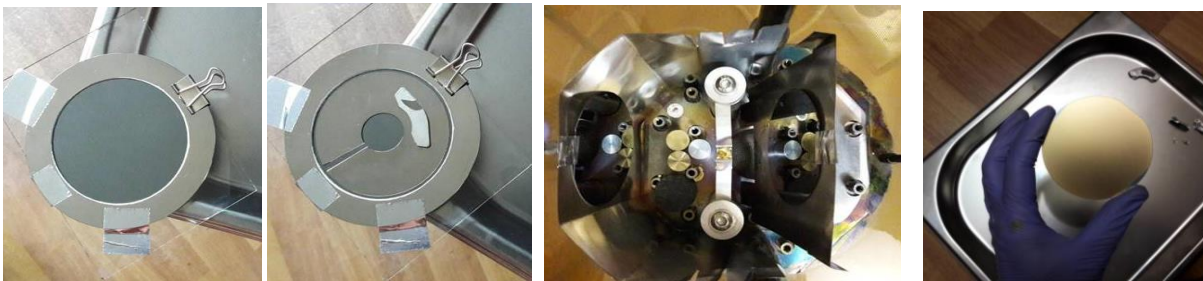


Рис. 4 а, б) установка о-образной и с-образной масок для напыления никеля; в) вакуумная установка; г) позолоченный образец

Структура фотодиода – рис. 5 а. Собранный фотодиод (рис. 5 б, в). Свет должен поступать на фотодиод со стороны прозрачного первого слоя Ni.

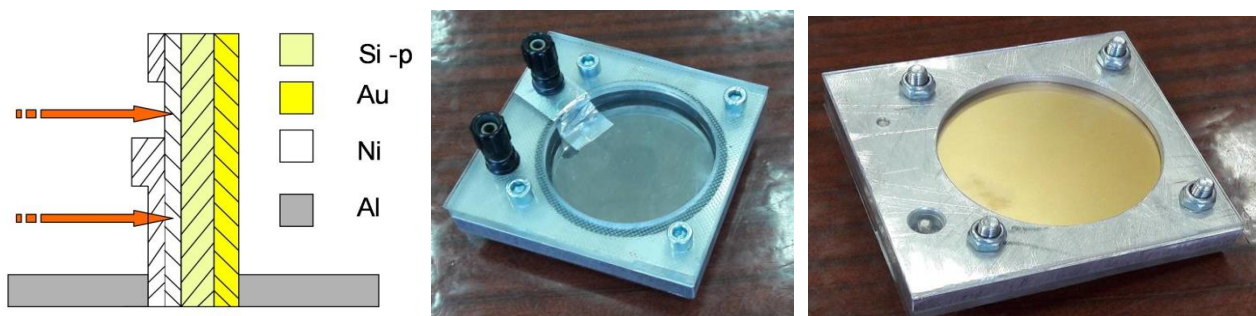


Рис. 5 а) структура фотодиода; б, в) фотодиод в корпусе: вид сверху и снизу

Двойной слой Ni необходим для обеспечения обязательных условий:

- 1) оптическая прозрачность;
- 2) возможность съема тока с никелевой плёнки.

Условию №1 отвечает тонкий слой равномерного запыления Ni в окно в о-образной маске.

Условие №2 обеспечивает второй слой Ni, напыленный в зазор между двумя масками, центральным отверстием и радиусной щелью в с-образной маске. Внешний контакт из фольги (Al) подключён к месту соединения кольцевого слоя и полоски Ni по радиусу.

Вывод: Эксперименты с фотодиодом и люксметром показали, что фотодиод Шоттки реагирует на изменение освещенности перехода металл - полупроводник с учётом процессов в металлической наноплёнке.

5.3. Изготовление биполярного транзистора и исследование его электрических характеристик

После проведения подготовительных работ (изготовления диодов Шоттки и фотодиодов) была продолжена работа уже по изготовлению биполярного транзистора.

В качестве основы использована пластина диаметром 60 мм из кремния р-типа, легированного бором. Корпус изготавливали на фрезерном и токарном станках.

Далее работа с пластиной. Вначале нанесли слой серебра. Это – «База». Контакт невыпрямляющий – омический. Для создания необходимых областей с четкими границами применялись контактные маски. Контакт «База» расположен по внешнему краю пластины. Толщина серебра около 10 мкм. Этого достаточно для механической прочности пленки и ее надежного контакта с кремнием. Следующий этап: эмиттерный переход. Метод тот же: термовакуумное напыление никеля. Эмиттер имеет меньшую площадь, чем коллектор, и он будет на той же стороне пластины, где был изготовлен контакт

«База». Использовали контактную маску, закрывающую край пластины, оставляя свободной центральную часть. Слой никеля толщиной 1 мкм достаточен для формирования механически прочной пленки, имеющей надежный контакт с Si. Более толстый слой будет отслаиваться в результате преобладания сил поверхностного натяжения перед силами адгезии [4, 5].

Контакт «Коллектор» имеет площадь, большую, чем «Эмиттер». Он создавался на обратной стороне пластины. Далее подклеили контакты из алюминиевой самоклеящейся фольги. «Сэндвич»- структура транзистора – рис. 6 а. Транзистор с барьерами Шоттки – рис.6 б. Рис. 6 в – эксперименты.

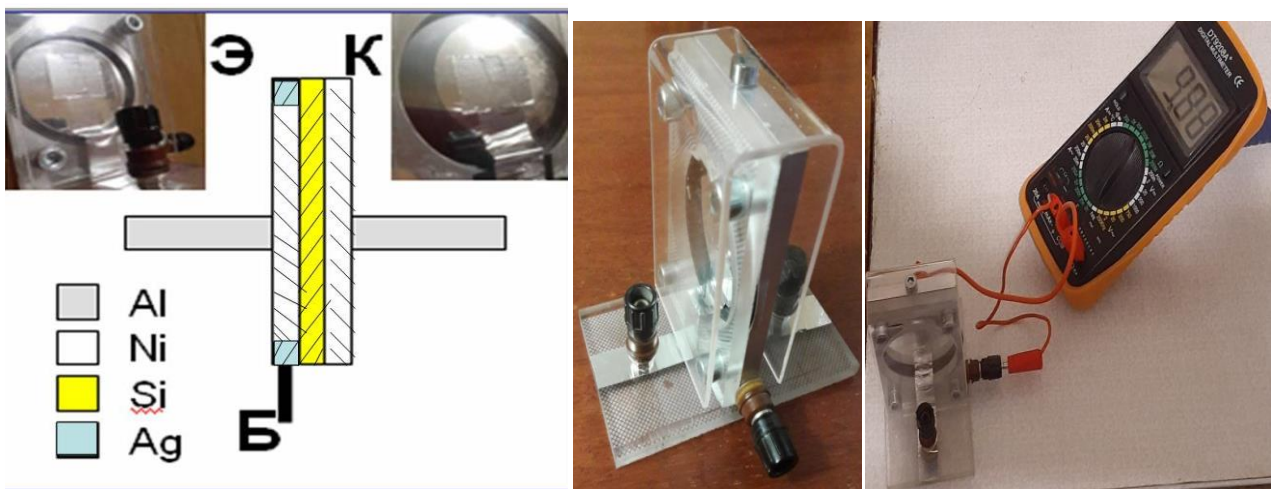


Рис. 6 а) сэндвич- структура транзистора; б) транзистор; в) эксперименты

Таблица 2. Измерение электрического сопротивления переходов
изготовленного биполярного транзистора (эмиттер – база)

Освещённость Е, лк	Электрическое сопротивление, кОм	
	Прямой переход. На эмиттере «+», на базе «—»	Обратный переход. На эмиттере «—», на базе «+»
500	18,4	27
2500 со стороны эмиттера	14,7	32
2500 со стороны коллектора	17,8	28
50	18,1	27

Выводы: Проведённая серия измерений показала влияние света на электрическое сопротивление переходов. Наиболее сильно реагирует эмиттер: освещаем прямой переход – сопротивление резко падает за счёт разрыва

ковалентных связей и появления дополнительных свободных носителей заряда. Для обратных переходов при освещении зафиксировано увеличение сопротивления. Это можно объяснить влиянием напыленного металла. В дальнейшем предполагается разобрать эти процессы с теоретической точки зрения более подробно. Также автор считает необходимым продолжить эксперименты по изготовлению фотодиодов и транзисторов согласно разработанной технологии их получения. При этом для более широкого спектра экспериментальных данных предназначенных для дальнейших исследований необходимо менять толщину плёнок, выбирая при этом для напыления и другие металлы. Можно взять другой полупроводник.

6. Заключение

Авторами для изготовления приборов был выбран вариант с использованием доступных технологий, а именно, термовакуумное напыление с использованием масок. Предварительно были проведены эксперименты по изготовлению более простых изделий с одним выпрямляющим переходом (диод Шоттки и фотодиод), что позволило лучше разобраться в технологии изготовления и внести необходимые коррективы. С полученными действующими моделями были проведены исследования. Опыты показали работоспособность приборов, предназначенных для наглядной демонстрации их устройства и принципов действия. Изделия можно использовать в учебных заведениях различного уровня, а также в работе технических кружков, повышая доступность изучаемого материала. Новизной работы следует считать то, что авторами разработана технология изготовления действующих моделей диодов и транзистора, адаптированная к учебному процессу. Эти приборы должны быть для обучающихся не «черными ящиками», а простыми изделиями, физические принципы действия которых вполне понятны. Это важно для развития конструкторского типа мышления.

7. Список литературы

1. Мякишев Г. Я. , Буховцев Б. Б., Сотский Н. Н. Физика. 10 класс. / Г. Я. Мякишев: учебник. – М.: Просвещение, 2020. – 416 с.
2. Бутенко Д. В., Созинов Б. Л., Черкасова Г. С. Исследования полупроводниковых приборов./ Электронное учебное пособие. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 64 с.
3. Костржицкий В.Ф., Карпов М.П., Кабанченко О.Н., Соловьёва А. И. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме. – М.: Машиностроение,1991. –120 с.
4. Силаев И. В., Радченко Т. И., Гергиева Б. Э., Магкоев Т. Т. Физико-химические основы и технология получения тонких плёнок резистивным испарением. / Учебное пособие. – Владикавказ: Изд-во СОГУ, 2016. – 136 с.
5. Силаев И. В., Магкоев Т.Т., Радченко Т. И. Технология экономного расходования напыляемых материалов при использовании установок термовакuumного испарения. //Международный журнал экспериментального образования. 2016. №. 6 (часть 2). С. 95.