

**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 лабораторной работы № 3
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 лабораторной работы № 3 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. — 19 с.

В методических указаниях изучаются и экспериментально исследуются размерные эффекты в тонких пленках. Приводятся теоретические и практические сведения, необходимые для выполнения лабораторной работы № 3. Тематика лабораторной работы 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_3.pdf.

Ил. 5. Табл. 1. Библиогр.: 6 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 № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЕРНОГО ЭФФЕКТА В ТОНКИХ ПЛЁНКАХ

1.1. Общие указания

1.1.1. Цель работы

Изучение процессов конденсации, образования зародышей и роста тонких плёнок, исследование электрических свойств металлических тонких плёнок.

1.1.2. Содержание работы

В работе изучаются механизмы роста, структура и свойства тонких плёнок. Измеряются толщина приготовленных плёнок различных металлов (Cu, Ni, Al и др.), сопротивление каждого образца и рассчитываются удельное и удельное поверхностное сопротивление, а также параметры размерного эффекта.

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.

Шпиндель подвижной системы должен быть заарретирован при отсутствии в блоке испытуемого образца от арретира при установленном образце.

1.2. Домашние задания и методические указания по их выполнению

1.2.1. Задание № 1

Изучить механизмы роста и особенности структуры тонких металлических плёнок.

1.2.1.1. Методические указания по выполнению первого задания

Для выполнения задания следует проработать материал [1], с.7-18, [2], с.131-134, в заготовку отчёта занести схемы механизмов роста плёнок и перечень факторов, влияющих на структуру плёнок.

Параметры тонких металлических плёнок существенно отличаются от параметров массивных материалов, что связано с различием структуры и с размерными эффектами в тонких плёнках.

Размерный эффект — это проявление существенных качественных или (и) количественных изменений физических свойств объекта с уменьшением его размера (толщины плёнки, диаметра частицы). Эти проявления затрагивают практически каждое физическое свойство материала, включая многие его фундаментальные параметры, такие как тип кристаллической решетки, температура плавления и др.

Таким образом, проявлением «тонкопленочного состояния» является размерный эффект: фазовый, структурный, субструктурный, ориентационный и практически всех физических свойств твёрдых тел. Отсюда следует, что понятие «тонкая пленка» относительно лишь к конкретному свойству: будучи таковой по отношению к одному свойству, пленка может иметь параметры массивного образца по другому свойству.

Для нанесения тонких плёнок 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 плёнок называют *вакуумными*.

В технологии получения тонких плёнок 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 плёночной структуры.

После столкновения атомов паровой фазы с подложкой могут происходить три процесса: адсорбция, приводящая к окончательному оседанию атома; адсорбция, приводящая к реиспарению через некоторое время; отражение сразу после столкновения. Отражение обычно имеет небольшую вероятность. Частота реиспарения

$$f = \nu \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{kT_n}\right), \quad (1)$$

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 (1), 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 проис-

ходит образование и рост зародышей. Чем больше скорость испарения, тем выше вероятность образования центров конденсации, обусловленных либо миграцией атомов по поверхности, либо столкновением с ранее осажденными атомами.

С увеличением размера островков при образовании контакта между ними происходит их слияние. Этот процесс называется коалесценцией, что приводит к уменьшению поверхностной плотности островков и увеличению зазоров между ними. Дальнейшее увеличение количества сконденсированного металла приводит к образованию единой сетки из срастающихся частиц — «лабиринтной структуры».

Структура и свойства тонких пленок 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.

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.

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.

В основу классификации видов роста кристаллических пленок положены качественные морфологические признаки. В настоящее время по характерным структурным и морфологическим превращениям, происходящим на всех стадиях роста, выделены три механизма роста тонких плёнок.

1. По Фольмеру и Веберу (ФВ) рост пленки начинается с образования на поверхности твердого тела (подложки) дискретных зародышей-островков (при конденсации в вакууме это комплексы из нескольких атомов); по мере поступления атомов из источника (испарителя) происходит рост островков, их срастание и образование сплошного покрытия (рис. 1); последующий рост - это собственно продолжение нормального роста кристалла в случае монокристаллической пленки и зерен поликристаллической.

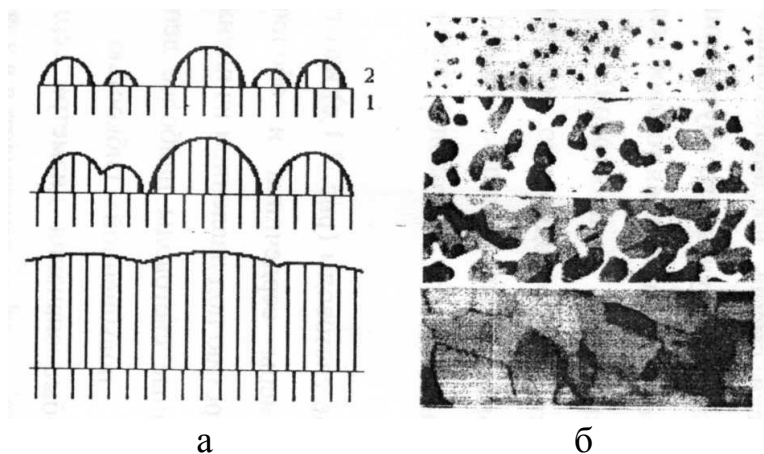


Рис. 1. Морфологические изменения при росте пленок по механизму Фольмера и Вебера: а — схема последовательных стадий перехода от островковой к сплошной структуре; б — структурно-морфологические изменения при росте пленки Мо на фторфлогопите; четвертая стадия соответствует толщине около 50 нм; 1 — подложка, 2 — пленка

Рост по ФВ в общем безотносителен к структуре подложки и может реализоваться как на кристаллической, так и на аморфной подложках. На поверхности монокристалла в зависимости от пары материалов подложка-пленка и условий роста возможно образование как ориентированных (в предельном случае — монокристаллических), так и неориентированных поликристаллических, а для ряда многокомпонентных систем ниже определенных температур подложки — аморфных пленок.

2. По Франку и Ван дер Мерве (ФМ) рост пленки начинается с образования двумерных зародышей и происходит последовательным наращиванием монокристаллических слоев (рис. 2).

При этом, как следует из экспериментальных исследований, для зарождения очередного слоя не обязательно должно происходить заполнение предыдущего слоя. На начальных стадиях рост по ФМ можно рассматривать как про-

должение кристалла подложки (по крайней мере, в базисной плоскости). При отсутствии явно выраженных морфологических изменений рост пленки по ФМ сопровождается характерными структурными превращениями. До некоторой критической толщины $t_{кр}$, контролируемой энергией упругой деформации, сохраняется слой, аккомодированный посредством упругой деформации (ε_0) до полного устранения несоответствия $f_0 = (a_2 - a_1) / a_1$ параметров a_1 и a_2 кристаллических решеток соответственно подложки и пленки ($\varepsilon_0 = f_0$). При этом практически всегда изменяется тип кристаллической решетки пленки; а наблюдаемое явление называется псевдоморфизмом. При толщине $h > h_{кр}$ происходит релаксация пленки к нормальной структуре данного материала.

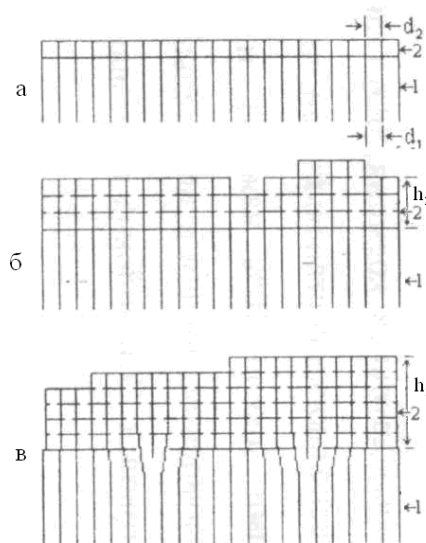


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая рост пленок по механизму Франка и Ван дер Мерве: а,б — $h_2 < h_{кр}$, $d_1 = d_2$, ($\varepsilon_0 = f_0$); в — $h_2 > h_{кр}$, $d_1 < d_2$; d_1 и d_2 — межплоскостные расстояния для сопрягающихся плоскостей подложки и пленки; 1 — подложка; 2 — плёнка

3. По Кристанову и Страпскому (КС) на поверхности кристалла-подложки вначале происходит послойный рост с образованием двумерных кристаллов толщиной от долей монослоя до нескольких атомных слоев в зависимости от системы подложка-пленка, а на (или в) этом двумерном кристалле образуются дискретные островки-зародыши, и последующий рост пленки происходит как в первом варианте (рис. 3). При этом механизме роста уже на ранних стадиях, до заполнения одного монослоя ($\Theta < 1$. Θ — отношение числа атомов в пленке к числу возможных мест адсорбции — минимумов потенциала подложки) можно наблюдать последовательность структурных переходов по мере увеличения количества адсорбированных атомов.

В отличие от первого, второй и третий механизмы роста, естественно, реализуются только на поверхности.

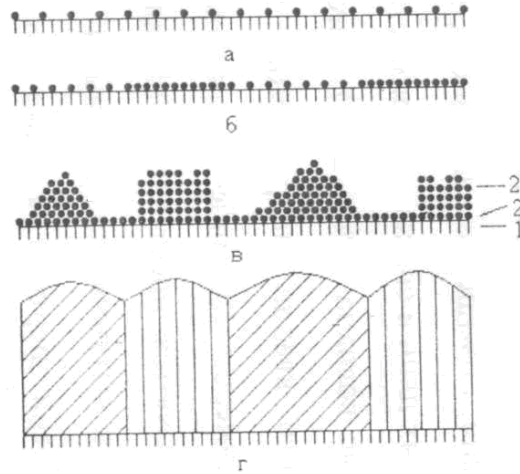


Рис. 3. К иллюстрации структурно морфологических превращений при росте по Крастанову и Страпскому: 1 — подложка; 2 — двумерное (монослойное) покрытие; 2 — трехмерные островки на (в) двумерном слое; а, б — структурные переходы при $\Theta < 1$; в — образование трехмерных островков (в общем случае разной ориентации) на (или в) слоевом покрытии; г — полидоменная (поликристаллическая) пленка при $\Theta \gg 1$

Наиболее общий критерий для предсказания механизма роста в относительно простых случаях, когда не происходят заметная взаимная диффузия компонентов системы подложка-пленка и реакции образования других фаз на межфазной границе, базируется на соотношении величин свободных энергий поверхностей раздела: подложки E_1 , пленки E_2 и границы раздела E_{12} .

При условии плохого смачивания подложки осаждаемым веществом пленки

$$E_1 < E_2 + E_{1,2} \quad (2)$$

реализуется первый механизм.

Для второго механизма (Франка и Ван дер Мерве) характерно зарождение на поверхности кристаллической подложки псевдоморфного слоя, т.е. упруго деформированного до полного соответствия параметров кристаллических решеток пленки и подложки; при дальнейшем росте (при толщине пленки $h > h_{кр}$, где

$$h_{кр} = \frac{G_2 \beta^2 \ln \left[\frac{4 \cdot \pi \cdot G_1 G_2 (a_2 - a_1)}{(G_1 + G_2) G_i (1 - \mu) (a_1 + a_2)} \right]}{2\pi \cdot a_2 f_0 (1 + 2\mu) \cdot (G_1 + G_2)}. \quad (3)$$

где G_1 , G_2 , G_i — модули упругости подложки, плёнки и межфазной границы; μ — коэффициент Пуассона;

$$f_0 = (a_2 - a_1) / a_1;$$

a_1 и a_2 — параметры плёнки и подложки;

$$\beta = \frac{2 \cdot \pi G_1 b}{p^* (1 - \mu) \left(1 - \frac{G_1}{G_2} \right) G_i}$$

b — параметры плёнки и подложки;

p^* — расстояние между дислокациями,

происходит релаксация упругой деформации путём введения на межфазную границу подложка-плёнка дислокаций, компенсирующих несоответствие параметров сопрягающихся решеток, называемых дислокациями несоответствия. Условием реализации второго механизма будет хорошее смачивание, т.е.

$$E_1 > E_2 + E_{1,2} \quad (4)$$

Третий механизм (Крастанова-Странского) предполагает двумерное зарождение плёнки с образованием трёхмерных островков при последующем росте, условие реализации этого механизма будет

$$E_1 \geq E_2 + E_{1,2} \quad (5)$$

Из неравенств (2), (4) и (5) видно, что механизм роста определяется величиной $E_{1,2}$, которая по определению может быть записана в виде:

$$E_{1,2} = E_1 + E_2 - E_{1-2} + E_f \quad (6)$$

где E_{1-2} — энергия межфазной связи;

E_f — энергия, характеризующая ослабление межфазной связи вследствие несоответствия параметров кристаллических решеток пленки подложки.

Все системы подложка-плёнка можно классифицировать по характеру связи: системы со слабой связью (первый механизм) и с сильной связью, в которых реализуются второй и третий механизмы.

Механизмы роста в значительной мере предопределяют преимущественные типы дефектов, образующихся в сплошных плёнках и многослойных плёночных системах, природу и механизм образования дефектов.

Для первого механизма — это, в первую очередь, границы зерен (мало- и высокоугловые границы, границы двойников и т.д.), дислокации, дефекты упаковки; для второго — межфазные границы раздела подложка-плёнка, содержание дислокации несоответствия.

1.2.2. Задание № 2

Изучить размерные эффекты и основные электрофизические свойства тонких металлических плёнок.

1.2.2.1. Методические указания по выполнению первого задания

Для выполнения задания необходимо изучить материал [3], с.95-101, 120-129.

Следует обратить внимание на то, что электрофизические свойства тонких металлических плёнок, в значительной степени зависят от их толщины независимо от способа получения. Удельная проводимость таких плёнок уменьшается с уменьшением их толщины (рис. 4).

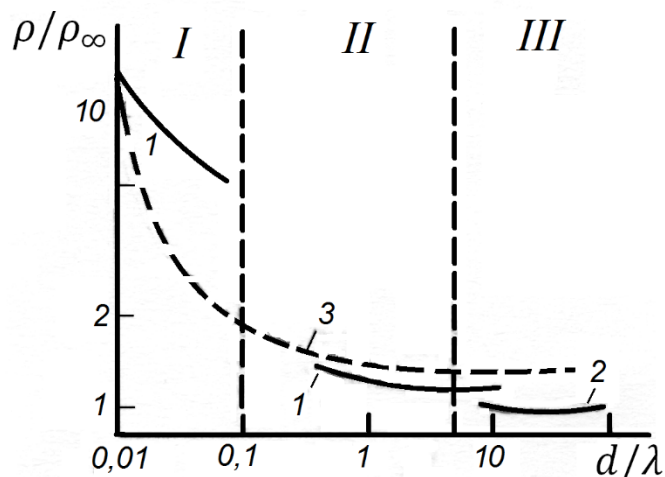


Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления плёнки от толщины:

I — гранулярная структура плёнки; II — сплошная структура; III — большое количество дефектов по сравнению с толщиной плёнки; 1-1' — теоретические кривые; 2 — теоретическая кривая для массивного материала (толстой плёнки); 3 — экспериментальная кривая

Это объясняется тем, что длина свободного пробега электронов в плёнке оказывается меньше, чем в массивном материале, так как электроны плёнки испытывают дополнительные столкновения с границами поверхностей.

Проводимость сплошных металлических пленок подчиняется закономерностям, присущим процессам токопереноса в массивных образцах. Удельная электропроводность последних пропорциональна длине свободного пробега:

$$\gamma = \frac{e^2 \cdot n \cdot \bar{l}}{m \cdot \bar{u}}, \quad (7)$$

где e — заряд электрона;

n — концентрация свободных носителей заряда в единичном объёме;

$\bar{l}$ — средняя длина свободного пробега электрона;

m — масса электрона;

$\bar{u}$ — средняя скорость теплового движения электронов.

Особенностью процессов токопереноса в тонких плёнках, в отличие от массивных образцов, является размерный эффект. Он может проявляться в различных вариантах:

а) ограничивая эффективную длину свободного пробега носителей (электронов) вследствие геометрических ограничений, носимых поверхностями раздела (внешней поверхностью, границей подложка-плёнка и внутренними границами зёрен и фаз); в этом случае имеет место классический размерный эффект;

б) через изменение морфологии плёнки при уменьшении его эффективной толщины (переход к островковым структурам); в этом случае происходит весьма существенные качественные изменения: меняется характер и механизм проводимости;

в) при толщинах плёнки, сравнимых с дебройлевской длиной волны наблюдается квантовый размерный эффект.

Теория даёт сложную зависимость между удельным сопротивлением плёнки и её толщиной. Однако зависимость существенно упрощается для двух крайних случаев, когда толщина плёнки h значительно меньше ($h/\bar{l} \ll 1$) или значительно больше ($h/\bar{l} \gg 1$) длины свободного пробега электрона.

Обычно предполагается, что при распространении электронов в тонкой плёнке каждый свободный пробег электрона заканчивается столкновением с поверхностью. Удельное сопротивление увеличивается по мере того как утоньшается образец, вследствие чего число столкновений с поверхностью начинает составлять значительную часть из общего количества столкновений. Другими словами, удельное сопротивление увеличивается всякий раз, когда один или несколько размеров образца становятся сравнительными при определённой температуре со средним свободным пробегом или становится меньше среднего свободного пробега. Соударения с поверхностью будут важны только тогда, когда они не зеркальны, т.е., когда направление в котором движется электрон после соударения, не зависит от его направления движения до соударения. В этом случае рассеяние электронов носит диффузный характер (рис. 5, 1).

Аналогией этого может служить сравнение зеркальных и не зеркальных отражений света от полированных и рассеивающих поверхностей.

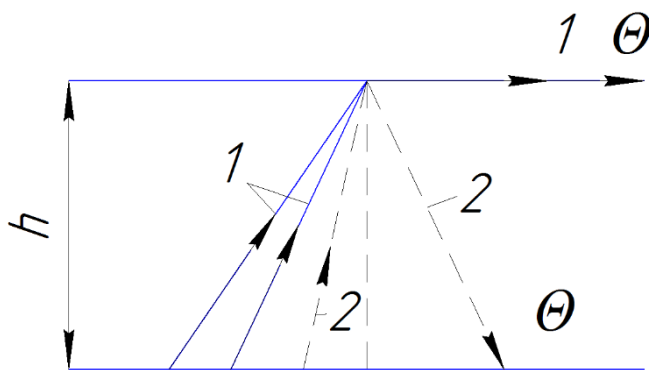


Рис. 5. Два механизма рассеяния электронов на поверхности тонкой плёнки:
1 — диффузный; 2 — зеркальный

В этом случае

$$\frac{\gamma_M}{\gamma} = \frac{\rho_M}{\rho} \approx 1 + \frac{3\bar{l}}{8h} \text{ при } h > \bar{l}, \quad (8)$$

$$\frac{\gamma_M}{\gamma} = \frac{\rho}{\rho_M} \approx \frac{4\bar{l}}{3h} \left(\frac{\bar{l}}{h} \right)^{-1} \text{ при } h \ll \bar{l}, \quad (9)$$

где $\gamma_M(\rho_M)$ – удельная электропроводность (сопротивление) массивного образца;
 $\gamma(\rho)$ – удельная электропроводность (сопротивление) плёнки.

Но диффузное рассеяние — идеальный случай. На практике наблюдается зеркальное рассеяние части электронов (рис. 5, 2). Если обозначить через p часть электронов, которые зеркально рассеиваются на поверхности с обращением знака компоненты скорости в направлении, нормальном к поверхности, то $1-p$ будет представлять часть электронов, рассеиваемых диффузно.

Электроны проводимости рассеиваются в пленке не только на ее поверхностях и решетке, но также на различных дефектах кристаллической структуры и примесях. В общем случае

$$\rho = \rho_p + \rho_{\Pi} + \rho_d. \quad (10)$$

Величина ρ_d сильно зависит от параметров процесса нанесения пленки и в некоторых случаях может превышать ρ_p и ρ_{Π} . Учет этих механизмов рассеяния значительно усложняет выражения (8) и (9) и они принимают вид

$$h = \rho_M \left[h + \frac{3}{8}(1-p)\bar{l} \right], \quad (11)$$

$$\frac{1}{h} = \frac{\sqrt{3}}{\rho_M \cdot \bar{l}} \cdot \frac{1+p}{1-p} (\lg 1,5\bar{l} - \lg h). \quad (12)$$

Для островковых конденсированных пленок металлов на диэлектриках (ОКДМ) характерны следующие особенности электропроводности:

а) удельное сопротивление всегда во много раз больше удельного сопротивления массивного материала ($\rho_{\Pi} \gg \rho_M$);

б) отрицательный температурный коэффициент сопротивления (ТКС);

в) экспоненциальная зависимость проводимости от величины, обратной температуре $\gamma \approx \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$, указывает на термически активируемую проводимость ОКМД (где E_a энергия активации);

г) зависимость энергии активации проводимости от эффективной толщины (размеров островков: с ее уменьшением энергия активации увеличивается);

д) омический характер проводимости имеет место в области слабых полей; в области сильных - нелинейный характер (линейная зависимость от напряжённости поля).

Механизмы, качественно объясняющие основные закономерности электропроводности островковых пленок: термоэмиссия, активированное туннелирование, туннелирование через подложку или ловушки, а также механизм прыжковой проводимости по примесям в полупроводниках.

1.3. Вопросы к домашнему заданию

1. Что представляет собой тонкая пленка?
2. Что такое размерный эффект?
3. Какие методы используются для получения тонких плёнок? Какие этапы различают в технологии их нанесения вакуумными методами?
4. От каких факторов зависят структура и свойства тонких плёнок?
5. Какую структуру могут иметь напылённые плёнки?
6. Какие механизмы роста тонких плёнок Вы знаете? В чём заключается их сущность?
7. Чем объясняется более высокое удельное сопротивление пленок по сравнению с массивными образцами?
8. Какие существуют механизмы рассеяния электронов на поверхности тонких плёнок?
9. Какие особенности электропроводности островковых конденсированных пленок металлов?
10. Какие механизмы объясняют основные закономерности электропроводности островковых пленок?

1.4. Лабораторные задания и методические указания по их выполнению

1.4.1. Задание № 1

Ознакомиться с устройством и принципом работы интерферометра МИИ-4.

На интерферометре МИИ-4 измеряется толщина пленочных образцов. Для этого образец кладется исследуемой поверхностью вниз на столик прибора. Включается освещение и с помощью микрометрического микроинтерферометр фокусируется на исследуемую поверхность, перемещая столик до момента появления в поле зрения края пленочного элемента. Включается интерференционная головка поворотом рукоятки (стрелка должна быть в горизонтальном положении). При этом в поле зрения возникают цветные интерференционные полосы. Полосы изгибаются на крае образца (на переходе пленка-подложка). Предметный столик разворачивают таким образом, чтобы направление полос было перпендикулярно краю пленочного элемента. После этого окулярный микрометр поворачивается так, чтобы одна из нитей совпадала с направлением интерференционных полос, а другая — с направлением границы пленочного элемента.

Передвигая окулярный микрометр в направлении, указанном стрелками, производят отсчет количества делений барабана микрометра N_2-N_1 и N_1-N_3 . Толщина пленочного элемента определяется из следующего соотношения

$$h = 0,27 \frac{N_2 - N_1}{N_1 - N_3}, \text{ мкм.}$$

1.4.2. Задание № 2

Измерить сопротивление данного набора тонкопленочных образцов.

Толщина пленок меняется от образца к образцу в пределах $5 \div 1000$ нм. Напыленные пленки, как правило, содержат большое количество структурных дефектов и являются напряженными. Для снижения влияния структурных несовершенств можно провести отжиг при температуре $\sim 600\text{K}$ в течении 1,5 часов в вакууме.

В силу известной неопределенности в измерении малых толщин в технологии тонких пленок используется понятие поверхностного сопротивления $\rho_{\circ}$, которым называют сопротивление квадратного участка пленки (с одинаковыми длиной и шириной). Для квадратного участка любой площади сопротивление $\rho_{\circ}$ одно и то же.

Измерение удельного поверхностного сопротивления пленок осуществляется следующим образом:

- а) измеряется длина (L) и ширина (b) пленочных элементов;
- б) из отношения L/b определяется число квадратов со стороной b ;
- в) с помощью двухзондового устройства измеряется сопротивление каждого элемента;
- г) вычисляя отношение измеренного сопротивления к числу квадратов, определяется величина удельного поверхностного сопротивления $\rho_{\circ}$, Ом/м;
- д) умножив величину $\rho_{\circ}$ на толщину пленки h , получают удельное сопротивление пленки ρ :

$$\rho = \rho_{\circ} \cdot h, \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

1.4.3. Задание № 3

Обработать результаты эксперимента и определить параметры размерного эффекта.

Результаты измерений заносятся в таблицу.

Таблица 1

Результаты измерений

№ образца	толщина h, нм	длина, мм	ширина, мм	число квадратов	сопротивление, Ом	ρ , Ом·мм	l, мкм	p, n_3/n_d
1								
2								
3								

По данным таблицы строятся графические зависимости:

1) $\rho = f(h)$;

2) $\frac{1}{\rho \cdot h} = f(\lg h)$;

3) $\rho \cdot h = f(h)$;

После построения кривых вычисляются значения l , p , $n_3/n_d = p/(1-p)$, где n_3 , n_d — концентрации зеркально и диффузно рассеянных электронов.

Определение параметров размерного эффекта осуществляется с помощью построенных графиков $\frac{1}{\rho \cdot h} = f(\lg h)$, и $\rho \cdot h = f(h)$ следующим образом: график зависимости $\frac{1}{\rho \cdot h} = f(\lg h)$ представляет собой кривую с прямолинейным участком.

В точке А, полученной пересечением прямой с осью абсцисс, левая часть (12) будет равна нулю. Тогда будет выполняться соотношение $\lg 1,5\bar{l} = \lg h$, откуда находится величина $\bar{l}$.

Из графика зависимости $\rho \cdot h = f(h)$ получаем точку В, в которой величина $\rho \cdot h = 0$. Поэтому приравняв левую часть уравнения (11) к нулю, получим $h = -\frac{3}{8}(1-p)\bar{l}$. Подставив сюда определенную ранее величину $\bar{l}$, находим значение величины p .

1.5. Указания по оформлению отчёта

Отчет оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4. Необходимо дома подготовить заготовку отчета по данной лабораторной работе. Заготовка отчета должна содержать наименование лабораторной работы, цель и краткое содержание работы, все пункты лабораторных заданий и свободные места для выполнения.

Отчет должен содержать виды материалов, которые должны исследоваться студентом, практическое выполнение лабораторной работы и графики зависимости исследуемых параметров от частоты и температуры. В конце отчета необходимо сделать выводы по результатам работы. В выводах должно быть дано объяснение величин ε и $\tan \delta$ в исследуемых материалах в зависимости от их структуры, а также изменение их частотной и температурной зависимостей.

Рисунки и графики необходимо выполнять на отдельных листах формата А4, на которых, если позволяет место, может быть размещено несколько рисунков.

1.6. Контрольные вопросы к лабораторным заданиям

1. Чем обусловлено сопротивление тонких металлических пленок?
2. Какое влияние на проводимость пленок оказывают структурные дефекты?
3. Что такое диффузное и зеркальное рассеяние электронов на поверхностях пленки?
4. Как измеряется толщина плёночных образцов?
5. Как определяется величина удельного поверхностного сопротивления?
6. Каким образом вычисляются параметры размерного эффекта: значения $\bar{l}$, ρ , n_z/n_d ?
7. Укажите области применения тонких металлических плёнок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иевлев В. М. Рост и субструктура конденсированных плёнок: учебное пособие / В. М. Иевлев, А. В. Бугаков, В. И. Трофимов. — Воронеж: ВГТУ, 2000. — 386 с.
2. Балашов Ю. С. Технологические операции в производстве РЭС: учебное пособие / Ю. С. Балашов, А. С. Бадаев, В. П. Иевлев. — Воронеж: ВГТУ, 2006. — 147 с.
3. Ефимов И. Е. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надёжность: учебное пособие / И. Е. Ефимов, И. Я. Козырь, Ю. И. Горбунов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1986. — 464 с.
4. Петров К. С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника: учебное пособие / К. С. Петров. — СПб.: Питер, 2006. — 522 с.
5. Балашов Ю. С. Физические основы функционирования интегральных устройств микроэлектроники: учебное пособие / Ю. С. Балашов, М. И. Горлов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2008. — 187 с.
6. Чернышов А. В. Радиоматериалы. Ч. 2: Проводниковые, полупроводниковые и магнитные материалы: учебное пособие / А. В. Чернышов, А. С. Бадаев. — Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2008. — 235 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЕРНОГО ЭФФЕКТА В ТОНКИХ ПЛЁНКАХ.....	3
1.1. Общие указания.....	3
1.1.1. Цель работы.....	3
1.1.2. Содержание работы.....	3
1.2.3. 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.....	9
1.3. Вопросы к домашнему заданию.....	13
1.4. Лабораторные задания и методические указания по их выполнению	13
1.4.1. Задание № 1.....	13
1.4.2. Задание № 2.....	14
1.4.3. Задание № 3.....	14
1.5. Указания по оформлению отчёта.....	15
1.6. Контрольные вопросы к лабораторным заданиям.....	16
Библиографический список.....	17

РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению лабораторных работ № 3
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. 1,0.

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