

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Д.А. Усанов, Ал.В. Скрипаль,
Ан.В. Скрипаль, А.В. Абрамов

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ НАНОМЕТРОВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЁВ

Учебное пособие
для студентов факультета нано- и биомедицинских технологий

УДК 621.372.542
У74

Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Абрамов А.В.

У74 Оптические методы измерения нанометровых металлических слоёв: Учеб. пособие для студентов факультета нано- и биомедицинских технологий – Саратов: Саратов. ун-т, 2007. – 50 с.: ил.

В учебном пособии изложены принципы работы микроинтерферометров, а также способы применения микроинтерферометров для измерения параметров слоистых наноструктур. Описаны особенности формирования интерференционной картины при отражении оптического излучения от проводящих структур. Приведено описание автоматизированной системы обработки и анализа интерференционных изображений «МИИ-4 Видео». Сформулированы задания к лабораторным занятиям.

Для студентов университета, обучающихся по направлению “Электроника и микроэлектроника”, специальностям “Нанотехнология в электронике”, “Физика твердого тела”, “Физика”, “Медицинская физика”, “Материалы и компоненты твердотельной электроники”, “Микроэлектроника и полупроводниковые приборы”, а также научных сотрудников, аспирантов, инженеров, занимающихся проведением автоматизированного видеоконтроля.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ.....	7
1.1. Интерференция двух монохроматических волн.....	7
1.2. Микроинтерферометр Линника «МИИ-4».....	10
2. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КРАЮ ПОКРЫТИЯ.....	15
2.1. Интерференция оптического излучения при отражении от двухслойной структуры на краю одного из слоёв.....	16
2.2. Особенности интерференции оптического излучения на краю проводящего покрытия, нанесенного на проводящую подложку.....	18
3. ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ ПО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЕ НА ЕГО КРАЮ.....	21
3.1. Определение толщины диэлектрического или проводящего покрытия, нанесенного на диэлектрическую или проводящую подложку, по сдвигу интерференционных полос на краю покрытия.....	21
3.2. Использование технологий обработки видеоизображений для анализа интерференционных картин.....	22
3.3. Измеритель толщин покрытий «МИИ-4 Видео».....	25
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	29
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ.....	30
Лабораторная работа №1. Моделирование особенностей формирования интерференционной картины при отражении оптического излучения от проводящих структур.....	30
Лабораторная работа №2. Измерение толщины металлического слоя, нанесенного на полупроводниковую или диэлектрическую подложку.....	32
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	37

4 Оптические методы измерения нанометровых металлических слоёв

<i>ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ПРОГРАММА ДЛЯ ПАКЕТА <i>MATHCAD</i> ДЛЯ РАСЧЕТА ЗАВИСИМОСТИ ФАЗЫ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА.....</i>	40
<i>ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ФРАГМЕНТ ПРОГРАММЫ НА <i>C++</i> ДЛЯ РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ ПО ВЕЛИЧИНЕ СДВИГА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС НА ГРАНИЦЕ.....</i>	43
<i>ПРИЛОЖЕНИЕ 3. СВИДЕТЕЛЬСТВО НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ.....</i>	47
<i>ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ ПЛЕНОК И ПОДЛОЖЕК.....</i>	48

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность производства существующих и успешное создание новых приборов твердотельной микро- и наноэлектроники во многом зависит от уровня развития технологии изготовления слоёв различных материалов толщиной от нескольких нанометров до десятков микрометров. Достижение высокой степени совершенства слоистых структур и, в частности, структур на основе нанометровых металлических пленок, которое и определяет возможность их успешного применения в микро-, нано-, акусто-, СВЧ- и оптоэлектронике, невозможно без использования высокоточных методов измерений электрофизических параметров диэлектрических и полупроводниковых материалов и структур, металлических пленок.

При измерении параметров таких структур большое внимание уделяется бесконтактным методам. Достоинством бесконтактных методов, к которым, помимо прочих, относятся оптические интерференционные методы, является возможность проводить измерения, не разрушая материал и не изменяя его свойства. Важным фактором, стимулировавшим развитие таких методов, было открытие и широкое внедрение в практику различных типов когерентных источников, способствовавших реализации различных методов интерферометрии и голографии [1–4]. Особенности характера формирования картины интерференции волновых полей [5–10] были положены в основу контроля параметров неоднородных материалов и струк-

тур как при конструировании различных покрытий и изделий электронной техники, так и при реализации интерференционных методов измерения. Необходимость и актуальность исследований влияния параметров неоднородных структур, состоящих из чередующихся тонких проводящих и диэлектрических слоев, на интерференционные картины, образованные при отражении от них электромагнитных волн, связаны с использованием таких структур для создания новых видов покрытий, обладающих заданными свойствами для заранее определенных диапазонов частот [11–13].

В предлагаемом учебном пособии излагаются некоторые применения особенностей интерференции оптического излучения при отражении от слоистых металлодиэлектрических и металлополупроводниковых структур.

В первой главе обсуждаются основы интерференции и принципы работы интерферометров.

Во второй главе рассматриваются некоторые особенности интерференции оптического излучения при отражении от слоистых структур с проводящими слоями.

В третьей главе изложены методы измерения параметров таких структур с использованием интерференционных методов в оптическом диапазоне.

Пособие содержит материалы лабораторных работ.

1 ● УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ

1.1. Интерференция двух монохроматических волн

Интерференцией света называется явление перераспределения светового потока в пространстве, возникающее при наложении когерентных волн, выражающееся в образовании устойчивой картины чередующихся максимумов и минимумов интенсивности.

Интенсивность света I определяется как усредненное по времени количество энергии, пересекающее единицу площади, перпендикулярной к направлению потока энергии, в единицу времени. Для плоской волны имеем [8]:

$$I = \frac{c}{4\pi} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \langle \mathbf{E}^2 \rangle, \quad (1.1)$$

где \mathbf{E} – вектор электрического поля.

Пусть волны от двух точечных источников света S_1 и S_2 одинаковой частоты ω и одинаковой поляризации (в этом случае можно отвлечься от векторного характера электрического поля световой волны) освещают экран X (рис. 1.1). Определим интенсивность света в некоторой точке A .

Электрические векторы волн в точке A равны:

$$\mathbf{E}_{1,2} = E_{01,02} \exp(i\omega t + \varphi_{1,2}), \quad (1.2)$$

где E_{01} и E_{02} – модули векторов электрического поля в точке A , $\varphi_{1,2} = -k\mathbf{r}_{1,2} + \alpha_{1,2}$ – фазы векторов электрического поля в точек A , $\alpha_{1,2}$ – начальные фазы, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны в вакууме, $\mathbf{r}_{1,2}$ – оптические пути, пройденные волнами от источников до точки A .

Амплитуду результирующего колебания E_0 проще всего найти с помощью векторной диаграммы, изображенной на рис. 1.2.

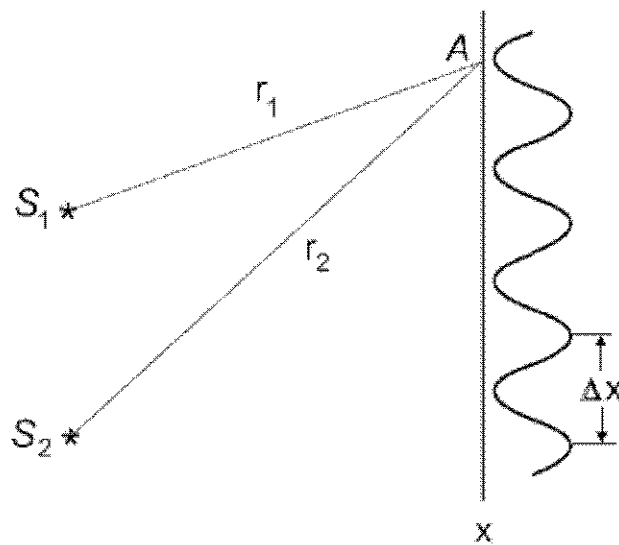


Рис. 1.1. К интерференции волн, испускаемых точечными источниками S_1 и S_2

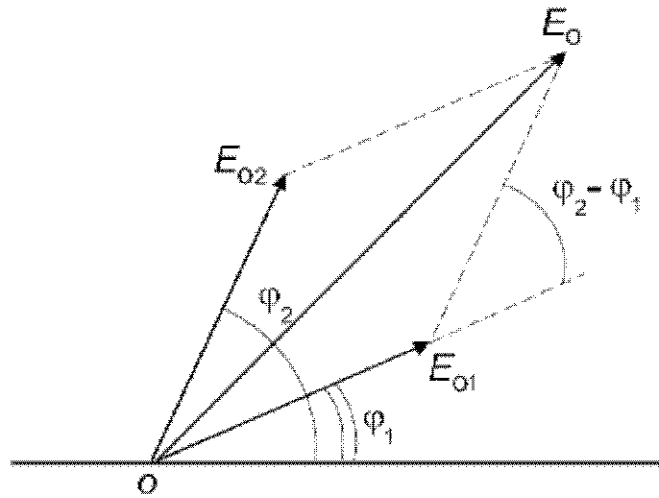


Рис. 1.2. Сложение гармонических колебаний с помощью векторной диаграммы

По теореме косинусов находим:

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(\delta), \quad (1.3)$$

где δ – разность фаз интерферирующих волн в точке наблюдения.

Учитывая, что в соответствии с (1.1) интенсивности волн пропорциональны квадратам их амплитуд, то при наложении двух монохроматических пучков света с интенсивностями I_1 и I_2 распределение интенсивности в интерференционной картине описывается формулой :

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta), \quad (1.4)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r, \quad (1.5)$$

где Δr – оптическая разность интерферирующих волн в точке наблюдения.

Таким образом, суммарная интенсивность зависит от точки наблюдения и от материала, в котором распространяются волны. В точках, где $\cos(\delta) = 1$ будут наблюдаться максимумы интенсивности, а в точках, где $\cos(\delta) = -1$ – минимумы интенсивности. Распределение интенсивности в

пространстве, таким образом, периодически. Пространственный период изменения интенсивности называется шириной интерференционной полосы

1.2. Микроинтерферометр Линника «МИИ-4»

Интерференционные явления, послужившие в своё время доказательством волновой теории света, в наши дни имеют важные практические применения, в том числе и в метрике. На явлении интерференции основана работа целого класса измерительных приборов – интерферометров.

С помощью интерферометров можно с высокой степенью точности измерять линейные и угловые расстояния, малые разности показателей преломления, исследовать структуру спектральных линий. В зависимости от предназначения интерферометры имеют различную конструкцию.

В современной микро- и наноэлектронике широкое применение нашли микроинтерферометры. Микроинтерферы используют для измерения высоты микронеровностей на металлических и других поверхностях. С помощью микроинтерферометров на поверхностях также определяют глубину и профиль штрихов, высоту ступенек, толщину пленок и т. д. Измерение высоты микронеровностей производят по искривлению интерференционных полос. Оптический прибор, предназначенный для исследования мелких неровностей на поверхности, должен обладать большим увеличением и высокой разрешающей способностью. Поэтому микроинтерферометры представляют собой сочетание интерферометра (обычно типа Майкельсона) и микроскопа.

Большое распространение в практике получил микроинтерферометр Линника МИИ–4. Основные его характеристики приведены в таблице.

Таблица 1.1

Основные характеристики микроинтерферометра Линника МИИ-4	
Классы чистоты контролируемых поверхностей	10÷14
Увеличение прибора при визуальном наблюдении	x 490
То же при фотографировании	x 260
Размеры поля зрения при визуальном наблюдении, мм	0,32
То же, при фотографировании, мм	0,10
Апертура микрообъектива	0,65
Габариты прибора, мм	300x340x380
Масса прибора, кг	23
Пределы перемещения стола в двух взаимно перпендикулярных направлениях, мм	0-10
Цена делений микрометрических винтов стола, мм	0,005
Пределы поворота стола	0-360 °

По своей оптической схеме (рис. 1.3) микроинтерферометр МИИ-4 представляет собой сочетание интерферометра Майкельсона с микроскопом [14]. Нить лампы 1 конденсором 2 с междулинзовым светофильтром проектируется в плоскость апертурной диафрагмы 3. Объективом 5 и полупрозрачной плоскопараллельной пластиной 8 изображение диафрагмы 3 проектируется в плоскости зрачков входа двух одинаковых микрообъективов 7 и 10, а изображение полевой диаграммы 4 – в бесконечность.

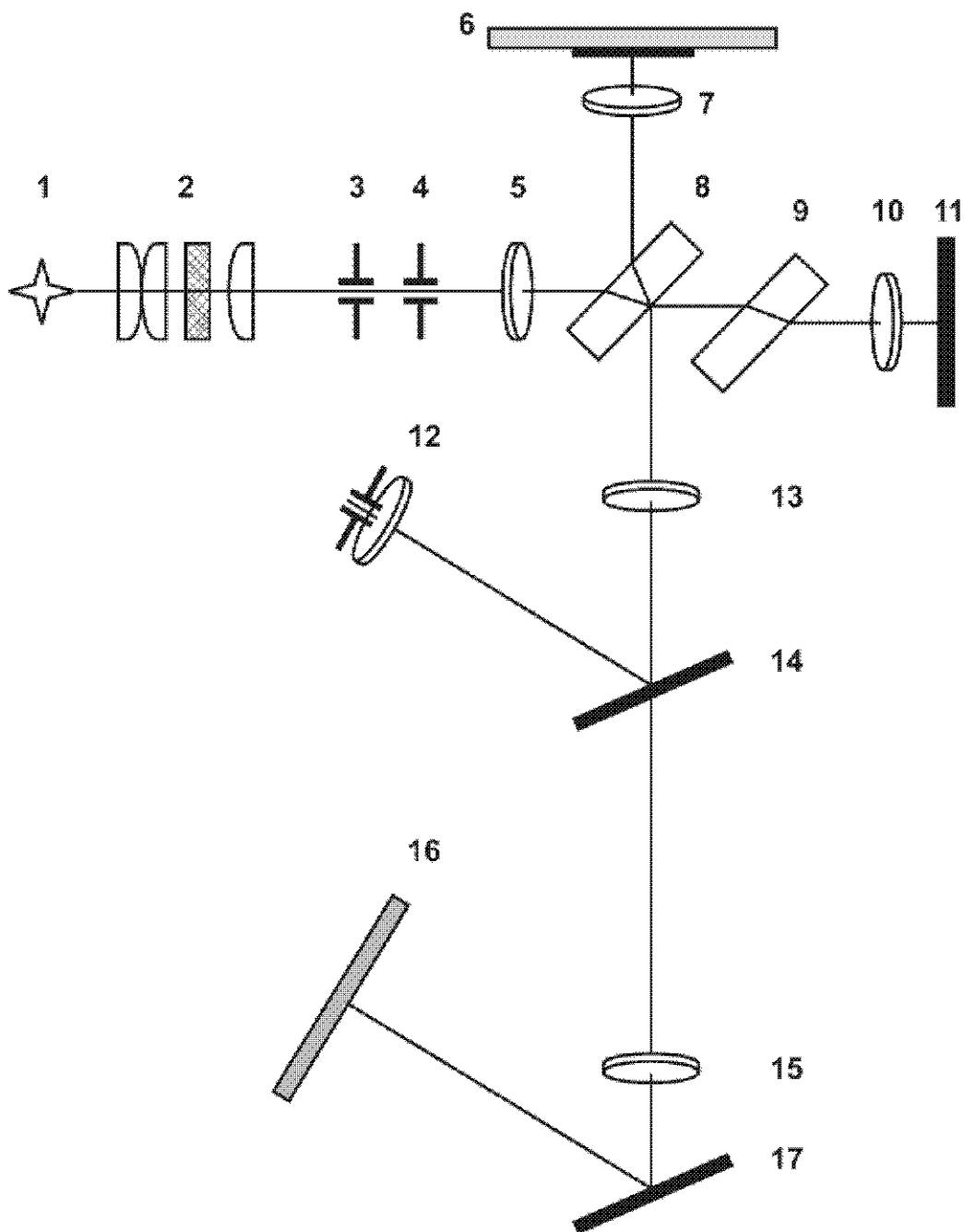


Рис. 1.3. Оптическая схема микроинтерферометра Линника

Вторичные изображения полевой диаграммы микрообъективами 7 и 10 проектируются соответственно на проверяемую поверхность 6 и на плоское опорное зеркало 11. Плоскопараллельная пластина 9 служит для уравнивания длины хода в стекле двух интерферирующих пучков лучей.

Отраженные от измеряемой поверхности 6 и от зеркала 11 пучки лучей, пройдя микрообъективы 7 и 10, соединяются полупрозрачным слоем пластины 8 и с помощью объектива 13 и зеркала 14 направляются в окуляр 12. В фокальной плоскости окуляра наблюдают изображение проверяемой поверхности и систему интерференционных полос на ней. Форма полосы в крупном масштабе воспроизводит профиль контролируемого участка поверхности. Величину искривления полос оценивают на глаз или измеряют винтовым окулярным микрометром. Ширину и направление полос можно менять, смещая объектив 10 перпендикулярно его оптической оси.

Фотографирование интерференционной картины в кадровом окне 16 осуществляют объективом 15 с помощью зеркала 17. Зеркало 14 при этом из хода лучей выводят.

Внешний вид микроинтерферометра МИИ-4 показан на рис. 1.4.

Здесь 6 – основание, 1 – столик, перемещаемый в горизонтальной плоскости микрометрическими винтами 8. Далее 2 – осветитель, 4 – тубус с винтовым окулярным микрометром, 5 – фотокамера.

Измеряемый образец 7 устанавливают на столик 1 исследуемой поверхностью вниз. Фокусировку осуществляют микрометрическим винтом 12. Кольцо 3 служит для переключения прибора с визуального наблюдения контролируемой поверхности на ее фотографирование. Механизм 9 служит для измерения ширины и направления интерференционных полос путем поворота головки 10 как вокруг ее оси, так и вокруг оси механизма 9. Головка 11 управляется шторкой, которой можно перекрывать пучки лучей, идущие к объективу горизонтальной ветви прибора, что позволяет рассматривать контролируемую поверхность без наложенных на нее интерференционных полос.

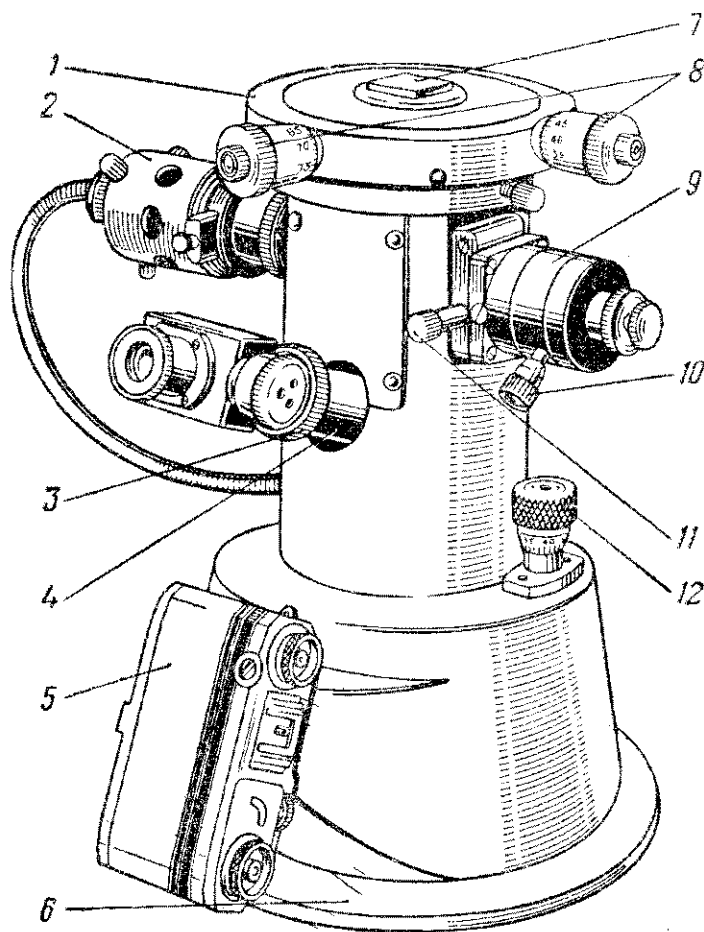


Рис. 1.4. Микроинтерферометр МИИ-4

2. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КРАЮ ПОКРЫТИЯ

Для объектов с неоднородной формой поверхности и неоднородных по составу в пространстве координат характерны особенности формирования интерференционной картины, связанные с конечностью глубины проникновения волны в неоднородную структуру. Актуальным является исследование влияния параметров неоднородных структур, состоящих из чередующихся тонких проводящих и диэлектрических слоев, на интерференционные картины, образованные при отражении от них электромагнитных волн. Такие структуры используются, например, для создания покрытий, обладающих заданными свойствами для заранее определенных диапазонов частот. В работах [9, 10] приведены результаты анализа влияния параметров материала металлической пленки на интерференцию оптического излучения, отраженного от структуры, состоящей из диэлектрической подложки и тонкой металлической пленки. В работе [15] приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований особенностей взаимодействия излучения микроволнового и оптического диапазонов с металлополупроводниковыми и металлодиэлектрическими структурами. В данной главе приводится анализ влияния параметров слоистой структуры на картину интерференции.

2.1. Интерференция оптического излучения при отражении от двухслойной структуры на краю одного из слоёв

В общем случае, рассматриваемая структура состоит из подложки толщиной t_2 с комплексным показателем преломления $\bar{n}_2 = n_2 + ik_2$ и нанесенным на неё слоем толщиной t_1 с комплексным показателем преломления $\bar{n}_1 = n_1 + ik_1$. При этом слой покрывает подложку не полностью и имеется четко выраженная его граница (рис. 2.5). Для простоты и наглядности расчетов, подложку будем считать бесконечно толстой или непрозрачной для оптического излучения. Это позволит нам не учитывать отражения от задней границы подложки.

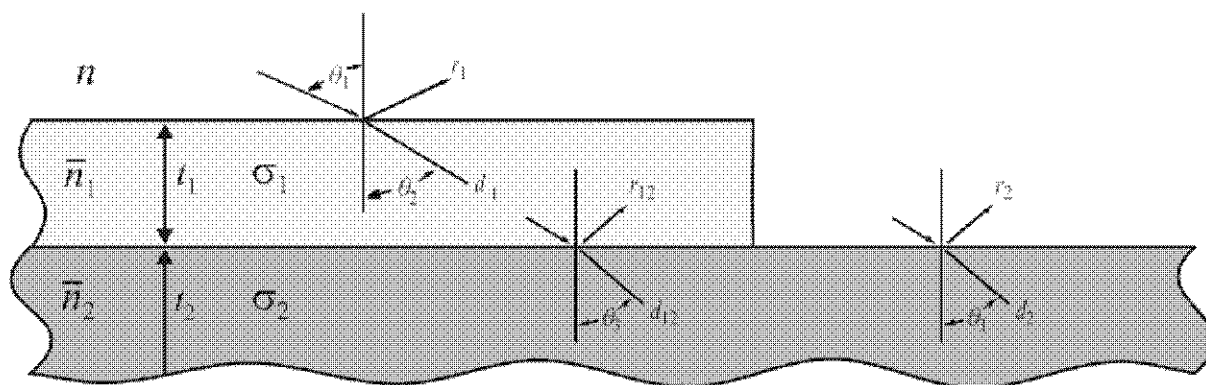


Рис. 2.5. Отражение оптического излучения от двухслойной структуры с ограниченным в плоскости структуры слоем.

Распределение интенсивности света при отражении монохроматической волны от структуры вблизи края слоя, определяется соотношением (1.0.), в котором I_1 и I_2 — соответственно интенсивности волн, отраженных от структуры слой–подложка и от чистой подложки, δ — представляет собой разность фаз между волной, отраженной от структуры слой–подложка, и волной, отраженной от чистой подложки.

Разность фаз δ определяется как изменением фазы $2\pi t_1/\lambda$ при прохождении волной расстояния, равного удвоенной толщине пленки t_1 , так и

изменением фазы при отражении волны от структуры вследствие конечной величины поглощения оптического излучения пленкой и подложкой [8–10, 16–19], если плёнка и/или подложка изготовлены из проводящих материалов:

$$\delta = \frac{2\pi t_1}{\lambda} + \varphi_0 - \varphi, \quad (2.1)$$

где φ — изменение фазы при отражении волны от структуры слой–подложка, φ_0 — изменение фазы при отражении волны от чистой подложки.

Фазовые сдвиги φ и φ_0 между отраженной и падающими волнами связаны с коэффициентами отражения r и r_2 от структуры слой–подложка и от чистой подложки соответственно следующим образом:

$$r = \rho \exp(i\varphi), \quad r_2 = \rho_0 \exp(i\varphi_0) \quad (2.2)$$

где ρ и ρ_0 — модули соответствующих коэффициентов отражения.

Рассматривая среду с комплексным коэффициентом преломления \bar{n}_1 (слой), расположенную между средами с показателями преломления n (воздух) и \bar{n}_2 (подложка) при нормальном угле падения волны на структуру, выражение для коэффициента отражения от структуры слой–подложка можно записать в виде [8]:

$$r = \frac{r_1 + r_{12} \exp(-2i\beta)}{1 + r_1 r_{12} \exp(-2i\beta)}, \quad (2.3)$$

где $r_1 = \frac{n - \bar{n}_1}{n + \bar{n}_1}$; $r_{12} = \frac{\bar{n}_1 - \bar{n}_2}{\bar{n}_1 + \bar{n}_2}$; $\beta = \frac{2\pi t_1 \bar{n}_1}{\lambda}$.

Следовательно, с учетом (2.2) фазу φ можно определить из решения уравнения

$$\rho \exp(i\varphi) = \frac{r_1 + r_{12} \exp(-2i\beta)}{1 + r_1 r_{12} \exp(-2i\beta)}. \quad (2.4)$$

В то же время, коэффициент отражения от чистой подложки с показателем преломления \bar{n}_2 записывается в виде:

$$r_2 = \frac{n - \bar{n}_2}{n + \bar{n}_2}. \quad (2.5)$$

а фаза φ_0 может быть определена из уравнения:

$$\rho_0 \exp(i\varphi_0) = \frac{n - \bar{n}_2}{n + \bar{n}_2}. \quad (2.6)$$

Анализируя выражения (2.0.), (2.3) и (2.4), можно сделать вывод, что разность фаз δ между волной, отраженной от структуры слой–подложка, и волной, отраженной от чистой подложки, зависит от геометрических и электрофизических параметров исследуемой структуры. Следовательно, его можно использовать для их измерения.

2.2. Особенности интерференции оптического излучения на краю проводящего покрытия, нанесенного на проводящую подложку

В современных микро-, нано-, акусто-, СВЧ- и оптоэлектронике широкое применение нашли слоистые структуры, в частности, структуры на основе металлических пленок нанометровой толщины, нанесенных на полупроводниковую или диэлектрическую подложку. Для таких структур характерны нелинейные зависимости величины разности фаз от толщины пленки, что необходимо учитывать при измерении толщин плёнок нанометровой толщины [9–10, 15].

Зависимости разности фаз δ от толщины металлической пленки t_1 с учетом комплексных коэффициентов преломления $\bar{n}_1 = n_1 + ik_1$ для металлических пленок алюминия, ванадия, меди, никеля, титана, хрома, нанесенных на кремниевые подложки с $\bar{n}_2 = n_2 + ik_2$, представлены на рис. 2.6 (пунктирные линии). На этом же рисунке приведена зависимость, соответ-

ствующая случаю равенства нулю значений φ_0 и φ (сплошная линия). Значения \bar{n}_1 и \bar{n}_2 некоторых материалов приведены в табл. 1 и 2 [20–22].

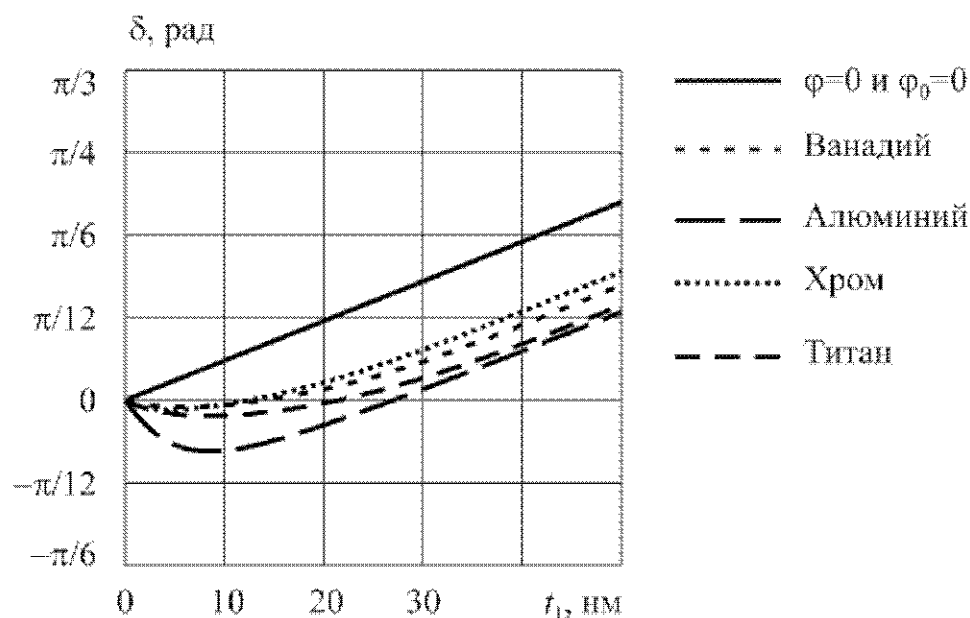


Рис. 2.6. Зависимость разности фаз δ от толщины металлической пленки

Немонотонный характер зависимости фазового сдвига от толщины, хорошо наблюдающийся на рис. 2.6, может быть объяснен следующим образом. На начальном участке пунктирных кривых при малых значениях толщины металлической пленки отражение от передней поверхности пленки мало (коэффициент отражения от поверхности пленки намного меньше коэффициента отражения от диэлектрического основания) и изменение фазы отраженной волны происходит вследствие прохождения света через оптически более плотную среду (увеличивается оптическая длина пути). Это приводит к отрицательному набегу фазы отраженной волны. Следует отметить, что за нулевое значение величины фазового сдвига принимается отражение волны от диэлектрической подложки, непокрытой металлической пленкой.

При дальнейшем увеличении толщины металлической пленки преимущественную роль начинает играть отражение от передней поверхности

пленки. Для больших значений толщины металлической пленки, когда глубина проникновения волны в пленку меньше ее толщины, наблюдается линейное изменение фазы отраженной волны с ростом толщины пленки.

Следует отметить, что в связи с зависимостью оптических параметров металлической пленки от толщины начальный участок зависимостей $r(t_1)$ и $\delta(t_1)$ может отличаться от расчетного.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ ПО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЕ НА ЕГО КРАЮ

3.1. Определение толщины диэлектрического или проводящего покрытия, нанесенного на диэлектрическую или проводящую подложку, по сдвигу интерференционных полос на краю покрытия

Как уже отмечалось в предыдущей главе, разность фаз δ между волной, отраженной от структуры слой–подложка, и волной, отраженной от чистой подложки, зависит от геометрических и электрофизических параметров исследуемой структуры. Следовательно, измерив экспериментально разность фаз δ , можно, решая уравнение (2.0.) с учетом выражений (2.3) и (2.4), определить один из электрофизических или геометрических параметров структуры слой–подложка, если все остальные параметры известны.

Для примера, рассмотрим метод определения толщины диэлектрического или проводящего покрытия, нанесенного на диэлектрическую или проводящую подложку. Уравнение (2.0.) можно переписать в виде:

$$t_1 = (\delta - \varphi_0 + \varphi(t_1)) \frac{\lambda}{2\pi}. \quad (3.1)$$

Экспериментально фазовый сдвиг волны δ может быть определен в интерферометре, зеркала которого расположены перпендикулярно направлению падения плоских волн, по величине смещения Δ центров системы интерференционных полос белого света, образованной по разные стороны от границы пленки, нанесенной на подложку:

$$\delta = \pi \frac{\Delta}{\Delta_\lambda}, \quad (3.2)$$

где Δ_λ – расстояние между центрами соседних интерференционных полос, расположенных по одну сторону от границы пленки.

С учетом (3.5) уравнение (3.0.) приобретает вид [15]:

$$t_1 = \left(\frac{\Delta}{\Delta_\lambda} - \frac{\varphi_0}{\pi} + \frac{\varphi(t_1)}{\pi} \right) \frac{\lambda}{2}. \quad (3.3)$$

Таким образом, измеряя смещение Δ центров системы интерференционных полос, образованной по разные стороны от границы пленки, нанесенной на подложку, и расстояние Δ_λ между центрами соседних интерференционных полос, расположенных по одну сторону от границы пленки, в результате решения уравнения (3.6) относительно t_1 с учетом выражений (2.3) и (2.4), можно определить толщину покрытия если остальные электрофизические параметры исследуемой структуры (показатели преломления и поглощения плёнки и подложки) известны.

3.2. Использование технологий обработки видеоизображений для анализа интерференционных картин

Интенсивное развитие электроники, начавшееся во второй половине двадцатого века, привело к мощному прогрессу в производстве систем регистрации, обработки и анализа изображений. Интерференционная картина может быть представлена в виде двумерного сигнала $F(x, y)$, который может быть зарегистрирован с помощью видеокамеры, сканера, цифрового

фотоаппарата и других устройств. Данный сигнал, преобразованный в цифровые коды с помощью аналого-цифровых преобразователей и представленный в виде двумерного массива, называется дискретным изображением. Решение научных и инженерных задач при работе с визуальными данными требует особых усилий, опирающихся на знание специфических методов, поскольку традиционная идеология одномерных сигналов и систем мало пригодна в этих случаях. Для обработки информации визуального характера широкое применение находят автоматизированные системы обработки изображений. Такая система может быть создана и для анализа интерференционных картин [15, 17, 18].

Точность измерений интерференционными методами зачастую определяется точностью наводки на центр интерференционных полос, по измерению положения которых и проводится расчет рельефа поверхности микрообъекта (см., например, выражение (3.6)). Применение современных методов обработки и анализа изображений позволяет как повысить точность интерференционных измерений [15], так и автоматизировать эти измерения [17, 18, 23]. Следовательно, построение автоматизированных систем анализа интерференционных изображений представляет значительный практический интерес.

Для примера, рассмотрим задачу обработки и анализа интерференционной картины, образующейся при отражении оптического излучения от структуры слой–подложка, в области края слоя, с целью определения толщины диэлектрического или проводящего покрытия, нанесенного на диэлектрическую или проводящую подложку. Типичная интерференционная картина при отражении от такой структуры, наблюдаемая с помощью интерферометра МИИ-4, представлена на рис. 3.7.

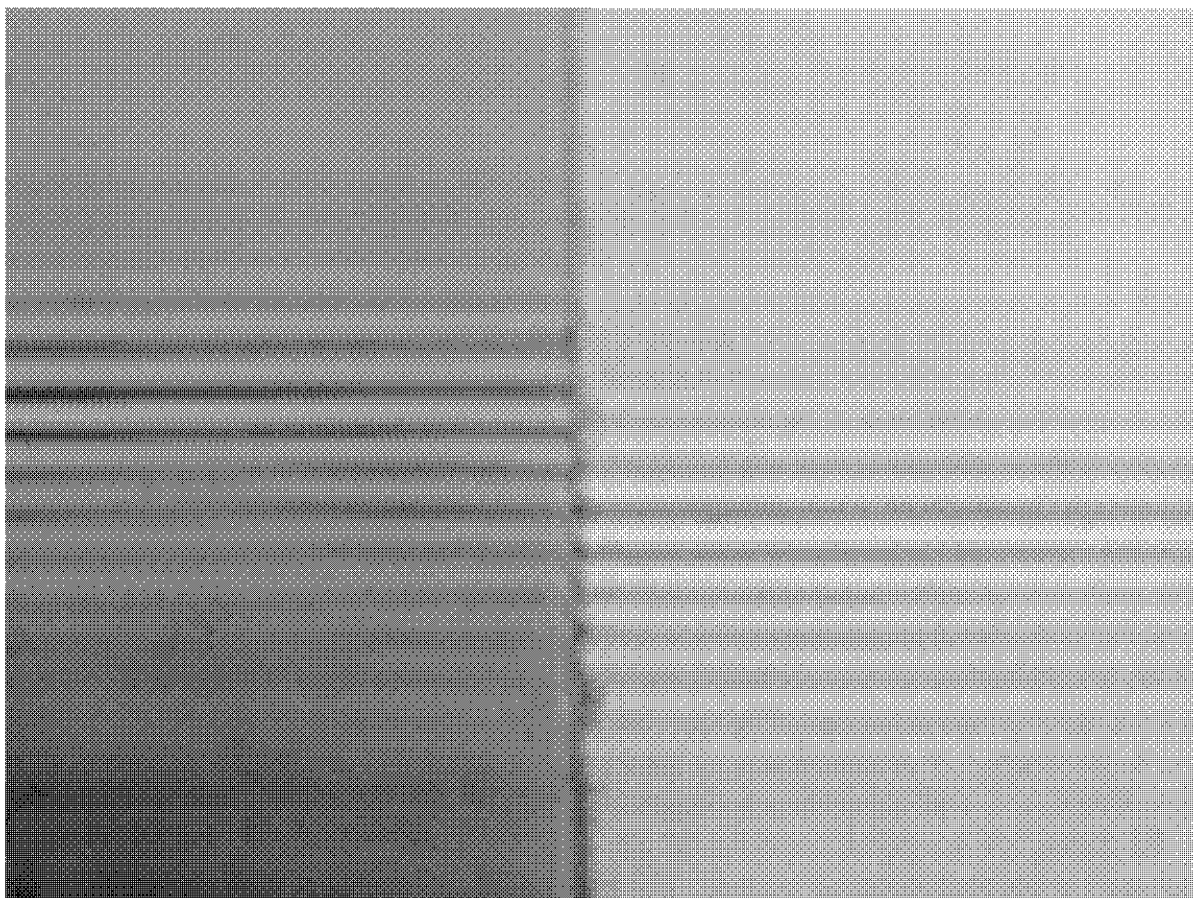


Рис. 3.7. Интерференционная картина при отражении оптического излучения от структуры "алюминиевая плёнка – кремниевая подложка" в области границы плёнки

В данном случае, автоматизированная система анализа интерференционных изображений, получив на вход такое изображение, на выходе должна выдать высоту "ступеньки", то есть толщину плёнки, нанесенной на подложку. Для этого, системе необходимо определить расстояние Δ_λ между центрами соседних интерференционных полос, расположенных по одну сторону от границы пленки, и смещение Δ центров системы интерференционных полос, образованной по разные стороны от границы пленки. При реализации такой системы необходимо решить следующие задачи:

1. Выделить на изображении границу плёнки и разбить изображение на две области – плёнку и подложку.

2. В каждой из областей выделить две первых, то есть наиболее ярких, интерференционных полосы и определить расстояние между ними.
3. В каждой из областей выделить первую интерференционную полосу и определить сдвиг между первыми интерференционными полосами в области плёнки и в области подложки.
4. Используя выражение (3.6), рассчитать высоту "ступеньки" (толщину покрытия).

Наиболее просто данные задачи решаются в интерактивном режиме с участием оператора [18]. Применение современных методов обработки и анализа изображений, а также технологий распознавания образов, позволяет решить данную задачу в полностью автоматическом режиме.

3.3. Измеритель толщин покрытий «МИИ-4 Видео»

Для измерения толщин покрытий интерференционным методом создан измеритель толщин покрытий «МИИ-4 Видео», базирующийся на микроинтерферометре Линника МИИ-4 [15, 17, 18]. Измеритель (рис. 3.8) включает микроинтерферометр Линника МИИ-4, в поле зрения окуляра которого наблюдается граница пленки структуры слой–подложка 4, совмещенная с системой интерференционных полос белого света. Измеряемая структура 4, закрепляется в держателе 5. Интерференционный сигнал от источника белого света 1 формируется на выходе микроинтерферометра, оптическая схема которого включает: микрообъектив 3, опорное зеркало 6, светоделительную пластину 2. С помощью видеокамеры 7 интерференционный сигнал вводится в компьютер 8 и анализируется с помощью специально разработанной программы. Путем поворота видеокамеры изображение исследуемой поверхности и системы интерференционных полос выбирается таким образом, чтобы положительный сдвиг интерференционных полос совпадал со смещением систем интерференционных полос при

перемещении исследуемой поверхности в направлении падения на нее излучения.

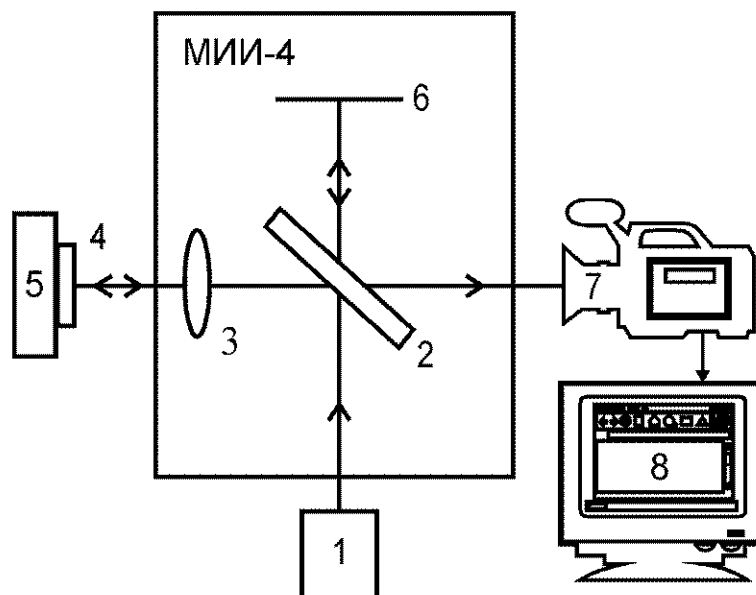


Рис. 3.8. Схема измерителя: 1 – источник белого света, 2 – светоделительная пластина, 3 – микрообъектив, 4 – измеряемая структура, 5 – держатель, 6 – опорное зеркало, 7 – видеокамера, 8 – компьютер, МИИ-4 – микроинтерферометр Линника

Программная часть измерительной системы включает специализированную программу "МИИ4.exe", функционирующую в среде *Windows* и осуществляющую анализ введенного изображения. На рис. 3.7 приведен пользовательский интерфейс специализированной программы, включающий изображение края пленки с наложенной системой интерференционных полос и систему измерительных визирных линий. Программа позволяет определять толщину пленки с учетом фазового сдвига при отражении оптического излучения. При этом фазовый сдвиг вычисляется после указания типа металлической пленки или задания ее параметров вручную. Для визуального контроля наводки программой на центр интерференционных полос слева и справа от изображения системы интерференционных полос выводится распределение интенсивности вдоль выбираемых поль-

зователем линий, перпендикулярных интерференционным полосам, на пленке и подложке.

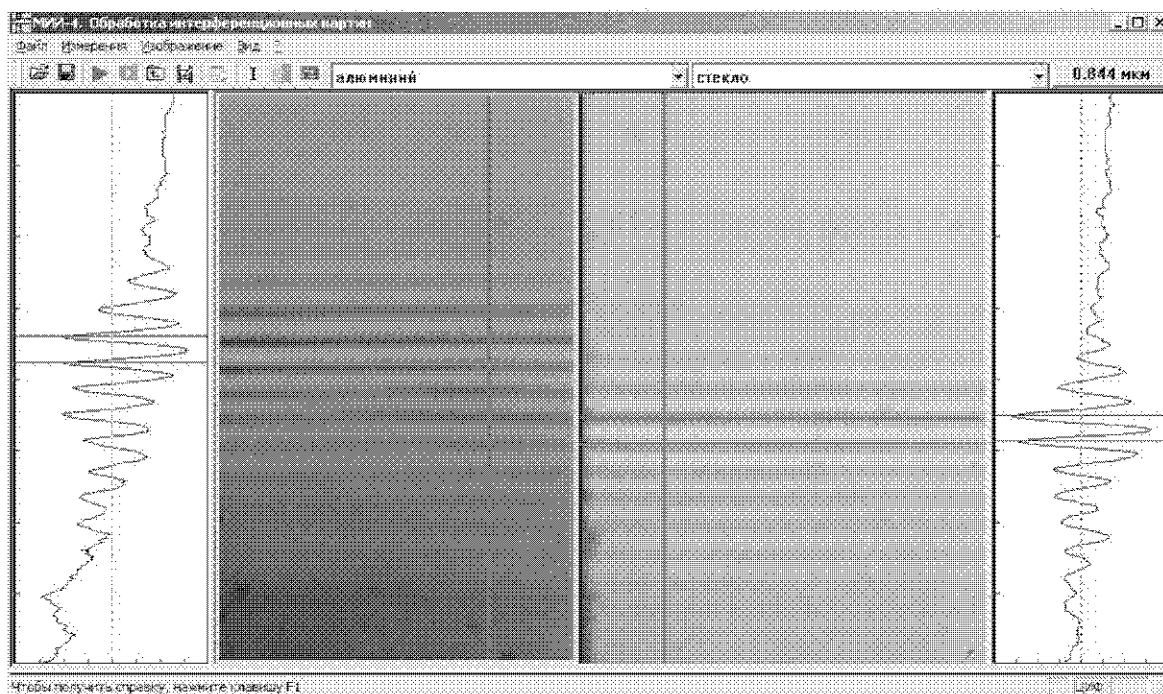


Рис. 3.4. Пользовательский интерфейс специализированной программы «измеритель толщин покрытий МИИ-4 Видео»

Погрешность измерения толщины пленки на подложке с использованием интерференционного метода, системы цифрового ввода и компьютерного анализа видеоизображения определяется погрешностью в определении положения минимумов интенсивности на интерференционной картине. Абсолютная погрешность в определении положения интерференционного минимума при разрешении фотокамеры 1024x768 точек, если в поле зрения находится не более трех минимумов, составляет 1,5 нм. Дополнительная погрешность в определении толщины может быть обусловлена зависимостью показателя преломления и показателя поглощения пленки от ее толщины в диапазоне 0–20 нм. При этом относительная погрешность ε измерений толщины пленки в диапазоне 10–200 нм составляет не более $\pm 8\%$ (рис. 3.8).

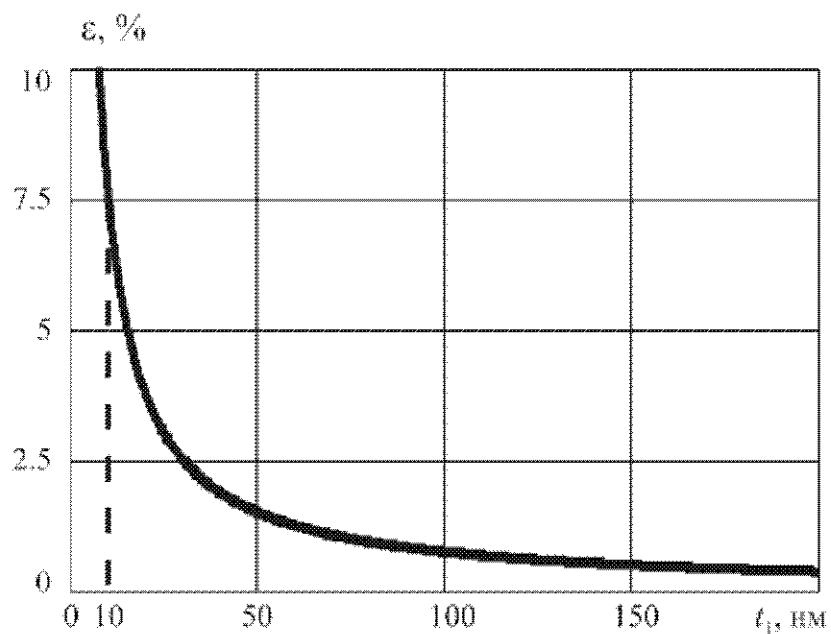


Рис. 3.5. Относительная погрешность измерений толщины пленки с использованием интерференционного метода

Использование такой методики определения значения и характера минимумов интенсивности излучения позволяет значительно повысить точность измерений, ускорить процесс проведения измерений и расширить диапазон контролируемых значений толщин пленок

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование особенностей взаимодействия излучения оптического диапазона с металлополупроводниковыми и металлодиэлектрическими структурами позволяет контролировать параметры металлических слоев в диапазоне толщин от 10 нм до 10 мкм. Применение современных методов обработки и анализа изображений к интерференционным картинам позволяет повысить точность, расширить диапазон измерений и номенклатуру измеряемых структур. Разработка пользовательского интерфейса к создаваемым программам анализа интерференционных картин позволяет достичь высокой точности и достоверности результатов измерений в нанометровом диапазоне значений толщин пленочных структур, автоматизировать процесс измерения.

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Лабораторная работа №1. Моделирование особенностей формирования интерференционной картины при отражении оптического излучения от проводящих структур

Цель работы. Освоение компьютерных методов расчета особенностей формирования интерференционной картины при отражении оптического излучения от проводящих структур.

Необходимое оборудование.

Персональный компьютер с программным обеспечением, позволяющим проводить математические расчеты (MathCAD, MatLAB, Mathematica, Pascal, Delphi, C++, C# или др.).

Задание к работе.

Разработать и реализовать программу для расчета зависимости от толщины слоя разности фаз (2.0.) между волной, отраженной от структуры слой–подложка, и волной, отраженной от подложки при известных элек-

трофизических параметрах структуры. Параметры структуры выбрать из таблиц 1 и 2 в Приложении 4.

Построить график зависимости разности фаз от толщины структуры для нескольких различных типов структур.

Контрольные вопросы.

1. Чем определяется разность фаз между волной, отраженной от структуры слой–подложка, и волной, отраженной от чистой подложки?
2. В чем отличие в расчете разности фаз при отражении от проводящих и непроводящих структур?
3. Где находят применение слоистые металлопроводниковые и металлодиэлектрические структуры?

Лабораторная работа №2. Измерение толщины металлического слоя, нанесенного на полупроводниковую или диэлектрическую подложку

Цель работы. Освоение интерференционных методов измерения толщин слоёв с применением автоматизированной системы обработки и анализа интерференционных изображений «МИИ-4 Видео».

Необходимое оборудование и измеряемые образцы.

1. Измерительная система «МИИ-4 Видео» в составе микроинтерферометра, цифровой видеокамеры и компьютера с установленным программным обеспечением для анализа интерференционных картин (рис. Л2.1).
2. Набор измеряемых структур — плёнок хрома толщиной 10, 20 и 50 нм, нанесенных на поликорговую подложку.
3. Набор измеряемых структур — плёнок титана толщиной 10, 20 и 50 нм, нанесенных на кремниевую подложку.

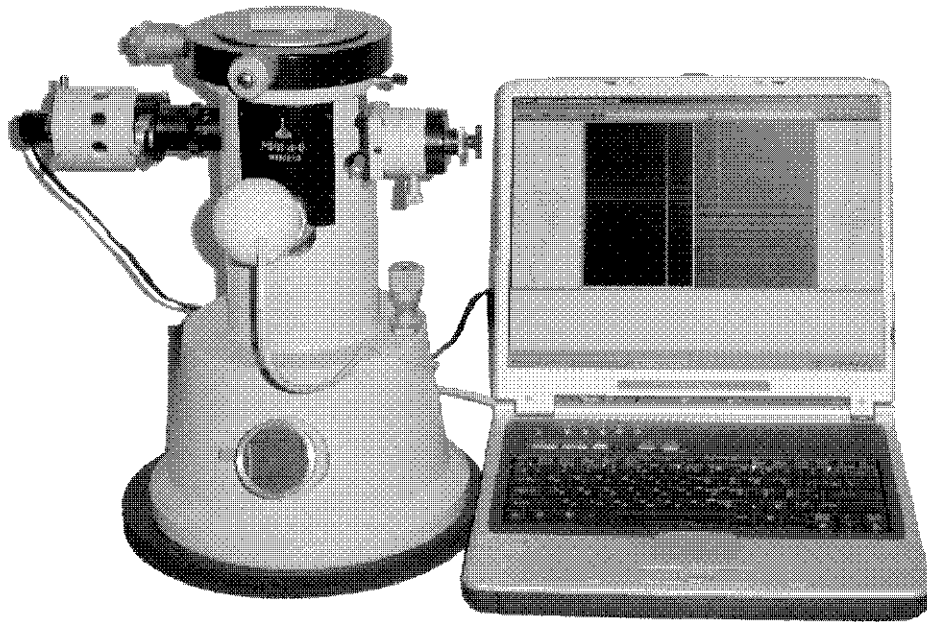







Рис. Л2.1. Измерительная система «МИИ-4 Видео»

Порядок работы с установкой.



1. Укрепить видеокамеру на микроинтерферометре. При этом следует убедиться в правильной ориентации видеокамеры: интерфейсный провод видеокамеры при установке камеры вместо окуляра микроинтерферометра МИИ-4 должен находиться слева, при этом логотип на видеокамере должен правильно читаться.
2. Подсоединить видеокамеру к USB-порту компьютера.
3. Включить видеокамеру.
4. Запустить программу *MIИ4.exe*.



Программа *MIИ4.exe* может работать в двух режимах: в режиме живого видео, когда изображение с видеокамеры непрерывно отображается на экране компьютера, и в режиме измерений, когда осуществляется обработка неподвижного изображения (кадра) и вычисляется толщина структуры по изгибу интерференционных полос. После запуска программы она находится в режиме живого видео (если видеокамера подключена к ком-

пьютеру и включена). Для перехода в режим измерений нужно нажать кнопку  или выбрать в меню *Изображение* пункт *Схватить* для получения стоп-кадра или же нажать кнопку  или выбрать в меню *Изображение* пункт *Открыть* для открытия файла изображения с диска. Для возврата в режим живого видео нужно нажать на кнопку . Для настройки параметров видеоизображения служит кнопка  и пункт *Настройка* меню *Изображение*. Для измерения толщин пленок следует использовать режим RGB-24, 640x480 точек. Для настройки микроинтерферометра удобнее использовать режим 320x240 точек, так как в режиме 640x480 видеокамера обеспечивает частоту смены кадров лишь 10 кадров в секунду. Визуальный интерфейс программы представлен на рис. 3.7.

5. Настроить микроинтерферометр: вывести в поле зрения видеокамеры границу пленки (ступеньку); ввести интерференционные полосы; поворачивая предметный столик микроинтерферометра и соответствующий винт настройки добиться перпендикулярности полос границе пленки; поворачивая видеокамеру обеспечить горизонтальность интерференционных полос (а следовательно и вертикальность границы).
6. Захватить изображение, нажав кнопку  или выбрав в меню *Изображение* пункт *Схватить*. Программа предложит сохранить кадр в файле. Вы можете сделать это введя имя файла и нажав кнопку *Сохранить*, или отказаться от сохранения, нажав кнопку *Отмена*. Программа перейдет в режим измерений.

Порядок измерений.

1. Захватить изображение с видеокамеры (кнопка ) или открыть полученное ранее изображение с диска (кнопка ). Изображение отображается в центральном окне программы (рис. 3.7).

2. Выбрать материал проводящей пленки и диэлектрической подложки в выпадающих списках на панели инструментов.
3. Нажать кнопку  для перехода в режим отметки границы. Отметьте курсором положение вертикальной границы раздела (ступеньки). Граница отобразится на экране вертикальной синей линией.
4. С одной стороны от границы находится подложка, а с другой - пленка. Местонахождение подложки выбирается кнопкой  и отмечается на изображении желтой рамкой. Если сторона, на которой находится подложка выбрана неверно, результат расчета толщины будет неправильным.
5. Справа и слева от границы появятся вертикальные зеленые линии, положение которых можно изменить, щелкнув мышкой в желаемой точке изображения. Вдоль этих линий снимается профиль яркости изображения, анализируется, выделяются в автоматическом режиме основной (красная линия) и второй (розовая линия) интерференционные минимумы, рассчитывается толщина пленки. Рассчитанная толщина пленки отображается на табло в правой части панели инструментов. Оператору следует проследить, чтобы профили не попали на дефекты изображения, а в случае, если это произошло, изменить положения профиля. Кроме того, следует убедиться, что интерференционные минимумы, выделенные в автоматическом режиме справа от границы, соответствуют минимумам слева от границы. Если имеет место несоответствие (то есть выделены не те минимумы) можно попробовать изменить положение профилей яркости на изображении. Если это не помогает, следует вручную указать положение главного (левая кнопка мыши) и второго (правая кнопка мыши) минимума в окнах профилей лева и справа от окна изображения.

Задание к работе.

С помощью автоматизированной системы обработки и анализа интерференционных изображений «МИИ-4 Видео» измерить толщины пленок на предлагаемых образцах.

Контрольные вопросы.

4. Рассказать об устройстве и принципе действия микроинтерферометра МИИ-4.
5. Каковы преимущества компьютерной обработки и анализа интерференционных изображений?
6. Является ли автоматизированная системы обработки и анализа интерференционных изображений «МИИ-4 Видео» интерактивной или полностью автоматической?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нагибина И.М. Интерференция и дифракция света. - Л.: Машиностроение, 1985. - 332с.
2. Гинзбург В.М., Степанов Б.М. Голографические измерения. - М.: Радио и связь, 1981. 296 с.
3. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл - интерферометрия. - М.:Мир, 1986. 328 с.
4. Коронкевич В.П., Соболев В.С., Дубинцев Ю.Н. Лазерная интерферометрия - Новосибирск, Наука. 1983. 212 с.
5. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах.- М.:Мир, 1973.343 с.
6. Вольф Э., Мандель Л. Когерентные свойства оптических полей. //УФН. - 1965. - Т.87. - В.3. - С.491-521.
7. Уотерс Д.П. Голографическая интерферометрия / В кн.: Голографические неразрушающие исследования. - М.: Машиностроение, 1979. С.102-118.
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
9. Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Особенности интерференции на границе тонкая металлическая пленка - диэлектрическое основание // Журнал технической физики. 1994. Т.64. №5. С.72–77.

10. Усанов Д.А., Куренкова О.Н., Скрипаль А.В. Особенности отражения лазерного излучения от структур диэлектрик-металл // Оптика и спектроскопия. 1987. Т.63. №6. С.1320–1324.
11. Бабе Г.Д., Гусев Е.Л. Математические методы оптимизации интерференционных фильтров. - Новосибирск: Наука. Сибир.отд., 1987. 212 с.
12. Беляков В.А. Дифракционная оптика периодических сред сложной структуры. - М.:Наука. Гл.ред. физ.-мат.лит., 1988. 256 с.
13. Алимин Б.Ф., Торганов В.А. Методы расчета поглотителей электромагнитных волн // Зарубежная радиоэлектроника. 1976. №3. С.29–57.
14. Коломийцов Ю.В., Духопел И.И., Инюшин А.И., Артемьев И.В. Оптические приборы для измерения линейных и угловых величин в машиностроении. М.: Машиностроение, 1964. 256 с.
15. Чаплыгин Ю.А., Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Семёнов А.А., Абрамов А.В. Радиоволновые и оптические измерения толщины и электропроводности металлических пленок на полупроводниковых и диэлектрических подложках // Известия вузов. Электроника. 2005. №1. С. 68–77.
16. Метфессель С. Тонкие пленки, их изготовление и измерение. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 272 с.
17. Патент РФ. № 2233430. Способ видеоизмерения толщины плёнки / Д.А. Усанов, Ан.В. Скрипаль, Ал.В. Скрипаль, А.В.Абрамов, А.А.Сергеев, А.Н.Абрамов, Т.В.Коржукова. – Оpubл. 27.07.2004, Бюл. №21.
18. Свидетельство на полезную модель №28400. Устройство для видеоизмерения толщины пленки / Д.А.Усанов, Ан.В.Скрипаль, Ал.В.Скрипаль, А.В.Абрамов, А.А.Сергеев, А.Н.Абрамов, Т.В.Коржукова. – Оpubл. 20.03.2003, Бюл. № 8.

-
19. Пат. РФ 1742612 МКИ G 01 В 11/06. Способ определения толщины пленки/ Д.А.Усанов, В.Д.Тупикин, А.В.Скрипаль. – Оpubл. 23.06.92, Бюл. 23.
20. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. Оптические постоянные природных и технических сред: Справочник. – Л.: Химия, 1984. – 216 с.
21. Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti and W in the infrared and far infrared / M.A. Ordal, L.L. Long, R.J. Bell et al. // *Applied Optics*. – 1983. – Vol. 22, № 7. – P. 1099–1119.
22. Optical constants for thin films of Ti, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Hf, Ta, W, Re, Ir, Os, Pt, and Au from 24 Å to 1216 Å / D.L. Windt, W.C. Cash, J.M. Scott et al. // *Applied Optics*. – 1988. – Vol. 27, № 2. – P. 246–278.
23. Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Абрамов А.В. Видеотехнологии автоматизированного контроля: Учеб. пособие для студентов физ. фак. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2001. – 96 с.

Приложение 1. Программа для пакета *MathCAD* для расчета зависимости фазы отраженного сигнала

В данном приложении приводится пример программы, разработанной для математического пакета *MathCAD*, для расчета зависимости от толщины слоя разности фаз между волной, отраженной от структуры слой–подложка, и волной, отраженной от подложки. Курсивом выделены пояснения к программе.

Длина волны зондирующего излучения.

$$\lambda := 500 \cdot 10^{-9}$$

Коэффициент отражения от границы между средами с показателями преломления n и n_2 .

$$r_0(n, n_2) := \frac{n - n_2}{n + n_2}$$

Коэффициент отражения от границы между средами с показателями преломления n и n_1

$$r_1(n, n_1) := \frac{n - n_1}{n + n_1}$$

Коэффициент отражения от границы между средами с показателями преломления n_1 и n_2 .

$$r_2(n_1, n_2) := \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2},$$

Геометрический набег фазы.

$$\beta(t_1, n_1) := \frac{2\pi \cdot t_1 \cdot n_1}{\lambda}$$

Коэффициент отражения от структуры.

$$r(n, n_1, n_2, t_1) := \frac{r_1(n, n_1) + r_2(n_1, n_2) \cdot e^{2 \cdot i \cdot \beta(t_1, n_1)}}{1 + r_1(n, n_1) \cdot r_2(n_1, n_2) \cdot e^{2 \cdot i \cdot \beta(t_1, n_1)}}$$

Фаза коэффициент отражения от структуры.

$$\varphi(n, n_1, n_2, t_1) := \operatorname{atan} \left(\frac{\operatorname{Im}(r(n, n_1, n_2, t_1))}{\operatorname{Re}(r(n, n_1, n_2, t_1))} \right)$$

Фаза коэффициент отражения от свободной подложки.

$$\varphi_0(n, n_2) := \operatorname{atan} \left(\frac{\operatorname{Im}(r_0(n, n_2))}{\operatorname{Re}(r_0(n, n_2))} \right)$$

Суммарный набег фазы.

$$\delta(n, n_1, n_2, t_1) := \frac{2 \cdot \pi \cdot t_1}{\lambda} + \varphi_0(n, n_2) - \varphi(n, n_1, n_2, t_1)$$

Комплексный показатель преломления алюминия.

$$n_{1a} := 0.62 + i \cdot 4.8$$

Комплексный показатель преломления ванадия.

$$n_{1va} := 3.20 + i \cdot 3.57$$

Комплексный показатель преломления титана.

$$n_{1ti} := 2.54 + i \cdot 3.43$$

Комплексный показатель преломления хрома.

$$n_{1cr} := 3.452 + i \cdot 4.85$$

Показатель преломления воздуха.

$$n := 1$$

Комплексный показатель преломления кремния (подложка).

$$n_2 := 4.24 + i \cdot 0.47$$

**Приложение 2. Фрагмент программы на C++ для расчета
толщины покрытия по величине сдвига
интерференционных полос на границе**

Для определения толщины покрытия по величине сдвига интерференционных полос на границе необходимо решить уравнение (3.6). В данном приложении приводится фрагмент программы на языке C++, разработанной для автоматизации интерферометрических измерений и входящей в состав комплекса, описанного в разделе 3.3.

Курсивом выделены пояснения к программе

```
//СМI4Doc - класс, инкапсулирующий рабочие вычисления
double СМI4Doc::CalculatedD()
{
    double n,k;
    //m_aFilms - массив, содержащий параметры пленок,
    //хранящихся в базе данных
    // If - индекс выбранной пленки
    n = m_aFilms[If].n;
    k = m_aFilms[If].k;
    double lambdaMkm = m_lambda * 1e+6;

    // Начальное приближение - толщина пленки,
    // рассчитанная из геометрического набега фаз.
    m_dD =
        lambdaMkm / 2 *
        ( 0.5*( fabs(double(m_iX1-m_iX3))/
                fabs(double(m_iX1-m_iX2)))
        + 0.5*( fabs(double(m_iX4-m_iX2))/
                fabs(double(m_iX3-m_iX4))) );
```

```
// Решение уравнения  $F(x)=0$   
// методом половинного деления  
if (!( (n==0) || (k==0) ))  
{  
    double eps = 1e-15;  
    double a,b,c;  
    double h0,h;  
    double fa,fb,fc;  
    h0 = m_dD*1e-6;  
    a = h0;  
    b = 1000*h0;  
    c = (a+b)/2;  
    while (fabs(a-b)>eps)  
    {  
        fa = F(a);  
        if (fa==0)  
        {  
            h = a;  
            break;  
        }  
  
        fb = F(b);  
        if (fb==0)  
        {  
            h = b;  
            break;  
        }  
  
        if (fa*fb>0)  
        {  
            h = -1;  
            break;  
        }  
  
        fc = F(c);  
        if (fc==0)  
        {  
            h = c;  
            break;  
        }  
    }  
}
```

```

        if (fa*fc<0)
            b = c;

        if (fb*fc<0)
            a = c;

        h = c = (a+b)/2;
    }

    m_dD = h*1e+6;
}
return m_dD;
}

// Решаемая функция
double CMI4Doc::F(double h)
{
    double n,k,n1,n3;
    double a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4;
    double E1,psi,fi;

    double pi = 3.14;

    n1 = 1.0;

    //m_aFilms - массив, содержащий параметры пленок,
    //хранящихся в базе данных
    // If - индекс выбранной пленки
    n = pDoc->m_aFilms[If].n;
    k = pDoc->m_aFilms[If].k;

    //m_aSubstrates- массив, содержащий параметры
    //подложек, хранящихся в базе данных
    // Is - индекс выбранной подложки
    n3 = pDoc->m_aSubstrates[Is].n;

    a1 = (n1*n1-n*n-k*k)/((n1+n)*(n1+n)+k*k);
    a2 = (n*n-n3*n3-k*k)/((n3+n)*(n3+n)+k*k);
    b1 = 2*n1*k/((n1+n)*(n1+n)+k*k);
    b2 = 2*n3*k/((n3+n)*(n3+n)+k*k);

    E1 = exp(-4*pi*h/m_lambda);

```

```

psi = 4*pi*h*n/m_lambda;

a3 = a1 + a2*E1*cos(psi) - b2*E1*sin(psi);
a4 =
    1 +
    E1*(a2*b1-a1*b2)*sin(psi) +
    E1*(a1*a2+b1*b2)*cos(psi);

b3 = a2*E1*sin(psi) + b2*E1*cos(psi) - b1;
b4 =
    E1*(a1*a2+b1*b2)*sin(psi) +
    E1*(a1*b2-a2*b1)*cos(psi);

// Фаза отраженной от структуры волны
fi = atan((a4*b3-a3*b4)/(a3*a4+b3*b4));

double H,dX,P;
dX = double(m_iX3-m_iX1+m_iX4-m_iX2)/2;
P = double(m_iX2-m_iX1+m_iX4-m_iX3)/2;

//Фаза,
//расчитываемая по сдвигу интерференционных полос
H = fabs(dX/P);

double res;
res = h - m_lambda/2 * ( fi/2/pi + H);
return res;
}

```

Приложение 3. Свидетельство на полезную модель.



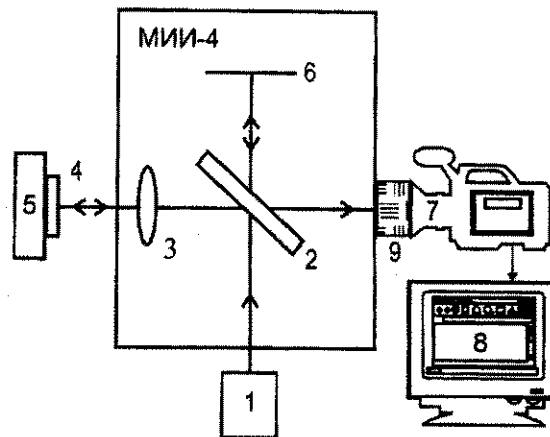
РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО
ПО ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(19) RU (11) 28391 (13) U1
(51) 7 G 01 B 11/06

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ
к свидетельству Российской Федерации
(титульный лист)

<p>1</p> <p>(21) 2002132485/20 (24) 10.12.2002 (46) 20.03.2003 Бюл. № 8 (72) Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Сергеев А.А., Абрамов А.Н., Коржукова Т.В. (71) (73) Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского Адрес для переписки: 410026, г. Саратов, ул. Московская, 155, СГУ, ПЛЮ, пат. пов. Н.В. Романовой, рег. № 325 (54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ВИДЕОИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ (57) Устройство для измерения толщины пленки, нанесенной на часть подложки, включающее</p>	<p>2</p> <p>последовательно расположенные источник излучения и светоделительную пластину для разделения пучка излучения на два канала, в одном из которых расположен микрообъектив, а в другом - опорное зеркало, механизм перемещения подложки, фотоприемную камеру, расположенную на пути выхода излучения, при этом все элементы устройства расположены на общем основании, отличающееся тем, что в него введены ЭВМ, фотоприемная камера выполнена в виде матрицы пространственного разрешения, снабжена подвижным переходным кольцом и подключена к ЭВМ через USB порт.</p>	<p><u>RU</u> <u>28391</u> <u>U1</u></p>
---	--	---

RU
28391
U1



Приложение 4. Электрофизические параметры некоторых пленок и подложек

В данном приложении приводятся электрофизические параметры некоторых металлических пленок и полупроводниковых и диэлектрических подложек, использующихся в лабораторном практикуме.

Таблица 1

Значение коэффициентов преломления для металлических пленок

Металлическая пленка	n_1	k_1
Алюминий	0,62	4,80
Ванадий	3,20	3,57
Медь	0,88	2,42
Никель	1,92	3,61
Титан	2,54	3,43
Хром	3,45	4,85

Таблица 2**Значение коэффициентов преломления для подложек**

Подложка	n_2	k_2
Арсенид галлия	4,30	0,38
Кремний	4,24	0,47
Стекло	1,52	–
Кварцевое стекло	1,55	–
Поликор	1,69	–
Сапфир	1,77	–

Учебное издание

Усанов Дмитрий Александрович,
Скрипаль Анатолий Владимирович,
Скрипаль Александр Владимирович,
Абрамов Антон Валерьевич

**ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ
ТОЛЩИНЫ НАНОМЕТРОВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ**

Учебное пособие

для студентов факультета нано- и биомедицинских технологий

Форма издания: Электронная