

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный
институт имени академика С.П.Королева

МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЯ
ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Методические указания к лабораторной работе 33

Куйбышев 1982

УДК 621.382.049

Изучаются методы и техника измерения толщины тонких пленок, полученных термическим испарением. Дается устройство прибора МНИ-4 и правила работы на нем.

Анализируется распределение конденсата по поверхности плоской подложки.

Рекомендуется студентам специальности 0705 при изучении курса "Конструкции и технология микросхем".

Составители: В.Д.Д м и т р и е в, А.В.В о л к о в

**Утверждены редакционно-издательским советом
института 16.12.81г.**

Ц е л ь р а б о т ы: изучение методов и техники измерения толщины тонких пленок, полученных методом термического испарения в вакуумной установке.

З а д а н и я:

1. Изучить методы измерения толщины тонких пленок.
2. Изучить устройство прибора МИИ-4 и порядок работы на нем.
3. Рассчитать и построить на миллиметровой бумаге диаграмму распределения конденсата по формуле (2) для шести точек в интервале $e/R = 0 \div 0,3$.
4. Измерить толщину пленок. Построить диаграмму распределения конденсата.

I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

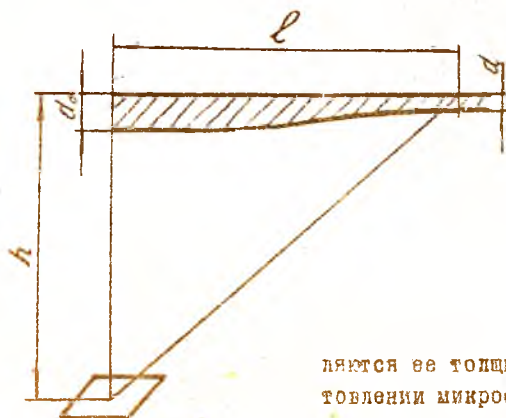
Распределение конденсата по поверхности подложки

Состояние вещества в пленке и его свойства могут отличаться от их значений в массивном образце. При тонких пленках (толщиной менее 1 мкм) параметры, характеризующие свойства пленки — ϵ — для диэлектрических материалов и ρ — для резистивных и полупроводниковых материалов — резко меняют свои значения. Кроме того, существенной характеристикой процесса осаждения пленки является равномерность ее параметров по поверхности подложки. Распределение толщины пленки по поверхности подложки называется диаграммой конденсации. Рассмотрим распределение конденсата для двух идеализированных типов испарителей: точечного испарителя и испарителя типа "элементарная площадка".

Во многих вакуумных установках подложки при нанесении пленки располагают в одной плоскости на расстоянии R от испарителя (рис.1). При этом толщина пленки будет наибольшей d_0 в зоне подложки, ближайшей к испарителю. По мере удаления от этой зоны толщина d изменяется по закону, определенному для каждого типа испарителя.

Относительное изменение толщины пленки для точечного испарителя составит

$$\frac{d}{d_0} = \frac{1}{4[1+(e/R)^2]^{3/2}}, \quad (1)$$



Р и с. 1. Распределение конденсата по поверхности подложки

а для испарителя с малой площадью - "элементарная площадка" -

$$\frac{d}{d_0} = \frac{1}{[1 + (l/R)^2]^2} \quad (2)$$

Так как параметры пленки (сопротивление квадрата резистивной и проводящей пленок, удельная емкость диэлектрических пленок) опреде-

ляются ее толщиной, то при расчете и изготовлении микросхем важно знать толщину пленки.

2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНОК

В производстве тонкопленочных микросхем используют различные методы измерения толщины тонких пленок.

2.1. Механические методы

Существенным преимуществом механических методов измерения толщины пленок является независимость результатов измерения от электрических, физических или химических параметров и свойств материалов, так как все механические методы непосредственно измеряют истинную геометрическую толщину пленки.

Наиболее точные измерения могут быть выполнены с помощью специально выпускаемых промышленностью механических измерителей толщины. Принцип действия таких инструментов состоит в измерении увеличенного (посредством механических или оптических приспособлений) смещения соответствующего цула.

Недостатком этого метода является появление погрешности, возникающей вследствие углубления цула в пленку.

2.2. Определение толщины слоя по количеству осажденного вещества

Такого рода измерения наиболее удобно проводить, когда про-

песс нанесения слоя отрегулирован таким образом, что за равные промежутки времени толщина слоя равномерно по всей поверхности увеличивается на одну и ту же величину. По результатам большого количества измерений, проведенных на предварительных экспериментах по усредненным данным, строится градуировочная кривая, которая дает возможность судить о толщине пленки по длительности осаждения на установившемся режиме напыления.

2.3. Интерференционные методы

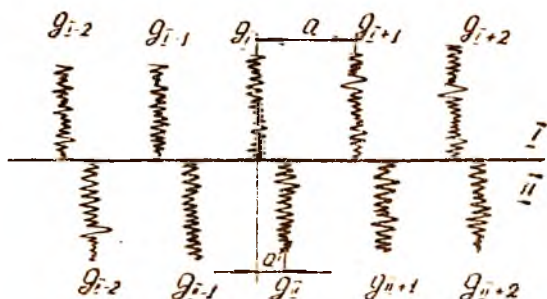
Когда измеряемые толщины очень малы (менее 1 мкм), переходят к интерференционным методам измерений. Используемые в этом случае интерференционные установки различного рода основаны на получении и измерении разности фаз двух лучей, зависящей от толщины измеряемой пленки. Существует несколько интерференционных способов измерения толщины пленок.

2.4. Определение толщины пленки на подложке при помощи воздушного клина

Сущность метода заключается в том, что часть пленки, нанесенной на подложку, удаляется скалыванием или иным способом и сверху накладывается другая стеклянная плоскопараллельная пластина, которая прижимается таким образом, что при освещении монохроматическим светом возникают интерференционные полосы, перпендикулярные границе удаленного слоя. Поскольку толщина воздушного клина, образованного двумя стеклянными пластинами, отличается на толщину измеряемой пленки от толщины параллельно лежащего ему клина, ограниченного измеряемой пленкой и второй стеклянной пластинкой, возникают две лежащие рядом системы интерференционных полос (I и II) (рис. 2), которые сдвинуты друг от друга на величину, определяемую разностью толщин воздушного клина. Толщину пленок можно определить, сравнивая толщины обоих клиньев в определенном месте по формуле

$$d = d_I - d_{II} = (q_I - q_{II} + \frac{a'}{a}) \frac{\lambda}{2} = \frac{a'}{a} \frac{\lambda}{2},$$

где q_I и q_{II} - интерференционные полосы q - порядка для систем I и II; a' - расстояние между двумя соседними полосами, имеющими соответственно порядки q_I и q_{II} ; a - расстояние между двумя



Р и с. 2. Картина интерференционных полос при измерении методом воздушного клина

полосами (в одной системе полос); λ - длина волны монохроматического света в вакууме.

2.5. Измерение толщины пленки посредством колец Ньютона

Здесь также используется принцип воздушного клина, для получения которого применяется стеклянная линза с очень большим радиусом кривизны (3 м). Со стеклянной подложки удаляется половина измеряемой пленки. Линза плотно прижимается к пленке таким образом, чтобы среднее темное пятно возникающих колец Ньютона своим центром лежало на границе пленки. Наблюдаемые тогда в монохроматическом свете кольца состоят из двух половин с различными радиусами. Смещение полос на границе пленки в своем первом приближении пропорционально толщине измеряемой пленки, определяемой по формуле

$$d = \frac{(a_q' - a_q) \lambda}{2(a_{q+1} - a_q)},$$

где d - толщина измеряемой пленки, a_q - радиус кольца q - порядка для части подложки, покрытой пленкой; a_q и a_{q+1} - радиусы колец a_{q+1} -го и q - порядка для части подложки, свободной от пленки; λ - длина волны монохроматического света в вакууме.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЕЩИНЫ ПЛЕНОК С ПОМОЩЬЮ МИКРОИНТЕРФЕРОМЕТРА МИИ-4

3.1. Описание микроинтерферометра Линника МИИ-4

Принцип действия микроинтерферометра впервые был разработан академиком В.П.Линником. Действие прибора основано на использовании явления интерференции света.

Микроинтерферометр Линника МИИ-4 является специальным прибором, предназначенным для визуальной оценки, измерения и фотографирования высоты неровностей тонкообрабатываемых поверхностей. С помощью микроинтерферометра можно наблюдать исследуемую поверхность и интерференционные полосы, искривляющиеся в местах выступов или впадин. Величина искривления позволяет определить высоту неровности на исследуемой поверхности (измерение производят винтовым окулярным микрометром МОВ-I-15^X).

Прибор МИИ-4 позволяет измерять высоты неровностей в пределах от 1 до 0,03 мм.

Увеличение микроинтерферометра при визуальном наблюдении с винтовым окулярным микрометром и симметричным окуляром составляет - 490^X, увеличение при фотографировании - 290^X.

Предметный столик прибора имеет координатное перемещение в двух взаимно перпендикулярных направлениях (по 10 мм каждое) и вращение на 360°. Цена деления барабана микрометрических винтов 0,005 мм.

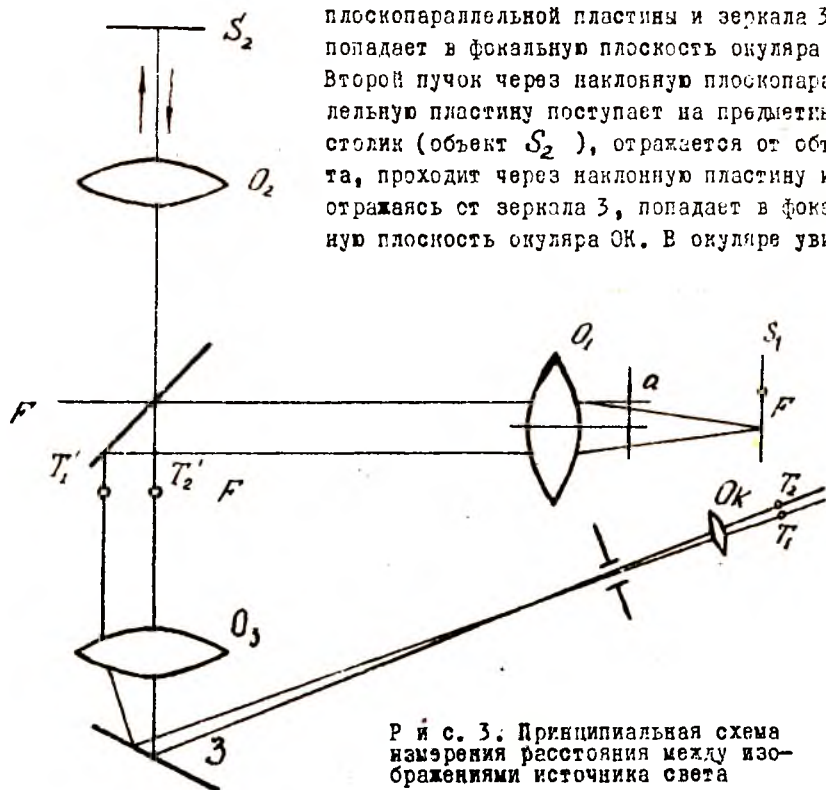
Микроинтерферометр позволяет вести наблюдение в обычном и монохроматическом свете. Обычное освещение осуществляется электролампочкой СЦ-80 (8В, 9В), питаемой от осветительной сети 127/220 В через понижающий трансформатор 110-127-220/8 В.

Монохроматическое освещение - от той же лампы накаливания через зеленый или желтый интерференционный светофильтр.

На практике для получения двух систем волн, способных интерферировать, пользуются разделением пучка лучей, исходящих из одной точки источника света S , на два пучка (рис.3).

В микроинтерферометре МИИ-4 в качестве разделяющей системы используется наклонная плоскопараллельная пластина, имеющая полупрозрачное светоотделительное покрытие.

Первый пучок, отразившись от наклонной плоскопараллельной пластины и зеркала 3, попадает в фокальную плоскость окуляра ОК. Второй пучок через наклонную плоскопараллельную пластину поступает на предметный столик (объект S_2), отражается от объекта, проходит через наклонную пластину и, отражаясь от зеркала 3, попадает в фокальную плоскость окуляра ОК. В окуляре уви-



Р и с. 3. Принципиальная схема измерения расстояния между изображениями источника света

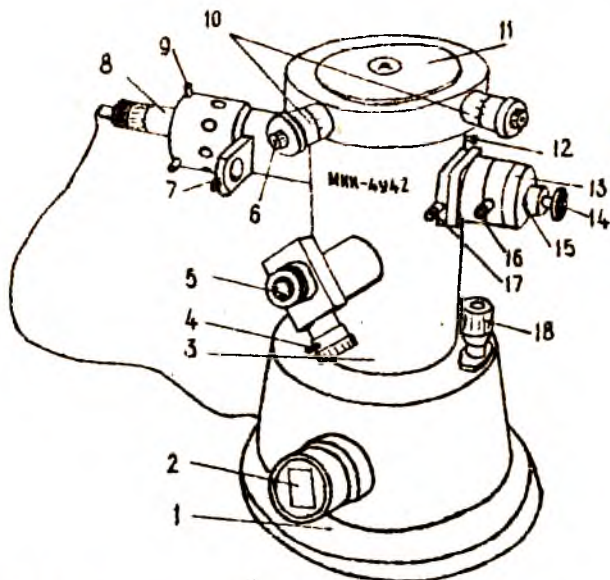
дим пучки T_1 и T_2 . В результате сложения (интерференции) двух систем волн в фокальной области окуляра наблюдаются интерференционные полосы.

В отъюстированном приборе при работе в монохроматическом свете в поле зрения должны быть видны чередующиеся черные и светлые полосы.

Два интерференционных светофильтра, с помощью которых получается монохроматический свет, пропускают соответственно желтую и зеленую часть спектра. Без светофильтра наблюдается интерференционная картина в белом свете, когда в центре наблюдается белая полоса, по обеим сторонам которой находятся черные полосы с цветной каймой, и дальше по три-четыре цветные полосы с каждой стороны.

В белом свете полосы для равных длин волн не совпадают друг с другом, за исключением нулевой полосы, определяющей ось симметрии интерференционной картины.

Основными узлами микроинтерферометра МИИ-4 являются (рис. 4):



Р и с. 4. Микроинтерферометр МИИ-4

1 - основание, 2 - рамка с матовым стеклом, 3 - колонка, 4 - кольцо для выключения отражательного зеркала, 5 - винтовой окулярный микрометр МОВ-1-15х, 6 - кольцо для изменения диаметра апертурной диафрагмы, 7 - пластинка со светофильтрами, 8 - фонарь, 9 - центровочные винты лампы, 10 - микрометрические винты перемещения столика, 11 - предметный столик, 12 - стопорный винт столика, 13 - объективная головка прибора, 14 - винт для смещения интерференционных полос, 15 - контргайка, 16 - винт для изменения ширины и направления полос, 17 - рукоятка для выключения шторки, 18 - микрометрический винт фокусировки микроскопа.

Микроинтерферометр имеет круглое основание 1, на котором установлена фотокамера или рамка 2 с матовым стеклом. К верхнему торцу основания привинчена цилиндрическая полая колонка 3 с

предметным столиком II. При помощи двух микрометрических винтов IO столик перемещается в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Перемещение отсчитывается по барабанам винтов, цена деления которых 0,005 мм. Кроме того, столик может поворачиваться вокруг вертикальной оси и стопориться винтом I2. В колонке 3 под углом 70° к вертикальной оси расположен наблюдательный тубус, в отверстие которого устанавливается прикладываемый к прибору симметричный окуляр со шкалой или сеткой.

При необходимости измерения величины искривления интерференционных полос на наружный диаметр тубуса взамен окуляра устанавливает винтовой окулярный микрометр 5 (МОЗ-I-15).

На тубусе имеется кольцо 4, вращением которого можно вводить в оптическую систему или выводить из нее отражающее зеркало. При визуальном наблюдении или измерении зеркало должно быть введено в оптическую систему, а при фотографировании выведено.

Вращением микрометрического винта I8 осуществляется фокусировка микроскопа на объект. Величина вертикального перемещения интерференционной головки может быть отсчитана по барабану микрометрического винта, цена деления которого равна 0,003 мм.

Ответственной частью прибора является интерференционная головка, укрепленная на внутреннем стекле микроскопа.

Интерференционная головка состоит из трех частей:

а - левой, включающей в себя фонарь 8 с винтами 9 (для центровки лампы) и трубку, внутри которой смонтирована осветительная часть системы. В трубке установлена горизонтально выдвигающаяся пластина 7 с тремя отверстиями. В двух крайних отверстиях той пластины поставлены светофильтры монохроматического света; среднее отверстие свободное (используется при работе в обычном белом свете). Вращением кольца 6 с накаткой изменяется диаметр открытия апертурной диафрагмы;

б - средней, в которую постоянно ввинчен объектив. Внутри корпуса средней части установлены разделительная пластина и компенсатор. Кроме того, в средней части головки расположена рукоятка I7, при помощи которой в ход лучей включается шторка. При включенной шторке лучи не попадают в объектив; в этом случае с микроинтерферометром можно работать как на металлографическом микроскопе. На торце рукоятки I7 нанесена стрелка, ориентирующая положение шторки;

в - правой, содержащей в себе второй объектив и эталонное зеркало. Эта часть имеет устройство для измерения ширины и направления интерференционных полос. Ширина полос изменяется вращением винта I6 вокруг своей оси. Изменение направления полос производится этим же винтом I6 путем вращения его вокруг оси всей интерференционной головки. Винт I4 служит для смещения интерференционных полос в поле зрения микроскопа.

3.2. Подготовка микроинтерферометра к работе

Микроинтерферометр МИИ-4 должен быть установлен в помещении, где нет вибраций или они минимальны. Для уменьшения влияния вибраций рекомендуется под основание прибора подложить амортизатор (губчатая резина толщиной 10-20 мм).

Питание электролампочки (4 В, 9 В) прибора производится через трансформатор переменного тока I10, I27 или 220 В. В одном корпусе с трансформатором помещается реостат, рукояткой которого можно изменять яркость свечения лампы. Трансформатор выпускается включенным на напряжение 220 В.

При работе на микроинтерферометре наблюдатель не должен быть обращен лицом к окну или сильному источнику света, так как при этом глаза ослепляются ярким посторонним светом, вследствие чего снижается контрастность изображения. В помещении, где установлен прибор, не должно быть резких колебаний температуры.

При точных измерениях или при фотографировании с большими экспозициями нужно включить лампочку осветителя за тридцать минут до начала работы на приборе.

Настройка микроинтерферометра производится в следующей последовательности.

1. Включить лампу и положить измеряемый объект на столики прибора исследуемой поверхностью вниз (к объективу).

2. После настройки освещения вставить окуляр в тубус. Далее повернуть рукоятку I7 так, чтобы указатель (стрелки) на ней стоял вертикально. С помощью микрометрического винта I8 сфокусировать микроинтерферометр на испытуемую поверхность. Затем поворотом рукоятки I7 выключить объективную головку I3 (стрелка на рукоятке в горизонтальном положении), при этом в поле зрения должны быть интерференционные полосы. Микрометрическим винтом I8

добиться наиболее резкого изображения полос и такого положения, при котором в поле зрения будут одновременно изображение контролируемой поверхности, граница пленки и интерференционная картина.

Необходимый для работы интервал между полосами устанавливается вращением головки винта 16 вокруг его оси. Затем поворотом винта 16 вокруг оси объективной головки 13 необходимо установить интерференционные полосы, перпендикулярные к грани измеряемой пленки. Для работы с монохроматическим светом необходимо перемещением до упора выдвижной пластинки 7 включить один из светофильтров.

3.3. Измерение величины изгиба полос

Величину изгиба полос также выражают в делениях барабана винтового окулярного микрометра. Устанавливают микрометром нить на черной полосе подложки и снимают показания N_3 , затем нить перекрытия совмещают с серединой той же полосы на пленке и получают второй отсчет N_4 .

Величина изгиба полосы в долях интервала между полосами выражается формулой

$$\Delta N = \frac{N_3 - N_4}{N_1 - N_2}.$$

3.4. Вычисление толщины пленки

При работе в белом свете искривление в одну интерференционную полосу соответствует толщине пленки на испытуемой поверхности, равной 0,27 мкм. В общем виде измеренная толщина пленки d вычисляется по формуле

$$d = 0,27 \frac{N_3 - N_4}{N_1 - N_2},$$

где d - толщина пленки; N_1 и N_2 - первый и второй отсчет при измерении интервала; N_3 и N_4 - первый и второй отсчет при измерении величины изгиба полос.

Для монохроматического света, мкм

$$d = \lambda \frac{N_3 - N_4}{N_1 - N_2}.$$

Измерение толщины пленок можно произвести двумя способами: "на глаз" и с помощью винтового окулярного микрометра.

3.5. Измерение с помощью винтового окулярного микрометра

Для измерения с помощью винтового окулярного микрометра МОВ-1-15^х следует установить его на тубус микроинтерферометра до упора, затем повернуть так, чтобы одна из нитей перекрестия совпала с направлением интерференционных полос, а другая с направлением царапин на исследуемой поверхности. После этого закрепить винтовой окулярный микрометр зажимным винтом.

Последовательность определения толщины пленки: а - измерение величины интервала между полосами; б - измерение величины изгиба полос; в - вычисление толщины пленки.

Для этого необходимо выполнить следующие операции.

1. Включить осветитель и положить подложку на предметный столик исследуемой поверхностью вниз.

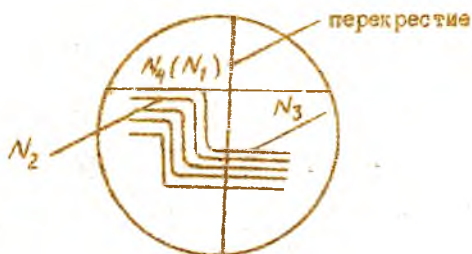
2. Повернуть рукоятку со стрелкой вертикально вращением микрометрического винта добиться резкого изображения исследуемой поверхности.

3. С помощью рукояток найти край канавки резистивной (проводящей, диэлектрической) пленки.

4. Повернуть рукоятку со стрелкой в горизонтальное положение. В этом случае выключается зеркало З и в окуляре ОК одновременно будут видны исследуемая поверхность и интерференционные полосы. Вращением винта добиться четкой фокусировки картины полос.

5. Вращая предметный столик, добиться того, чтобы граница пленки (канавки) оказалась перпендикулярно интерференционным полосам.

6. Развернуть винтовой окулярный микрометр так, чтобы одна из линий перекрестия была направлена вдоль интерференционных полос (рис. 5). Снять значение по лимбу окулярного микрометра $N_4(N')$.



Р и с. 5. Картина интерференционных полос при измерении с помощью винтового окулярного микрометра

П р и м е ч а н и е.
Для большей точности измерения наводку нити перекры-

тия лучше всего производить по середине, а не по краю полосы.

7. Измерить ширину интерференционной полосы (значение N_2).

8. Снять значения изгиба полосы - N_3 .

П р и м е ч а н и е. Все измерения проводятся в относительных значениях.

9. Определить толщину пленки по формулам:

для монохроматического света $d = \frac{\lambda}{2} \frac{N_4 - N_3}{N_1 - N_2}$,
 для белого света $d = 0,27 \frac{N_4 \cdot N_3}{N_1 - N_2}$,
 где d в мкм.

При работе со светофильтрами используют следующие значения
 для волн: $\lambda_{\text{зелен}} = 0,543$ мкм, $\lambda_{\text{желт}} = 0,590$ мкм.

10. Результаты измерений и вычислений записать в таблицу:

Тонкая пленка	Свето- фильтр	N_1	N_2	N_3	N_4	$d, \text{мкм}$
Проводящая (резистивная)	зеленый					
	желтый					
	белый					
Диэлектрическая	зеленый					
	желтый					
	белый					

3.6. Измерение толщины пленки "на глаз"

При правильной настройке микроинтерферометра в поле зрения окуляра должны быть видны одновременно граница пленки и интерференционные полосы, изогнутые в местах, где проходят канавки или царапины, или уступ пленки на подложке. Причем интерференционные полосы должны быть ориентированы перпендикулярно кромке пленки.

Для определения толщины пленки следует "на глаз" определить, на какую долю интервала между полосами или на сколько интервалов изгибается полоса в месте прохождения исследуемой пленки. Глубина царапины или риска определяется по следующей формуле:

при работе с белым светом $d = 0,27 \Delta N \text{ мкм}$.

при работе с монохроматическим светом $d = \frac{\lambda}{2} \Delta N \text{ мкм}$.

где d - глубина канавки (толщина пленки), мкм;

ΔN - величина изгиба полосы, доля интервала;

λ - длина волны света, указанная в аттестате.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Провести скальпелем или иглой две параллельные канавки вдоль всей поверхности напыленной пленки (по середине и вдоль края подложки).

П р и м е ч а н и е. В качестве тонкой пленки используется подложка с тонкой пленкой, полученной в предыдущей лабораторной работе 31.

2. Включить прибор МИИ-4.

3. Согласно методикам измерения толщины пленок с помощью винтового окулярного микрометра и "на глаз" замерить толщину пленки вдоль обеих канавок. Измерение производить в 7 точках с равным шагом для каждой канавки.

4. Построить диаграмму распределения толщины рядом с теоретически построенной диаграммой.

5. Оформить отчет.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Привести принципиальную схему измерения расстояния между изображениями источника света, а также результаты измерений.

2. Построить графики изменения толщины пленки от соотношения e/λ .

3. Объяснить графики полученных зависимостей.

Контрольные вопросы

1. Назовите методы измерения толщины тонких пленок и поясните их сущность.

2. Объясните принцип работы прибора МИИ-4.

3. Объясните сущность интерференционных методов определения толщины тонких пленок: метода воздушного клина, метода колец Ньютона.

4. Как производится измерение толщины пленки "на глаз"?

5. Как производится измерение толщины пленки с помощью винтового окулярного микрометра МОВ-I -15^х?

6. Как распределяется конденсат по толщине на поверхности плоской подложки?

Л и т е р а т у р а

1. Е р м о л а е в Ю.П., П о н о м а р е в М.Ф., К р ю -
к о в Ю.Г. Конструкции и технология микросхем. -М.: Сов. радио,
1980, - 256 с.

2. С л у ц к а я В.В. Тонкие пленки в технике СВЧ. -М.: Сов.
радио, 1967, - 456 с.

**Составители: Василий Дмитриевич Дмитриев,
Алексей Васильевич Волков**

МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Методические указания к лабораторной работе 33

**Редактор И.С о н о х о в а
Техн. редактор Н.Х а з а н о в а
Корректор Н.С. К у п р я н о в а**

**Подписано в печать 14.12.82г. Формат 60х84 1/16.
Бумага оберточная белая. Оперативная печать
Усл.п.л. 0,93.Уч.-изд. л.0,86.Тираж 300 экз.
Заказ № 2 Бесплатно.**

**Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный
институт имени академика С.П.Королева, г.Куйбышев, ул.Мохо-
догвардейская, 151.
Офсетный участок КуАИ, г.Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.**