

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова  
Кафедра микроэлектроники

## **Измерение параметров пленочных структур**

*Методические указания  
по выполнению лабораторных работ*

Ярославль 2004

ББК В 379.2я73

И 37

УДК 53:372.8

Составитель **С.П. Зимин**

**Измерение параметров пленочных структур:** Метод. указания по выполнению лабораторных работ / Сост. С.П. Зимин; Яросл. гос. ун-т. Ярославль, 2004. 36 с.

В методических указаниях содержатся теоретические сведения и излагается порядок выполнения лабораторных работ. Выполнено в соответствии с государственным образовательным стандартом.

Предназначены для студентов, обучающихся по специальности 014100 Микроэлектроника и полупроводниковые приборы (дисциплина «Физика тонких пленок и низкоразмерные структуры» блок ДС), очной формы обучения.

Ил. 12. Табл. 1. Библиогр.: 17 назв.

**Рецензент:** кафедра микроэлектроники Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова

© Ярославский государственный университет, 2004

© С.П. Зимин, 2004

# Лабораторная работа № 1

## Методы измерения толщины тонких пленок

**Цель работы** – ознакомление с методами измерения толщины пленочных структур и глубины залегания  $p$ - $n$  переходов при диффузионных процессах.

### Краткая теория работы

Важное место при производстве интегральных микросхем (ИМС) занимает контроль толщины эпитаксиальных слоев и глубины залегания  $p$ - $n$  переходов диффузионных областей. Наибольшее применение при изготовлении ИМС находят диффузионные области глубиной 1 - 20 мкм и эпитаксиальные слои толщиной 1 - 30 мкм. Трудности измерения таких сравнительно малых толщин заключаются не только в их размерах, но и в том, что часто необходимо произвести измерение толщины слоя в сложной структуре, состоящей из нескольких слоев (диэлектрического, эпитаксиального, полупроводникового и т.д.).

Для измерения толщины эпитаксиальных слоев и глубины диффузионных областей в настоящее время разработан ряд методов, которые можно разделить на разрушающие и неразрушающие. К *разрушающим* методам относятся методы косого (прямого) шлифа, цилиндрического шлифа (редко применяемого и здесь не рассматриваемого), сферического шлифа и метод измерения толщины по размерам дефектов упаковки с применением селективного травления и обычного микроскопа. В практике нашли наибольшее распространение методы *косого и сферического шлифов*.

### **Метод косого шлифа**

Метод косого шлифа состоит в том, что пластину в контролируемой области сошлифовывают под небольшим углом  $\alpha$  (0,5 - 5°), как показано на рисунке 1.

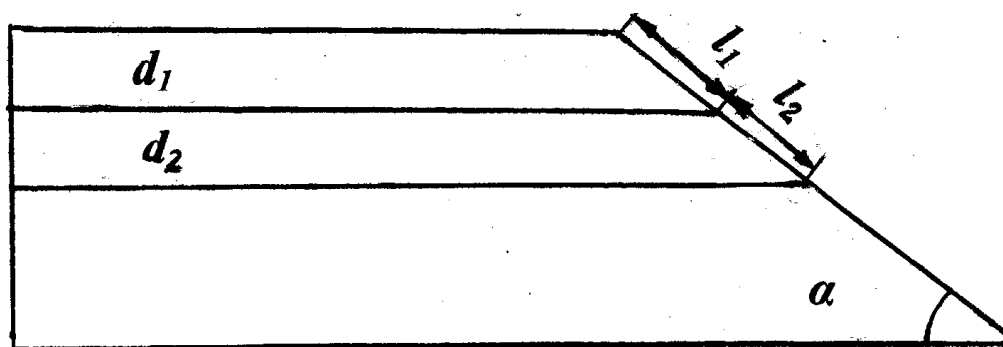


Рис. 1. Косой шлиф полупроводниковой пластины (справа). Слева – прямой шлиф

Изготовленный шлиф, если слои трудноразличимы, окрашивают специальными травителями. После окрашивания измеряют линейные размеры  $l_1$  и  $l_2$  соответствующих слоев шлифованной поверхности в направлении шлифа с помощью измерительного микроскопа. Толщины слоев определяются выражениями

$$d_1 = l_1 \sin \alpha; \quad d_2 = l_2 \sin \alpha. \quad (1)$$

В случае достаточно толстых пленок толщина их может быть определена методом прямого шлифа (см. рис. 1), когда измерительным микроскопом непосредственно измеряются величины  $d_1$  и  $d_2$ . Изготовление прямого шлифа более простое, чем косого шлифа, но и оно требует достаточно много времени на абразивную или электрохимическую полировку для получения контрастной границы.

Косой шлиф обычно изготавливается механическим способом - шлифовкой и полировкой алмазными пастами. При этом получают плоские поверхности с углом скоса до  $1^\circ$ . Однако при измерении толщины тонких эпитаксиальных слоев (менее 1 мкм) возникает необходимость изготавливать шлифы с углом скоса менее  $1^\circ$ . Для этой цели предлагается удобный способ химического травления, схема которого показана на рисунке 2.

Устройство состоит из нижней емкости 1, держателя 2 с образцом 3, верхней емкости 4 и трубки 5, соединяющей две емкости, и воздушного насоса 6, в качестве которого служит резиновая груша. Нажатием груши трубка заполняется травителем из сосуда 4, после этого начинается произвольное равномерное наполнение емкости 1 травителем из емкости 4. При наполнении емкости травителем различные участки образца по его высоте травятся разное время, в ре-

зультате чего угол скоса получаемого шлифа зависит от соотношения скорости травления и наполнения емкости 1 травителем. Скорость травления определяется составом травителя. Скорость наполнения варьируется изменением отношения площади сечения емкости 1 к поперечному сечению соединительной трубки.

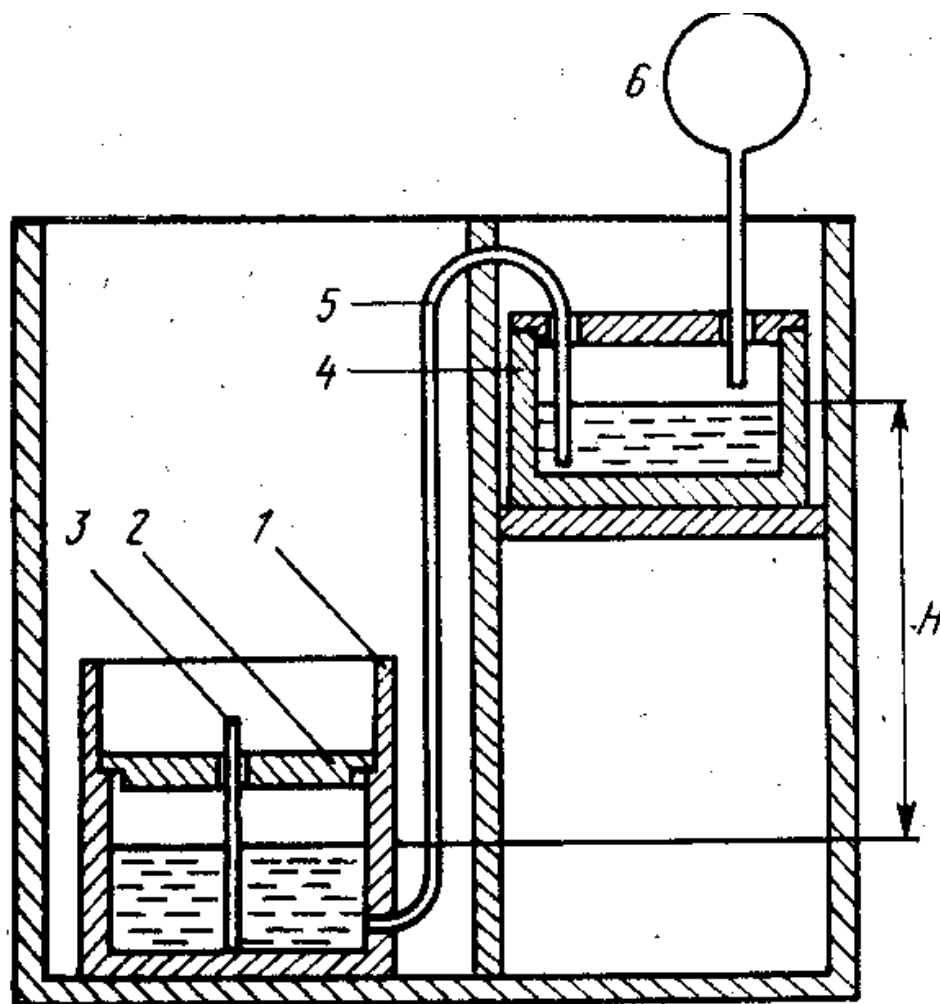


Рис. 2. Устройство для изготовления косошлифа химическим травлением: 1 - нижняя емкость; 2 - держатель; 3 - образец; 4 - верхняя емкость; 5 - трубка; 6 - воздушный насос

Угол наклона получаемого шлифа оценивается по соотношению  $tg \alpha = V_T S / S_{TP} \sqrt{2gH}$ , где  $V_T$  – скорость травления;  $S$  – площадь сечения нижнего сосуда;  $S_{TP}$  – площадь сечения трубки;  $g$  – ускорение свободного падения;  $H$  – разность высот начальных уровней травителей в верхнем и нижнем сосудах. Высокая равномерность скорости наполнения нижнего сосуда травителем обеспечивает ровную поверх-

ность шлифа и линейность его профиля. В этом отношении описанный способ изготовления косо́го шлифа имеет преимущества перед аналогичными методами, в которых используется принцип механического погружения образца в травитель. Описанный способ позволяет получать косые шлифы с углом скоса до нескольких минут и даже секунд.

### ***Метод сферического шлифа***

Применение метода косо́го шлифа становится затруднительным, когда необходимо получить информацию об однородности толщины по площади эпитаксиальной структуры. Для этой цели наиболее удобно применять сферический шлиф, который получил наиболее широкое распространение для измерения толщины слоев и глубины залегания *p-n* переходов при диффузионных процессах. При изготовлении сферического шлифа в качестве рабочего инструмента используют металлический шар диаметром 30 – 150 мм. С помощью шара и абразивной суспензии из алмазной пасты и часового масла изготавливают сферическую лунку. Специальными окрашивающими растворами контрастируют окраску измеряемых слоев. Микроскопом измеряют диаметр  $D_1$  лунки и диаметр  $D_2$  вписанной концентрической окружности, соответствующий границе раздела контролируемого слоя с последующим слоем (рис. 3). При известном диаметре  $D$  шара толщина контролируемого слоя вычисляется по формуле

$$d = (D_1^2 - D_2^2) / 4D. \quad (2)$$

На практике пользуются таблицами, позволяющими по измеренному значению  $D_2$  найти соответствующее значение  $d$  (при постоянных  $D$  и  $D_1$ ). Метод сферического шлифа применим для контроля слоев толщиной более 0,1 мкм с разным типом электропроводности или с концентрацией легирующей примеси, отличающейся более чем на порядок.

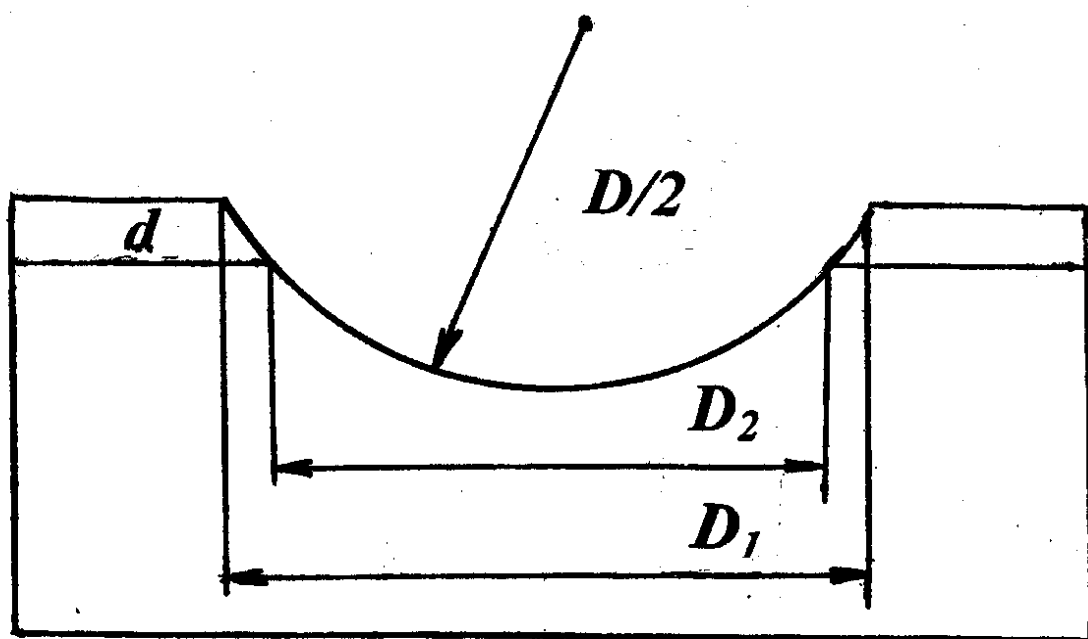


Рис. 3. Сферический шлиф пластины с пленкой толщины  $d$

Операция «окрашивания» при определении глубины залегания  $p$ - $n$  переходов производится следующим образом. Несколько капель окрашивающего травителя пипеткой наносится на место шлифа. Для кремния чаще всего используется раствор 100 ч.  $HF$  + 0,1÷0,5 ч.  $HNO_3$ , при действии которого кремний  $p$ -типа темнеет больше, чем материал  $n$ -типа. Для германия используется концентрированная перекись  $H_2O_2$ . Для окрашивания слоев эпитаксиальных структур арсенида галлия используют окисление в разбавленном растворе  $HNO_3$ .

### **Интерференционный метод измерения толщины пленок**

Рассмотренные разрушающие методы контроля предполагают использование либо контрольных модулей на рабочих пластинах, либо специальных пластин-спутников (контрольных пластин), обрабатываемых вместе с рабочими пластинами и служащих только для контроля. Определение качества партии пластин по одной-двум пластинкам-спутникам может быть недостоверным. Желательно измерять электрофизические параметры (поверхностное и удельное сопротивление эпитаксиального слоя и диффузионных областей) непосредственно на рабочих пластинах. В настоящее время используют метод контроля параметров эпитаксиальных слоев и диффузионных областей с помощью тестовых (контрольных) ячеек. Разработаны наборы тестовых ячеек, соизмеримых с размерами ИМС. Каждая тестовая

ячейка представляет собой набор элементов, с помощью которых определяют какой-либо параметр.

Неразрушающие методы контроля толщины основаны на оптических явлениях в тонких пленках. К ним относятся методы эллипсометрии, интерференции ИК-излучения, интерференции видимого излучения, ИК-спектрометрии, фурье-спектрометрии, многолучевой интерференции, а также методы измерения толщины по размерам дефектов упаковки без селективного травления. В качестве примера рассмотрим методы определения толщины тонких пленок на основе явления интерференции в видимой области спектра.

Принципиальная схема наиболее распространенного двухлучевого интерферометра (интерферометра Линника) показана на рисунке 4. Свет от источника  $S$ , пройдя через конденсор  $C$ , падает на наклонную плоскопараллельную светоделительную (полупрозрачную) пластину  $AB$ . Часть пучка, пройдя через пластину, отражается от эталонного зеркала  $M_2$ , возвращается к пластине, отражается от нее и распространяется вдоль оптической оси системы. Другая часть пучка, отразившись от пластины  $AB$ , попадает на объект  $M_1$ , отражается от него и также распространяется вдоль оси системы. Эти лучи интерферируют в фокальной плоскости окуляра  $O$ . Разность хода увеличивается от центра поля зрения к его краям и последовательно проходит через значения  $0, \lambda/2, \lambda, 3/2\lambda, 2\lambda$  и т.д. Там, где разность хода  $\Delta = m\lambda$  ( $m$  – целое число), наблюдаются светлые полосы, там, где  $\Delta = (2m+1)\lambda/2$ , – темные. Наличие выступов и впадин на поверхности, приводящих к появлению дополнительной разности хода, вызывает искривление интерференционных полос. При высоте ступени  $\lambda/2$  разность хода лучей в двух ветвях интерферометра изменяется на  $\lambda$  и интерференционная картина смещается на одну полосу. Наименьшая высота неровности, которая может быть обнаружена и измерена с помощью выпускаемых российской промышленностью двухлучевых интерференционных микроскопов (МИИ-4, МИИ-10), соответствует изгибу полосы  $0,1$  интервала между полосами и для белого света ( $\lambda_{cp} = 0,55$  мкм) равна  $0,1 \times 0,55/2 = 0,03$  мкм ( $300 \text{ \AA}$ ).

Порядок измерения толщины пленки следующий. На поверхности слоя делают царапину острым предметом до подложки или изготавливают четкую ступеньку, равную толщине пленки. При наблюдении в интерференционный микроскоп в месте ступеньки интерференционные линии будут искривляться. Если измерить величину, на которую смещается линия и расстояние между интерференционными

полосами, то с помощью рабочих формул можно определить искомую величину  $d$ :

$$d = (\Delta x/x) \cdot (\lambda/2), \quad (3)$$

где  $\Delta x$  - сдвиг центральной полосы (в относительных единицах),  $x$  - расстояние между соседними интерференционными полосами (в относительных единицах),  $\lambda$  - длина волны середины видимого спектра. Микроскоп МИИ-4 позволяет определить толщины пленок от 0,03 до 1 мкм, микроскоп МИИ-11 от 0,005 мкм до 1 мкм.

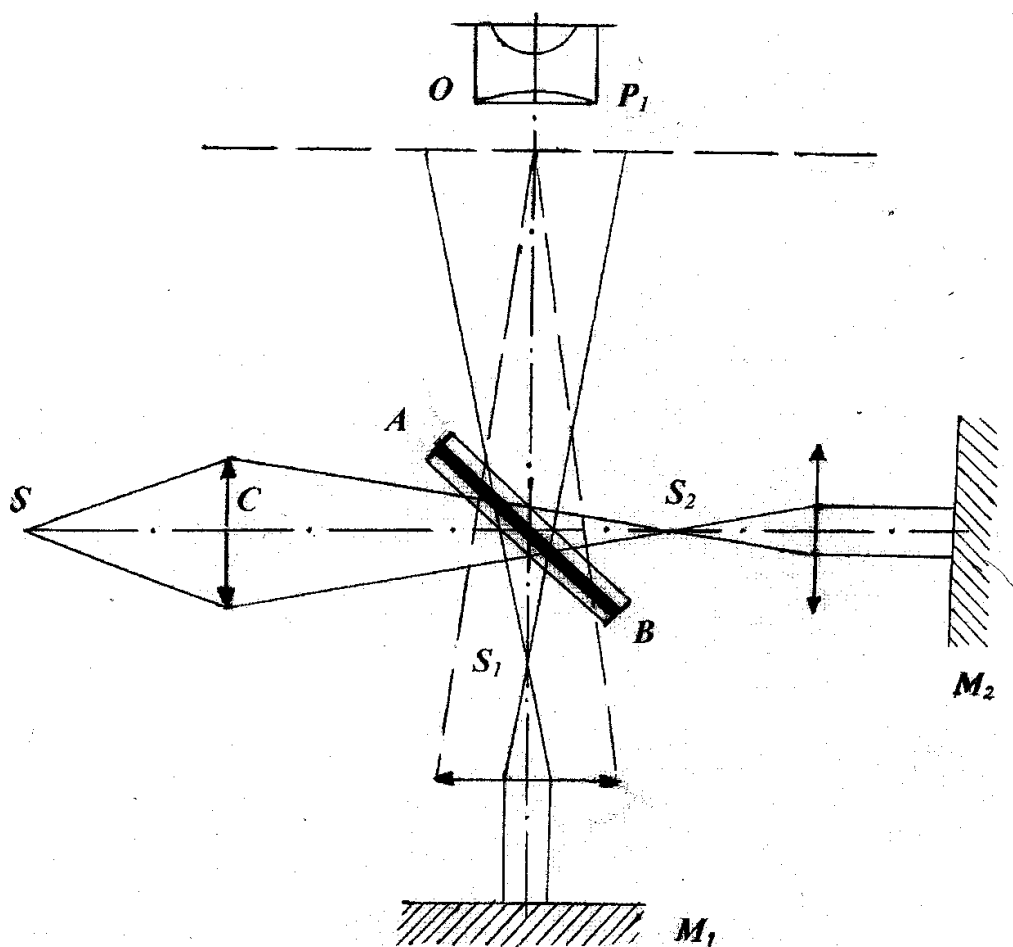


Рис. 4. Оптическая схема двухлучевого интерферометра Линника

Другой разновидностью интерференционного метода измерения толщины тонких пленок является цветовой метод, который широко используется для определения толщины термически выращенного слоя  $SiO_2$  или слоя  $Si_3N_4$  на  $Si$ . Основы этого метода изучались на 3-м курсе при выполнении лабораторных работ «Методы контроля в технологии ИМС».

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с микроскопами МБС-11 и ОГМЭ. Привести их в рабочее состояние согласно техническим описаниям.

2. Установить цену деления микроскопа МБС-11. Определить толщины предложенных преподавателем пленок методами прямого и косого шлифов.

3. Методом шарового шлифа при помощи микроскопа ОГМЭ определить глубину залегания  $p$ - $n$  переходов в кремнии. Определить тип проводимости каждой диффузионной области и исходного кремния.

### *Литература*

1. Измерения и контроль в микроэлектронике / Под ред. А.А. Сазонова. М.: Высшая школа, 1984. 367 с.

2. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем / Под ред. И.П. Степаненко. М.: Радио и связь, 1983. 232 с.

3. Батавин В.Б., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В., Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.

## Лабораторная работа № 2

### Проводимость диспергированных металлических пленок

**Цель работы** - изучение основных закономерностей электропроводности диспергированных металлических пленок при изменении электрического поля и температуры.

### Краткая теория работы

Известно, что в зависимости от стадии роста пленка может быть островковой (диспергированной), пористой (структура с каналами) или сплошной. Каждая из перечисленных стадий характеризуется индивидуальными электрическими свойствами, которые следует рассматривать отдельно. В данной работе будут изучены особенности электрических характеристик островковых металлических пленок.

Диспергированные пленки формируются из небольших островков материала, которые физически не связаны друг с другом. Как следствие этого электропроводность островковых пленок на много порядков величины меньше, чем у объемного материала. Полной неожиданностью оказалось то, что если металлы в объемном и сплошном пленочном состоянии обладают положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), то в диспергированных пленках ТКС отрицателен. Установлено, что электропроводность островковых пленок экспоненциально зависит от величины обратной температуры, свидетельствуя тем самым о том, что механизм проводимости можно термически активировать.

Нетипичным для металлов явился также тот факт, что электропроводность островковых пленок носит омический характер только в области слабых электрических полей (до нескольких сотен Вольт на сантиметр), становясь в более сильных полях нелинейной.

Экспериментальные исследования, выполненные на островковых пленках различных материалов, показали, что сопротивление пленок в зависимости от температуры хорошо описывается при помощи уравнений

$$R = A_0 T^\alpha \times \exp(\theta / k_0 T), \quad (1)$$

где  $A_0$ ,  $\alpha$  и  $\theta$  - постоянные для конкретной пленки. Некоторые графические зависимости  $R(1/T)$  приведены на рисунках 1 и 2.

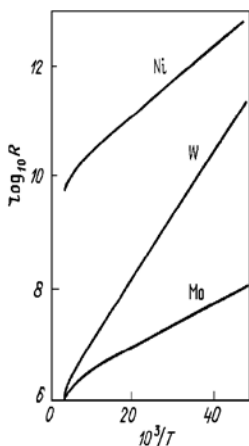


Рис. 1. Зависимость сопротивления от температуры прерывистых пленок трех различных металлов

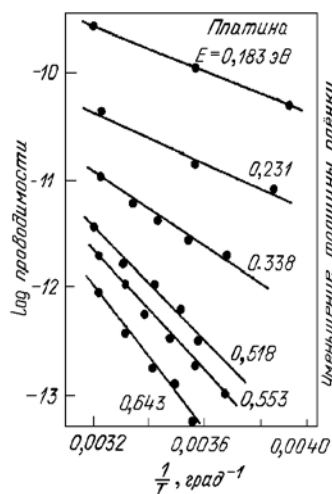


Рис. 2. Зависимость проводимости от температуры платиновых пленок при различной толщине

Для объяснения полученных экспериментальных результатов были предложены несколько различных механизмов проводимости диспергированных пленок, каждый из которых может работать при определенных условиях. В основу рассмотрения положено, что электроны проводимости без приложения электрического поля могут находиться только в изолированных островках. Каждый островок отделен от другого вакуумным промежутком. В этом случае островки рассматриваются в виде потенциальных ям, разделенных потенциальными барьерами. При наложении внешнего электрического поля при определенных условиях возможен перенос электронов от одного островка к другому. Рассмотрим некоторые из этих механизмов – термоэлектронную эмиссию, туннелирование через вакуумный зазор и туннелирование через ловушки диэлектрической подложки.

### ***Перенос посредством термоэлектронной эмиссии***

Исторически это был первый механизм, выдвинутый для объяснения явления переноса тока между островками. Прохождение электрического тока в диспергированной пленке в данном случае связано с преодолением электронами потенциальных барьеров. Поскольку энергия активации, наблюдаемая в случае проводимости таких пленок, намного меньше работы выхода электрона из соответствующих металлов в массивном состоянии (например, для *Pt* работа выхода 5,3 эВ), необходимо было допустить, что имеет место одно из условий:

- более низкий барьер активации обусловлен наложением друг на друга поляризационных силовых потенциалов двух островков, почти примыкающих один к другому;
- небольшая частичка обладает более низкой работой выхода, чем массивный образец;
- форма небольшой частички обуславливает пониженную работу выхода.

Минном [1] было показано, что барьер между частицами берется меньшим, чем работа выхода массивного образца на величину  $\gamma q^2/d$ , обусловленную поляризационными силами, где  $\gamma$  - функция размера островков и расстояния  $d$  между ними. Окончательное выражение для удельной проводимости имеет вид:

$$\sigma = (BqTd / k_0) \times \exp ( - (\phi - \gamma q^2/d) / k_0T), \quad (2)$$

где  $B$  – константа, характерная для каждой пленки;

$\phi$  - внешняя работа выхода из металла.

### ***Перенос посредством туннелирования через разрешенные состояния***

Известно, что в островках нанометровых размеров энергетический спектр электронов квантуется. Обосновывая свою модель, Хартман [1] принимает во внимание такое квантование в частице малых размеров. Делается предположение, что для того, чтобы перенести заряд между двумя островками посредством туннелирования, два энергетических уровня, между которыми туннелирует электрон, должны пересекаться. Такое перекрытие становится наиболее вероятным, если имеется большая ширина энергетических уровней. Допускается, что ширина энергетического уровня в частице определяется временем жизни электрона на этом уровне. Ширина  $n$ -уровня равновесного состояния носителей заряда составляет, исходя из принципа неопределенности,

$$\delta E_n \approx (\hbar^2/a) \times (2E_n/m)^{1/2} \times P(E_n), \quad (3)$$

где  $a$  – линейный размер одной стороны куба;  $E_n$  – энергия уровня  $n$ ;  $m$  – масса электрона.

Вероятность туннелирования  $P(E_n)$  из уровня  $E_n$  выражается формулой

$$P(E_n) \sim \exp [(-2/\hbar) \int \{2m [U(x) - E_n]\}^{1/2} dx], \quad (4)$$

где интегрирование идет от  $x_1$  до  $x_2$ ;  $U(x)$  – высота барьера при расстоянии  $x$  между островками;  $x_1$  и  $x_2$  – величины  $x$ , при которых  $E_n = U(x)$ .

Поскольку мала вероятность туннелирования от энергетических уровней, которые низки по сравнению с высотой барьера, то ширина этого уровня – небольшая, и следовательно, есть основания предполагать, что он не перекрывается с соответствующим уровнем во втором островке. Поэтому процесс туннелирования не может протекать. Однако, если электрон туннелируется в более высокий уровень (от которого вероятность туннелирования больше и, следовательно, уровень – широкий), то в этом случае имеется гораздо большая степень вероятности, что энергетические уровни двух островков будут перекрываться. Энергия, необходимая для активирования электрона с уровня Ферми в первый возбужденный уровень, принимается как энергия активации, требуемая для обеспечения проводимости в этой модели. Окончательное выражение для удельной проводимости имеет вид:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-\Delta E_n / k_0 T), \quad (5)$$

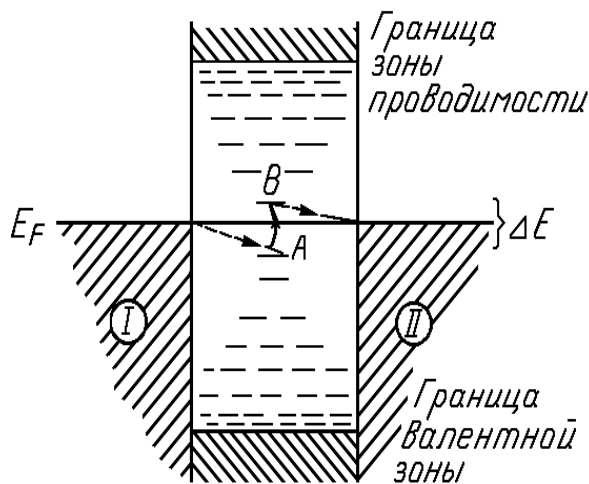
где

$$\Delta E_n = E_{n+1} - E_n. \quad (6)$$

### ***Влияние подложки на перенос заряда посредством туннелирования***

В этой модели, предложенной Хиллом [1], допускается, что диэлектрическая подложка имеет большое количество ловушек в промежутке между зоной проводимости и валентной зоной, и электроны скорее туннелируют в эти ловушки, чем перескакивают с островка на островок.

Энергия активации, необходимая для обеспечения проводимости в этой модели является энергией, требуемой для активирования электрона из ловушки в ловушку, обладающей более высоким энергетическим уровнем в подложке (рис. 3).



*Рис. 3. Модель туннелирования с учетом влияния подложки*

Если в описанном примере при уровне Ферми ловушка отсутствует, то процесс туннелирования должен протекать от островка 1 в ловушку А, расположенную ниже уровня Ферми. Однако,

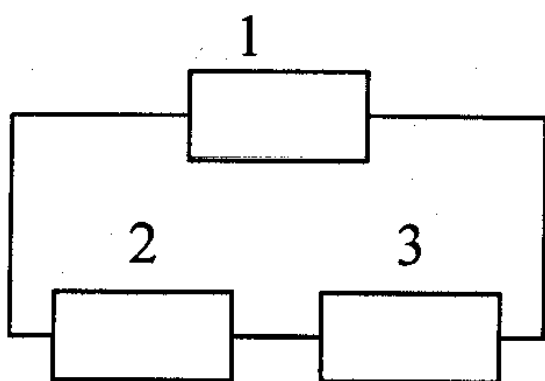
поскольку туннелирование от А в островок 2 невозможно вследствие отсутствия в нем вакантных состояний, то электрон должен термически активироваться в ловушку В (выше уровня Ферми), из которой теперь он может туннелировать в островок 2. Ясно, что за счет этого механизма процесс туннелирования может протекать на больших расстояниях.

Исходя из физической природы приведенных механизмов проводимости диспергированных пленок понятно, что они должны иметь место при определенных величинах размеров частиц  $r$  и расстояниях между ними  $d$ . Так, туннелирование между разрешенными состояниями проявляется при  $r < 25 \text{ \AA}$  и  $d < 20 \text{ \AA}$ . Термоэлектронная эмиссия

является основным механизмом переноса при  $d > 20 - 40 \text{ \AA}$  и  $r < 150 \text{ \AA}$ , а туннелирование с помощью подложки преобладает при  $r > 150 \text{ \AA}$  и  $d > 40 \text{ \AA}$ .

## Порядок выполнения работы

1. При комнатной температуре произвести измерения вольт-амперной характеристики металлической диспергированной пленки серебра. Для этого собрать следующую схему:



1 - блок питания (Б5-50);  
2 - микроамперметр (В7-22А); 3 - образец пленки, смонтированный в термостат. *Характеристика исследуемой пленки:* островковая пленка серебра на поверхности стекла. Геометрические размеры: ширина – 2 мм, длина – 3 мм. Пайка проведена низкотемпературным

припоем и повышение температуры выше **80°C недопустимо**.

2. На источнике питания Б5-50 выставить «1 В», «15 мА», прибор должен работать в режиме стабилизации напряжения. Показания напряжения снимать на панели Б5-50. Изменяя напряжение на источнике через 1 В до 19 В, измерить миллиамперметром величину тока через образец.

3. Построить вольт-амперную характеристику, проанализировать закон изменения  $I = f(U)$ , оценить величину электрического поля в пленке.

4. В интервале температур от комнатной до 80°C изучить зависимость сопротивления образца от температуры  $R(T)$ , для чего подключить термостат к источнику питания «Агат». Значениям напряжения 8 – 15 В через 1 В соответствуют температуры в интервале 37 - 78°C с примерным шагом 5°C. Измерение сопротивления проводить прибором В7-35.

5. Построить зависимость  $R(T)$  в координатах  $\ln R = f(10^3/T)$ , оценить энергию активации. Сравнить ее с работой выхода электронов из серебра.

6. Провести анализ полученных в работе результатов, сформулировать выводы по работе.

### ***Литература***

1. Технология тонких пленок (справочник) / Под ред. Л. Майсella и Р. Гленга. М.: Сов. Радио, 1977. Т. 2. 268 с.

2. Чопра К.Л. Электрические явления в тонких пленках. М.: Мир, 1972. 434 с.

## **Лабораторная работа № 3**

### **Измерение электрофизических параметров резистивных пленок**

***Цель работы*** – исследование электрофизических свойств резистивных пленок, полученных методом вакуумного напыления металлов, их сплавов и методом трафаретной печати.

### **Краткая теория работы**

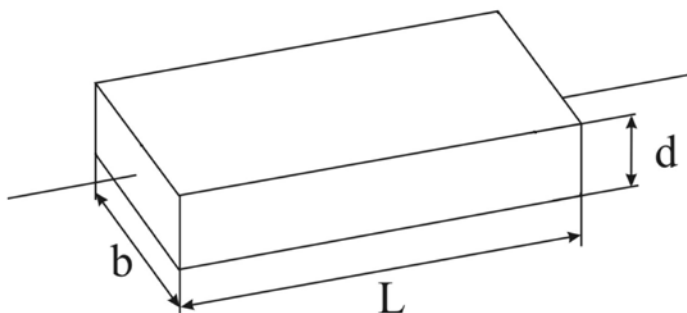
#### ***Сопротивление слоя***

Электрическое сопротивление участка пленки прямоугольной геометрии (рис. 1) можно выразить равенством:

$$R = \rho \cdot L / d \cdot b, \quad (1)$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление материала пленки. Если  $L=b$ , тогда

$$R = \rho / d \equiv R_s, \quad (2)$$



*Рис. 1. Элемент пленки прямоугольной формы*

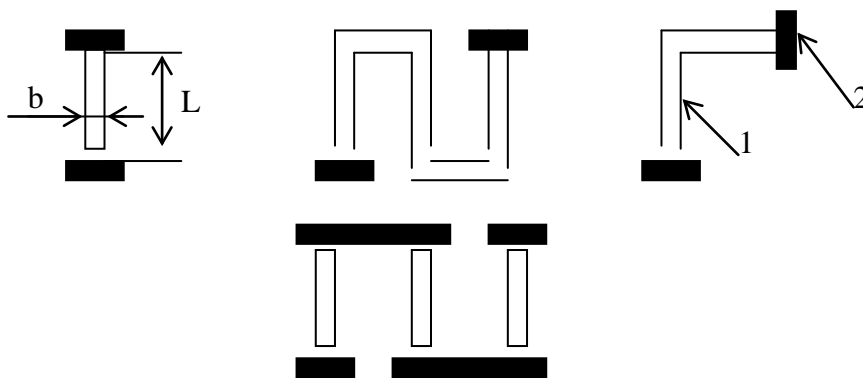
т.е. сопротивление одного квадрата пленки не зависит от размеров квадрата, а только от величины удельного сопротивления и толщины. Величина  $R_s$  называется удельным поверхностным сопротивлением

пленки и выражается в Омах на квадрат (Ом/□). Эта величина имеет большое значение и широко используется для сравнения электрического сопротивления пленок. При использовании величины  $R_S$  формула для электрического сопротивления пленки (1) запишется в виде:

$$R = R_S \times L / b = R_S \times N, \quad (3)$$

где  $N$  – число квадратов по линии тока.

Таким образом, для создания пленочного резистора определенного номинала в микросхеме можно варьировать как материалом резистора ( $R_S$ ), так и числом квадратов резистора. Некоторые конструкции пленочных сопротивлений приведены на рисунке 2. Число квадратов для резисторов сложной формы вычисляется по специальным формулам, которые сведены на дополнительной карточке к данной работе.



*Рис. 2. Геометрия пленочных сопротивлений:*

*1 - резистивная пленка; 2 - пленочные металлические контакты*

Важной характеристикой пленочных резисторов является также температурный коэффициент сопротивления (ТКС)  $\alpha_R$ , который характеризует обратимые изменения сопротивления в диапазоне температур и в конечном итоге позволяет оценить стабильность работы схемы при различных температурах.

$$\alpha_R = [(R_2 - R_1) / R_1] \times [1 / (T_2 - T_1)], \quad (4)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – сопротивления пленочных образцов при температурах  $T_1$  и  $T_2$  ( $T_2 > T_1$ ), соответственно. Из формулы (4) вытекает, что для измерения  $\alpha_R$  знание геометрии образца необязательно.

### ***Тонкопленочные резисторы***

Если еще недавно тонкопленочные резисторы использовались главным образом при изготовлении гибридных микросхем, то за последние годы они все шире начинают применяться в производстве монолитных интегральных схем (ИС) по совмещенной технологии. Замена диффузионных резисторов на тонкопленочные дает целый ряд преимуществ: низкий температурный коэффициент сопротивления, низкую паразитную емкость, более высокую радиационную стойкость, более высокую точность номинала и др.

Материалы, используемые при изготовлении резистивных пленок, должны обеспечивать возможность получения широкого диапазона стабильных во времени резисторов с низким ТКС, обладать хорошей адгезией, высокой коррозионной стойкостью и устойчивостью к длительному воздействию повышенных температур. При осаждении материала на подложке должны образовываться тонкие, четкие линии сложной конфигурации с хорошей повторяемостью рисунка от образца к образцу.

Резистивные пленки чаще всего имеют мелкозернистую дисперсную структуру. Наличие дисперсности в структуре пленок позволяет в первом приближении рассматривать их электросопротивление как суммарное сопротивление отдельных гранул и барьеров между ними, при этом характер общего сопротивления определяет величину и знак ТКС. Так, например, если преобладающим является сопротивление самих зерен, то проводимость пленки имеет металлический характер и ТКС будет положительным. С другой стороны, если сопротивление обусловлено прохождением электронов через промежутки между зернами (что обычно имеет место при малой толщине пленки), то проводимость будет иметь полупроводниковый характер, и ТКС, соответственно, будет отрицательным.

При изготовлении ИС возникает необходимость разместить на сравнительно небольшой площади кристалла высокоомные резисторы, имеющие сопротивление до нескольких МОм, что может быть достигнуто только в том случае, если материал резистора будет обладать  $R_s \approx (10 - 20) \text{ кОм}/\square$ . В монолитных ИС для изготовления резисторов используются в основном нихром и тантал. При изготовлении гибридных ИС используется значительно более широкая номенклатура материалов для тонкопленочных резисторов. Материалы, используемые для получения резистивных пленок, можно разделить на 4 группы: 1) чистые металлы; 2) сплавы; 3) керметы; 4) соединения.

В качестве низкоомных пленок с  $R_S$  от 10 до 300 Ом/□ используются пленки хрома, нихрома и тантала. Получение пленок хрома с воспроизводимыми электрофизическими свойствами несколько затруднено его способностью образовывать соединения (особенно окисные) при взаимодействии с остаточными газами в процессе испарения и осаждения. Значительно более стабильными характеристиками обладают резисторы на основе хромоникелевого сплава (20% *Cr* и 80% *Ni*). Резисторы на основе тантала с  $R_S = 100$  Ом/□, обладая высокой стабильностью, легко выдерживают нагрузку до 10 Вт/см<sup>2</sup>. Из многокомпонентного сплава (74% *Ni*, 20% *Cr*, 3% *Fe* и 3% *Al*) получают пленки с  $R_S$  до 400 Ом/□. Примерно такое же  $\rho_S$  имеют резисторы, изготовленные из сплава МЛТ – 3М (45% *Si*, 17% *Cr*, 14% *Fe* и 24% *W*).

Пленки керметов представляют собой совокупность металлов и диэлектриков и состоят из двух твердых фаз, одна из которых – диэлектрик, увеличивает удельное сопротивление, обволакивая частицы металла. К керметам, получившим наибольшее применение, относится, например, система «хром - моноокись кремния». Величина удельного сопротивления, температурного коэффициента сопротивления и характеристики стабильности зависят от состава порошка кермета и условий формирования пленки. С увеличением содержания монооксида кремния в составе пленки «хром - моноокись кремния» от 10 до 60% величина удельного сопротивления меняется от  $10^{-3}$  до  $10^2$  Ом·см. Величина температурного коэффициента сопротивления от -60°C до 145°C керметных пленок системы «хром - моноокись кремния» изменяется в пределах  $\pm 140 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup> в зависимости от состава и удельного поверхностного сопротивления. Керметные резисторы имеют незначительное изменение сопротивления при испытаниях под нагрузкой 0,125 Вт и повышенной температуре 125°C; за 2 000 ч работы изменение сопротивления составляет менее 2%.

Резистивными пленками, представляющими собой соединения, являются, например, пленки нитрида тантала. Резисторы на основе нитрида тантала имеют хорошие электрические и эксплуатационные характеристики. При испытаниях под нагрузкой 0,5 Вт/см<sup>2</sup> в течение 170 ч изменение сопротивления составило менее 0,1%; после испытаний за это же время при 100%-ной относительной влажности и температуре 70°C сопротивление изменилось менее чем на 0,5%. Некоторые параметры тонкопленочных резисторов приведены в таблице 1.

**Материалы тонкопленочных резисторов**

<i>Наименование материала</i>	<i>Поверхностное сопротивление, Ом/□</i>	<i>Температурный коэффициент сопротивления, град<sup>-1</sup></i>
Вольфрам	$(4 - 5) \cdot 10^3$	$10^{-5} - 10^{-4}$
Тантал	$(0,8 - 1) \cdot 10^3$	$10^{-5} - 10^{-4}$
Хром	60 – 400	$10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4}$
Титан	60 – 100	$5 \cdot 10^{-4} - 10^{-3}$
Молибден	50	$2 \cdot 10^{-4}$
Никель	40	$5 \cdot 10^{-3}$
Золото	0,5 – 5,0	$5 \cdot 10^{-3}$
Сплав нихром (80% никеля и 20% хрома)	50 – 300	$5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-4}$
Сплав МЛТ – 3М	500	$5 \cdot 10^{-4}$
Сплав серебра и платины (40% серебра)	$10^4$	$10^{-4} - 10^{-3}$
Металлокерамические пленки (сплав монооксида кремния и хрома)	$5 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{-6}$

**Толстопленочные резисторы**

В качестве резистивных материалов толстопленочных схем и гибридных схем применяются резистивные композиции, позволяющие создавать пленки методом трафаретной печати с удельным поверхностным сопротивлением 20 – 5000 Ом/□.

Резистивные пасты представляют собой смесь мелкоизмельченных (менее 5 мкм) порошков благородных металлов или окислов, стеклянной фритты (порошка стекла с размером частиц 10 – 30 мкм), органического наполнителя и растворителя. После нанесения рисунка

резистора на поверхности подложки из керамики проводится вжигание в печи, в результате которого образуется структура в виде смеси стекла с металлическими частицами.

Резистивные пасты содержат те же металлы, которые используют для приготовления проводящих паст, только в другом процентном отношении: уменьшается доля металлических частиц и увеличивается доля фритты. Так, проводящая паста на основе «палладия – серебра» содержит:  $Pd$  – 55%;  $Ag$  – 30%; фритты – 15%; резистивная  $Pd$  – 12%; фритты – 73 – 84%;  $Ag$  – 12%. Функциональным элементом резистивных паст могут быть окислы металлов: палладия, таллия, рутения. Для получения хороших температурных характеристик, низкого уровня шумов и высокой стабильности во времени используют составы на основе «палладий – серебро» или «платина – окись таллия».

Величина температурного коэффициента сопротивления толсто-пленочных резисторов изменяется в зависимости от состава паст от +8 до  $-12 \cdot 10^{-4}$  град<sup>-1</sup>. Незащищенные резисторы меняют сопротивление после испытаний на влагуустойчивость (98% относительная влажность, 40°C в течение 30 сут.) в пределах  $\pm 5\%$ . Изменение сопротивления после испытаний на термоциклирование (5 циклов при  $-60 \div +85^\circ\text{C}$ ) составляет  $\pm 2,5\%$ .

## Порядок выполнения работы

1. Микроскопом МИР-12 измерить геометрические размеры предложенных тонкопленочных и толстопленочных тестовых измерительных структур. Оценить число квадратов.

2. При комнатной температуре при помощи омметра измерить величины электрического сопротивления тестовых структур с разным числом квадратов. Определить удельное поверхностное сопротивление. Провести статистическую обработку результатов.

3. Снять зависимость сопротивления пленочных резисторов от температуры в интервале 20 – 100°C, стабилизируя 5-6 значений температуры. Для достижения и стабилизации требуемой температуры применяется термостат с резистивным нагревательным элементом. Питание термостата производится от источника питания «Агат». Значениям напряжений 9, 11, 13, 14, 15 В соответствуют температуры в районе 53, 68, 84, 93, 100°C.

4. Рассчитать ТКС тонкопленочных и толстопленочных резисторов.

5. Провести анализ полученных результатов.

### ***Литература***

1. Данилин Б.С. Получение тонкопленочных элементов микросхем. М.: Энергия, 1977. 136 с.
2. Бушминский И.П., Морозов Г.В. Технология гибридных интегральных схем СВЧ. М.: Высшая школа, 1980. 285 с.
3. Хаммер Д., Биггерс Д.Ш. Технология толстопленочных гибридных схем. М.: Мир., 1985. 304 с.

## **Лабораторная работа № 4**

### **Исследование емкостных свойств диэлектрических пленок**

***Цель работы*** - изучение электрических свойств диэлектрических пленок, измерение параметров тонкопленочных и толстопленочных конденсаторов и исследование их температурных и частотных зависимостей.

### **Краткая теория работы**

#### ***Пленочные конденсаторы***

Пленочный конденсатор является одним из основных пассивных элементов интегральной схемы. Он представляет собой трехслойную структуру металл – диэлектрик - металл (рис. 1а), нанесенную на изоляционную подложку. Многослойный конденсатор с большим числом обкладок представляет собой параллельное включение нескольких пленочных конденсаторов (рис. 1б).

Основные параметры конденсатора:

1. Емкость (С) – величина, характеризующая способность конденсатора запасать и сохранять электрическую энергию. Емкость плоского многослойного конденсатора равна

$$C = 0,00885 \times \varepsilon \times (N - 1) \times S / d, \text{ пФ}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

$N$  – количество обкладок, шт.,

$S$  – площадь верхней обкладки, мм<sup>2</sup>;

$d$  – толщина пленки диэлектрика, мм.

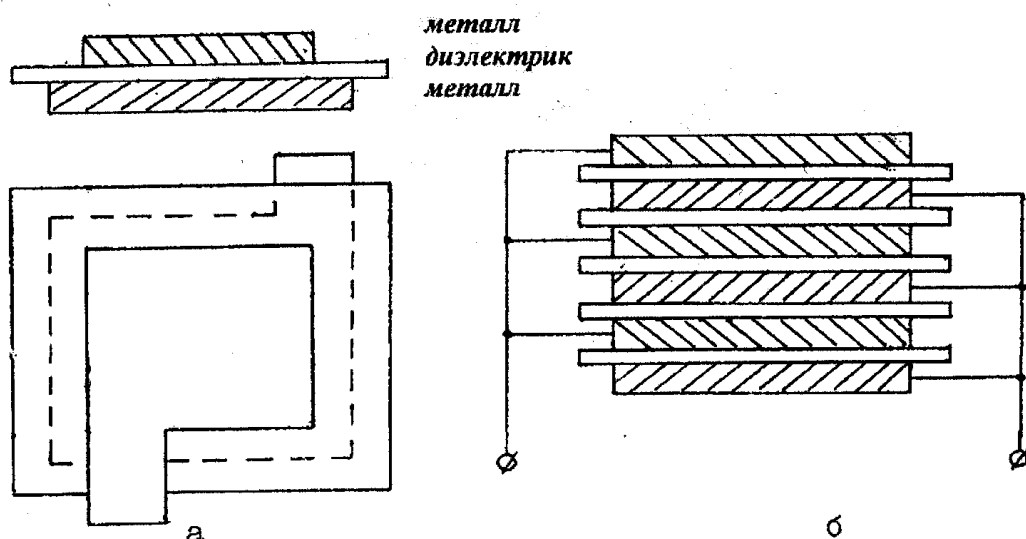


Рис. 1. Структура простого (а) и многослойного (б) конденсатора

2. Удельная емкость ( $C_{yd}$ ) – емкость, распределенная на определенном квадрате поверхности

$$C_{yd} = C/S, \quad \text{пФ/мм}^2. \quad (2)$$

3. Тангенс угла диэлектрических потерь ( $tg \delta$ ) – величина, обратная добротности конденсатора  $Q$  ( $tg \delta = 1/Q$ ). Так как в идеальном конденсаторе угол сдвига фаз между векторами тока и напряжения  $\varphi = 90^\circ$ , то, следовательно, активная мощность  $P_a = U I \cos \varphi = 0$ . В реальном конденсаторе  $\varphi \neq 90^\circ$ , и поэтому  $P_a \neq 0$ . В этом случае применяется угол  $\delta$ , дополняющий угол  $\varphi$  до  $90^\circ$ , который называется углом потерь. Тангенс угла потерь  $tg \delta$  представляет собой отношение активной мощности потерь  $P_a$  к полной реактивной мощности, запасенной в конденсаторе.

4. Электрическая прочность ( $E_{np}$ , В/мм) – величина, характеризующая электрическое поле, при котором происходит пробой конденсатора:

$$E_{np} = U_{np}/d, \quad \text{В/мм} \quad (3)$$

где  $U_{np}$  – пробивное напряжение,

В;  $d$  – толщина пленки диэлектрика, мм.

5. Температурный коэффициент емкости конденсатора (ТКЕ, град $^{-1}$ ) – величина, характеризующая изменение емкости конденсатора при изменении температуры окружающей среды на  $1^\circ\text{C}$ :

$$TKE = (C_1 - C_0) / ((t_1 - t_0) \times C_0), \quad (4)$$

где  $t_0$  – первоначальная температура;

$t_1$  – конечная температура при нагреве;

$C_0$  – значение емкости при  $t_0$ ;

$C_1$  – значение емкости при  $t_1$ .

ТКЕ в первом приближении можно представить формулой

$$TKE = \alpha_\varepsilon + 2\alpha_m - \alpha_\delta, \quad (5)$$

где  $\alpha_\varepsilon$  – температурный коэффициент диэлектрической постоянной;

$\alpha_m$  – температурный коэффициент линейного расширения материала обкладок;

$\alpha_\delta$  – температурный коэффициент линейного расширения диэлектрика.

В случае тонкопленочных конденсаторов, ввиду адгезии пленок с подложкой, линейное расширение обкладок будет определяться линейным расширением материала подложки, поэтому в формуле вместо  $\alpha_m$  можно записать  $\alpha_n$ , где  $\alpha_n$  – коэффициент линейного расширения материала подложки. Тогда

$$TKE = \alpha_\varepsilon + 2\alpha_n - \alpha_\delta. \quad (6)$$

Изменение емкости при воздействии температуры, главным образом, определяется температурной зависимостью диэлектрической проницаемости ( $\alpha_\varepsilon$ ). При этом величина ТКЕ может быть как положительной, так и отрицательной.

### ***Диэлектрические материалы для тонкопленочных и толстопленочных конденсаторов***

Пригодность диэлектрического материала для изготовления конденсаторных структур интегральных схем определяется возможностью получения заданных электрических и эксплуатационных характеристик. Поэтому при выборе диэлектрика и методов получения диэлектрической пленки необходимо учитывать следующие требования: высокую воспроизводимость свойств; низкие диэлектрические потери; высокую пробивную прочность; высокую диэлектрическую проницаемость, хорошую температурную стабильность и химическую стойкость при эксплуатации; минимальную гигроскопичность; температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), близкий к ТКЛР подложки и металлических пленок; и др.

Выбор материала пленки определяется также возможностью контроля характеристик пленок в процессе получения, что связано с трудностью подстройки конденсаторов после изготовления. Желательно, чтобы температура испарения диэлектрика была 1 000 – 1 800°C, так как более низкая температура свидетельствует о высокой подвижности атомов, что может стать причиной отказа конденсатора, а при более высоких температурах испарения возникают трудности создания испарителей.

Сквозная пористость диэлектрической пленки приводит к возникновению в конденсаторных структурах коротких замыканий и пробоев. Скорость диффузии атомов металла по поверхности намного больше, чем в объеме диэлектрика, поэтому наиболее вероятным местом образования «мостиков проводимости» является пора. Сорбция влаги и газов иногда приводит к увеличению проводимости, что может явиться источником теплового пробоя, а при высоких напряжениях электрического поля электрическая прочность конденсаторов будет ограничена возможностью пробоя газа в порах. Появление механических напряжений в диэлектрических слоях обуславливается как технологическими условиями формирования, так и отличием ТКЛР пленки, подложки и проводниковых пленок. Большие механические напряжения в пленках с течением времени приводят к неоднородности состава, растрескиванию, шелушению. Практика показала, что указанным требованиям удовлетворяет ограниченное число материалов.

Наиболее широко в тонкопленочных схемах используются пленка монооксида кремния  $SiO$  ( $\epsilon = 5 - 6$ ), которая сублимируется при температуре 1 100 – 1 300°C. На свойства получаемых пленок  $SiO$  сильно влияют технологические условия получения. Плохая воспроизводимость характеристик пленок  $SiO$  объясняется наличием в них таких соединений кремния, как  $SiO_2$ ,  $Si_2O_3$ , имеющих различные электрофизические характеристики. Контроль качества пленок позволяет получать конденсаторы с удельной емкостью до  $10^4$  пФ/см<sup>2</sup> с удовлетворительными электрофизическими характеристиками. Однако остается достаточно высокой вероятность спонтанного появления коротких замыканий, особенно, в условиях повышенной влажности. Пленки  $SiO_2$  в отличие от пленок  $SiO$  имеют меньшее значение диэлектрической проницаемости ( $\epsilon = 4$ ) и более высокую электрическую прочность. Добротность конденсаторов достигает  $10^2 - 10^3$ . Недостатком  $SiO_2$  является высокая температура испарения (~1700°C).

Пленки  $SiO_2$  в основном используются для получения конденсаторов, работающих при повышенных температурах.

На практике часто применяют пленки  $Al_2O_3$  и  $Ta_2O_5$ , получаемые анодированием пленок  $Al$  и  $Ta$ . Преимуществом пленок  $Ta_2O_5$  являются их высокая диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon = 25$ ) и возможность получения больших удельных емкостей ( $0,2 \text{ мкФ/см}^2$ ). Однако частотный диапазон этих элементов невелик ( $0,1 - 1 \text{ МГц}$ ) вследствие высокого сопротивления нижней танталовой обкладки.

Простоту нанесения пленок  $Al$  и процесса анодирования используют при получении конденсаторов с диэлектриком  $Al_2O_3$ . Несмотря на небольшую величину относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon = 8 - 9$ ), пленки  $Al_2O_3$  имеют высокую воспроизводимость и стабильность. В этом случае проводники, обкладки конденсаторов и диэлектрические пленки изготавливают обычно на основе одного и того же материала ( $Al$ ).

В последнее время широко распространены диэлектрические пленки на основе оксидных стекол (боросиликатные, алюмосиликатные и др.). Они наиболее плотно удовлетворяют требованиям, предъявляемым к материалу диэлектрических пленок. При этом повышается вероятность формирования беспористой диэлектрической пленки, допускается термоотжиг механических напряжений, залечивание дефектов пленки при электротренировке изготовленных конденсаторов. Путем подбора исходного состава стекол можно в широких пределах и плавно изменять их электрические, механические и тепловые характеристики. Так, электрическая прочность большинства известных стекол выше  $10^6 \text{ В/см}$ , относительная диэлектрическая проницаемость составляет  $4 - 8$ , тангенс угла диэлектрических потерь составляет  $(0,7 - 3) \cdot 10^{-3}$ ,  $TKLP = (50 - 200) \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-1}$ .

Для получения диэлектрических пленок толсто пленочных микросхем используют диэлектрические пасты, в состав которых входит титанат бария или стронция, стекло и частицы стеклокерамики. По толсто пленочной технологии изготавливают конденсаторы, работающие на частотах до  $1 \text{ ГГц}$  и в схемах, для которых требования к точности изготовления и электрическим характеристикам невысокие. При толщине пленки диэлектрика  $25 - 30 \text{ мкм}$  можно получить конденсаторы емкостью  $1 - 100 \text{ пФ}$ , выдерживающие пробивное напряжение  $150 \text{ В}$  и имеющие величину  $tg \delta$ , равную  $0,02$ .

## Порядок выполнения работы

1. Измерить геометрические размеры микроскопом МИР-12 предложенных пленочных конденсаторов.
2. Измерить емкость конденсаторов прибором Е7-5А, определить удельную емкость и диэлектрическую проницаемость диэлектрика.
3. При комнатной температуре куметром Е4-4 измерить зависимость емкости и  $\operatorname{tg} \delta$  (добротности  $Q$ ) тестового конденсатора от частоты в интервале 1,5 – 1,9 МГц шагом 100 кГц.
4. Снять зависимость емкости и  $\operatorname{tg} \delta$  пленочного тестового конденсатора от температуры. Для этого использовать микротермостат, нагреваемый от блока питания «Электроника». При пропускании тока через термостат 300 мА добиться стабильной температуры в интервале 55 - 60°C. Рассчитать величину ТКЕ. Измерения проводить куметром Е4-4 на частоте 1,5 МГц.
5. Провести анализ полученных результатов. Разделить пленочные диэлектрические материалы на конденсаторные и изоляционные.

### *Литература*

1. Бушминский И.П., Морозов Г.В. Технология гибридных интегральных схем СВЧ. М.: Высшая школа, 1980. 284 с.
2. Чернобровкин Д.И. Физические основы микроэлектроники. Куйбышев, 1983. 135 с.
3. Технология толстых и тонких пленок / Под ред. А. Реймана, К. Роуза. М.: Мир, 1972. 315 с.

## Лабораторная работа № 5

### Измерение поверхностного сопротивления тонких резистивных пленок

**Цель работы** - ознакомиться с теорией четырехзондового метода измерения величины удельного поверхностного сопротивления  $\rho_s$  тонких пленок, провести экспериментальное определение  $\rho_s$  на серии тонкопленочных образцов.

## Краткая теория работы

Создание пленочных резисторов в гибридных интегральных схемах требует знания величины поверхностного сопротивления пленочного материала. Известно, что сопротивление пленочного резистора простой формы определяется по формуле

$$R = \rho_s N, \quad (1)$$

где  $\rho_s$  - поверхностное сопротивление, Ом/□;

$N$  - число квадратов (коэффициент формы), определяемое как отношение длины резистора к его ширине.

В технологии интегральных схем необходимо осуществлять постоянный контроль величины  $\rho_s$ . Существует несколько методов, которые позволяют это сделать. Первый метод (лабораторная работа № 3) основан на измерении сопротивления резистора, определении числа квадратов и вычислении  $\rho_s$  по формуле (1). Однако этот метод требует наличия тестовых резистивных плат и не может применяться в качестве экспресс-метода в технологическом процессе. Другая группа методов основана на изучении высших гармоник при пропускании через пленку переменного электрического сигнала и является достаточно сложной по своему аппаратному исполнению.

Наиболее широко распространенным методом на технологических линиях является способ измерения  $\rho_s$  четырехзондовым методом. Общая теория этого метода описана в [1 - 3]. Студенты имели возможность ознакомиться с экспериментальной зондовой установкой на 3-м курсе при выполнении лабораторных работ «Методы контроля в технологии интегральных схем». В данной работе используется частный случай общей формулы, относящийся к ситуации, когда толщина образца  $d$  очень мала, а геометрические размеры в плоскости пленки по сравнению с межзондовым расстоянием велики. При этих условиях формула для измерения удельного сопротивления пленки имеет вид:

$$\rho = \pi d U / I \ln 2 = 4,53 d U / I, \quad (2)$$

где  $I$  – величина тока, протекающего через контакты 1 - 4,

$U$  - падение напряжения на участке между зондами 2 и 3.

Поскольку поверхностное сопротивление  $\rho_s$  по определению есть отношение удельного сопротивления пленки  $\rho$  к ее толщине  $d$

$$\rho_s = \rho / d, \quad (3)$$

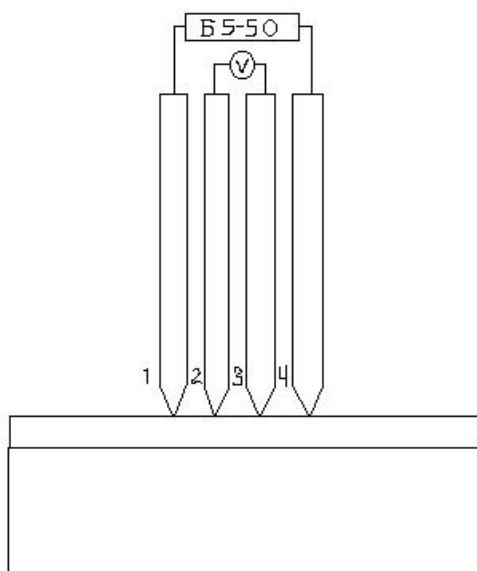
то формула для определения  $\rho_s$  запишется в виде

$$\rho_s = 4,53 U / I. \quad (4)$$

Достоинством данного метода является то, что в конечную формулу не входят значения толщины пленки и межзондовых расстояний.

### ***Четырехзондовая установка***

В работе используется зондовое устройство С2080.1 с четырьмя зондами (рис. 1) с межзондовым расстоянием 1 300 мкм. Зонды изготовлены из карбида вольфрама с диаметром рабочей площадки 20 мкм. Электрическая схема включения зондовой головки приведена на рисунке 1. В качестве источника питания и измерителя величины тока используется блок питания Б5-50. В случае работы Б5-50 в режиме стабилизации тока, величина тока с высокой точностью соответствует выставленному значению  $I$  на панели прибора. В качестве измерителя напряжения используется цифровой вольтметр ВР-11 с входным сопротивлением 10 кОм. Переключение полярности тока производится на клеммах блока Б5-50.



*Рис. 1. Схема измерительного устройства*

## Порядок выполнения работы

1. Включить приборы для прогрева (30 мин). Установить на панели Б5-50 напряжение 35В, ток 1 мА. Отключить один из штекеров зондовой головки (1 или 4) от Б5-50. Источник питания в этот момент должен находиться в режиме стабилизации напряжения.

2. Поместить пленку в измерительное устройство. Медленно опуская головку, добиться касания пластмассового бортика поверхности пленки.

3. Подсоединить отключенный штекер к Б5-50. Источник питания должен перейти в режим стабилизации тока, что будет означать, что через контакты 1 - 4 идет ток 1 мА. Если (при измерении высокоомных образцов) прибор Б5-50 не перешел в режим стабилизации тока, то необходимо увеличить напряжение на панели до 45 – 55 В.

4. Измерить падение напряжения на зондах 2 и 3. Повторить измерения при другой полярности тока.

5. Занести результаты в таблицу. Измерить предложенный преподавателем набор образцов.

№ п.п.	№ обр.	$I$ , мА	$U^-$ , В	$U^+$ , В	$\rho_s$

6. Сформулировать выводы по работе.

### *Литература*

1. Батавин В.Б., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В., Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.

2. Павлов Л.П. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов. М.: Высшая школа, 1975. 206 с.

3. Бочкарева Л.Б., Зимин С.П. Физика полупроводников. Явления переноса в тонких пленках: Учеб. пособие. Ярославль, 1985. С. 36 - 39.

## Лабораторная работа № 6

### Классические размерные эффекты в тонких пленках. Зависимость удельного сопротивления от толщины

**Цель работы** - изучить теоретические основы зависимости удельного сопротивления тонких пленок от толщины, освоить методику расчета длины свободного пробега электронов и коэффициента зеркальности, произвести экспериментальные исследования зависимости проводимости от толщины в рамках теории Фукса - Зондгеймера.

#### Краткая теория работы

Тонкие пленки по своей природе представляют собой объекты с разнообразными физическими свойствами, причем физические характеристики вещества в виде пленки и могут существенно отличаться от свойств этих же материалов в массивном состоянии. Изменение физических свойств вещества в пленочном состоянии происходит под влиянием двух основных причин. Первая причина заключается в том, что при получении тонких пленок можно добиться разнообразной структуры. При варьировании условий конденсации структура образующихся пленок может изменяться от предельно неупорядоченного мелкодисперсного состояния (гранулированные слои) до структуры совершенного монокристаллического слоя (эпитаксиальные пленки). При этом возможно получение островковой, пористой, аморфной структур, каждая из которых обладает специфическими физическими свойствами.

Другой причиной, приводящей к отличию физических свойств тонких пленок от свойств массивного вещества, является влияние малости ее толщины, что приводит к возникновению размерных эффектов. В частности, в электропроводности, гальваномагнитных и других эффектах проявляется классический размерный эффект, связанный с ограничением длины свободного пробега электронов толщиной пленки или при соизмеримости толщины пленки радиуса орбит электронов в магнитном поле. При дальнейшем уменьшении толщины слоев в очень тонких пленках при низких температурах может оказаться, что толщина становится соизмеримой с длиной волны де Бройля. В этом случае в термодинамических и кинетических свойствах электронов

проявляется квантовый размерный эффект, приводящий к целому ряду специфических квантовых явлений.

***Теория Фукса-Зондгеймера проводимости тонких металлических пленок в зависимости от толщины***

К категории классического размерного эффекта относится случай изменения величины удельного сопротивления пленок от их толщины. Установлено, что традиционная закономерность, когда сопротивление пленки обратно пропорционально толщине пленок справедлива не во всех случаях, а только тогда, когда толщина пленки достаточно велика. В более тонких слоях величина удельного сопротивления определяется размерными эффектами. Впервые на этот факт обратил внимание Томсон в 1901 г. Теория электропроводности тонких металлических пленок (пластин) в условиях, когда средняя длина свободного пробега электронов  $l_0$  соизмерима с толщиной  $d$ , построенная при использовании кинетического уравнения Больцмана, предложена в 1938 г. Фуксом, доработана в 1958 г. Зондгеймером и носит название теории Фукса - Зондгеймера. Согласно теории, электропроводность пленки  $\sigma$  и электропроводность массивного материала  $\sigma_0$  в случае  $d/l_0 > 1$  связаны соотношением

$$\sigma/\sigma_0 = 1 - (3d / 8l_0), \quad (1)$$

а в случае  $d/l_0 \ll 1$

$$\sigma/\sigma_0 = 3d \ln (l_0 / d) / 4 l_0. \quad (2)$$

Эти уравнения справедливы при диффузном отражении электронов от границ пленки. Если учесть, что часть электронов  $p$  упруго отражается от поверхности, а остальные  $(1-p)$  рассеиваются диффузно, то формулы (1) и (2) при переходе к величине удельного сопротивления приобретают следующий вид (параметр  $p$  часто называют параметром зеркальности):

$$\rho/\rho_0 \approx 1 + [3l_0(1-p) / 8d], \quad d/l_0 > 1 \quad (3)$$

$$\rho/\rho_0 = [4l_0 (1-p)] / [3 (1+p) d \ln(l_0/d)], \quad d/l_0 \ll 1. \quad (4)$$

Соотношение (3) применимо в широкой области значений  $d/l_0$  (от 0,1 до предельно высоких). Теория Фукса рассматривает металл со сферической поверхностью Ферми и изотропной длиной свободного пробега. Кроме того она основана на предположении, что коэффициент зеркальности не зависит от траекторий электронов и одинаков для обеих поверхностей.

На рисунке 1 приведены экспериментальные результаты зависимости удельного сопротивления пленок серебра ( $l_0 = 32$  мкм) при 4,2 К от толщины и теоретические кривые, соответствующие уравнениям (3) и (4) при различных значениях коэффициента  $p$ . Из рисунка следует, что классический размерный эффект приводит к значительному возрастанию удельного сопротивления (на порядок) при уменьшении толщины пленки от 12 000 до 1 000 Å, и что в данном конкретном случае 50% всех электронов рассеиваются зеркально, а остальные - диффузно.

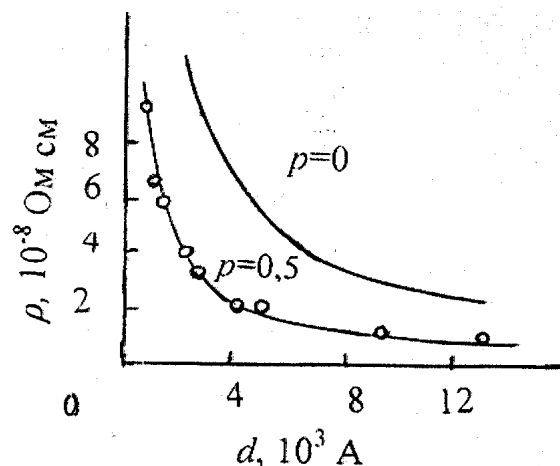


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления пленок серебра от толщины при 4,2К. Точки - экспериментальные результаты, линии - теоретические зависимости

### **Методика определения длины свободного пробега электронов и коэффициента зеркальности**

Сопоставляя экспериментальные зависимости  $\rho(d)$  с соотношениями (3) и (4), можно на практике определить длину свободного пробега электронов  $l_0$  и коэффициент зеркальности  $p$ . Это может быть сделано следующим образом.

В области  $d \ll l_0$  соотношение (4) может быть записано в виде:

$$1/pd = [3 (1+p) (\ln l_0 - \ln d)] / [4 (1-p) \rho_0 l_0]. \quad (5)$$

Следовательно, величина  $1/\rho d$  является линейной функцией  $\ln(d)$

$$1/\rho d = A - B \ln d, \quad (6)$$

причем

$$A / B = \ln l_0. \quad (7)$$

Если построить график зависимости  $1/\rho d = f(\ln(d))$ , то точка пересечения полученной прямой с осью абсцисс дает возможность определить  $l_0$ . Действительно, если  $1/\rho d = 0$ , то  $A = B \ln(d_0)$ , и, следовательно, на основании (7) имеем  $l_0 = d_0$ . Здесь  $d_0$  – толщина пленки, определяемая в точке пересечения прямой  $1/\rho d = f(\ln(d))$  с осью абсцисс.

В области  $d > l_0$  соотношение (3) можно переписать в виде:

$$\rho d = [3 (1-p) \rho_0 l_0 / 8] + \rho_0 d. \quad (8)$$

В данном случае  $\rho d$  является линейной функцией  $d$ :

$$\rho d = C + Dd. \quad (9)$$

Если построить графическую зависимость  $\rho d = f(d)$ , то наклон этой зависимости позволит определить удельное сопротивление  $\rho_0$ . Кроме того, зная величину  $C$ , отсекаемую прямой на оси ординат при  $d=0$ , можно на основании (8) определить  $p$ , воспользовавшись уже найденными  $\rho_0$  и  $l_0$ .

## Порядок выполнения работы

1. Ниже (см. Приложение) приводятся результаты экспериментальных исследований зависимости удельного сопротивления тонких пленок различных металлов от их толщины, взятые из работ различных авторов (задания А - Г).

2. По указанию преподавателя проведите анализ одного из предложенных вариантов данных. Для этого постройте зависимости  $1/\rho d = f(\ln(d))$ ,  $\rho d = f(d)$ , проведите расчеты (если это возможно) величин  $l_0$ ,  $\rho_0$ ,  $p$ . Проанализируйте полученные результаты.

3. Сформулируйте выводы по работе.

### Литература

1. Майселл Л.И. Электрические свойства металлических тонких пленок // Технология тонких пленок. М.: Советское радио, 1977. Т. 2. С. 314 - 315.

2. Комник Ю.Ф. Физика металлических пленок. Размерные и структурные эффекты. М.: Атомиздат, 1979. 264 с.

3. Ларсон Д.К. Размерные эффекты в электропроводности тонких металлических пленок и проволок // Физика тонких пленок. М.: Мир, 1973. Т. 6. С. 97 - 170.

## Приложение к работе 6

### Вариант А

Пленки золота, нанесенные на стекло. Температура измерения 4,2 К.

$d, \text{\AA}$	$\rho, 10^{-8} \text{ Ом см}$	$d, \text{\AA}$	$\rho, 10^{-8} \text{ Ом см}$
700	36,8	2200	17,1
850	32,4	2700	14,8
1000	28,5	3300	12,8
1100	26,9	3850	11,6
1400	22,8	4450	10,2
1800	19,3	6000	9,2

### Вариант Б

Пленки золота на стекле. Температура измерения - 295 К.

$d, \text{\AA}$	$\rho, 10^{-6} \text{ Ом см}$	$d, \text{\AA}$	$\rho, 10^{-6} \text{ Ом см}$
200	5,0	1000	2,5
260	3,4	1500	2,45
300	2,9	2000	2,4
350	2,7	3000	2,35
400	2,6	4000	2,3

### Вариант В

Тонкие пленки хрома. Температура измерения - 295 К.

$d, \text{\AA}$	$\rho, 10^{-6} \text{ Ом см}$	$d, \text{\AA}$	$\rho, 10^{-6} \text{ Ом см}$
110	620	610	45
230	86	680	44
310	61	790	43
390	58	950	42
490	47	1180	41

### Вариант Г

Тонкие поликристаллические пленки золота. Температура измерения - 295 К.

$d, \text{\AA}$	$\rho, 10^{-6} \text{ Ом см}$	$d, \text{\AA}$	$\rho, 10^{-6} \text{ Ом см}$
200	8,0	620	3,6
250	6,3	740	3,4
290	5,5	800	3,1
320	5,0	1200	2,9
370	4,5	2000	2,8
460	4,1		

## Содержание

Лабораторная работа № 1.....	3
Методы измерения толщины тонких пленок .....	3
Лабораторная работа № 2.....	10
Проводимость диспергированных металлических пленок .....	10
Лабораторная работа № 3.....	16
Измерение электрофизических параметров резистивных пленок .....	16
Лабораторная работа № 4.....	22
Исследование емкостных свойств диэлектрических пленок.....	22
Лабораторная работа № 5.....	27
Измерение поверхностного сопротивления тонких резистивных пленок .....	27
Лабораторная работа № 6.....	31
Классические размерные эффекты в тонких пленках. Зависимость удельного сопротивления от толщины.....	31

---

Учебное издание

### Измерение параметров пленочных структур

Составитель **Зимин** Сергей Павлович

Редактор, корректор А.А. Антонова  
Компьютерная верстка И.Н. Ивановой

Подписано в печать 28.06.2004 г. Формат 60×84/16. Бумага тип.  
Усл. печ. л. 2,09 Уч.-изд. л. 1,8. Тираж 70 экз. Заказ

Оригинал макет подготовлен  
в редакционно-издательском отделе ЯрГУ

Отпечатано на ризографе

Ярославский государственный университет.  
150000 Ярославль, ул. Советская, 14.



---

---

# **Измерение параметров пленочных структур**

---

---