

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиоэлектронных устройств и систем

РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ № 4-5
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения

Воронеж 2024

УДК 621.396.6(07)
ББК 32я7

Составитель
канд. физ.-мат. наук А. С. Бадаев

Радиоматериалы и радиокомпоненты: методические указания к выполнению лабораторных работ № 4-5 для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: А.С. Бадаев. — Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2024. — 28 с.

В методических указаниях изучаются и экспериментально исследуются эффект Зеебека, Пельтье и Томсона, изучаются методы нанесения тонких пленок. Приводятся теоретические и практические сведения, необходимые для выполнения лабораторных работ № 4-5. Тематика лабораторных работ соответствует рабочей программе дисциплины «Радиоматериалы и радиокомпоненты».

Предназначены для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» 4 и 5 курсов очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле РМиРК_4-5.pdf.

Ил. 9. Табл. 2. Библиогр.: 5 назв.

УДК 621.396.6(07)
ББК 32я7

Рецензент – *А. В. Останков, д-р техн. наук, профессор
кафедры радиотехники ВГТУ*

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

1.1. Общие указания

1.1.1. Цель работы

Ознакомление с термоэлектрическими эффектами в полупроводниках, изучение физики термоэлектрического охлаждения.

1.1.2. Содержание работы

Основным содержанием работы является: изучение эффектов Зеебека, Пельтье и Томсона; ознакомление с устройством и принципом работы термоэлектрического охлаждающего модуля; экспериментальное исследование температуры спаев термоэлектрического модуля в зависимости от токового режима и расчет его основных параметров и характеристик.

Обучение осуществляется в процессе выполнения домашних и лабораторных заданий. Контроль усвоения полученных студентами знаний и навыков производится при собеседовании путем оценки ответов на контрольные вопросы, а также при выполнении лабораторной работы.

Время выполнения домашних заданий 3 ч. Общее время на выполнение лабораторных заданий, включая собеседование и отчет по лабораторной работе 4 ч.

1.1.3. Указания по технике безопасности

В процессе работы необходимо соблюдать общие правила техники безопасности при работе с электроустановками напряжением до 1000 В.

1.2. Домашние задания и методические указания по их выполнению

1.2.1. Задание № 1

Изучить термоэлектрические явления в полупроводниках: эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона, рассмотрев их термодинамическую основу и физическую природу. В заготовку отчета занести аналитические выражения для рассмотренных эффектов и энергетические диаграммы, их объясняющие.

1.2.1.1. Методические указания по выполнению первого задания

Для выполнения задания необходимо проработать материал [1], с. 428 – 432; [2], с. 19 – 20, 87 - 89.

К важнейшим термоэлектрическим явлениям в полупроводниках относятся эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона.

Эффект Зеебека (термоэлектрический эффект) состоит в том, что в полупроводниках, как и в металлах, в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных полупроводников или полупроводника и металла, возникает ЭДС, если температуры контактов различны (рис. 1).

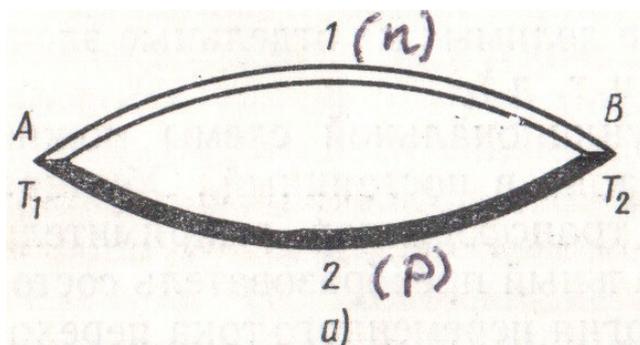


Рис. 1. К объяснению эффекта Зеебека

Эта ЭДС называется *термоэлектродвижущей силой* (термо-ЭДС). Как показывает опыт, в относительно узком интервале температур она пропорциональна разности контактов А и В:

$$V_T = \alpha(T_2 - T_1). \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности

$$\alpha = dV_T / dT \quad (2)$$

называют *дифференциальной* или *удельной* термо-ЭДС. Он зависит от природы соприкасающихся проводников и температуры.

Существует три составляющих термо-ЭДС.

Первая составляющая обусловлена диффузией носителей заряда от нагретого спая, температура которого из-за подводимой к нему тепловой мощности от какого-нибудь источника выше температуры тепловыделяющего спая. Диффузия носителей заряда в ветвях цепи может возникать по двум причинам. Во-первых, у нагретого спая оказывается большее число ионизированных примесей. При дополнительной ионизации примесей увеличивается концентрация основных носителей заряда на нагретых концах цепи. В этом случае возникает диффузия основных носителей в каждой ветви из-за градиента концентрации. Во-вторых, если все примеси были ионизированы уже при низкой температуре (эта температура выше температуры истощения примесей), то концентрация основных носителей заряда при нагреве практически не увеличивается. Но на нагретых концах носители заряда приобретают большие энергии. Поэтому опять происходит диффузия основных носителей заряда от нагретого конца в

каждой ветви, связанная с выравниванием средней энергии, приходящейся на один носитель определенного знака.

Диффузия, например, электронов в отрицательной ветви может происходить только от нагретого конца этой ветви вдоль нее и не может происходить в положительную ветвь, так как переходу электронов в положительную ветвь препятствует потенциальный барьер нагретого спае. Аналогично, дырки в положительной ветви могут диффундировать вдоль нее от нагретого конца.

Перемещение носителей заряда, связанное с их диффузией, нарушает электрическую нейтральность. В цепи на нагретых концах остаются нескомпенсированные ионизированные примесные атомы, а на противоположных концах образуется избыток основных носителей заряда. В результате возникает первая составляющая термо-ЭДС, которую можно назвать диффузионной, так как она возникает из-за процесса диффузии.

Вторая составляющая термо-ЭДС — это следствие температурной зависимости контактной разности потенциалов. Если оба спае имеют одну и ту же температуру, то контактные разности потенциалов на этих спае равны, направлены в противоположные стороны при обходе контура и не дают результирующей ЭДС. Если же температура спае различна, то значение контактной разности потенциалов на спае будет также различно. Тогда в цепи появляется вторая составляющая термо-ЭДС с той же полярностью, что и первая составляющая.

Третья составляющая термо-ЭДС возникает вследствие увлечения носителей заряда квантами тепловой энергии — фононами. Если в ветвях цепи есть градиент температуры, то будет существовать направленное движение фононов от нагретых концов ветвей. В результате столкновений фононов с носителями заряда фононы увлекают за собой электроны в отрицательной ветви и дырки в положительной ветви. Этот эффект может оказаться преобладающим при низких температурах.

Эффект, обратный явлению Зеебека, называют *эффектом Пельтье* (электротермическим эффектом Пельтье). Его сущность заключается в том, что при прохождении тока через контакт двух разных полупроводников или полупроводника и металла происходит нагревание или охлаждение контакта в зависимости от направления тока. Количество тепла, выделяющегося или поглощающегося при эффекте Пельтье:

$$Q_{\text{п}} = \Pi J t, \quad (3)$$

где $Q_{\text{п}}$ — теплота Пельтье;

J — плотность тока;

Π — коэффициент Пельтье, зависящий от природы контактов, температуры и направления тока.

Если направление тока в цепи такое, как показано на рис. 2, то на спае 1 свободные электроны и дырки, возникшие в результате тепловой генерации, движутся в разные стороны под действием суммарного электрического поля

(диффузионного поля спае и внешнего поля). При тепловой генерации носителей заряда в области спае 1 на переброс электрона из валентной зоны в зону проводимости затрачивается некоторая тепловая энергия кристаллической решетки полупроводника. Поэтому при заданном направлении тока спай 1 будет охлаждаться, спай 2 при этом нагревается, так как к нему с разных сторон подходят электроны и дырки, которые отдают при рекомбинации некоторую энергию в виде теплоты.

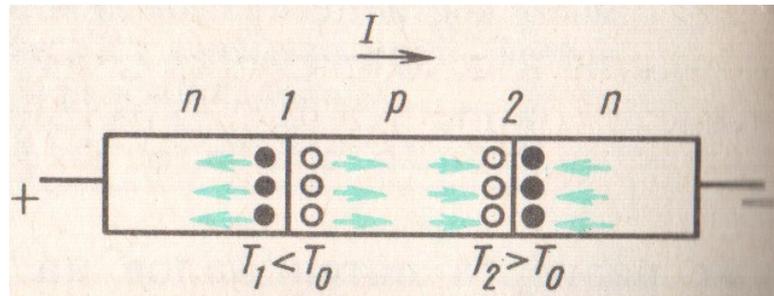


Рис. 2. Охлаждение спае (1) и нагрев спае (2) двух полупроводников при прохождении тока

В результате при прохождении тока цепь работает как своеобразный тепловой насос, забирая тепловую энергию на спае 1 (теплопоглощающем спае при данном направлении тока) и выделяя ее на спае 2 (тепловыделяющем спае).

Эффект Пельтье является обратным эффекту Зеебека. Поэтому существует связь между коэффициентом Пельтье и коэффициентом термо-ЭДС:

$$P = \alpha T . \quad (3')$$

Это соотношение может быть получено при применении к термоэлектрическим явлениям первого и второго законов термодинамики.

Эффект Пельтье возникает вследствие различия средних энергий электронов проводимости в разнородных материалах, приведенных в контакт. В качестве примера рассмотрим контакт металла с невырожденным полупроводником *n*-типа (рис. 3). После установления равновесия уровни Ферми в них располагаются на одной высоте. В проводимости металла участвуют лишь электроны, размещающиеся вблизи уровня Ферми, средняя энергия которых равна практически энергии Ферми. Обозначим среднюю энергию электронов проводимости полупроводника через \bar{E}_n . Эта энергия не равна средней тепловой энергии электронов $3kT/2$, так как относительная роль быстрых электронов в формировании электрического тока выше, чем медленных.

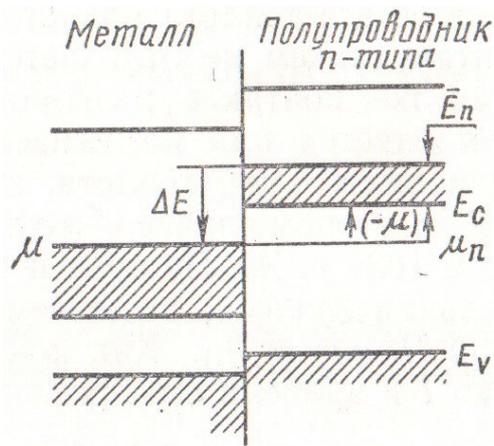


Рис. 3. Энергетические диаграммы, поясняющие эффект Пельтье

Предположим, что электрический ток в контакте течет так, что электроны переходят из полупроводника в металл. Из рис. 3 видно, что каждый электрон, переходящий из полупроводника в металл, переносит избыточную энергию, равную

$$E = \Delta E = \bar{E}_n + (-\mu_n). \quad (4)$$

Эта энергия выделяется в форме теплоты вблизи контакта. Она и представляет собой теплоту Пельтье. При противоположном направлении тока электроны, переходя из металла в полупроводник, поглощают энергию, охлаждая контакт.

Эффект Томсона, состоит в том, что при пропускании тока через полупроводник, вдоль которого имеется градиент температуры, в дополнение к теплоте Джоуля в объеме полупроводника в зависимости от направления тока выделяется или поглощается некоторое количество тепла. Эффект Томсона объясняется возникновением термо-ЭДС при наличии в образце градиента температур. Если направление возникшего поля совпадает с направлением внешнего поля, то не вся энергия, поддерживающая ток, обеспечивается внешним источником, часть работы совершается тепловой энергией самого полупроводника, в результате чего он охлаждается. При смене направления внешнего электрического поля оно будет совершать дополнительную работу, сопровождающуюся выделением тепла, дополнительного к джоулевой теплоте. Теплота Томсона Q_T :

$$Q_T = \tau (T_1 - T_2) J t, \quad (5)$$

где τ — коэффициент Томсона;

$(T_1 - T_2)$ — разность температур вдоль полупроводника;

J — плотность тока;

t — время.

1.2.2. Задание № 2

Ознакомиться с конструкцией и принципом действия полупроводниковых термоэлектрических устройств, в заготовку отчета занести схему полупроводникового термоэлемента. Проанализировать тепловой режим термоэлектрического охлаждающего модуля.

1.2.2.1. Методические указания по выполнению второго задания

Для выполнения задания следует изучить материал [1], с. 438 – 441.

Полупроводниковое термоэлектрическое устройство — это устройство, действие которого основано на использовании термоэлектрических эффектов Пельтье или Зеебека в полупроводниках, предназначенное для получения теплоты или холода с использованием электрической энергии или получения электрической энергии с использованием тепловой.

В полупроводниковых термоэлектрических устройствах используют полупроводниковые *термоэлементы*, каждый из которых состоит из двух *ветвей*, обладающих разным типом электропроводности. Ветвь термоэлемента, материал которого имеет электропроводность *p*-типа, называют *положительной ветвью*. Ветвь термоэлемента с электропроводностью *n*-типа — *отрицательной ветвью*. Положительную и отрицательную ветви полупроводникового термоэлемента соединяют между собой последовательно *контактной пластиной* (рис. 4). Зону электрического соединения ветвей полупроводникового термоэлемента называют *спаем*. При работе термоэлемента его спаи имеют различную температуру: один из них является *теплопоглощающим*, другой — *тепловыделяющим*.

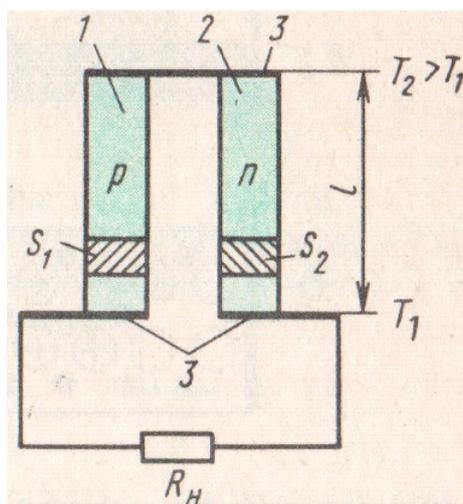


Рис. 4. Схема полупроводникового термоэлемента с сопротивлением нагрузки:
1 — положительная ветвь; 2 — отрицательная ветвь; 3 — металлические контактные пластины

Полупроводниковое термоэлектрическое устройство обычно имеет большое число последовательно соединенных между собой термоэлементов в еди-

ном конструктивном исполнении — полупроводниковую термобатарю. Полупроводниковое термоэлектрическое устройство, включающее одну или несколько электрически соединенных полупроводниковых термобатарей в едином конструктивном исполнении с системой теплообмена, называют полупроводниковым термоэлектрическим блоком или модулем.

При прохождении тока через термоэлементы наряду с поглощением на спае 1 (рис. 2) в единицу времени некоторого количества теплоты

$$Q_{\Pi} = -PI, \quad (6)$$

где I — сила тока,

происходит еще выделение джоулевой теплоты, пропорциональной квадрату силы тока и сопротивлению спае 1. В первом приближении можно считать, что сопротивления спаев 1 и 2 равны, т.е. каждое из них составляет половину полного сопротивления термоэлемента R . Тогда джоулева теплота, выделяющаяся на первом спае,

$$Q_{Дж} = \frac{1}{2}I^2R. \quad (7)$$

Алгебраическая сумма соотношений (6) и (7) для теплопоглощающего спае

$$Q = Q_{\Pi} + Q_{Дж} = -PI + \frac{1}{2}I^2R. \quad (8)$$

Графическое пояснение уравнения (8) дано на рис. 5. При токе, равном нулю, оба эффекта отсутствуют и охлаждения не происходит, а при достаточно большом токе $Q_{Дж}$ превысит Q_{Π} и охлаждение первых спаев перейдет в нагрев. Поэтому существует оптимальный ток, при котором эффект охлаждения максимален (от теплопоглощающего спае отводится максимальное количество теплоты).

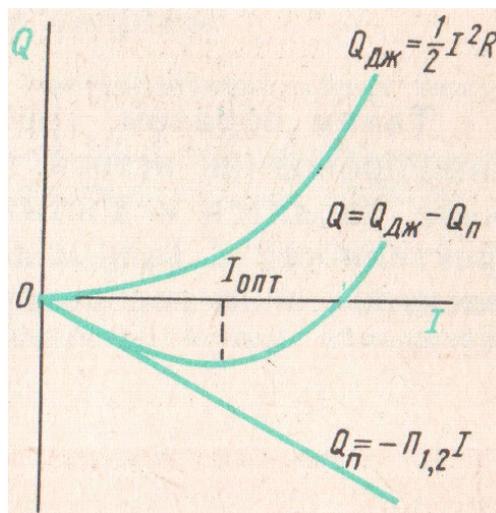


Рис. 5. Зависимость теплоты, выделяемой $Q_{Дж}$ и поглощаемой Q_{Π} на спае 1 термоэлемента (см. рис. 2) и зависимость результирующей теплоты Q от значения тока через термоэлемент

Дифференцированием (8) находим, что Q достигает максимума при токе

$$I_{opt} = P / R. \quad (9)$$

При этом токе

$$Q_{I_{opt}} = -P^2 / (2R). \quad (10)$$

Из (10) следует, что чем меньше сопротивление термоэлемента, тем больше количество теплоты $Q_{I_{opt}}$, отводимое от теплопоглощающего спая. Однако из этого не следует, что увеличивая токовые сечения или уменьшая токовую длину ветвей термоэлемента, можно достичь более низких температур на теплопоглощающем спае, так как одновременно в такой же мере возрастают теплопроводность и поток теплоты по ветвям термоэлемента от тепловыделяющего спая к теплопоглощающему. Температура теплопоглощающего спая будет понижаться до тех пор, пока количество теплоты Q_K , переносимое между спаями в результате теплопроводности по ветвям термоэлемента, не сбалансирует отводимое от спая 1 количество теплоты Q_I при токе I . (В данном случае не учитываем поток теплоты из окружающей среды на теплопоглощающий спай термоэлемента, т.е. предполагаем, что теплоизоляция теплопоглощающего спая идеальна.)

Условием теплового баланса, следовательно, будет

$$-Q_I = Q_K = \lambda(T_2 - T_1),$$

где λ — теплопроводность термоэлемента;

T_2 и T_1 — температуры горячего и холодного спаев соответственно или

$$T_2 - T_1 = -Q_I / \lambda.$$

В оптимальном режиме работы термоэлемента, т.е. с учетом (10) получим

$$(T_2 - T_1)_{max} = -Q_{I_{max}} / \lambda = P^2 / 2\lambda R. \quad (11)$$

Используя (3), находим

$$(T_2 - T_1)_{max} = \frac{\alpha^2}{\lambda R} \frac{1}{2} T_1^2 = \frac{1}{2} Z T_1^2. \quad (12)$$

Таким образом, эффективность работы термоэлектрического охлаждающего элемента (как и термогенератора) в основном определяется характеристиками полупроводниковых ветвей: их удельной термо-ЭДС, электрическим сопротивлением и теплопроводностью. Величина $Z = \alpha^2 / \lambda R$ называется *эффек-*

тивностью или добротностью термоэлемента и позволяет рассчитать наиминимальную достижимую температуру холодного спая T_1 при данной температуре горячей стороны T_2

$$T_1 = \frac{\sqrt{1 + 2ZT_2} - 1}{Z}, \quad (13)$$

а также максимальный холодильный коэффициент $\varepsilon = Q_{I_{\max}} / W$, равный отношению количества тепла, отводимого в единицу времени, к затраченной на это электроэнергии W :

$$\varepsilon_{\max} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \cdot \frac{\sqrt{1 + 0,5Z(T_2 + T_1)} - T_2/T_1}{\sqrt{1 + 0,5Z(T_2 - T_1)} + 1}. \quad (14)$$

Полупроводниковые холодильники успешно применяют в радиоэлектронике, медицине, сельском хозяйстве, метрологии и для бытовых целей (например, автомобильные холодильники).

Однако экономичность полупроводниковых холодильников при охлаждении объемов более десятков литров пока еще ниже экономичности существующих компрессионных машин. Поэтому полупроводниковые холодильники могут конкурировать с компрессионными только при охлаждении малых объемов.

В полупроводниковой батарее при прохождении через нее постоянного тока происходит охлаждение одних спаев и нагрев других из-за поглощения и выделения теплоты на соответствующих спаях в связи с эффектом Пельтье. Это явление, во-первых, оказывается удобным для использования в термостатах: простое изменение направления тока позволяет либо охлаждать, либо нагревать спаи термоэлементов, находящиеся внутри термостата. Во-вторых, разогрев тепловыделяющих спаев в полупроводниковой термобатарее происходит не только из-за выделения обычной джоулевой теплоты, но и в результате переноса теплоты Пельтье с теплопоглощающих спаев на тепловыделяющие. Таким образом, на тепловыделяющих спаях может выделяться большее количество теплоты, чем было затрачено электрической энергии. Так, при разности температур 10 К на каждый ватт выделяемой на тепловыделяющих спаях теплоты необходимо затратить не более 0,2 Вт электрической энергии. Принцип теплового насоса может оказаться экономически целесообразным даже для обогрева и охлаждения жилых и производственных помещений. Но это будет возможно только при существенном снижении стоимости термоэлементов, когда выигрыш в расходе электрической энергии компенсирует стоимость полупроводникового термоэлектрического подогревателя.

1.3. Вопросы к домашнему заданию

1. Какие важнейшие термоэлектрические явления в полупроводниках Вы знаете?
2. В чем заключается эффект Зеебека? Объясните его природу.
3. В чем заключается эффект Пельтье и связан ли он с эффектом Зеебека? Какова связь между коэффициентом Пельтье и удельной термо-ЭДС?
4. Каковы причины возникновения эффекта Пельтье? Поясните с помощью энергетических диаграмм.
5. В чем состоит эффект Томсона, как он объясняется? Чему равна теплота Томсона?
6. Что называют полупроводниковым термоэлектрическим устройством и термоэлектрическим блоком или модулем?
7. Приведите схему полупроводникового термоэлемента, объясните его устройство.
8. Каков принцип действия термоэлектрического охлаждающего элемента? В чем разница между джоулевым теплом и теплом Пельтье?
9. Назовите основные параметры термоэлектрического модуля. Чем определяется эффективность его работы?
10. Каковы два основных режима работы термоэлектрических модулей?

1.4. Лабораторные задания и методические указания по их выполнению

1.4.1. Задание № 1

Изучите лабораторную установку и порядок работы с ней. Снимите зависимость температуры холодной пластины термоэлектрического модуля (T_1) от тока питания и определите величину оптимального тока.

Коммутация материалов в виде, представленном на рис. 4, дает элементарный термоэлемент, представляющий собой структурную единицу термоэлектрического охлаждающего модуля. Пропускание электрического тока через термоэлемент приводит к перекачиванию тепла от нижней холодной металлической пластины к верхней, которую присоединяют к теплоотводу. Несколько таких термоэлектрических пар можно соединить последовательно электрически и параллельно термически, чтобы увеличить тепловую мощность — тогда мы получим термоэлектрический охлаждающий модуль (рис. 6).

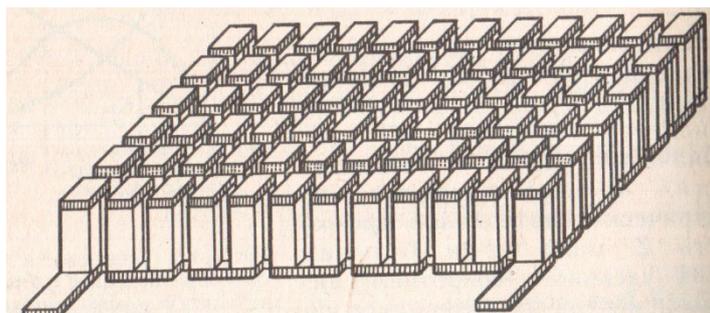


Рис. 6. Один из вариантов конструкции термомодуля

Схема лабораторной установки представлена на рис. 7.

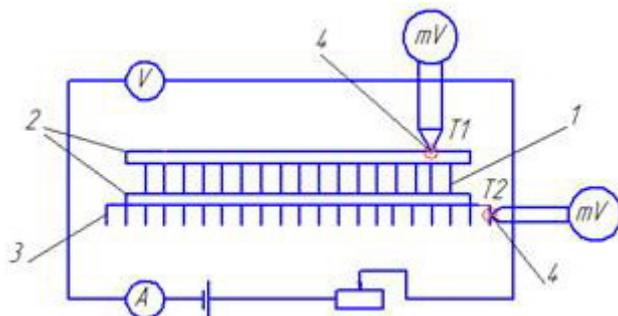


Рис. 7. Схема лабораторной установки: 1 — полупроводники; 2 — металлические пластины; 3 — радиатор; 4 — спаи термопар, контролирующие температуры холодной (T_1) и горячей (T_2) пластин

Включите установку, изменяя величину силы тока от 0 до 4 А через 0,2 – 0,5 А, проведите измерения падения напряжения на модуле, температуры холодной (T_1) и горячей (T_2) пластин, занося результаты в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений

№ п/п	I , А	U , В	W , Вт	T_1 , К	T_2 , К	Q_I , Вт	ε , %

После того как температура холодной пластины начнет повышаться с ростом тока, отключите источник питания и тут же отметьте величину термо-ЭДС, вырабатываемую термоэлектрическим модулем из-за разности температур спаев вследствие эффекта Зеебека.

Постройте график зависимости $T_1 = f(I)$ и найдите величину оптимального тока I_{opt} .

1.4.2. Задание № 2

Рассчитать основные характеристики термоэлектрического модуля: коэффициент Пельтье P , термоэлектрическую добротность Z , тепловую мощность, отводимую холодной пластиной модуля Q_I и холодильный коэффициент ε .

Коэффициент Пельтье определяется из формулы (9), при этом в расчетах необходимо использовать сопротивление модуля, определяемое из закона Ома в начальный момент времени при небольшом токе, $R = U/I$.

Объясните тот факт, что зависимость падения напряжения на модуле от протекающего через него тока $U = f(I)$ не является линейной. Сравните эту нелинейность с величиной термо-ЭДС, измеренной сразу после отключения источника тока.

Используя значения параметров полупроводниковых материалов $\alpha = 2 \cdot 10^{-4}$ В/К, $R = 1,2 \cdot 10^{-5}$ Ом и $\lambda = 1,5$ Вт/м·К, рассчитайте термоэлектрическую добротность полупроводников по формуле

$$Z = \alpha^2 / \lambda R. \quad (15)$$

Считая, что теплообмен холодной пластины модуля с окружающей средой осуществляется за счет конвекции, рассчитайте тепловую мощность Q_I , отдаваемую холодной пластиной, по формуле

$$Q_I = 2 \left[(T_{cp} - T_1) / L \right]^{1/4} \cdot L^2 (T_{cp} - T_1), \quad (16)$$

где $T_{cp} - T_1$ — разность температур окружающей среды и холодной пластины;
 L — длина стороны холодной пластины ($L = 4 \cdot 10^2$ м).

Рассчитайте также электрическую мощность $W = U \cdot I$, затрачиваемую на работу модуля и холодильный коэффициент по формуле

$$\varepsilon = Q_I / W. \quad (17)$$

Постройте зависимости $Q_I = f(I)$ и $\varepsilon = f(T)$ и укажите на них режимы работы модуля с наибольшей холодопроизводительностью и наибольшей энергетической эффективностью.

Из выражений (13) и (14) определите величины T_1 и ε_{max} . Объясните, почему они не были достигнуты в работе.

Сменив на короткое время полярность источника тока, убедитесь в проявлении обратного эффекта Пельтье.

1.5. Указания по оформлению отчета

Отчет оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4 (210 × 297 мм). Необходимо дома подготовить заготовку отчета по всей работе. Заготовка отчета должна содержать номер, цель и содержание работы, все пункты домашних заданий и результаты их выполнения, все пункты лабораторных заданий и свободные места для их выполнения. Дополнительно в отчете необходимо сделать выводы по результатам проделанной работы. Рисунки и графики выполнять на отдельных листах формата А4, на которых, если позволяет место, может быть размещено по несколько рисунков. Рисунки вкладывать в отчет после первой ссылки по тексту. Титульный лист выполняется по ГОСТ 7.4-78 в виде обложки, в которую вкладывается отчет.

1.6. Контрольные вопросы к лабораторным заданиям

1. Объясните устройство термоэлектрического охлаждающего модуля и схему лабораторной установки.

2. Как определяется величина оптимального тока I_{opt} ?
3. Почему снятая Вами зависимость $U = f(I)$ нелинейна?
4. Почему величина термо-ЭДС, измеряемая после отключения внешнего источника быстро снижается?
5. Как рассчитывается коэффициент Пельтье, термоэлектрическая добротность и холодильный коэффициент?
6. Как практически используются эффекты Зеебека и Пельтье? Приведите примеры.
7. Каким образом можно использовать эффект Пельтье для нагрева и почему этот эффект не используют для обогрева жилых и производственных помещений?

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ПОЛУЧЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК МЕТОДОМ ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ В ВАКУУМЕ

2.1. Общие указания

2.1.1. Цель работы

Освоение технологического процесса нанесения металлических пленок методом термического испарения в вакууме и экспериментальное исследование зависимости удельного сопротивления тонких пленок от толщины.

2.1.2. Содержание работы

Основным содержанием работы является: изучение методов нанесения тонких пленок; ознакомление с устройством и принципом работы вакуумного поста; освоение методики получения тонких пленок методом термического испарения материалов в вакууме; исследование полученных пленок.

Обучение осуществляется в процессе выполнения домашних и лабораторных заданий. Контроль усвоения полученных студентами знаний и навыков производится при собеседовании путем оценки ответов на контрольные вопросы, а также при выполнении лабораторной работы.

Время выполнения домашних заданий 3 ч. Общее время на выполнение лабораторных заданий, включая собеседование и отчет по лабораторной работе 4 ч.

2.1.3. Указания по технике безопасности

В процессе работы необходимо соблюдать общие правила техники безопасности при работе с электроустановками напряжением до 1000 В. Запрещается производить откачку рабочего объема без использования защитного колпака.

2.2. Домашние задания и методические указания по их выполнению

2.2.1. Задание № 1

Изучить и занести в отчет сведения о методах получения тонких пленок, обратив особое внимание на метод термического испарения в вакууме и основные параметры, характеризующие этот процесс. Ознакомиться с принципами выбора испарителей и подложек и с технологией их подготовки.

2.2.1.1. Методические указания по выполнению первого задания

Для выполнения задания необходимо ознакомиться с материалом [3], с. 128 – 144; [4], с. 348 – 349. При изучении материала необходимо обратить вни-

мание на то, что сформированные различными технологическими методами структуры элементов и отдельных приборов в интегральных микросхемах (ИМС) коммутируются между собой при помощи металлических пленок. Контакты к этим структурам также изготавливаются из металлических пленок. Для нанесения тонких пленок используются физические и химические методы. Физические методы основаны на образовании потока атомных частиц (отдельных атомов, молекул или ионов) из напыляемых материалов и последующей их конденсации на поверхности подложки. Для этого необходимо применение высокого вакуума, поэтому физические методы нанесения тонких пленок называют *вакуумными*.

В технологии получения тонких пленок вакуумными методами различают три этапа:

- 1) испарение вещества с целью получения пара — атомарного потока;
- 2) перенос пара в вакуумном пространстве;
- 3) конденсация пара на подложке и образование пленочной структуры.

В тонкопленочной технологии для нанесения тонких пленок наибольшее применение нашли следующие методы: термическое вакуумное напыление, катодное распыление, ионно-плазменное напыление и магнетронное распыление. Общими требованиями, предъявляемыми к каждому из этих методов, являются воспроизводимость свойств и параметров получаемых пленок и обеспечение надежного сцепления (адгезия) пленок с подложками и другими пленками.

Термическое вакуумное напыление заключается в нагреве вещества в вакууме до температуры, при которой возрастающая с нагревом кинетическая энергия атомов и молекул вещества становится достаточной для их отрыва от поверхности и распространения в пространстве. Это происходит при такой температуре, при которой давление собственных паров вещества превышает на несколько порядков давление остаточных газов. При этом атомарный поток распространяется прямолинейно, и при столкновении с поверхностью испаряемые атомы и молекулы конденсируются на ней.

Термическое испарение любого вещества характеризуется температурой испарения, давлением паров и скоростью испарения. *Температурой испарения* называют температуру, при которой давление паров вещества над его поверхностью составляет 1,33 Па. *Давление насыщенного пара* зависит только от температуры:

$$p = VT^{-1/2} \exp(-C / T), \quad (18)$$

где V и C — постоянные коэффициенты, значения которых различны для разных материалов.

Скорость испарения вещества $V_{исп}$ определяется количеством частиц, покидающих в единицу времени единицу поверхности испаряемого вещества. При молекулярном режиме испарения, когда давление остаточных газов мало (менее 10^{-2} Па), скорость испарения зависит от давления насыщенного пара и температуры испарения. В рамках кинетической теории газов

$$V_{исп} = 0,0585 p \sqrt{\frac{M}{T}}, \quad (19)$$

где p — давление паров;

M — молекулярный вес вещества;

T — абсолютная температура.

На распространение потока пара испаряемого вещества в первую очередь влияет *степень вакуума* в рабочей камере, от которой зависит длина свободного пробега l . Согласно кинетической теории газов

$$l = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\delta^2 p}, \quad (20)$$

где δ — эффективный диаметр молекулы газа (для воздуха $\delta = 3,7 \cdot 10^{-10}$ м).

Из выражения (3) следует, что значение l зависит от степени вакуума (при $p = 1,33$ Па $l = 4,7$ мм, при $p = 1,33 \cdot 10^{-2}$ Па $l = 47$ см). Это обуславливает конструктивные параметры рабочей камеры при получении молекулярного (атомарного) потока. В частности, расстояние подложки от испарителя должно быть всегда меньше l . Следует отметить, что в реальных условиях необходимо учитывать наличие остаточных газов.

После столкновения атомов паровой фазы с подложкой могут происходить три процесса:

- 1) адсорбция, приводящая к окончательному оседанию атома;
- 2) адсорбция, приводящая к реиспарению через некоторое время;
- 3) отражение сразу после столкновения. Отражение обычно имеет небольшую вероятность. Частота реиспарения

$$f = \nu \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{kT_n}\right), \quad (21)$$

где ν — частота колебаний адсорбированного атома;

ΔE_a — энергия активации адсорбции, или энергия связи адсорбированного атома с поверхностью;

T_n — температура подложки.

Как видно из (21), для уменьшения реиспарения необходимо, чтобы $\Delta E_a \gg kT_n$, что достигается определенным значением температуры подложки.

Адсорбированные атомы мигрируют по поверхности и при столкновении образуют скопления. В скоплениях между атомами действуют силы связи, определяемые энергией конденсации (центры конденсации), в результате происходит образование и рост зародышей. Чем больше скорость испарения, тем выше вероятность образования центров конденсации, обусловленных либо ми-

грацией атомов по поверхности, либо столкновением с ранее осажденными атомами.

На процесс образования пленки влияют состояние поверхности и наличие остаточных газов, которые нарушают условия конденсации. Отношение числа молекул остаточного газа, ударяющихся о подложку, к числу молекул испаряемого вещества характеризует степень загрязненности конденсируемой пленки. Процесс конденсации характеризуется также *коэффициентом конденсации*, определяемым отношением числа атомов, сконденсировавшихся на поверхности, к числу атомов, ударившихся об нее. Он численно равен отношению скорости конденсации и скорости испарения.

Для проведения процесса испарения вещества в вакууме необходимо иметь испаритель, который содержал бы в себе испаряемое вещество и разогревал его до температуры испарения.

Материалами, имеющими незначительную упругость паров при высоких температурах (2300 – 3500 К), являются тугоплавкие металлы и некоторые окислы (W, Mo, Ta, Al₂O₃). Выбор испарителя осуществляется также с учетом образования сплавов и возможности реакции между ним и испаряемым веществом. Простейшие конструкции испарителей изготавливаются из проволоки или металлической фольги, а также с использованием тиглей различных форм.

В качестве подложек для нужд радиоэлектронной промышленности используются кристаллы кремния, стекла и ситаллы. Для улучшения адгезии тонкой пленки с подложкой необходима тщательная очистка последней перед нанесением пленки.

2.2.2. Задание № 2

Изучить особенности структуры и электрические свойства тонких металлических пленок.

2.2.2.1. Методические указания по выполнению второго задания

Для выполнения задания следует проработать материал [3], с. 132 – 134; [4], с. 40 – 41; [5], с. 95 – 101, в заготовку отчета занести график зависимости удельного сопротивления пленок от их толщины и перечислить основные механизмы рассеяния электронов проводимости.

Параметры тонких металлических пленок существенно отличаются от параметров массивных материалов, что связано с различием в структуре и с размерными эффектами в тонких пленках.

Структура и свойства тонких пленок, полученных путем термического испарения в вакууме, в значительной степени определяются условиями их конденсации и зависят от следующих факторов: природы испаряемого вещества и соответствия его структуры структуре подложки; природы подложки, степени ее очистки, микрорельефа и температуры поверхности; степени вакуума и скорости испарения вещества; угла падения атомарного пучка на подложку; толщины пленки.

Адгезия пленки к подложке во многом зависит от наличия оксидного слоя, который может возникнуть в процессе осаждения между пленкой и подложкой. Такой слой образуется, например, при напылении железа и никрома, чем и объясняется хорошая адгезия этих пленок. Желательно, чтобы образующийся слой оксида был равномерно распределен между пленкой и подложкой, если же оксид распределен неравномерно или располагается на поверхности пленки, то свойства пленки могут измениться.

Наличие загрязнений на подложке сильно влияет на электрофизические свойства пленок. В зависимости от того, какая энергия связи больше – между материалами пленки и островками загрязнений или между материалом пленки и подложкой, - пленка образуется либо на островках, либо на чистой подложке. Поэтому перед напылением необходимо тщательно очищать подложки, а также предохранять их от появления масляных пленок, возникающих в результате проникновения паров рабочих жидкостей из насосов.

Степень шероховатости поверхности подложки также оказывает сильное влияние на структуру образующейся пленки. Для получения гладкой поверхности производят термическую полировку стеклянных и других подложек нагревом и оплавлением поверхности. Для устранения микронеровностей иногда на подложку предварительно напыляют слой SiO толщиной 1000 – 10000 Å.

В зависимости от конкретных условий напыления пленки, полученные из одного и того же вещества, могут иметь следующие структуры:

— *монокристаллическую*, если вся пленка представляет собой сплошную кристаллическую решетку атомов данного материала;

— *коллоидную* (мелкозернистую), состоящую из кристаллов размерами менее 100 Å;

— *гранулярную* (крупнозернистую), имеющую кристаллы размерами 1000 Å и более;

— *аморфную* — не имеющую кристаллической решетки.

Сверхтонкие пленки металлов обычно имеют островковое строение. Островки металла разделены непроводящими зазорами. Размер островков с увеличением средней толщины пленки растет, и расстояние между ними сокращается. С увеличением средней толщины пленки растет и средний размер кристаллитов, образующих пленку. Рост размера зерен объясняется преимущественным ростом отдельных граней кристаллита в процессе конденсации (селективный рост).

В большинстве случаев проводимость сплошных пленок несколько меньше проводимости массивных материалов; удельное сопротивление пленки изменяется с ростом толщины (рис. 8).

Когда пленка нанесена на диэлектрическую подложку и является островковой, то ее проводимость определяется в первую очередь проводимостью через непроводящие зазоры. Механизмами проводимости в этом случае являются термоэлектронная эмиссия и активированное туннелирование через подложку. В сплошной пленке электроны проводимости рассеиваются на фононах решетки, дефектах решетки и на поверхности. Максимальный вклад в рассеяние дают точечные дефекты и границы зерен. При недостаточно высоком вакууме в про-

цессе напыления из-за абсорбции газов происходит встраивание чужеродных атомов и молекул в напыляемую пленку, в результате чего растет число дефектов и центров кристаллизации, а вследствие этого уменьшается размер кристаллитов. Поэтому для уменьшения сопротивления пленок процесс напыления необходимо проводить в высоком вакууме.

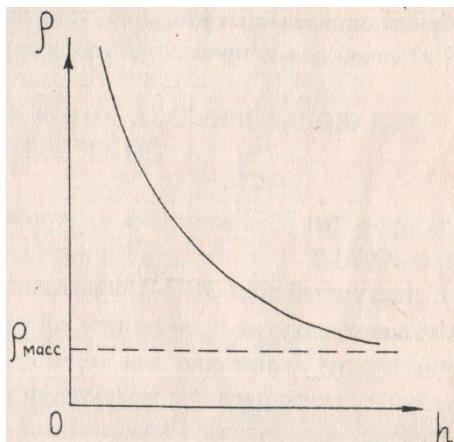


Рис. 8. Зависимость удельного сопротивления пленки от толщины

После напыления пленки обычно отжигают в целях уменьшения их сопротивления и повышения стабильности характеристик. При отжиге происходят процессы рекристаллизации (перекристаллизации), приводящие к увеличению размера зерна, и отжиг дефектов, в результате чего их число уменьшается.

Метод термического вакуумного напыления широко применяется в производстве, так как он является наиболее освоенным и позволяет получать почти все элементы тонкопленочных ИМС. Основными его преимуществами являются сравнительная простота, высокие скорости осаждения и возможность получения пленок с минимальными загрязнениями в условиях высокого вакуума ($10^{-5} - 10^{-7}$ Па).

К недостаткам этого метода относится то, что напыляемые пленки имеют, как правило, неоднородный химический состав (особенно при напылении из сплавов) и недостаточную стабильность.

2.3. Вопросы к домашнему заданию

1. Какие существуют методы получения тонких пленок?
2. В чем заключается метод термического испарения и катодного распыления?
3. В чем отличие катодного распыления от ионно-плазменного распыления?
4. Какие общие требования предъявляются к каждому из этих методов?
5. Что такое температура испарения, давление насыщенного пара, скорость испарения вещества? Приведите аналитические выражения.
6. Почему для получения тонких пленок физическими методами требуется вакуум?

7. Какую структуру могут иметь тонкие пленки, полученные методом термического испарения? От каких факторов зависят структура и электрические свойства тонких пленок?

8. Как температура подложки и скорость испарения влияют на структуру пленки?

9. Объясните зависимость удельного сопротивления пленки от толщины.

10. Чем определяется удельное сопротивление тонких пленок?

11. С какой целью производят отжиг пленок после напыления?

12. Каковы достоинства и недостатки метода термического вакуумного напыления?

2.4. Лабораторные задания и методические указания по их выполнению

2.4.1. Задание № 1

Ознакомиться с устройством и принципом работы вакуумного поста ЭВП-2 и занести его схему в отчет.

Вакуумный пост ЭВП-2 предназначен для получения в рабочем объеме (под колпаком) вакуума с давлением остаточных газов до $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па. Такого давления вполне достаточно для переноса молекул испаряемого вещества на подложку без столкновения с молекулами остаточного газа. Для получения такого давления использована классическая схема вакуумной системы с применением механического роторного насоса для получения предварительного вакуума и паромасляного высоковакуумного насоса.

Включение поста производить в исходном положении распределителя «О» при закрытом клапане К1:

а) включить тумблер «мех. насос»;

б) перевести распределитель в положение «В». При этом в рабочий объем поста через клапан К5 напускается воздух, давая возможность провести загрузку рабочего режима;

в) установить испарители и подложки. Одновременно производится откачка диффузионного насоса через клапан К3;

г) перевести распределитель в положение «ПВ». При этом производится откачка форвакуумным насосом из рабочего объема через открытый клапан К2;

д) включить воду для охлаждения диффузионного насоса и включить тумблер «насос В.Р.»;

е) включить тумблер «вакуумметр», реостатом «накал вакуумметра» установить рабочий ток измерительной лампы 120 мА и произвести откачку рабочего объема до 1,3 Па (2 мВ по шкале вакуумметра);

ж) перевести распределитель в положение «ВВ». При этом откачка из рабочего объема производится через клапаны К3 и К4. Произвести откачку рабочего объема до высокого вакуума.

Схема вакуумного поста ЭВП-2 представлена на рис. 9.

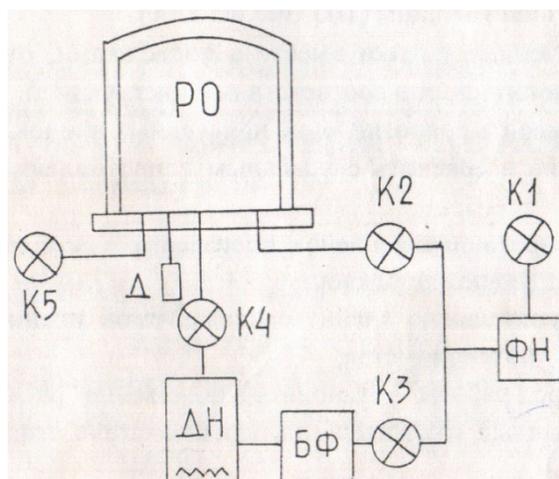


Рис. 9. Схема вакуумного поста ЭВП-2:

К1 – К5 — клапаны; PO — рабочий объем; ФН — форвакуумный насос;
 ДН — диффузионный насос; БФ — баллон форвакуумный

Состояние клапанов в зависимости от положения ручки распределителя представлено в таблице 2 («О» — открыт; «З» — закрыт).

Таблица 2

Состояния клапанов

Положение ручки распределителя	Клапаны				
	К1	К2	К3	К4	К5
0	0	3	3	3	3
В	3	3	0	3	3
ПВ	3	0	3	3	3
ВВ	3	3	0	0	3

2.4.2. Задание № 2

Произвести напыление пленки алюминия (или другого металла) на подложку из ситалла или стекла:

а) подготовить подложку для напыления, для чего прокипятить подложки в изопропиловом спирте 5 мин и обработать в парах изопропилового спирта в течение 3 мин. Метод контроля чистоты поверхности сводится к следующему: при обработке подложки в парах изопропилового спирта на поверхности, содержащей микрзагрязнения, мельчайшие капли спирта не сливаются в сплошную пленку и поверхность выглядит вспотевшей;

б) рассчитать навеску испаряемого (напыляемого) металла, необходимую для получения пленки требуемой толщины. Массу испаряемого металла рассчитывают по формуле

$$m = \rho \cdot h \cdot 4\pi R^2 / \cos \Theta, \quad (23)$$

где m — масса испаряемого материала;

ρ — плотность;
 h — средняя толщина пленки;
 R — расстояние от подложки до испарителя;
 Θ — угол между нормалью к поверхности подложки и направлением потока частиц.

Объем испаряемого металла рассчитывают по формуле

$$V = 4\pi R^2 h ; \quad (24)$$

а) согласно описанию включить пост, загрузить испарители, установить подложки и трафареты;

б) произвести последовательно напыление на три подложки, получив при этом тонкие пленки различной толщины (300, 500 и 700 Å);

в) извлечь полученные пленки вместе с подложками, откачать из под колпака воздух и выключить пост в соответствии с инструкцией.

2.4.3. Задание № 3

Измерить сопротивление полученных пленок, рассчитать их удельное сопротивление. Построить график зависимости $\rho = f(h)$ и сравнить полученные значения с удельным сопротивлением массивного образца.

Измерение сопротивления пленок произвести с помощью потенциометра УПП-60М в следующем порядке:

а) подключить измерительную ячейку с исследуемой пленкой к зажимам «Т1», «П1» и «Т2», «П2» потенциометра; переключатель «род работы» установить в положение «МОСТ 4₃»;

б) установить выбранный множитель на переключателе отношения плечей «N=»;

в) включить питание;

г) установить стрелку гальванометра на нуль при нажатой кнопке «грубо», а затем при нажатой кнопке «точно» вращением рукояток переключателей « $\times 1,0 \Omega$ », « $\times 0,1 \Omega$ », « $\times 0,01 \Omega$ ».

Результат измерения определяется по формуле

$$R = NR_M , \quad (25)$$

где R_M — величина сопротивления плеча сравнения.

Удельное сопротивление пленки алюминия или другого металла рассчитывается по формуле

$$\rho = Rah/l , \quad (26)$$

где l , a , h — длина, ширина и толщина пленки соответственно (м).

Удельное сопротивление массивного алюминиевого образца $\rho = 2,6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

2.5. Указания по оформлению отчета

Отчет оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4 (210 × 297 мм). Необходимо дома подготовить заготовку отчета по всей работе. Заготовка отчета должна содержать номер, цель и содержание работы, все пункты домашних заданий и результаты их выполнения, все пункты лабораторных заданий и свободные места для их выполнения. Дополнительно в отчете необходимо сделать выводы по результатам проделанной работы. Рисунки и графики выполнять на отдельных листах формата А4, на которых, если позволяет место, может быть размещено по несколько рисунков. Рисунки вкладывать в отчет после первой ссылки по тексту. Титульный лист выполняется по ГОСТ 7.4-78 в виде обложки, в которую вкладывается отчет.

2.6. Контрольные вопросы к лабораторным заданиям

1. Как устроен вакуумный пост ЭВП-2?
2. Расскажите о порядке включения и выключения вакуумной установки ЭВП-2.
3. Охарактеризуйте используемые в работе испарители и подложки. Каковы критерии выбора испарителя для напыления тонких пленок?
4. Как осуществляется подготовка подложек?
5. Каков порядок измерения сопротивления тонких пленок с помощью потенциометра УПИП-60М? Объясните методику расчета их удельного сопротивления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пасынков В. В. Полупроводниковые приборы: учебник для вузов / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. — 7-е изд., испр. — СПб: Лань, 2003. — 460 с.
2. Чернышов А. В. Радиоматериалы. Ч. II: Проводниковые, полупроводниковые и магнитные материалы: учебное пособие / А. В. Чернышов, А. С. Бадаев. — Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2008. — 235 с.
3. Балашов Ю. С. Технологические операции в производстве РЭС: учебное пособие / Ю. С. Балашов, А. С. Бадаев, В. П. Иевлев. — Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2006. — 147 с.
4. Петров К. С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника: учебное пособие / К. С. Петров. — СПб.: Питер, 2006. — 522 с.
5. Ефимов И. Е. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность: учебное пособие / И. Е. Ефимов, И. Я. Козырь, Ю. И. Горбунов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1986. — 464 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ	3
1.1. Общие указания.....	3
1.1.1. Цель работы.....	3
1.1.2. Содержание работы.....	3
1.1.3. Указания по технике безопасности.....	3
1.2. Домашние задания и методические указания по их выполнению.....	3
1.2.1. Задание № 1.....	3
1.2.2. Задание № 2.....	8
1.3. Вопросы к домашнему заданию.....	12
1.4. Лабораторные задания и методические указания по их выполнению	12
1.4.1. Задание № 1.....	12
1.4.2. Задание № 2.....	13
1.5. Указания по оформлению отчёта.....	14
1.6. Контрольные вопросы к лабораторным заданиям.....	14
2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. ПОЛУЧЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЁНОК МЕТОДОМ ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ В ВАКУУМЕ	16
2.1. Общие указания.....	16
2.1.1. Цель работы.....	16
2.1.2. Содержание работы.....	16
2.1.3. Указания по технике безопасности.....	16
2.2. Домашние задания и методические указания по их выполнению.....	16
2.2.1. Задание № 1.....	16
2.2.2. Задание № 2.....	19
2.3. Вопросы к домашнему заданию.....	21
2.4. Лабораторные задания и методические указания по их выполнению	22
2.4.1. Задание № 1.....	22
2.4.2. Задание № 2.....	23
2.4.3. Задание № 3.....	24
2.5. Указания по оформлению отчёта.....	25
2.6. Контрольные вопросы к лабораторным заданиям.....	25
Библиографический список.....	26

РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению лабораторных работ № 4-5
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения

Составитель
Бадаев Андрей Станиславович

Издается в авторской редакции

Подписано к изданию 30.05.2024.
Уч.-изд. л. 1,4.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84