

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО МАТЕРИАЛАМ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве методических указаний к лабораторным работам*

САМАРА
Издательство СГАУ
2009

УДК СГАУ: 621.315

Составители: **В.Н. Буров,** *А.В. Архипов*

Рецензент канд. техн. наук, доц. Г.П. Ш о п и н

Лабораторный практикум по материалам электронных средств: метод. указания к лаб. работам/ сост. **В.Н. Буров** *А.В. Архипов.*
- Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. – 60 с.

Предназначен для изучения электротехнических свойств материалов, широко используемых в элементах электронной техники. Содержит краткие теоретические сведения, а также указания к проведению экспериментов и составлению отчета.

Рекомендуется студентам специальностей «Конструирование и технология радиоэлектронных средств» и «Биотехнические и медицинские аппараты и системы».

Учебное издание

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО МАТЕРИАЛАМ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

Методические указания к лабораторным работам

Составители: **Буров Виктор Николаевич**
Архипов Алексей Владимирович

Редактор Л.Я. Чегодаева
Доверстка А.В. Ярославцева

Подписано в печать 21.05.2009 г. Формат 60х84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 3,75.
Тираж 100 экз. Заказ **89** . Арт. С- 23/2009.

Самарский государственный аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2009

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: ознакомиться с основными видами поляризации материалов, используемых в конденсаторах.

Задания:

1. Для образцов конденсаторов экспериментально определить зависимость диэлектрической проницаемости от температуры на фиксированной радиочастоте.
2. На основе существующих моделей поляризации диэлектриков определить вид поляризации, дать теоретическую интерпретацию.

Теоретические сведения

Классификация диэлектриков

Из опыта известно, что емкость вакуумного конденсатора C_0 возрастает в ϵ раз при заполнении объема между обкладками электродов диэлектриком:

$$C = \epsilon C_0. \quad (1)$$

Величина ϵ получила название диэлектрической проницаемости. Внесение диэлектрика приводит к ослаблению начального электрического поля в ϵ раз, что является следствием реакции молекул, образующих диэлектрик, на внешнее электрическое поле. Действительно, при внесении диэлектрика в электрическое поле происходит нарушение симметрии молекул из-за смещения зарядов, образующих диэлектрик (рис. 1).

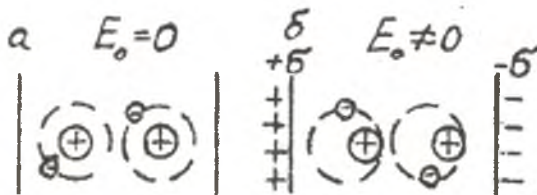


Рис. 1. Поляризация неполярных атомов диэлектриков: а – без электрического поля; б – в электрическом поле

Необходимо различать два класса диэлектриков:

А — диэлектрики, молекулы которых построены из электрических зарядов столь симметрично, что в отсутствие электрического поля молекулярный дипольный момент $\bar{p} = 0$;

Б — диэлектрики, молекулы которых в отсутствие внешнего электрического поля обладают некоторыми дипольными моментами $\bar{p} \neq 0$.

К классу А относятся газы, ряд жидких и твердых диэлектриков, таких как парафин, полистирол, фторопласт, алмаз. Диэлектрики этого класса называются неполярными и, как правило, обладают малой величиной ϵ .

К классу Б относится подавляющее большинство органических диэлектриков и ряд неорганических жидкостей, например вода. Диэлектрики этого класса получили название полярные, они обладают достаточно высокими значениями ϵ .

В основу определения количественной меры поляризации диэлектрика положен вектор дипольного момента молекул (атомов) вещества:

$$\bar{p} = q\bar{l}, \quad (2)$$

где q - заряд; \bar{l} - вектор, направленный от отрицательного заряда молекулы к положительному и численно равный расстоянию между зарядами.

Между вектором дипольного момента P и диэлектрической проницаемостью существует однозначная зависимость:

$$\epsilon = 1 + 4\pi N\bar{P} / \bar{E}. \quad (3)$$

Диэлектрики класса А

Во внешнем электрическом поле поляризация молекул диэлектрика класса А происходит за счет нарушения сферической симметрии в расположении зарядов, образующих молекулу. Дипольный момент, приобретаемый молекулой, пропорционален напряженности электрического поля:

$$\bar{P} = \alpha \bar{E}, \quad (4)$$

где α — поляризуемость молекулы.

Схематически процесс образования диполей представлен на рис. 1.

Очевидно, что величина смещения \bar{l} будет обратно пропорциональна жесткости упругой связи k между зарядами молекулы и прямо пропорциональна силе электростатического растягивания зарядов во внешнем поле $q\bar{E}$. Таким образом, можно заключить, что

$$\bar{l} = q\bar{E}/k, \quad (5)$$

а дипольный момент и поляризуемость единичной молекулы имеют вид:

$$\bar{P} = \bar{l}q = q^2\bar{E}/k, \quad (6)$$

$$\alpha_A = q^2/k. \quad (7)$$

Выражения (3), (6), (7) позволяют получить аналитическое выражение для диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon_A = 1 + 4\pi Nq^2/k. \quad (8)$$

В выражении (8) параметрами, зависимыми от температуры, являются N и k . Однако их температурные изменения проявляются весьма незначительно вплоть до очень высоких температур (например, у твердых диэлектриков – до температуры плавления). Поэтому диэлектрическая проницаемость диэлектриков класса А практически не зависит от температуры окружающей среды.

Диэлектрики класса Б

Молекулы диэлектриков класса Б обладают дипольным моментом $\bar{P} \neq 0$ даже в отсутствие внешнего электрического поля, что обусловлено асимметричным строением молекул. В отсутствие внешнего электрического поля все молекулярные диполи ориентированы хаотично. Поляризация проявляется в том, что электростатические силы стремятся повернуть начальные молекулярные диполи \bar{P}_0 в направлении поля. Пропорциональность поляризации напряженности электрического поля вытекает из того обстоятельства, что хаотическое тепловое движение молекул (в частности, их колебания, собственные вращения и взаимные столкновения) приводит к нарушению порядка в ориентации диполей, т.е. к деполяризации диэлектрика. Таким образом, фактическая величина поляризации определяется соотношением между упорядочивающим воздействием электрического поля и противоположным воздействием теплового движения молекул. В этой связи очевидно, что величина поляризации диэлектриков класса Б будет монотонно уменьшаться с ростом температуры.

Статистически средняя величина \bar{P}_x диэлектриков класса Б может быть определена из выражения

$$\bar{P}_x = \frac{\bar{P}_0^2}{3kt} \bar{E}, \quad (9)$$

и, следовательно, $\alpha_B = \bar{P}_0^2 / 3kT$. С учетом выражений (3) и (9) диэлектрическая проницаемость может быть представлена в виде

$$\varepsilon_B = 1 + 4\pi N(\bar{P}_0^2 / 3kT). \quad (10)$$

Согласно выражению (10) диэлектрическая проницаемость полярных диэлектриков должна уменьшаться по гиперболическому закону с увеличением температуры.

Представляется очевидным, что если в диэлектрике имеют место оба механизма поляризации (А и Б), то зависимость диэлектрической проницаемости от параметров молекулярной структуры диэлектрика определяется выражением:

$$\varepsilon = 1 + 4\pi N(\alpha_A + \alpha_B), \quad (11)$$

а графическое представление зависимости $\varepsilon = \varphi(T)$ выглядит, как показано на рис. 2, кривая а.

Рассмотренные аналитические зависимости находятся в хорошем количественном соответствии с экспериментальными данными для диэлектриков, выполненных на основе газов, полярных и разбавленных полярных жидкостей.

Для полярных, жидких, твердых диэлектриков наблюдается только качественное соответствие, а количественные оценки значительно расходятся с экспериментальными данными. Причина расхождения заключается в том, что во всех рассмотренных выражениях в качестве напряженности электрического поля, воздействующего на элементарный молекулярный диполь, принималось усредненное макроскопическое поле в диэлектрике. Однако, ввиду чрезвычайно сильного взаимного электрического влияния соседних диполей, микроскопическое (локальное) электрическое поле, непосредственно воздействующее на молекулярный диполь, может значительно отличаться от макроскопического.

Следует также учитывать тот факт, что часто рост температуры приводит к изменению фазового состояния вещества диэлектрика (для большинства органических диэлектриков, например, в температурном

интервале 60... 110°C наблюдается переход из твердого состояния в высокоэластичное), что сопровождается резким уменьшением межмолекулярных связей, и ход зависимости $\varepsilon = \varphi(T)$ приобретает следующий вид, рис. 2, кривая б.

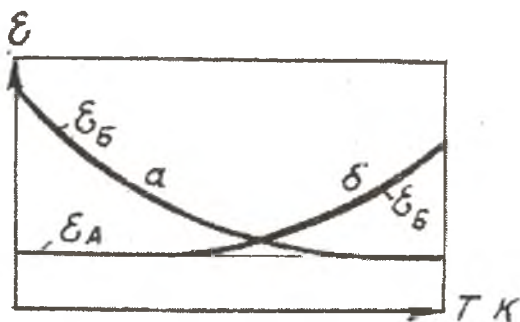


Рис. 2. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости

Виды поляризации диэлектриков

При смещении электронов относительно положительно заряженного ядра возникает поляризация, которую называют электронной. В полярных диэлектриках, обладающих ионной или дипольной структурой, под действием электрического поля возникают ионная или дипольная поляризация. Величина ε у таких диэлектриков не превышает 100. Однако у некоторых диэлектриков при определенных температурах величина ε может достигать значений 10^5 . Это результат влияния спонтанной поляризации, которая существует у сегнетоэлектриков. Существует также объемная поляризация, связанная с накоплением в локальных зонах диэлектрика свободных зарядов проводимости, и остаточная поляризация у аморфных диэлектриков.

Методика проведения исследования

Указания по выполнению работы

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3.

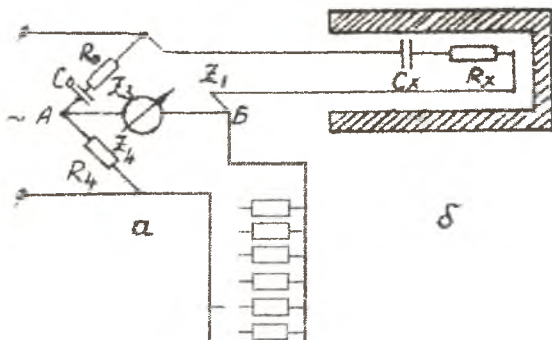


Рис. 3. Принципиальная схема установки для определения температурной зависимости диэлектрической проницаемости на низких частотах:
 а - измеритель емкости; б - термостат с образцом диэлектрика

Она состоит из термостата, в котором размещаются экспериментальные образцы диэлектриков, и измерительного моста. Первое плечо моста образуется исследуемым конденсатором, который можно представить эквивалентной последовательной схемой замещения: C_x, R_x . Третье плечо состоит из образцового конденсатора C_0 и магазина сопротивлений R_0 . Второе и четвертое плечи моста образованы магазинами сопротивлений R_2 и R_4 . В одну диагональ моста включен источник питания, в другую индикатор нуля (микроамперметр). Если для полных сопротивлений всех плеч моста выполняется условие:

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3, \quad (12)$$

то разность потенциалов между точками А и Б равна нулю и отклонение стрелки индикатора нуля будет минимально. Согласно выражению (12), зная величины Z_2, Z_3, Z_4 , можно определить величину Z_1 , а следовательно, и емкость конденсатора.

Для уравнивания моста изменением емкости C_0 добиваются минимального показания индикатора нуля. Далее, оставляя неизменным C_0 , изменяют величину R_0 с целью дальнейшего уменьшения показания индикатора нуля. Затем, не изменяя положения R_0 , снова производят подстройку C_0 . Операции последовательной подстройки C_0 и R_0 производятся 3-4 раза. Все промышленные измерительные мосты прокалиброваны таким образом, что непосредственно свидетельствуют о величине емкости образца.

Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя экспериментальные образцы.
2. Ознакомиться с экспериментальной установкой.
3. Измерить емкость образцов при различных температурах. Результаты измерения внести в табл. 1, форма которой выбирается произвольной.
4. Вычислить значение ε при различных температурах, используя формулу

$$C_x = \varepsilon_0 \varepsilon * S / d, \quad (13)$$

где $\varepsilon_0 = 8.85 * 10^{-12} \text{ Ф/м}$;

S - площадь образца, м^2 ;

d - толщина образца, м;

C_x - емкость образца, Ф.

Полученные значения ε внести в табл. 1.

5. Построить график зависимости $\varepsilon = \varphi(T)$.
6. Для нескольких конкретных температур методом графического дифференцирования определить температурный коэффициент изменения ε по формуле

$$TK_{\varepsilon_T} = 1 / \varepsilon_T * \Delta \varepsilon / \Delta T \text{град}^{-1}. \quad (14)$$

7. По полученным графикам $\varepsilon = \varphi(T)$ определить вид поляризации диэлектриков.
8. Сформулировать основные выводы по работе.

Вопросы к коллоквиуму

1. Что представляет собой явление поляризации?
2. Как отличить поляризацию материалов классов А и Б?
3. Как установить, что диэлектрик конденсатора – сегнетоэлектрик?
4. Дайте определение ε .
5. Какова сущность метода исследования поляризации диэлектриков?

Библиографический список

1. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники/ В.В. Пасынков. - М.: Высш. шк., 1986. - 306 с.
2. Казарновский, Д. М. Испытания электроизоляционных материалов/ Д.М. Казарновский. - М.: Энергия, 1972. - 186 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЗИСТОРОВ

Цель работы: исследование влияния температуры на удельное сопротивление непроволочных резисторов.

Задание:

1. Для образцов резистивных материалов экспериментально определить температурный коэффициент удельного электрического сопротивления.
2. Дать теоретическую интерпретацию полученных экспериментальных резисторов.
3. Определить группы материалов, из которых выполнены исследуемые образцы.

Теоретические сведения

Электрические свойства резистивных материалов

Наилучшими проводниками тока являются металлы. Механизм протекания тока по металлам в твердом состоянии обусловлен движением свободных электронов, вследствие чего их называют проводниками с электронной проводимостью. Металлические проводниковые материалы могут быть разделены на материалы с высокой проводимостью и материалы высокого сопротивления. Металлы с высокой проводимостью используются для проводов, кабелей, обмоток электрических машин и трансформаторов, для изготовления волноводов и т.д. Металлы высокого сопротивления применяются в реостатах, резисторах, лампах накаливания, нагревательных элементах.

Основными электрическими характеристиками проводниковых материалов являются:

- удельное сопротивление ρ , Ом·м, или мкОм·м.;
- температурный коэффициент удельного сопротивления ТК ρ , 1/град;
- термоэлектродвижущая сила относительно меди $E^{20.100}$ мкВ/°С.

Удельное электрическое сопротивление связано с сопротивлением R проволоки любой длины l и площади поперечного сечения S известной формулой: $\rho = R(S/l)$.

Удельное сопротивление металлического проводника может быть выражено на основании представлений электронной теории металлов:

$$\rho = (2mU_{cp}) / (q^2 n_0 \lambda_{cp}),$$

где m – масса электрона; U_{cp} – средняя скорость теплового движения электрона внутри металлического проводника; q – заряд электрона; n_0 – число электронов в единице объема металлического проводника; λ_{cp} – средняя длина свободного пути электрона.

Скорость теплового движения электронов относительно мало зависит от температуры, т.е. электронный газ в металлических проводниках находится в состоянии «вырождения». Для различных проводников она примерно одинаковая. Незначительно отличается также и число свободных электронов в единице объема проводников, так, например, для меди и никеля это различие составляет 10%. Поэтому удельное электрическое сопротивление различных проводников в основном не зависит от средней длины свободного пробега электрона в проводнике, связанной со строением проводника, с его структурой. Все чистые металлы с наиболее правильной кристаллической решеткой характеризуются наименьшими значениями удельного сопротивления, а сплавы всегда имеют повышенное значение ρ в сравнении с компонентами, входящими в их состав. Повышенное сопротивление сплавов объясняется тем, что число свободных электронов и длина свободного пробега электрона у них понижены по сравнению с чистыми металлами. С повышением температуры колебания узлов кристаллической решетки металлического проводника становятся все более активными, и на пути направленного движения электронов под воздействием электрического поля возникает все больше и больше препятствий, т.е. средняя длина свободного пробега электронов уменьшается, а сопротивление, следовательно, возрастает. Величина, характеризующая возрастание удельного сопротивления, получила название температурного коэффициента удельного сопротивления ($TK\rho$).

Так как зависимость ρ от температуры близка к линейной, то в технике принимают:

$$\rho = \rho_0 [1 + TK\rho(t - t_0)],$$

где ρ_0 – значение ρ при $t = t_0$. Для чистых металлов $TK\rho$ всегда больше, чем для сплавов из этих металлов, они имеют положительный

знак и близки к $1/273$, т.е. к $0,004 \text{ K}^{-1}$. Температурные коэффициенты сплавов могут быть очень малы, а в некоторых случаях приобретать и отрицательные значения.

Проводящий слой резисторов может быть из полупроводникового материала (в основном в том случае, когда резистивный элемент используется как датчик тепла давления или света). Подвижность носителей заряда в полупроводниках, так же как и в проводниках, уменьшается с ростом температуры по причине, изложенной выше. Однако изменение подвижности $\mu \approx T^{-3/2}$. В то же время число носителей заряда с увеличением температуры не сохраняется (как в случае металлов), а увеличивается:

$$n \approx n_0 \exp(-\Delta W / 2kt),$$

где ΔW – ширина запрещенной зоны полупроводника.

Таким образом, с ростом температуры протекает два противоположных процесса: уменьшение подвижности и увеличение числа носителей. Вообще можно утверждать, что для предсказания поведения материала в тех или иных условиях необходимо произвести анализ процессов, протекающих под действием того или иного фактора окружающей среды и оценить степень влияния процессов на параметры материала.

Как правило, благодаря экспоненциальному характеру изменения числа носителей в полупроводниках второй процесс преобладает над первым. В результате электропроводность полупроводников возрастает с ростом температуры, следовательно, сопротивление уменьшается. Таким образом, $\text{TK}\rho$ полупроводниковых резисторов имеет отрицательный знак.

Влияние конструктивных особенностей резисторов на ТКρ

Рассмотренные моменты справедливы для материалов, обладающих идеальной кристаллической решеткой, - для монокристаллов. В реальных же условиях приходится иметь дело с поликристаллическими материалами. Рассмотрим, как это обстоятельство может влиять на температурные параметры резисторов. Остановимся на металлопленочных резисторах. В конструктивном отношении этот тип резисторов выполнен в виде тонкопленочного поликристаллического металлического слоя на керамическом основании. Токопрохождение обусловлено движением электронов внутри каждого кристалла и между смежными кристаллитами.

В первом случае движение носителя происходит в пределах совершенной кристаллической решетки, поэтому сделанные ранее выводы справедливы. Второй случай имеет свои особенности. Очевидно, что возможность продвижения носителя заряда между смежными кристаллитами существенно зависит от расстояния между ними, от состояния границ зерен (наличие примесных атомов на поверхности кристаллита, аморфной фазы и т.д.) и от геометрических факторов соприкосновения кристаллитов, т.е. от контактного сопротивления между отдельными кристаллитами. В любом случае можно утверждать, что движение электронов преимущественно происходит в точках соприкосновения отдельных кристаллитов, так как другие пути имеют гораздо более высокое сопротивление.

С ростом температуры происходит линейное расширение как самого покрытия, так и керамического основания. Однако коэффициент линейного расширения керамического основания во много раз меньше коэффициента линейного расширения металлов, поэтому имеет место своеобразное сжатие металлического покрытия. В результате происходит сжатие зерен и, следовательно, увеличение площади соприкосновения кристаллитов, а значит, уменьшение контактного сопротивления.

Таким образом, знак и величина ТКС будут определяться по результатам суммарного взаимодействия двух рассмотренных конкурирующих процессов, поэтому не исключено, что ТКС металлопленочного резистора окажется отрицательным.

Особенности технологии изготовления резисторов

В промышленности нашли применение резисторы из углеродистых, металлопленочных, металлооксидных, полупроводниковых и композиционных материалов.

Для изготовления углеродистых резисторов применяют пиролитический углерод, получаемый разложением углеводородов, чаще гептана (C_7H_{16}). Пленки пиролитического углерода толщиной 10^{-6} см имеют плотность $2,05$ г/см³, удельное объемное сопротивление $1,5 \cdot 10^{-5}$ Ом·м, отрицательный температурный коэффициент сопротивления $-(2 - 4) \cdot 10^{-4}$ 1/°C и температурный коэффициент линейного

расширения $6,6 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$. Они имеют низкую себестоимость, малую зависимость от частоты, высокую стабильность параметров и стойкость к импульсным нагрузкам. Для изготовления металлопленочных и металлооксидных резисторов применяют тонкие пленки из металлов, сплавов или окислов, нанесенных на основание (керамику, стекло, ситалл и др.). Нанесение пленок ведется испарением в вакууме, катодным, реактивным или ионно-плазменным распылением, термическим разложением, электрохимическим осаждением, вжиганием и др. методами. Для получения пленочных резисторов наиболее часто применяют нихром, тантал, хром, палладий и их сплавы. Например, тонкие пленки нитрида тантала, защищенные пятиокисью тантала, имеют очень стабильные параметры. В основном для защиты пленок используется двуокись кремния.

Металлооксидные резисторы обладают высокой термостойкостью, и область их применения расширяется (особенно на основе двуокиси олова).

Композиционные резисторы типа кермет, РС-3001, РС-3760 и МЛТ получают из смеси различных материалов. Например, кермет, получаемый композицией 90% хрома и 10% кремния, представляет собой металлоглазуревую композицию. Смешением порошков металлов с окисью кремния и растворителем получают пасту, которую наносят на подложку и подвергают термообработке при 1100°C . Полученная пленка резистора толщиной 20-25 мкм обладает высокой термостойкостью, влаго- и износостойкостью, стабильностью характеристик, получаемые из нее резисторы обладают номиналами от 10^3 до 10^6 Ом.

Резистивный сплав РС-3001, имеющий 31,8% хрома, 0,9% железа и 60% кремния, обеспечивает номиналы сопротивления от 100 до 10^6 Ом.

Методика проведения исследований

Исследование ТКС резисторов проводится на установке, схема которой представлена на рис. 1. Установка состоит из термошкафа с размещенными в нем резисторами, измерителя сопротивления и измерителя температуры, состоящего из термомпары и индикатора.

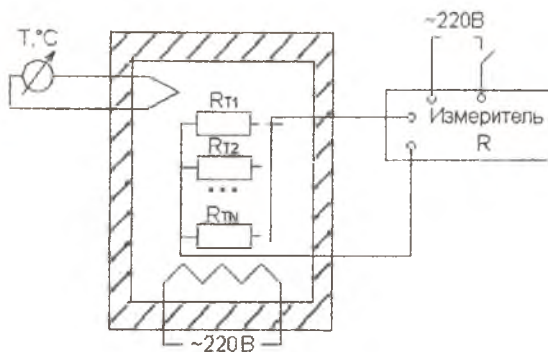


Рис. 1. Схема лабораторной установки

Измерение сопротивления производится цифровым омметром. Индикатор температуры проградуирован в $^\circ\text{C}$.

Порядок выполнения работ

1. Ознакомьтесь с экспериментальной установкой.
2. Откройте термошкаф и по виду резисторов внутри шкафа сделайте предположение о материалах, из которых выполнены резисторы, и о стабильности исследуемых резисторов.
3. Включите установку, для чего установите тумблер на левой боковой панели измерительного моста в верхнее положение.
4. Проведите измерения всех исследуемых резисторов с помощью переключателя, расположенного на дверце термошкафа. Результаты занесите в табл. 1.
5. Закройте дверцу термошкафа и включите его, поставив тумблер на передней панели в верхнее положение.
6. Проведите измерение всех исследуемых резисторов через каждые $10\text{ }^\circ\text{C}$. Результаты измерений температуры и сопротивления занесите в табл. 1.
7. Постройте график зависимости $R=\varphi(T)$.
8. Определите величину и знак ТКС резисторов.
9. Сформируйте выводы о правильности сделанных выше предположений (см. приложение, табл. 1, 2).

Таблица 1

№ п/п	T, °C	Тип резистора (при визуальном осмотре)	R ₁	R ₂	...	R _N
1	20					
...						
...						
10	120					
TKC [1/°C]						

Вопросы к коллоквиуму

1. Чем объясняется знак $TK\rho$ резисторов?
2. Влияет ли конструктивное исполнение резистора на $TK\rho$?
3. Какова структура композиционных резисторов?
4. В чем заключаются преимущества и недостатки проволочных и непроволочных резисторов?
5. Какие материалы используются для изготовления металлизированных и металлооксидных резисторов?

Библиографический список

1. Буров, В.Н. Измерительные приборы для исследования свойств материалов РЭА. Универсальные приборы: метод. указания /В.Н. Буров. - Куйбышев: КуАИ, 1982.-34 с.

Таблица 1. Основные параметры некоторых наиболее распространенных типов резисторов

Тип резистора	Номинальная мощность, Вт	Диапазон номинальных сопротивлений	Допускаемое отклонение номинала, %	Предельная рабочая температура, °С
<i>Постоянные непроволочные углеродистые</i>				
BC	0,125 – 10	10 Ом – 10 МОм	5, 10, 20	125
C1 – 8	0,125 – 1	10 Ом – 10 МОм	1, 2, 5	125
C1 – 4	0,125 – 0,5	10 Ом – 10 МОм	2, 5, 10	125
<i>Металлодиэлектрические и металлооксидные</i>				
МЛТ	0,125 – 2	8,2 Ом – 10 МОм	5, 10, 20	125
C2 – 8	0,125 – 1	10,2 кОм – 10МОм	1, 2, 5	155
C2 – 23	0,125 – 2	24 Ом – 10 МОм	1, 2, 5, 10, 20	155
C2 – 1	0,125 – 2	10 Ом – 5,1 МОм	5, 10	155
<i>Композиционные</i>				
C3 – 2	0,05	10 Ом – 1 МОм	5, 10, 20	125
C4 – 2	0,25 – 2	10 кОм – 10 МОм	5, 10, 20	155
<i>Переменные непроволочные металлооксидные</i>				
СП2 – 1	0,5 – 1	47 Ом – 100 кОм	20	200
СП2 – 2	0,5 – 1	47 Ом – 47 кОм	20	125
<i>Композиционные</i>				
СП3 – 10	0,25 – 2	470 Ом – 4,7МОм	10, 20, 30	100
СП3 – 17	1 – 2	470 Ом – 4,7МОм	20, 30	125
СП3 – 23а	0,5 – 1	470 Ом – 4,7МОм	10, 20, 30	125

Таблица 2. Температурный коэффициент сопротивления резисторов

Диапазон номинальных сопротивлений, Ом	Температурный коэффициент сопротивления	
	ТКС, $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ от -60 до $+20^\circ\text{C}$	ТКС, $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ от -60 до $+155^\circ\text{C}$
1. Металлодиэлектрические С2 – 33		
0,1 – 0,91	± 1000	± 1000
10,2 – $237 \cdot 10^3$	± 300	± 100
1 – 10^7	± 500	± 500
С2 – 50		
10^4 – 10^5	± 250	± 50
1 – $5,1 \cdot 10^6$	± 250	± 100
2. Углеродистые С1 – 4		
до 10	-500	-200
10 – $9,1 \cdot 10^3$	-800	-500
$0,91 \cdot 10^6$ – 10^7	-2500	-1500
3. Объемные (С4 – 2, С4 – 3, ТВО) С4 – 2		
до 10^3	-1500	-800
Свыше 10^5	-1500	-1200

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭДС МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: исследование температурной зависимости термоЭДС различных пар металлов и сплавов.

Задания:

1. Снять зависимость термоЭДС образцов материалов от температуры.
2. Рассчитать коэффициент термоЭДС исследуемых пар материалов.
3. Дать интерпретацию полученным результатам.

Теоретические сведения

Влияние градиента температуры на свойства резистивного материала

Составляя цепи из двух металлических проводников и нагревая один из контактов до более высокой температуры, чем другой, можно получить термоэлектродвижущую силу, которая для данной пары будет только функцией температур. Подбирая материалы, имеющие меньшую термоэлектродвижущую силу, пользуются ими для создания резисторов, способных работать в радиоэлектронной аппаратуре в условиях значительных градиентов температуры. Материалы с большой термоЭДС используют для измерения температуры (термопара). В измерительных приборах и образцовых сопротивлениях стремятся применять металлы и сплавы с возможно меньшей термоэлектродвижущей силой относительно меди, чтобы не внести погрешности в измерения. Существуют пары, меняющие знак ЭДС в процессе нагревания. Отрыв электрона от нейтрального атома связан с затратой энергии, необходимой для преодоления электростатических сил притяжения между ними. Это энергия, выраженная в электрон-вольтах, получила название потенциала ионизации вещества (аналогично для твердых тел – работа выхода электрона). Физический смысл работы выхода становится понятен при рассмотрении энергетической диаграммы электронов в кристаллическом твердом теле. При образовании кристаллической решетки (вследствие сближения атомов) энергетические барьеры между соседними атомами снижаются настолько, что электроны зоны проводимости приобретают возможность свободно перемещаться по всему кристаллу. В то же время потенциал на поверхности кристалла остается таким же, как и у изолированного атома. Поэтому за работу

выхода электрона принимается минимальный интервал энергии W_B , необходимый для удаления электрона из кристалла, и измеряется она от самого верхнего уровня, занятого электронами (при 0 К), – уровня Ферми.

Рассмотрим, как изменяются энергетические диаграммы при соприкосновении двух металлов.

Следует иметь в виду, что не только при высокой, но и при достаточно низкой температуре имеется определенное количество электронов, обладающих энергией большей W_B . При этом, чем меньше работа выхода, тем больше таких электронов. Поэтому при соприкосновении металлов между ними начинается обмен «высокоэнергетическими» электронами. Предположим, что работа выхода у первого металла меньше, чем у второго (рис. 1).

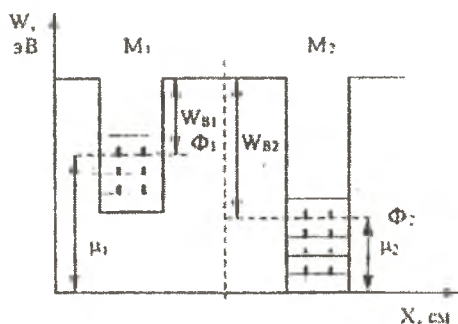


Рис. 1. Энергетические диаграммы металлов до контакта

В этом случае электронный ток, протекающий слева направо, будет больше тока, протекающего в обратном направлении. Следовательно, поверхность второго металла будет заряжаться отрицательно, а на поверхности первого металла появится некомпенсированный положительный заряд. Процесс преимущественного перетекания зарядов продолжается до тех пор, пока возникшая вследствие этого разность потенциалов между металлами не скомпенсирует разность работ выхода между металлами:

$$qU_K = W_{B1} - W_{B2}, \quad (1)$$

где q - заряд электрона; U_K - контактная разность потенциалов; W_{B1} , W_{B2} - работы выхода металлов.

Энергетическая диаграмма, характеризующая этот процесс, показана на рис. 2.

Оценим количество электронов, которое должно перейти из первого металла во второй, чтобы создать равновесную разность потенциалов U_K . Если принять $U_K = 1 \text{ В}$, зазор между металлами $d = 10^{-7} \text{ см}$, то напряженность электрического поля в зазоре составит $E = 10^7 \text{ В/см}$. Принимая во внимание, что для плоского конденсатора справедливо выражение $Q = E/4\pi$, для плотности поверхностного заряда получим

$$n = E/4\pi q \cong 10^{12} [\text{см}^{-2}]. \quad (2)$$

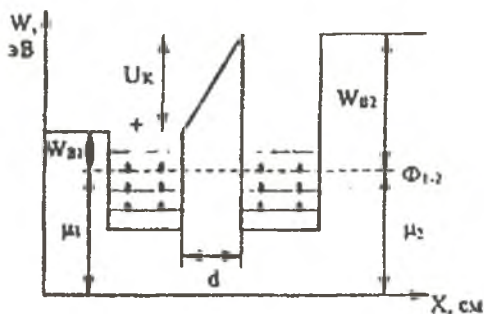


Рис. 2. Энергетические диаграммы металлов после образования контакта

Число атомов на поверхности металла по порядку величины составляет 10^{12} , следовательно, в первом металле 0,1% поверхностных атомов будет ионизировано, а во втором такое же количество атомов получит избыточный отрицательный заряд. После этого уровни Ферми обоих металлов сравняются. При переходе части электронов из первого металла во второй изменяются также величины W_{B1} и W_{B2} , однако ввиду того, что количество перешедших электронов 10^{12} гораздо меньше общего количества электронов в зоне проводимости 10^{22} , изменения работ выхода металлов практически не происходит.

ТермоЭДС

Сущность явления термоЭДС состоит в том, что в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных различных металлов, возникает электродвижущая сила, если сварные контакты двух разнородных материалов поддерживаются при различных температу-

рах. В простейшем случае, когда такая цепь состоит из двух различных металлов (рис. 3), она носит название термопары.

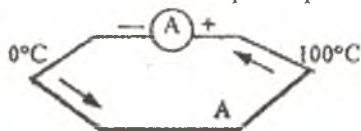


Рис. 3. Схема включения термопар

Возникновение термоЭДС в цепи объясняется двумя причинами: положение уровня Ферми в каждом проводнике является функцией температуры; наличие градиента температур в проводнике приводит к возникновению градиента концентраций носителей заряда.

В первом приближении зависимость уровня Ферми в металлах от температуры определяется следующим выражением:

$$\mu = \mu_0 \left[1 - \frac{\pi^2}{12} \left(\frac{kT}{\mu_0} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где μ_0 - положение уровня Ферми при $T = 0$ К.

К примеру, в меди уровень Ферми снижается на 80 мкэВ при повышении температуры от 0 К до комнатной температуры.

Экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что термоЭДС термопары зависит от разности температур между холодным T_0 и горячим T контактами и для небольших интервалов температур с достаточной для практических цепей точностью подчиняется соотношению

$$E = \alpha_{AB} (T - T_0), \quad (4)$$

где E - величина термоЭДС, α_{AB} - коэффициент термоЭДС для данной пары металлов.

Если оба сварных контакта находятся при одинаковой температуре, то их термоЭДС равны по величине и направлены противоположно, а, следовательно, суммарная термоЭДС равна 0. С увеличением температуры одного из контактов в нем активизируются процессы диффузионного перемещения заряда, в результате чего появляется дополнительная разность потенциалов.

Для однозначного определения полярности и величины термоЭДС поступают следующим образом. Для цепи из двух проводников А и Б, в которых контакты находятся при температурах 0 и 100°C, определяется величина $E_{AB}^{0,100}$, имеющая положительный знак, если через

горячий контакт течет ток от А к Б, т.е. в направлении стрелок, указанных на рис.3. Величины $E_{AB}^{0,100}$, взятые с учетом знака, образуют термоэлектрический ряд напряжений, причем в качестве проводника А используется один и тот же металл – платина.

Следует, однако, иметь в виду, что наличие термоЭДС не всегда является положительным фактором. В частности, при создании прецизионных измерительных мостов постоянного тока в отдельных ветвях последнего могут возникать дополнительные источники ЭДС вследствие неодинаковой температуры контактов металлических соединений, образующих электрическую цепь. Появление непредвиденных источников ЭДС вносит значительные погрешности в процесс измерения параметров цепи.

Схема экспериментальной установки для изучения термоЭДС металлов приведена на рис. 4. На нем даны обозначения: Т – встроенный термощкаф, В – вольтметр, R_H – сопротивление нагревательного элемента, в котором расположены горячие концы контактных пар металлов. Измерения температуры осуществляется с помощью термопары ХА. Измерение термоЭДС производится с помощью милливольтметра постоянного тока. Переключение термопар осуществляется с помощью переключателя S1.

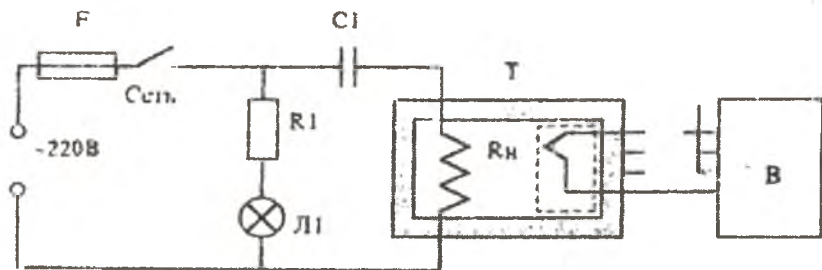


Рис. 4. Схема установки для изучения термоЭДС металлов

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой и схемой подключения термопар (рис. 5).
2. Провести измерения термоЭДС всех контактных пар, предусмотренных в экспериментальной установке, при нормальной температуре.

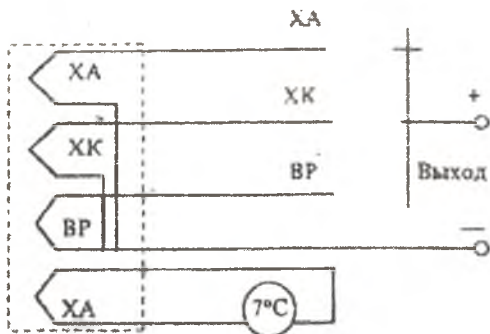


Рис. 5. Схема подключения термопар

3. Включить термостат тумблера «Вкл.» на лабораторном стенде и снять зависимость термоЭДС всех термопар от температуры. Результаты занести в таблицу, форма которой выбирается произвольно.
4. Построить зависимости по экспериментальным данным.
5. Определить коэффициенты термоЭДС для исследуемых пар материалов.
6. Сформулируйте основные выводы по работе.

Вопросы к коллоквиуму

1. Какие требования предъявляются к резисторам в отношении величины термоЭДС?
2. Как выглядит энергетическая диаграмма до и после соприкосновения одинаковых и различных металлов?
3. Что такое работа выхода электронов?
4. Изменится ли работа выхода каждого из проводников при соприкосновении его с другими проводниками?
5. При каких условиях возникает термоЭДС?
6. Для каких целей выгодно иметь большую термоЭДС? В каких случаях необходимо иметь минимальные значения термоЭДС металлов и сплавов относительно меди?
7. Укажите основные свойства и области использования испытанных металлов и сплавов.

Библиографический список

1. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники/ В.В. Пасынков. - М.: Высш. шк., 1986. – 406с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕКОМБИНАЦИИ И ДИФФУЗИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКЕ

Цель работы: изучение процессов рекомбинации и диффузии неравновесных носителей заряда в полупроводниках, возбужденных светом, и экспериментальное исследование их длины свободного пробега и времени жизни.

Задания:

1. Изучить основные механизмы возбуждения и рекомбинации неравновесных носителей заряда.
2. Изучить процессы переноса неравновесных носителей заряда в неоднородных полупроводниках.
3. Измерить среднюю длину свободного пробега и время жизни неравновесных носителей заряда в образце полупроводника.

Теоретические сведения

Основной особенностью, отличающей полупроводник от металла, является наличие в спектре энергии электронов запрещенного промежутка, разделяющего зону связанных электронов и зону электронов проводимости. Поэтому в полупроводнике возможны два типа проводимости: электронная и дырочная, в зависимости от того, являются ли носителями тока электроны в зоне проводимости или дырки в заполненной зоне, образующиеся в результате переходов на вышележащие энергетические уровни. Полупроводник, в котором единственным источником электронов в зоне проводимости является валентная зона, называется «собственным».

Наличие в объеме полупроводника каких-либо примесей ведет к возникновению локальных энергетических уровней, лежащих обычно в запрещенной зоне. Характер и концентрация этих примесей часто определяет не только величину, но и тип электропроводности материала. Примеси, атомы которых отдают свои электроны в зону проводимости, называются «донорными», примеси, отбирающие электроны из валентной зоны, – «акцепторными». В первом случае проводимость носит электронный характер, во втором – дырочный.

Носители заряда, представленные в большинстве, называются основными, а представленные в меньшинстве – неосновными. Таким

образом, в электронном полупроводнике основными носителями являются электроны, неосновными – дырки; в дырочном – наоборот.

Равновесные концентрации электронов и дырок, соответствующие данной температуре, устанавливаются в результате уравнивания скорости двух процессов: теплового возбуждения, т.е. переходов на более высокие энергетические уровни (рис. 1, стрелки, направленные вверх) и рекомбинации, т.е. обратных переходов (стрелки, направленные вниз).

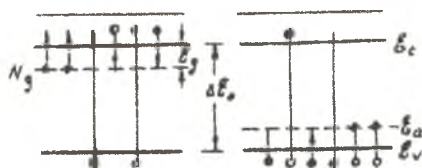


Рис. 1. Переход электронов в зону проводимости или на акцепторные уровни и рекомбинации

Эти скорости определяются шириной запрещенной зоны $\Delta\epsilon_0$, концентрацией и энергетическим положением донорных и акцепторных примесей (соответственно $N_g, \epsilon_g, N_a, \epsilon_a$ на рис.1). Таким образом, при каждой температуре в данном полупроводнике существует определенная равновесная концентрация электронов n_T и дырок p_T .

Концентрацию электронов и дырок в полупроводнике можно сделать больше их равновесных значений путем введения в объем полупроводника дополнительных носителей. Если, например, осветить полупроводник, то концентрация носителей заряда в нем увеличится, и это состояние сохранится в течение некоторого промежутка времени. Тот же эффект наблюдается при прохождении тока через полупроводник, различные части которого имеют разные типы проводимости, а также при ударной ионизации электронов в сильных электрических полях. Во всех случаях в объеме кристалла появляются дополнительные неосновные носители: дырки в случае электронного и электроны – в случае дырочного материала.

Механизм образования дополнительных носителей сводится в первом случае к созданию возможности дополнительных переходов электронов валентной зоны в зону проводимости под действием света, во втором случае – к введению их из одного слоя полупроводника в другой в результате протекания электрического тока. Это явление уве-

личения концентрации неосновных носителей заряда по сравнению с ее равновесным значением получило название инжекции неосновных носителей заряда. Явление инжекции электронов и дырок лежит в основе действия полупроводниковых диодов и транзисторов.

Так как в однородном полупроводнике объемный заряд должен быть равным нулю, то избыточная концентрация неосновных носителей заряда влечет за собой появление избыточной концентрации основных носителей, заряд которых компенсирует заряд противоположного знака неосновных носителей. Такая возможность имеется в полупроводниках благодаря наличию в них носителей зарядов двух знаков.

Возникновение избытка носителей заряда в объеме кристалла ведет к увеличению скорости рекомбинации пар «электрон-дырка», поэтому отклонение от равновесного состояния с течением времени исчезает.

Время, в течение которого сохраняется неравновесное состояние, оказалось величиной, меняющейся в очень широких пределах в различных кристаллах. Это позволяет заключить, что рекомбинация электронов и дырок происходит не непосредственно в результате их «соударения», а преимущественно на различного рода нарушениях идеальной кристаллической решетки, которые могут служить ловушками для электронов или для дырок, увеличивающими вероятность рекомбинации. Такими нарушениями могут являться примеси, механические нарушения решетки и, в частности, сама поверхность кристалла. Они ведут к возникновению положительно или отрицательно заряженных локальных уровней.

Общая схема рекомбинации на такой «ловушке» может быть представлена следующим образом. Пусть в кристалле имеется дефект, могущий захватить электрон. Если затем дырка оказывается в пределах эффективного сечения центра, захватившего уже электрон, то дырка захватывается заряженным дефектом и рекомбинирует с электроном. Вероятность рекомбинации носителей на таких ловушках определяется концентрацией последних, их природой, т. е. величиной эффективного сечения захвата и их состоянием в условиях термического равновесия. Качественной характеристикой скорости рекомбинации электронов и дырок служит величина, называемая «временем жизни» носителей заряда и определяемая следующим образом.

Если избыточная концентрация электронов n (или, соответственно, концентрация дырок p) мала по сравнению с концентрацией основ-

ных носителей, то скорость уменьшения концентрации $\frac{dn}{dt}$ оказывается пропорциональной избыточной концентрации n :

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{1}{\tau} n, \quad (1)$$

где τ – время жизни; $\frac{1}{\tau}$ – есть, следовательно, вероятность рекомбинации электрона (или, соответственно, дырки).

Интегрирование уравнения (1) дает:

$$n(t) = n_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2)$$

где n_0 – концентрация в момент времени $t=0$.

Таким образом, время жизни есть величина времени, через которую концентрация неравновесных носителей уменьшается в $e = 2,718\dots$ раз.

Теория метода исследования

Прежде чем перейти к описанию конкретных методов измерения времени жизни, приведем некоторые соображения, служащие основой такого рода измерений. Пусть имеется полупроводник в виде бруска, длина которого велика по сравнению с поперечными размерами («нитевидный» образец, внутри которого возникает n_p дополнительных носителей в одном кубическом сантиметре в одну секунду) например, вследствие освещения области 1, рис. 2.

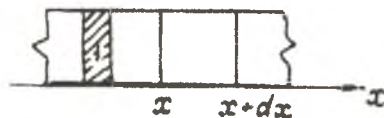


Рис. 2. Одномерная модель нитевидного образца:
1 – освещенная область

Рассмотрим слой полупроводника, ограниченный плоскостями x и $x + dx$. Через сечение x в рассматриваемый слой через 1 см^2 в 1 секунду входит вследствие диффузии число носителей: $-D \frac{dn}{dx}$ (D – коэффициент диффузии), а за это же время выходит через сечение $x + dx$:

$$-D \left(\frac{dn}{dx} \right)_{x+dx} = -D \left[\frac{dn}{dx} + \frac{d^2n}{dx^2} dx \right].$$

Следовательно, увеличение числа носителей слоя вследствие диффузии примет следующий вид:

$$-D \left(\frac{dn}{dx} \right)_x - \left(-D \left(\frac{dn}{dx} \right)_{x+dx} \right) = D \frac{d^2n}{dx^2} dx.$$

Если в полупроводнике имеется электрическое поле E , то носители участвуют еще в переносном «дрейфовом» движении. Число носителей, входящих вследствие дрейфа через сечение x через 1 см^2 в секунду равно:

$$n(x)\mu E,$$

где μ - подвижность, а число носителей, выходящих через $x + dx$, выражается формулой

$$n(x + dx)\mu E = \left(n + \frac{dn}{dx} dx \right) \mu E.$$

Увеличение числа носителей в слое за одну секунду равно:

$$n\mu E - \left(n + \frac{dn}{dx} dx \right) \mu E = -\mu E \frac{dn}{dx} dx.$$

В стационарном состоянии полное число носителей, вошедших в слой, должно равняться числу носителей, исчезающих вследствие рекомбинации также за одну 1 с (см. формулу (1)):

$$-\frac{dn}{dt} dx = \frac{ndx}{\tau}.$$

Поэтому уравнение баланса дополнительных носителей одного знака (например, электронов в дырочном материале) будет иметь вид:

$$D \frac{d^2n}{dx^2} dx - \mu E \frac{dn}{dx} dx - \frac{ndx}{\tau} = 0,$$

или

$$\frac{d^2n}{dx^2} - \frac{\mu E}{D} \frac{dn}{dx} - \frac{1}{D\tau} n = 0. \quad (3)$$

Заметим, что уравнение (3) справедливо только для малых значений концентрации неосновных носителей $n \leq p_T$ (по сравнению с концентрацией основных носителей).

Действительно, для стационарного случая необходимым является выполнение уравнения непрерывности $\text{div} j = \frac{dj}{dx} = 0$, где плотность

тока $j = en\mu_n E + ep\mu_p E$ составляется из потока дырок и электронов. Следовательно, в общем случае нужно было бы решать уравнение баланса носителей обоих знаков. Однако можно приближенно считать, что уравнение непрерывности соблюдается и в нашем случае.

Используем соотношение Эйнштейна:

$$\frac{\mu E}{D} = \frac{eE}{kT}, \quad (4)$$

где e - заряд электрона, k - постоянная Больцмана и введем обозначения:

$$D\tau = l_0^2, \quad (5)$$

$$\frac{\mu E}{D} = \frac{eE}{kT} = \bar{x}. \quad (6)$$

Тогда уравнение (3) принимает следующий вид:

$$\frac{d^2 n}{dx^2} - \bar{x} \frac{dn}{dx} - \frac{n}{l_0^2} = 0. \quad (7)$$

общие решение этого уравнения имеет вид

$$n = C_1 e^{k_1 x} + C_2 e^{k_2 x}, \quad (8)$$

где k_1 и k_2 удовлетворяют характеристическому уравнению

$$k^2 - k\bar{x} - \frac{1}{l_0^2} = 0.$$

Откуда

$$k_{1,2} = \frac{\bar{x}}{2} \pm \sqrt{\frac{\bar{x}^2}{4} + \frac{1}{l_0^2}}.$$

Так как физический смысл имеет только затухающие решения, то $C_1 = 0$, ибо $k_1 > 0$, $k_2 < 0$ и мы имеем:

$$n = C_2 e^{\frac{-x}{l}},$$

где

$$l = -\frac{1}{k_2} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\bar{x}^2}{4} + \frac{1}{l_0^2}} - \frac{\bar{x}}{2}} \quad (9)$$

Так как при $x = 0$, $C_2 = n_0$, то окончательно

$$n = n_0 e^{\frac{-x}{l}}. \quad (10)$$

Следовательно, концентрация неравновесных носителей заряда убывает по показательному закону с увеличением расстояния. Величина l , определяемая формулой (9), есть длина запаздывания носителей, т.е. расстояние, на котором их концентрация уменьшается в $e = 2,718\dots$ раз.

Исследуем решение для двух предельных случаев:

$$1. E = 0; \bar{x} = \frac{eE}{kT} = 0.$$

В этом случае $l = l_0$ и решение (10) принимает вид:

$$n = n_0 e^{\frac{-x}{l_0}}. \quad (11)$$

Здесь l_0 есть «диффузионная» длина носителей заряда, т.е. такое расстояние, на котором концентрация носителей, распространяющихся только вследствие диффузии (в отсутствие поля), уменьшается в e раз в результате рекомбинации.

$$2. \frac{\bar{x}}{2} \gg \frac{1}{l_0}. \text{ Тогда имеем}$$

$$\sqrt{\frac{\bar{x}^2}{4} + \frac{1}{l_0^2}} = \frac{\bar{x}}{2} \sqrt{1 + \frac{4}{\bar{x}^2 l_0^2}} \approx \frac{\bar{x}}{2} + \frac{1}{\bar{x}^2 l_0^2} + \dots$$

Подставляя это выражение в (9), имеем

$$l = \frac{1}{\frac{1}{\bar{x}^2 l_0^2}} = \bar{x}^2 l_0^2 = \frac{eE}{kT} DT = \mu E \tau. \quad (12)$$

Подставляя это выражение в формулу (10) и учитывая ещё, что $x = \mu E t$, где t - время движения носителей, находим $n = n_0 e^{-t/\tau}$, т.е. опять формулу (2).

Полученные результаты лежат в основе экспериментального определения времени жизни τ . Видно, что для этого можно либо исследовать уменьшение концентрации неравновесных носителей n с течением времени и найти τ по формуле (2), либо исследовать зависимость n от расстояния вдоль образца. В последнем случае мы определяем диффузионную длину l_0 , по значению которой, зная коэффициент диффузии D , можно найти τ по формуле (5).

Величину D можно определить из данных о подвижности, пользуясь соотношением Эйнштейна (4).

Методика проведения исследования

Измерения производятся на монокристаллах полупроводника электронной или дырочной проводимости.

Достаточно длинный образец прямоугольного сечения включается в цепь, изображенную на рис. 3.

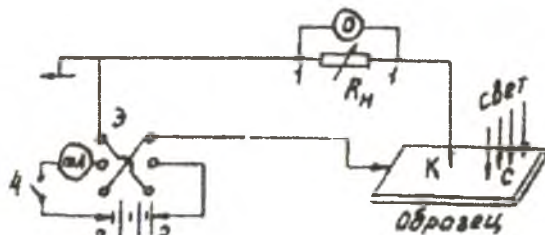


Рис. 3. Схема установки для определения диффузионной длины и времени жизни неосновных носителей заряда

Поверхность образца освещается узкой полосой света. Свет фокусируется при помощи простой оптической системы в тонкую прямую линию (С) шириной 0,1мм. Световая линия пересекает всю поверхность (верхнюю грань образца) параллельно его торцам. Такая система освещения упрощает решение задачи диффузии неосновных носителей и на определенном расстоянии от освещаемого участка позволяет свести её к вышерассмотренной одномерной задаче. Пучок света модулируется. Частота повторений импульсов задается генератором прямоугольных импульсов. Благодаря значительной длительности импульсов в образце создается стационарное распределение неосновных носителей, концентрация которых с увеличением расстояния от освещенной полосы уменьшается по экспоненциальному закону рекомбинации.

На некотором расстоянии от освещенной линии поверхности образца касается точечный контакт, называемый коллектором, который представляет собой вольфрамовую проволочку диаметром острия в несколько десятков микрон. Этот контакт является обычным точечным детектором. На него с батареи Е подается смещение. Переключатель 3 дает возможность менять полярность смещения, подаваемого на коллектор.

Сопротивление коллектора в запиорном направлении в обычных условиях достигает 100 кОм. Поэтому ток через включенное в цепь

коллектора нагрузочное сопротивление R_H определяется в основном сопротивлением коллектора. С нагрузочного сопротивления напряжение подается на осциллограф, регистрирующий таким образом изменение тока коллектора. Поле, создаваемое смещением на коллекторе в запорном направлении, достигающее в непосредственной близости от коллектора значительной величины, собирает движущиеся в объеме образца неосновные носители, меняя тем самым сопротивление коллектора. В результате этого обратный ток коллектора увеличивается, а падение напряжения на нагрузочном сопротивлении растет. Импульсное освещение образца позволяет отделить часть тока коллектора, обусловленную неосновными носителями от его постоянной составляющей. Поэтому падение напряжения, фиксируемое осциллографом, вызывается непосредственно током дополнительных носителей. Так как величина этого тока, а следовательно, и падение напряжения на нагрузочном сопротивлении R_H , пропорциональны концентрации дополнительных носителей, то диффузионную длину l_0 можно определить согласно формуле (11) графически, заменяя величину h пропорциональной ей величиной U .

Прологарифмировав выражение (11), получим

$$\ln n = \ln n_0 - \frac{x}{l_0}; \text{ или } \ln V = \ln V_0 - \frac{x}{l_0}.$$

Измерив величину U на различных расстояниях от освещенной линии, можно построить кривую зависимости $\ln U$ от x . Тангенс угла наклона этой кривой, которая при наблюдении экспоненциальной зависимости U от x представляет прямую линию, дает величину $1/l_0$.

Порядок выполнения работы

1. Включить осциллограф и генератор прямоугольных импульсов в сеть напряжением 220 В.
2. Поместить образец в микроманипулятор, привести коллектор в соприкосновение с поверхностью образца.
3. Вход осциллографа подключить к гнездам 1 параллельно R_H .
4. К гнездам 2 присоединить источник постоянного напряжения в соответствии с помеченной полярностью.
5. С помощью ключа 4, включающего прибор, и переключателя 3, меняющего знак смещения на коллекторе, установить запорное направление тока через коллектор, обратив внимание на нагрузочное сопротивление, которое в начале работы должно быть полностью введено.
6. Добиться стационарной картины на экране осциллографа с помощью ручек «частота» и «синхронизация».

7. Добиться максимальной величины пиков на экране осциллографа, регулируя R_H и совмещая луч света с коллектором. Это положение образца принимается за нулевое.
8. Удаляя луч от коллектора, снять кривую зависимости величины пика U (в произвольных единицах) от расстояния между лучом и коллектором x .
9. Построить график зависимости $\ln U$ от x . Определить l_0 по тангенсу угла наклона прямой. Вычислить τ по формуле $l_0 = \sqrt{D\tau}$, считая, что $D_p = 44 \text{ см}^2/\text{с}$, $D_n = 96 \text{ см}^2/\text{с}$.

Примечание. При выполнении работы необходимо проявлять особую аккуратность в обращении с коллектором и образцом, не следует дотрагиваться до них руками.

Записи рекомендуется вести по форме:

№ п/п	Расстояние между коллектором и лучом x , мм	Амплитуда импульса U , мВ	$\ln U$

Следует снять не менее трех кривых и в качестве окончательного результата взять среднее значение из полученных величин l_0 и τ .

Вопросы к коллоквиуму

1. Способы возбуждения неравновесных носителей заряда.
2. Объяснить примесное и собственное поглощение света в полупроводниках.
3. Записать уравнение полного тока для неравномерных распределенных неравновесных носителей заряда.
4. Дать определение диффузии носителей заряда.
5. Дать определение времени жизни и диффузионной длины неравновесных носителей заряда.
6. Описать релаксацию фотопроводимости.
7. Объяснить излучательную и безизлучательную рекомбинации.

Библиографический список

1. Орешкин, П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков/ П.Т. Орешкин. - М.: Высш. шк., 1977. - 447 с.
2. Епифанов, Н.И. Физические основы конструирования и технологии РЭА и ЭВА: учеб. пособие для вузов/ Н.И. Епифанов, Ю.А. Мома. - М.: Сов. радио, 1979. - 352с.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФОТОРЕЗИСТОРОВ

Цель работы: исследование влияния света на электропроводность материалов полупроводниковых приёмников оптического излучения.

Задания:

1. На основании экспериментальных данных построить зависимость тока через фоторезисторы от освещённости.
2. Определить величину сопротивления фоторезисторов для различных освещённостей.
3. Построить график спектральной чувствительности фоторезистора.
4. Дать интерпретацию полученным экспериментальным результатам. Определить материал фоторезистора.

Теоретические сведения

Внутренний и внешний фотоэффекты

В качестве материалов фотоэлектрических преобразователей используются полупроводники, электрические свойства которых под влиянием света изменяются. Рассмотрим важнейшие свойства и затем некоторые наиболее типичные случаи их применения. Ещё в конце 19-го века было известно, что электропроводность определённой группы твёрдых материалов может изменяться при облучении их светом. Развитие элементов, использующих фотоэффект, тесно связано с успехами физики полупроводников.

Как схематически показано на рис. 1, при внешнем фотоэффекте электроны за счёт облучения освобождаются с внешней поверхности металлического слоя (например, калия или цезия).

В вакуумном или газоразрядном фотоэлементе освобождённые электроны движутся к аноду, фотоэлементы создают фотоЭДС, пропорциональную силе света.

При внутреннем фотоэффекте электроны, которые до этого были соединены с атомами кристаллической решётки полупроводника, под влиянием облучения светом освобождаются и движутся в полупроводнике как свободные носители зарядов. В однородных легированных полупроводниках, обладающих n-проводимостью или p-проводимостью, это относится ко всему объёму. В таких полупроводниках можно полу-

чить очень сильные уменьшения электрического сопротивления при освещении. Этот эффект имеет место во всех полупроводниковых материалах. В том числе в химических соединениях групп A^2B^6 и A^4B^6 . Техническое применение получили фотосопротивления из халькогенидов CdS, CdSe, PbS.

	Внешний фотоэффект	Внутренний фотоэффект	
			
Тип элемента	Фотоэлектронный фотоэлемент	Фотосопротивление	
Действие света	Фотонапряжение	Изменение сопротивления	Фотонапряжение
Материал	Цезий(Cs) Калий(K)	Сульфид кадмия (CdS) Селенид кадмия (CdSe) Сульфид свинца (PbS)	Германий (Ge) Кремний (Si)

Рис. 1. Фотоэлектрические элементы

Если в полупроводнике области n-проводимости и p-проводимости граничат между собой (p-n переход), то в зоне перехода возникает запирающий слой. Фотодиоды и фототранзисторы, выполненные по этому принципу, создают при освещении фотоЭДС. В противоположность фотосопротивлениям фоточувствительным в них является только участок, непосредственно примыкающий к запирающему слою, поэтому можно говорить о фотоэффекте в запирающем слое.

В качестве материалов для этих элементов применяются в большинстве случаев Ge, Si.

Нанесение полупроводниковых материалов

Говоря об изготовлении фоторезисторов, используемых в РЭС, можно отметить, что для каждого материала применяется его особая технология нанесения на диэлектрическое основание в соответствии с физическими свойствами (точка плавления, давление паров и т.д.). Кристаллы Ge, Si вытягиваются из расплава, слой Se наплавляют, слой PbS осаждают из растворов солей, а CdS получают напылением в вакууме.

Фотоэлектрическая активность веществ, обладающих широкой запрещенной зоной, становится заметной в том случае, если в них добавлено незначительное, но строго определённое количество примесей, поэтому при изготовлении материалов необходимо, прежде всего, получить чистый основной материал, а затем добавить в требуемых количествах примеси. Далее необходимо выдержать в большинстве случаев малые допуски на геометрические размеры элементов. Разброс этих параметров – концентрации примесей и внешних габаритов – определяет разброс электрических параметров фоторезисторов.

Фоторезисторы

Фоторезистор – это полупроводниковый резистор, сопротивление которого зависит от освещённости. На рис. 2 схематично показано устройство фоторезистора. На основание из стекла или ситалла наносится поликристаллический слой полупроводника, например CdS, толщиной 20 – 30 мк, в который введены атомы примесей, например, Cu или Cl.

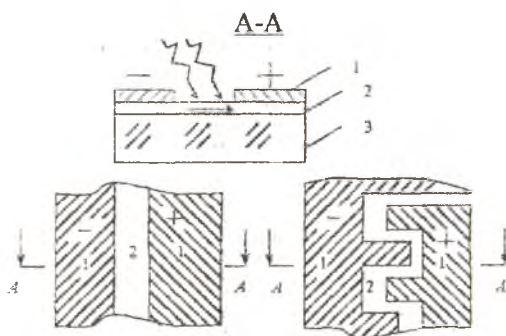


Рис. 2. Устройство фоторезистора:

1 – металлические электроды; 2 – слой полупроводника; 3 – стекло

Подсоединительные контакты фотосопротивления состоят из двух металлических электродов, полученных напылением на слой CdS, между ними расположена фотоактивная поверхность. Для фотосопротивления с активной поверхностью 30 мм^2 (расстояние между электродами равно 1 мм) темновое сопротивление составляет около 10^9 Ом , а сопротивление при освещённости $1500 \text{ ЛК} - 10^3 \text{ Ом}$. Если приложить к сопротивлению электрическое напряжение, то через слой CdS от одного контакта к другому, т.е. перпендикулярно лучку света, потечёт фототок.

Механизм электропроводности фоторезисторов

При затемнённом сопротивлении практически все электроны связаны с ионами решетки, и только незначительная часть их свободна за счёт тепловой энергии kT . Если при этом приложить напряжение, то эти свободные носители зарядов, двигаясь в направлении электрического поля, создадут очень незначительный ток – темновой. Падающий на фотосопротивление свет лучше всего представить себе как большое количество световых квантов. Если световой квант встречается с ионами сетки, то энергия светового кванта опосредовано передаётся электрону, и когда энергия, полученная электроном, превышает энергию связей, электрон освобождается.

Облучающий свет производит дополнительные свободные носители зарядов. Если к фоторезистору приложено напряжение, то протекающий через него ток становится больше, т.е. при освещении фоторезистора его сопротивление уменьшается.

С точки зрения зонной теории возбуждение электронов можно представить следующим образом: все электроны, связанные с ионами, находятся в валентной зоне, а свободные электроны в зоне проводимости и участвуют в создании электрического тока. Ширина запрещённой зоны, определяется энергией связи электронов. При наличии примесей (Cu, Cl) в запрещенной зоне полупроводника появляются разрешенные для пребывания электронов уровни, в данном случае примесные. При этом энергия, необходимая для отрыва электронов, становится меньше в том случае, если материал находится в зоне работы примеси (когда концентрация свободных электронов может возрастать за счет введенной в материал примеси).

Находясь в зоне проводимости, электрон движется под действием электрического поля и много раз захватывается, за счёт тепловой

энергии вновь освобождается, пока, наконец, он не окажется захваченным ионом, на котором отсутствует электрон. Отдельные электроны имеют весьма ограниченный срок жизни – единицы микросекунд. Постоянный фототок при освещении фоторезистора возникает вследствие того, что в каждый момент времени благодаря воздействию света появляется столько же свободных электронов, сколько рекомбинирует (динамическое равновесие).

Выбором геометрических размеров можно сделать фоторезистор низкоомным. Для этого необходимо увеличить толщину слоя полупроводника, уменьшить расстояние между электродами или увеличить активную поверхность. При постоянной освещённости сопротивление фоторезистора в широких пределах не зависит от приложенного напряжения (от милливольт до нескольких сотен вольт), т.е. фотосопротивление ведёт себя как обычное активное линейное сопротивление. При этом, конечно, предполагается, что между металлическими электродами и слоем полупроводника не образуется запирающих слоёв.

На рис. 3 приведена зависимость полупроводникового сопротивления от освещённости.

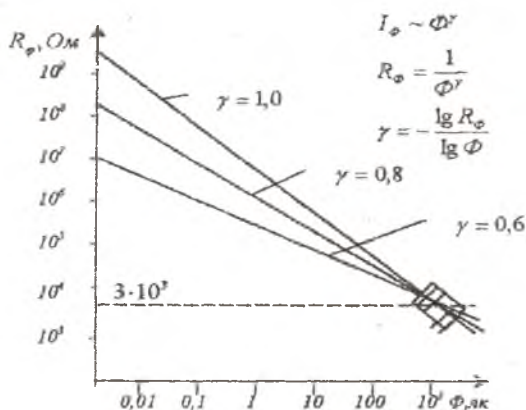


Рис. 3. Зависимость сопротивления фоторезистора от освещённости в логарифмических осях

В логарифмическом масштабе эта зависимость представляет собой прямую линию, угол наклона которой зависит от величины энергии необходимой для отрыва электрона от атома. Примесь может влиять на угол наклона, так как создает разрешенные уровни в запрещенной зоне.

Спектральная чувствительность фоторезисторов

Спектральная чувствительность фоторезистора определяется, по существу, его материалом. На рис. 4 представлены зависимости чувствительности некоторых материалов фоторезисторов от длины волны облучающего света (λ).

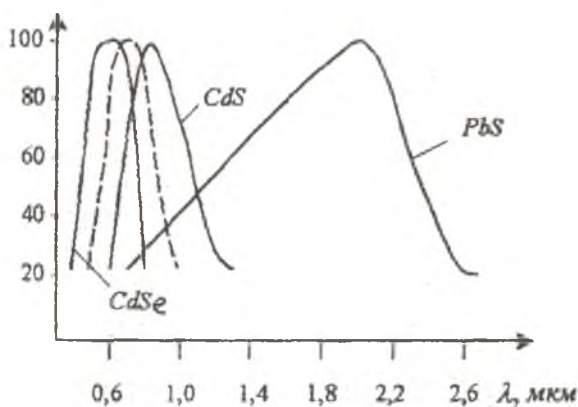


Рис. 4. Спектральные характеристики некоторых фоторезистивных материалов

Для сравнения приведена характеристика чувствительности человеческого глаза (пунктирная кривая) от фиолетового (0,4 мк) до тёмно-красного (0,75 мк) цветов.

Наличие максимума в спектральных характеристиках фотосопротивлений может быть объяснено следующим образом. При малых длинах волн низкая чувствительность объясняется тем, что облучающий свет полностью поглощается уже в тонком поверхностном слое фоторезистора (поглощение основной решёткой). С увеличением длины волны свет глубже проникает в фоторезистор, расширяя объем, задействованный в передаче световой энергии, и светочувствительность при этом повышается. Однако с ростом длины волны энергия кванта света уменьшается, что приводит к снижению числа активированных электронов. При некоторой длине волны чувствительность становится равной нулю, так как энергия светового кванта уже недостаточна для того, чтобы освободить электрон.

Чувствительность сернисто-кадмиевого фотосопротивления хорошо совпадает с чувствительностью человеческого глаза, однако мак-

симум этой чувствительности может смещаться введением соответствующих примесей. Максимальная чувствительность фотосопротивления из CdS расположена в области красных лучей, а чувствительность фотосопротивления из PbS – в области инфракрасных лучей (2,8мк).

Соответственно ширина запрещенной зоны в энергетической схеме этих материалов равна для CdS – 2,4 эВ, для PbS – 0,37 эВ.

Фоторезисторы широко используются в схемах защиты контролируемого технологического процесса, сортировки деталей по окраске или размерам, измерения силы света и автоматической регулировки освещённости, дистанционного управления температуры, кино- и фотоаппаратуры. Обозначаются фоторезисторы буквами СФ или ФС (фотосопротивление), за которыми следуют буква и цифра, характеризующая состав материала полупроводника и конструктивное оформление (А – PbS, К – CdS, Г – герметизированная конструкция).

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой экспериментальной установки (рис. 5).
2. Включить стенд с помощью тумблера «Сеть», расположенного на передней панели стенда.

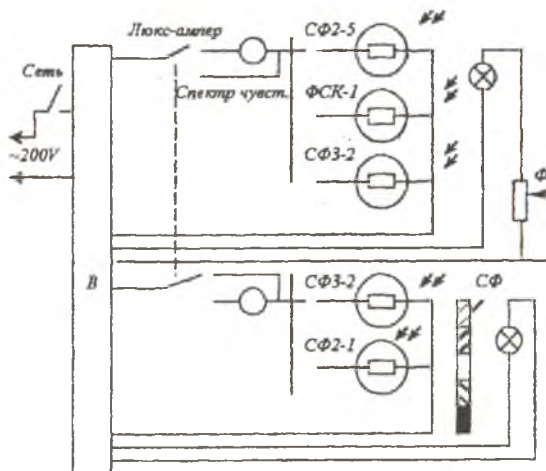


Рис. 5. Схема экспериментальной установки:
В – выпрямители, СФ – светофильтр

3. Поставить тумблер «Люкс – ампер – спектр. чувств.» в положение «Люкс – ампер».
4. Снять зависимости $I_{\phi} = \varphi(\Phi)$ последовательно для трёх фоторезисторов СФ2-5, ФСК-1 и СФ3-2. Освещённость фоторезисторов изменять регулятором «Ф» в пределах, указанных на стенде, выбрать максимальную чувствительность микроамперметра для каждого фоторезистора. Результаты занести в табл. 1, форму которой выбрать произвольной.
5. Поставить тумблер «Люкс – ампер – спектр. чувств.» в положение «Спектр. чувств.».
6. Снять зависимость спектральной чувствительности последовательно для трёх фоторезисторов СФ3-1 и СФ2-1. Длину волны света задавать с помощью таблицы, расположенной на крышке стенда. Результаты занести в табл. 2, форму которой выбрать произвольной.
7. Рассчитать величины фотосопротивлений в соответствии с формулами:

$$R_{\phi} = \frac{1}{\Phi^{\gamma}}; \quad \Phi^{\gamma} = I_{\phi}; \quad \gamma = -\frac{LgR_{\phi}}{Lg\Phi}.$$

8. Построить графики зависимостей

$$R_{\phi} = \varphi(\Phi) \text{ и } \frac{I_{\phi}}{I_{\phi\max}} = \varphi(\lambda).$$

9. Определить материалы, из которых выполнены фоторезисторы, сформулировать выводы.

Вопросы к коллоквиуму

1. Чем отличаются внутренний и внешний фотоэффекты?
2. Из каких материалов изготавливаются фоторезисторы?
3. Каков механизм электропроводности в фоторезисторах?
4. Почему ток, протекающий через резистор, зависит от частоты падающего светового потока?
5. Как должны изменяться спектральные чувствительности фоторезисторов с понижением температуры?
6. По каким характеристикам можно определить область применения фоторезистора?

Библиографический список

1. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники/ В.В. Пасынков, В.С. Савинков. - М: Высш. шк., 1986. – 367 с.
2. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники/ В.В. Пасынков. – М.: Высш. шк., 1980. – 406 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ

Цель работы: изучение зависимости электропроводности материалов термисторов и позисторов от температуры и электрического тока.

Задания:

1. По экспериментальным результатам построить для исследуемых элементов зависимости $\ln \gamma = \varphi_1(1/T)$ и $I = \varphi_2(U)$.
2. Определить ширину запрещенной зоны полупроводникового материала исследуемых элементов.
3. На основе анализа получаемых характеристик полупроводниковых резисторов определить область их применения. Назвать материалы, используемые для изготовления резисторов.

Теоретические сведения

Материалы термисторов

Термистор – это полупроводниковый резистор, в котором используется зависимость электрического сопротивления полупроводника от температуры. Процесс переноса зарядов – процесс электропроводности – может наблюдаться в полупроводниках при наличии электронов в зоне проводимости и условии неполного заполнения электронами валентной зоны. При выполнении этих условий и в отсутствие градиента температуры перенос носителей заряда может происходить либо под действием электрического поля, либо под действием градиента концентрации носителей заряда.

Широко распространены терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом, т. е. те у которых при увеличении температуры сопротивление уменьшается. Наряду с ними используют высокочувствительные терморезисторы с положительным коэффициентом сопротивления. Среди них особое место занимают позисторы. Термисторы бывают прямого и косвенного подогрева. В работе используются материалы термисторов прямого подогрева. Уменьшение сопротивления полупроводника с увеличением температуры может быть обусловлено тремя причинами:

- 1) увеличением концентрации носителей заряда;
- 2) увеличением их подвижности;

3) фазовыми превращениями полупроводникового материала.

Первое явление характерно для термисторов, изготовленных из монокристаллов ковалентных полупроводников (кремний, германий, карбид кремния, соединения типа $A^3 - B^5$ и др.). Зависимость сопротивления полупроводника от температуры определяется изменением концентрации носителей заряда, так как температурные изменения подвижности при этом пренебрежительно малы.

Зависимость сопротивления полупроводника от температуры соответствует уравнению

$$R_t = R_0 \exp B \left(\frac{T_0 - T}{T_0 T} \right),$$

где B - коэффициент температурной чувствительности, определяемый в виде

$$B = \frac{\ln \frac{R_1}{R_2}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}},$$

R_0 - «холодное» сопротивление термистора, обычно при 20°C . У разных типов термисторов $B = 700 - 15800 \text{ K}$.

Основная часть термисторов, выпускаемых промышленностью, изготовлена из поликристаллических окисных полупроводников из окислов так называемых металлов переходной группы таблицы Менделеева (от титана (Ti) до меди (Cu)). Наиболее широко используют окислы марганца (Mn), кобальта (Co), никеля (Ni) и меди (Cu). Термисторы в форме стержней, трубок, дисков или пластинок получают методами керамической технологии, т. е. путем обжига заготовок при высокой температуре. Электропроводность окисных полупроводников с преобладающей ионной связью между атомами отличается от электропроводности ковалентных полупроводников. Электропроводность окислов металлов связана с обменом электронами между соседними ионами. Энергия, необходимая для такого обмена, мала. Поэтому все электроны (или дырки), которые могут переходить от одного иона к другому, можно считать свободными носителями заряда, а их концентрацию - постоянной в рабочем диапазоне температур термистора.

Из-за сильного взаимодействия носителей заряда с ионами подвижность носителей заряда в окисном полупроводнике оказывается малой и экспоненциально возрастающей с ростом температуры. В результате температурная зависимость сопротивления термистора из окисного полупроводника оказывается такой же, как и у термисторов

из ковалентных полупроводников, но коэффициент температурной чувствительности характеризует и этом случае изменение подвижности носителей заряда, а не изменение их концентрации.

В оксидах ванадия V_2O_4 и V_2O_3 при температуре фазовых превращений ($68^\circ\text{C} - 110^\circ\text{C}$) наблюдается уменьшение удельного сопротивления на несколько порядков. Это явление позволяет создать термистор с большим отрицательным температурным коэффициентом сопротивления в диапазоне температур, соответствующих фазовому превращению.

Характеристики термисторов

На рис. 1 приведены статические характеристики термисторов прямого подогрева. При снятии характеристики после определения значения тока делалась достаточная выдержка времени до отсчета напряжения, чтобы температура термистора установилась. Из рис. 1 (участок OC) видно, что с ростом тока напряжение на термисторе растет медленнее, чем это предписывается законом Ома. Это объясняется тем, что при протекании через термистор тока он разогревается джоулевым теплом. Температура полупроводника растёт, что приводит к росту концентрации электронов и уменьшению сопротивления термистора. Каждая точка вольт-амперной характеристики соответствует тепловому равновесию между нагревом образца, протекающим током и его охлаждением за счет отвода тепла в окружающую среду.

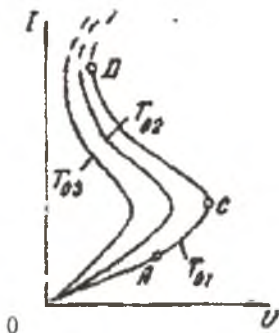


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика полупроводника, снятая при различных температурах окружающей среды $T_{01} < T_{02} < T_{03}$

Даже на участке OA (рис. 1), где вольт-амперная характеристика выглядит линейной, точные измерения зафиксировали бы небольшой

разогрев образца протекающим током и незначительное отклонение от закона Ома.

Поскольку концентрация свободных носителей в полупроводнике резко нелинейно, экспоненциально зависит от температуры, то когда ток станет больше, чем значение, соответствующее точке С, концентрация носителей, а следовательно, и проводимость полупроводника, могут расти так быстро, что нужно меньшее, чем прежде, напряжение, чтобы поддержать тот же или даже больший ток. Это видно из известного выражения

$$U = IR = I\rho(I)\frac{L}{S} = \frac{I}{\gamma(I)}\frac{L}{S}.$$

где L и S - длина и площадь поперечного сечения полупроводника. Удельное сопротивление $\rho(I)$ и проводимость в данном случае зависят от протекающего тока I . На рис. 1 видно, что еще большее увеличение тока (участок выше точки D) снова приводит к росту напряжения U .

Этот участок возникает на вольт-амперной характеристике полупроводника, когда протекающий ток разогреет его до температуры, соответствующей температуре примесного истощения. Участок выше точки D показан пунктиром, поскольку чаще всего раньше сгорает термистор или контакты к нему, прежде чем удастся наблюдать второй возрастающий участок.

Вольт-амперная характеристика термистора будет меняться при различных температурах окружающей среды T_0 . Чем больше T_0 , тем меньше начальное (при малых U и I) сопротивление полупроводника и тем больший ток соответствует тому же напряжению. С повышением T_0 вольт-амперная характеристика «прижимается» к оси токов и «спрямляется». При достаточно высокой температуре падающий участок на вольт-амперной характеристике может исчезнуть вовсе. Действительно, если T_0 так велика, что соответствует примесному истощению, то повышение температуры, образуемое за счет джоулева разогрева, не будет сопровождаться ростом проводимости. Следовательно, исчезнет и причина, вызывающая появление на вольт-амперной характеристике падающего участка.

Изменять вид вольт-амперной характеристики позволяют также технологические приемы. По сравнению с характеристикой обычного термистора, используемого для термокомпенсации элементов РЭС (кривая I на рис. 2), характеристики термистора, используемого в качестве стабилитрона (кривая II на рис. 2) или термистора измерительной щели (кривая III на рис. 2), не имеют падающего участка.

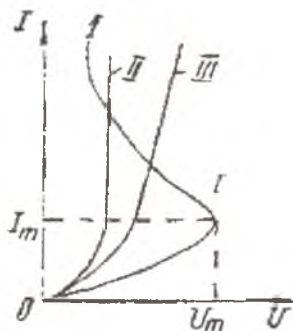


Рис. 2. Статические характеристики терморезисторов

Температурный коэффициент сопротивления термистора

$$TKR = \frac{1}{R_t} \frac{dR_t}{dT},$$

или

$$TKR = -B / T^2.$$

Позисторы

Позисторы – это полупроводниковые резисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления. В массовом производстве позисторы делают на основе титанатобариевой керамики, удельное сопротивление которой значительно уменьшается в результате добавления большого количества примесей.

Титанат бария ($BaTiO_3$) – диэлектрик с удельным сопротивлением $\rho \sim 10^{10} - 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Введение в $BaTiO_3$ малых количеств (0,1 – 0,3ат%) примесей редкоземельных элементов (лантана, церия и др.) приводит к уменьшению ρ до $10 - 10^2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. При дальнейшем увеличении примесей степень тетрагональности кристаллической решетки материала уменьшается, происходит разукрупнение кристаллитов, поэтому ρ растет.

Такой материал с введенными примесями обладает аномальной температурной зависимостью: в относительно узком диапазоне температур его удельное сопротивление ρ увеличивается на несколько порядков с увеличением температуры, как это показано на рис. 3. Резкое увеличение ρ $BaTiO_3$ происходит из-за тетрагонально-кубического фазового перехода, т.е. в диапазоне температур выше точки Кюри, при

которых BaTiO_3 переходит из сегнетоэлектрического состояния в параэлектрическое состояние.

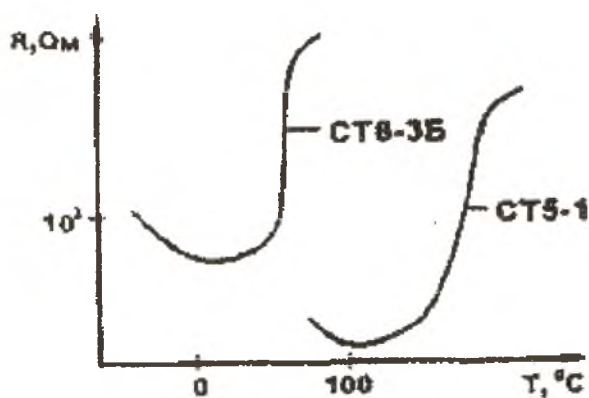


Рис. 3. Температурные характеристики некоторых позисторов

Иногда для создания позисторов используют монокристаллические Si, Ge и другие полупроводниковые материалы. Принцип действия позисторов основан на уменьшении подвижности носителей заряда с увеличением температуры в результате увеличения их рассеивания на тепловых колебаниях атомов кристаллической решетки. Преимуществом монокристаллических позисторов является возможность использования технологии, позволяющей создавать позисторы с разбросом номинальных сопротивлений (1 – 2)%. Однако из-за меньшей стоимости и из-за больших температурных коэффициентов сопротивления поликристаллические позисторы нашли более широкое применение.

Свойства позисторов оцениваются характеристиками и параметрами, аналогичными характеристикам и параметрам термисторов.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой экспериментальной установки (рис. 4).
2. Включить установку с помощью тумблера «Вкл.», расположенного на ее лицевой панели. Индикатор «Т°С» измерителя температуры покажет начальную температуру термостата T_0 .
3. Снять зависимости $I = \varphi(U)$ набора полупроводниковых резисторов при $T = T_0$, для чего регулятором «U» задать 5 – 6 значений напряжений и снять показания с индикаторов I и U. Результаты занести в табл. 1, форма которой выбирается произвольно.

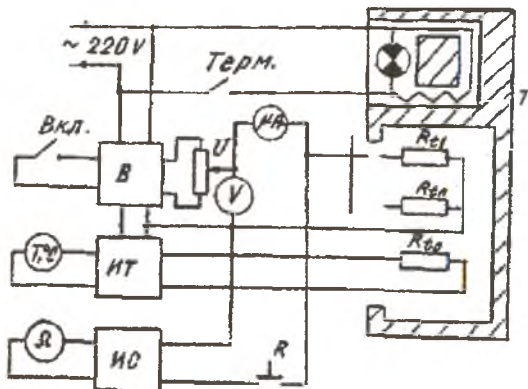


Рис. 4. Схема экспериментальной установки:
 В – выпрямитель; ИТ – измеритель температуры;
 ИС – измеритель сопротивления; Т – термостат

4. Снять зависимости $R = \varphi(T)$ для набора полупроводниковых резисторов, для чего регулятором «У» задать ток $I = 5 \text{ мкА}$ и включить термостат тумблером «Терм.» на правой стороне установки. Загорится красная лампочка на передней панели установки. Для измерения R полупроводниковых резисторов следует нажать кнопку «R» на передней панели установки и снять показания с индикатора «Ω» при 5 – 6 значениях температуры термостата. Результаты занести в табл. 2, форма которой выбирается произвольно.
5. Снять зависимости $I = \varphi(U)$ для набора полупроводниковых резисторов при $T = T_{\text{макс}}$ термостата. Результаты занести в табл. 3, форму которой выбрать аналогично табл. 1.
6. Вычислить γ , учитывая реальные размеры полупроводниковых резисторов и формулу

$$\gamma = 1/\rho = L/RS.$$

7. Построить зависимости $\ln \gamma = \varphi(1/T)$ и $I = \varphi 2(U)$ при $T = T_0$ и $T = T_{\text{макс}}$.
8. Определить ширину запрещенной зоны материала полупроводниковых резисторов по формуле

$$\Delta W = \frac{2,3k\Delta \ln \gamma}{\Delta(1/T)},$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-28} \text{ Дж/К} = 0,86 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$ – постоянная Больцмана.

9. Ответить на вопросы задания, сформулировать выводы.

Вопросы к коллоквиуму

1. Почему статическая характеристика терморезистора имеет три отличающихся друг от друга участка?
2. О чем свидетельствует нелинейность зависимости R от $T^{\circ}C$?
3. Как экспериментально определить ширину запрещенной зоны и полупроводника?
4. Какие характеристики полупроводникового элемента необходимо иметь, чтобы определить возможную область его использования?
5. В чем отличие электропроводности термисторов, изготовленных из карбида кремния и окиси марганца?

Библиографический список

1. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники/ В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. – М.: Высш. шк., 1986. - 367 с.
2. Овечкин, Ю.Л. Полупроводниковые приборы/ Ю.Л. Овечкин. - М.: Высш. шк., 1979. – С. 141-151.
3. Левинштейн, М.Е. Знакомство с полупроводниками/М.Е. Левинштейн, Г.С. Силин; под ред. Л.С. Асламазова. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 240 с. (Библиотека «Квант», вып. 33).

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Цель работы: исследование статических магнитных характеристик ферромагнитных материалов на примере электротехнической стали пермаллоя.

Задания:

1. Построить график зависимости статической магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля.
2. Построить график основной кривой намагничивания исследуемых образцов.
3. Представить теоретическую интерпретацию полученных экспериментальных результатов.

Теоретические сведения

Основная кривая намагничивания

Все ферромагнитные материалы обладают нелинейной зависимостью магнитной индукции \vec{B} от напряженности магнитного поля \vec{H} . Нелинейность объясняется доменной структурой этих материалов. При воздействии внешнего поля на образец магнитного материала его домены ориентируются в направлении поля. Ориентация доменов (намагниченность) осуществляется вследствие взаимодействия элементарных магнитных моментов, вызванных вращением электронов (вокруг ядра атома и вокруг собственной оси), с внешним полем. В зависимости от свойства материала, при одной и той же напряженности магнитного поля внутри тела, в нем будет разная намагниченность, векторная величина, определяемая уравнением

$$\vec{M} = \chi \vec{H}, \quad (1)$$

где \vec{M} - намагниченность; χ - магнитная восприимчивость; \vec{H} - напряженность магнитного поля.

При некотором \vec{H} все домены примут направление поля, и рост магнитной индукции \vec{B} практически прекращается, т.е. наступает насыщение образца материала.

Суммарное магнитное поле определяется векторами \vec{H} и \vec{M} :

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}), \quad (2)$$

где μ_0 - магнитная постоянная, составляющая $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; \vec{B} - вектор магнитной индукции, T .

Преобразуя выражение (2) с учетом (1), получим

$$\vec{B} = \mu_0(1 + \chi)\vec{H} = \mu_0\mu\vec{H}, \quad (3)$$

где $\mu = 1 + \chi$ - относительная магнитная проницаемость материала.

По величине μ и χ материалы классифицируют:

1. Парамагнетики: $\mu > 1$ на величину $\chi = 10^{-3} \dots 10^{-4}$. К ним относятся Pt, Pd, жидкий кислород и др.
2. Диамагнетики: $\mu < 1$ на величину $\chi = 10^{-2} \dots 10^{-5}$. К ним относятся медь (Cu), серебро (Ag), золото (Au) и др.
3. Ферромагнетики: $\mu \gg 1$ и достигает значений $10^5 \dots 10^6$. К ним относятся Fe, Ni, Co, Cd и ряд сплавов.
4. Антиферромагнетики: $\mu > 1$ на величину $\chi = 10^{-3} \dots 10^{-5}$. К ним относятся Cr, Mn и ряд редкоземельных элементов (Ce, Nd, Sm, Tm и др.).
5. Ферримагнетики: $\mu \gg 1$ и достигает значений $10^5 \dots 10^6$. Это вещества с нескомпенсированным антиферромагнетизмом. Такими свойствами обладает ряд упорядоченных сплавов металлов, но главным образом оксидные соединения, среди которых наибольший интерес вызывают ферриты с обобщенной формулой $MeFe_2O_4$.

Зависимость магнитной индукции \vec{B} от напряженности магнитного поля \vec{H} была впервые получена А.Г.Столетовым. При расчетах электромагнитных механизмов и при магнитных измерениях обычно имеет значение составляющая индукции (или намагниченности), параллельная или антипараллельная вектору \vec{H} . Поэтому в дальнейшем знаки векторов \vec{B} и \vec{H} можно опустить.

Как следует из выражения (3), намагниченность (индукция) не является однозначной функцией напряженности магнитного поля, а зависит от магнитной «предыстории» образца. Поэтому следует условиться о начальном состоянии среды, для которой определяется зависимость $B = f(H)$.

За «начальное» состояние принимают состояние так называемого полного размагничивания, которое характеризуется одновременным

равенством нулю намагниченности и напряженности магнитного поля ($M = 0, H = 0$). Поместив такой образец в магнитное поле, монотонно и медленно изменяющееся от нуля до некоторой величины, можно определить его кривую намагничивания $M(H)$ или $B(H)$, которая называется кривой первоначального намагничивания. Обычный вид кривой намагничивания показан на рис. 1.

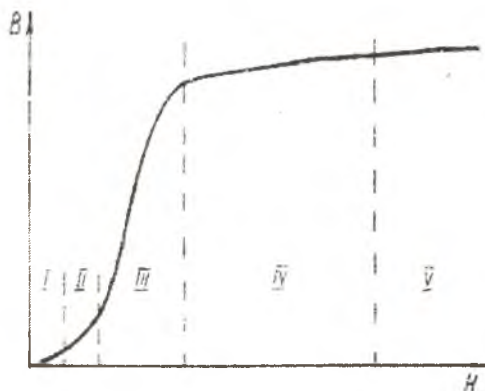


Рис. 1. Кривая первоначального намагничивания

На рис.1 кривую первоначального намагничивания можно разделить на пять участков: I – область начального или обратимого намагничивания (магнитная проницаемость постоянна); II - область Рэлея; III - область наибольших проницаемостей; IV- приближения к насыщению; V - область насыщения (парапроцесса).

Для материалов, подвергшихся размагничиванию магнитным полем, говорить о кривой первоначального намагничивания можно лишь условно, что связано с трудностью восстановления первоначального размагниченного состояния с таким же распределением областей самопроизвольного намагничивания.

Если учесть, что, во-первых, часто невозможно полностью размагнитить ферромагнитный образец так, чтобы в нем имело место действительно хаотическое расположение M_i доменов (кроме случая его нагрева выше температуры Кюри, когда это допустимо), во-вторых, у ряда материалов свойства необратимо изменяются после первого намагничивания (например, перминвар), в-третьих, ряд материалов (с магнитной текстурой) вообще не может быть получен в размагниченном состоянии и, в-четвертых, экспериментально получить кривую

первоначального намагничивания довольно трудно, то следует признать, что эта кривая не может являться технической характеристикой ферромагнитных материалов.

Если образец намагнитить до насыщения, а затем снять намагничивающее поле, то магнитная индукция уменьшится до значения B_r .

Это значение называется остаточной индукцией. Для того чтобы уменьшить индукцию от B_r до нуля, необходимо приложить обратно направленную напряженность поля H_c , называемую коэрцитивной силой. Изменяя силу магнитного поля от $-H_m$ до $+H_m$, получим замкнутую петлю гистерезиса (рис. 2).

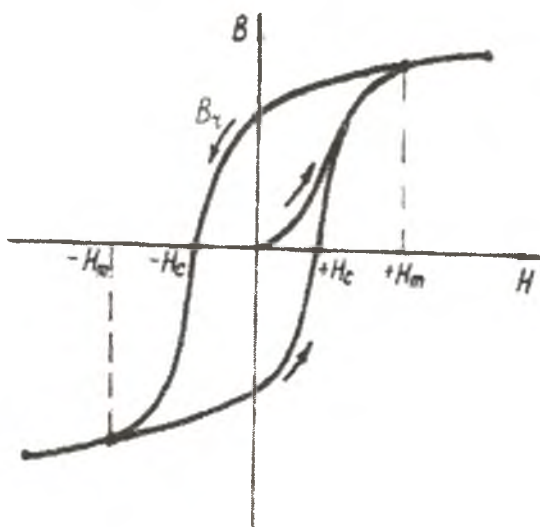


Рис. 2. Процесс намагничивания ферромагнетиков

При работе с разными предельными напряженностями магнитного поля для одного и того же образца получим семейство установившихся симметричных петель гистерезиса. Геометрическое место всех вершин петель гистерезиса получило название основной кривой намагничивания (ОКН) (рис. 3).

Основная кривая намагничивания – важнейшая характеристика ферромагнитных материалов.

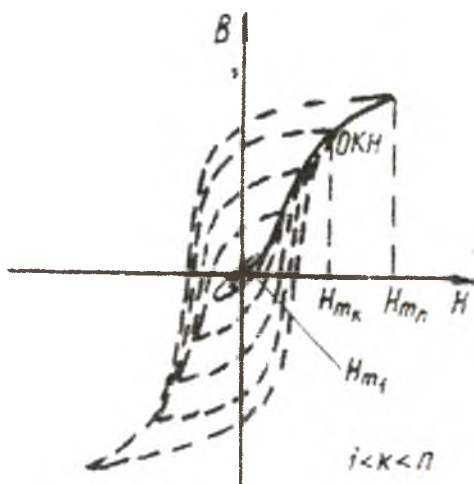


Рис. 3. Основная кривая намагничивания (ОКН) и гистерезисные циклы

Для перемагничивания ферромагнитного материала необходимо затратить энергию, величина которой пропорциональна площади петли гистерезиса.

Энергия, затрачиваемая при перемагничивании, переходит в тепло. При перемагничивании 1 см^3 ферромагнитного материала энергия, пропорциональная площади цикла,

$$\omega_{\Delta} = \oint HdB, \text{ Дж/см}^3. \quad (4)$$

Например, при перемагничивании электротехнической стали (сплавы железа и кремния) марок 1211, 1212 с частотой 50 Гц при энергии перемагничивания $\omega_r = 10^{-2} \text{ Дж/см}^3$ за цикл образец нагревается на $3 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}$. Качество магнитомягких материалов тем выше, чем меньше энергия, затрачиваемая на перемагничивание (потери на гистерезис). Так, у пермаллоя (железоникелевого сплава) $\omega_r = (4 \dots 50) 10^{-7} \text{ Дж/см}^3$ при максимальной индукции 0,5Тл. У технически чистого железа и листовой электротехнической стали при $B = 1,0\text{Тл}$, $\omega_r = (3 \dots 100) 10^{-7} \text{ Дж/см}^3$, а у сплавов постоянных магнитов (магнитотвердых ферромагнитных ма-

териалов) потери за цикл могут достигать 1 Дж/см³ и более. Потери на гистерезис часто измеряют в Вт/кг (удельные потери):

$$P_{\Gamma} = \frac{10^3 \omega_{\Gamma} f}{\gamma} = \alpha \cdot f, \text{ Вт/кг}, \quad (5)$$

где f – частота перемагничивания; γ – плотность материала.

Кроме потерь на гистерезис существуют потери на вихревые токи $P_{В.Т}$, которые наводятся в магнитном материале, и потери на последствия, связанные с отставанием по времени магнитной индукции от изменения H :

$$P_{В.Т} = \beta \cdot f^2, \quad (6)$$

где β – коэффициент, не зависящий от частоты и определяющийся свойствами материала.

Магнитная проницаемость

Если в каждой точке основной кривой намагничивания найти отношение $B/\mu_0 H$, т.е. статическую проницаемость μ , то можно построить зависимость $\mu = f(H)$ (рис. 4). На этой кривой имеются два значения проницаемости, являющиеся важными характеристиками материала.

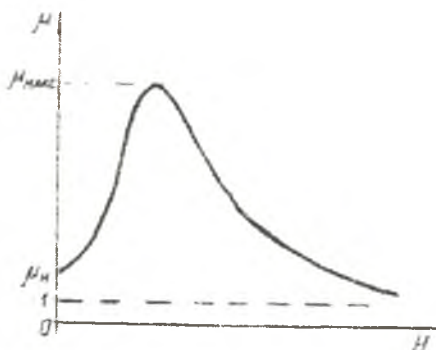


Рис. 4. Зависимость статической магнитной проницаемости μ от напряженности магнитного поля H

В очень слабых полях при $H \rightarrow 0$ проницаемость, как следует из анализа рис. 3, на некотором участке обычно постоянна и называется начальной проницаемостью (μ_n на рис. 4). Её можно определить как предел отношения B/H при $H \rightarrow 0$:

$$\mu_i = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H} \quad (7)$$

В полях, близких по значению к величине коэрцитивной силы, проницаемость достигает максимума (μ_{max} на рис. 4). Обычно $H_{\mu_{max}} = (1,2 \dots 1,4)H_c$. В больших магнитных полях ($H \rightarrow \infty$) магнитная проницаемость стремится к 1. Действительно:

$$\mu = \lim_{H \rightarrow \infty} \frac{B_s}{\mu_0 H} = \lim_{H \rightarrow \infty} \left[\frac{\mu_0 (M_s + H)}{\mu_0 H} \right] = \lim_{H \rightarrow \infty} \left(\frac{M_s}{H} + 1 \right) = 1. \quad (8)$$

Существуют и другие виды магнитной проницаемости. Всего их около восьми десятков.

Методика проведения исследования

Указания по выполнению работы

Исследования электротехнической стали и пермаллоя проводятся на установке, схема которой изображена на рис. 5. На образцы материалов I и II накладываются по две обмотки, равномерно распределенные по поверхности кольца. Первичная обмотка имеет 2400 витков ($W_1 = 2400$), а вторичная - 800 витков ($W_2 = 800$). Площадь сечения I-го образца S_1 . Средняя длина магнитной линии в образце l_1 . Площадь сечения второго образца S_2 . Длина магнитной линии l_2 .

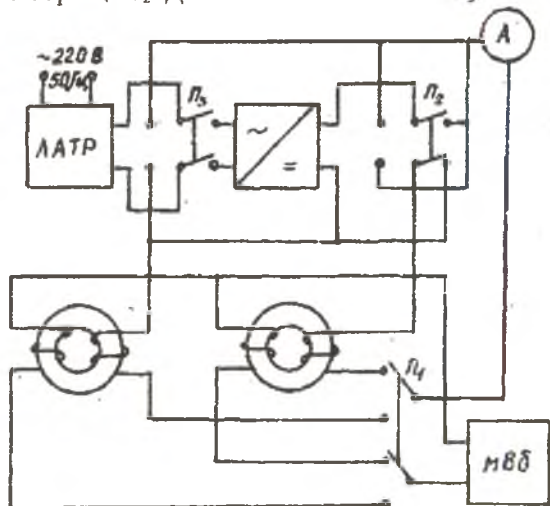


Рис. 5. Схема установки исследования образцов материалов

Принцип измерения заключается в следующем. Пропуская через первичную обмотку заданный постоянный ток, в исследуемом образце возбуждают магнитное поле определенной напряженности, пропорциональное величине тока I . Изменив полярность возбуждающего тока на обратную, во вторичной обмотке регистрируют импульс возникшего тока. Подключенный ко вторичной обмотке милливольтметр позволяет измерить реакцию вторичной обмотки, вызванную изменением полярности тока I . Зная геометрические параметры исследуемого образца, расчетным путем определяют магнитный поток Φ и магнитную индукцию B . Необходимая величина тока I устанавливается с помощью латра и измеряется амперметром.

Следует иметь в виду, что милливольтметр представляет собой магнитоэлектрический прибор без возвратной пружины, т.е. начальное положение его стрелки может быть установлено с помощью переключателя «корректор» произвольно. При работе с таким прибором нас интересует не абсолютное положение стрелки, а разность показаний при различных направлениях токов возбуждения в первичной обмотке образца.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой.
2. Включить установку.
3. Ручку латра установить в крайнее левое положение.
4. Переключатель милливольтметра установить в позицию 1.
5. Ручкой корректора установить стрелку милливольтметра на середине шкалы.
6. Установить переключатель P_1 в положение 1, что соответствует первому исследуемому образцу.
7. Переключатель P_2 установить в вертикальное положение (возбуждающий ток I положительной полярности).
8. Размагнитить образец, для чего:
 - переключатель P_3 поставить в положение тренировка;
 - переключатель милливольтметра 1-2-3 поставить в положение 3 (арретир прибора);
 - регулятором латра увеличить напряжение до максимума выдержать 5 – 10 с, затем плавно уменьшить до нуля;
 - переключатель P_3 установить в положение "измерение".
9. Переключатель милливольтметра 1-2-3 установить в положение 2.
10. Установить ручку латра в положение "ток возбуждения 0,1 А".

11. Снять показания α_1 на шкале милливеберметра и записать в табл. 1.
12. Переключатель $П_2$ поставить в горизонтальное положение (сменить полярность возбуждающего тока).
13. Снять показания α_2 на шкале милливеберметра и записать в табл. 1.

Таблица 1

Материал образца: _____

Экспериментальные данные				Расчетные данные				
№ п/п	I, A	α_1	α_2	$ \alpha_1 - \alpha_2 $	$H, A/M$	$\Phi, Вб$	$B, Тл$	μ
1	0,1							
2	0,2							
...	...							
15	1,5							

14. Повторить пункты 7 – 13 работы, устанавливая в каждом последующем эксперименте величину тока I на 0,1А больше предыдущего значения до значения $I = 1,5A$.

Примечание: после установления каждого конкретного значения тока возбуждения произвести магнитную тренировку образца, установив вначале переключатель милливеберметра 1-2-3 в положение 3, а затем переключатель $П_3$ в положение "тренировка" на 1-2с. После тренировки образца переключатели 1-2-3 и $П_3$ вернуть в первоначальное положение и продолжить исследования.

15. Для исследования второго образца переключатель $П_1$ поставить в положение 2. Данные записать в табл. 2, по форме аналогичную табл. 1.
16. Для всех экспериментов произвести расчет магнитного потока (в веберах) по формуле и записать в табл. 1 и 2.

$$\Phi = 10^3 \frac{C_\Phi |\alpha_2 - \alpha_1|}{2W_2},$$

где Φ - магнитный поток, Вб; W_2 - число витков измерительной обмотки; C_Φ - постоянная милливеберметра:

$$C_\Phi = 10^{-4} \frac{Вб * виток}{деление}.$$

17. Определить магнитную индукцию и напряженность магнитного поля по формулам и записать в табл. 1, 2.

$$B = \frac{\Phi}{S},$$

где B - магнитная индукция, Тл; S - площадь поперечного сечения образца, м²;

$$H = \frac{I * W_1}{l},$$

где H - напряженность магнитного поля, А/м; I - ток возбуждения, А; W_1 - число витков намагничивающей обмотки; l - средняя длина магнитной линии в образце, м.

18. Определить статическую магнитную проницаемость по формуле и записать в табл. 1,2.

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H},$$

где μ_0 - магнитная постоянная.

19. Построить график зависимостей $B = f_1(H)$ и $\mu = f_2(H)$ для обоих образцов.
20. Проведите сравнительный анализ полученных характеристик. Объясните их. Сделайте выводы.

Вопросы к коллоквиуму

1. Что называется основной кривой намагничивания ферромагнетиков?
2. По каким параметрам и как классифицируются магнитные материалы?
3. Укажите основные магнитные характеристики, при помощи которых оцениваются магнитные свойства материалов.
4. Какие составляющие магнитных потерь проявляются в сердечниках из электротехнической стали?
5. Как определить статическую магнитную проницаемость в области слабых и больших магнитных полей?
6. Объясните принцип измерения параметров материалов в данной работе.

Библиографический список

1. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники/ В.В. Пасынков. - М.: Высш. шк., 1980. - 406 с.
2. Преображенский, А.А. Магнитные материалы и элементы: учебное пособие/ А.А. Преображенский. - М.: Высш. шк., 1986 - 351с.