

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

**ОБОРУДОВАНИЕ
И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ
МИКРОРЕЛЬЕФА
ДИФРАКЦИОННЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2007

УДК 535.42
ББК 22.343
О 224



**Инновационная образовательная программа
"Развитие центра компетенции и подготовка
специалистов мирового уровня в области аэрокос-
мических и геoinформационных технологий"**

Авторы: А.В.Волков, А.Г. Саноян, С.А. Бородин, А.Н. Агафонов.

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук, профессор В.В. Ивахник,
д-р физ.-мат. наук, профессор И.П. Завершинский.

О 224 **Оборудование и методы контроля микрорельефа дифракционных оптических элементов:** учеб.пособие / [А.В.Волков и др.]. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 80 с.: ил.

ISBN 978-5-7883-0627-8

Рассмотрены теоретические основы дифракционных оптических элементов в части формирования требований к технологическим процессам создания необходимого микрорельефа оптических элементов. Представлен ряд материалов, связанных с метрологическим обеспечением технологических процессов изготовления дифракционных оптических элементов.

Пособие предназначено для студентов и аспирантов, специализирующихся в области создания элементов конструкций микрооптики.

УДК 535.42
ББК 22.343

ISBN 978-5-7883-0627-8

© А.В.Волков, А.Г.Саноян,
С.А.Бородин, А.Н.Агафонов, 2007
© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2007

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. Требования к параметрам микрорельефа	
дифракционных оптических элементов.....	7
1.1. Фазовые функции оптических элементов и границы зон	7
1.2. Дискретизация и квантование фазовой функции микрорельефа	
дифракционных оптических элементов	11
1.3. Специфика технологии формирования	
фазового микрорельефа.	17
1.4. Подготовка поверхности подложки перед формированием	
микрорельефа дифракционных оптических элементов	21
2. Основные операции технологического контроля при создании	
микрорельефа дифракционных оптических элементов.....	27
2.1. Методы контроля степени чистоты диэлектрических оснований	
дифракционных оптических элементов	27
2.1.1. Метод окунания.....	27
2.1.2. Метод компенсации.....	28
2.1.3. Оптические методы.....	29
2.1.4. Триботехнический метод.....	31
2.1.5. Контроль физической чистоты поверхности подложек....	33
2.1.6. Контроль чистоты поверхности подложки по критерию	
площади калиброванной капли жидкости	34
2.1.7 Комбинированные методы контроля чистоты поверхности	35
2.2. Контроль структуры конструкционных материалов и покрытий	
методом растровой электронной микроскопии	44
2.2.1. Физические основы растровой электронной микроскопии	44
2.2.2. Устройство и работа растрового электронного микроскопа	49
2.2.3. Подготовка объектов для исследований	
и особые требования к ним	53

2.2.4. Технические возможности	
растрового электронного микроскопа	54
2.2.5. Области применения	
растрового электронного микроскопа	54
2.3. Методы контроля геометрических характеристик микрорельефа	
дифракционных оптических элементов.....	57
2.3.1. Механические средства контроля	57
Оптические средства контроля.....	58
2.4. Сканирующие зондовые микроскопы.	68
2.4.1. Сканирующий зондовый микроскоп.....	68
2.4.2. Исследование поверхности твердых тел	
методом сканирующей туннельной микроскопии	71
Список литературы.....	74
Приложение №1. Задачи и упражнения	75
По разделу №1.....	75
По разделу № 2.....	76

ВВЕДЕНИЕ

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) широко используются в научно-технической и производственной практике и в конструктивном отношении представляют собой зонную пластинку с фазовым микрорельефом, отображающим необходимую фазовую функцию. Под фазовой функцией оптического элемента следует понимать функцию, представляющую зависимость величины набега фазы от пространственных координат, создаваемой оптическим элементом в некоторой точке пространства. Характерной особенностью микрорельефа ДОЭ, с конструктивно-технологической точки зрения, является то, что он реализуется из совокупности микроструктур, характеристические размеры которых сравнимы с длиной волны используемого оптического излучения. Последнее обстоятельство, вкуче с необходимостью обеспечения заданной точности воспроизведения геометрического профиля микрорельефа, определяет требования к разрешающей способности технологических процессов на уровне 0.1 – 1.0 мкм.

В этой связи особое внимание специалистов в области дифракционной оптики привлекают технологические методы формирования микрорельефа, основанные на достижениях и оборудовании, используемых при создании устройств микроэлектроники. Определяющими факторами, при рассмотрении вопроса о выборе оптимальной технологической базы являются следующие основные моменты:

- близость областей определения геометрических размеров ДОЭ и элементов конструкций современных микросхем;
- практическое совпадение требований к пространственному разрешению в топологических элементах устройств;
- высокий уровень автоматизации технологического оборудования, способствующая реализации сложных топологических структур в пределах значительных площадей поверхности элементов конструкций;
- возможность получения многих геометрических градаций фазовой функции микрорельефа, дискретного и гладкого типа;
- доступность технологического оборудования микроэлектроники в экономическом и территориальном плане;
- высокая степень надежности автоматизированных технологических комплексов, обеспечивающая статистическую устойчивость продукции;
- возможность использования материалов, нашедших широкое распространение в практике создания устройств микроэлектроники;
- наличие автоматизированных средств контроля за параметрами технологических процессов и используемых материалов.

Высокая степень автоматизации технологических процессов микроэлектроники позволяет говорить об автоматизированном проектировании и изготовлении дифракционного микрорельефа оптических элементов. Такое проектирование включает в себя не только выбор специальных методов, учитывающих технологические ограничения, но и

возможность итерационной оптимизации важнейших параметров ДОЭ на основе результатов контроля качества получаемого микрорельефа и эффективности работы ДОЭ в оптической схеме. При этом выбор размера, формы, используемого материала, пространственного разрешения проектируемого микрорельефа (и соответственно выбор технологий) определяется как задачами, стоящими перед ДОЭ, так и оптическим диапазоном работы ДОЭ. Например, возможные границы пространственного разрешения дифракционной решетки могут лежать в пределах от $0,25 \text{ мм}^{-1}$ в ИК и субмиллиметровом диапазоне и до 1200 мм^{-1} в УФ.

На современном этапе развития технологии изготовления ДОЭ широко применяются средства автоматизированного контроля параметров микрорельефа и формируемых на его основе ДОЭ. Контрольные операции осуществляются на всех этапах изготовления оптических элементов и включают в себя следующие моменты:

1. Входной контроль материалов и полуфабрикатов. Это контроль качества материалов подложек, металлов, неорганических продуктов (растворителей, щелочи, кислот). Контроль параметров оборудования, стекол, пластин с фотоэмульсией и т.п.
2. Контроль среды, энергоносителей, оборудования. Сюда относится контроль температуры, влажности, давления, запыленности среды; контроль чистоты воды; чистоты, состава, давления и скорости потока газов; температуры рабочих зон установок и оборудования.
3. Контроль технологических операций: проверка физической и химической чистоты поверхности подложек, контроль качества изготовления фотошаблонов (на разных стадиях изготовления), контроль режимов напыления и травления, контроль параметров микрорельефа.
4. Контроль геометрических и оптических параметров ДОЭ с целью установления их соответствия фазовой функции.

В настоящем пособии рассматриваются контрольно-измерительные методы и оборудование, используемые в практике создания ДОЭ. В технологической практике создания ДОЭ используется весьма широкий спектр контрольно-измерительных операций. Подавляющее большинство оговоренных контрольно-измерительных операций «встроено» в технологическое оборудование и не составляет предмета настоящего рассмотрения. Ввиду ограниченного объема настоящего учебного пособия, в настоящем разделе рассматривается всего два типа контрольно-измерительных операций, в значительной мере ответственных за качество микрорельефа ДОЭ. К их числу следует отнести определение :

- 1) степени чистоты поверхности исходных подложек, на которых производится нанесение микрорельефа ДОЭ;
- 2) геометрических характеристик микрорельефа ДОЭ, на предмет их соответствия требованиям к параметрам фазовой функции ДОЭ.

1. ТРЕБОВАНИЯ К ПАРАМЕТРАМ МИКРОРЕЛЬЕФА ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

1.1. Фазовые функции оптических элементов и границы зон

Как отмечалось выше, ДОЭ представляет собой зонную пластинку с дифракционным микрорельефом, отображающим фазовую функцию. На этапе проектирования ДОЭ определяется аналитический вид фазовой функции $\varphi(x, y)$ зонной пластинки. Рассмотрим вкратце этот вопрос, поскольку он имеет самое непосредственное отношение к обеспечению требований к точностным характеристикам технологических процессов создания ДОЭ.

Традиционный (макроскопический) оптический элемент характеризуется гладкой фазовой функцией $\varphi(x, y)$, где (x, y) — поперечные координаты точки в плоскости оптического элемента (см. рис. 1.1., на котором, в качестве примера отобразена фазовая функция обычной сферической линзы).

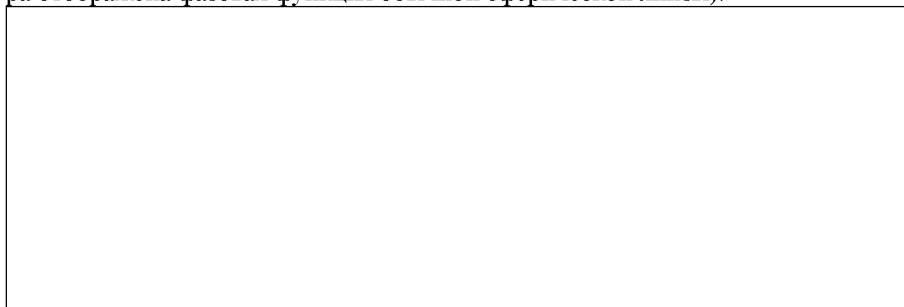


Рисунок 1.1. Фазовая функция сферической линзы

При освещении оптического элемента пучком света с комплексной амплитудой $W_0(\vec{u})$ непосредственно за оптическим элементом формируется поле:

$$W(\vec{u}) = \exp[k\rho(\vec{u})]W_0(\vec{u}). \quad (1.1.1)$$

Толщина традиционного оптического элемента H может составлять несколько тысяч длин волн. При этом значения фазы φ лежат в интервале от 0 до тысяч единиц 2π .

С учетом того, что комплексная экспонента в выражении (1.1.1) является периодической функцией с периодом 2π , фаза может быть приведена к интервалу $[0, 2\pi]$.

Приведение к интервалу проводится согласно выражению

$$\Phi = \text{mod}_{2\pi} \varphi, \quad (1.1.2)$$

где $\text{mod}_{2\pi} \varphi = \varphi - 2\pi j$,

при $j2\pi \leq \varphi \leq (j+1)2\pi$, $j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

В ряде случаев, исходя из практических соображений, может оказаться целесообразным привести фазу к более широкому интервалу $[0, 2\pi m]$ по формуле

$$\Phi = \text{mod}_{2\pi m} \varphi, \quad (1.1.3)$$

где обычно параметр m имеет значение в диапазоне величин $1 - 10^2$.

Эквивалентность исходной гладкой (в рассматриваемом случае сферической) фазы φ и приведенной к интервалу кусочно-аппроксимированной фазы выражается соотношением вида

$$\exp(i\Phi) = \exp(i\varphi). \quad (1.1.4)$$

Уравнение фазовой функции представленной выше сферической линзы в параксиальном приближении имеет вид

$$\varphi(x, y) = \varphi(r) = -k \frac{x^2 + y^2}{2f} \quad \text{при } r \leq \frac{D}{2}, \quad (1.1.5)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - модуль волнового числа; f - фокусное расстояние линзы; D - диаметр линзы; $r = \sqrt{(x^2 + y^2)}$ - текущая радиальная координата.

Приведение фазовой функции (1.1.5) плоской сферической линзы к интервалу $[0, 2\pi]$ представлено на рис. 1.2.

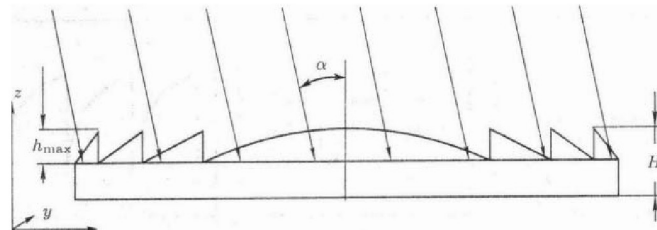


Рисунок 1.2. Приведение фазовой функции плоской сферической линзы к интервалу $[0, 2\pi]$

Если материал линзы имеет коэффициент преломления n , то максимальная высота микрорельефа составит

$$h_{\max} = \frac{\lambda}{n-1} \quad (1.1.6)$$

и имеет порядок длины волны используемого оптического излучения.

Учитывая осевую симметрию плоской сферической линзы, функция профиля ее микрорельефа определяется согласно выражению

$$h(r) = \frac{\lambda}{n-1} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \text{mod}_{2\pi} \varphi(r). \quad (1.1.7)$$

Радиусы кольцевых зон (зоны Френеля, см. рис. 1.2.) могут быть определены из соотношения

$$\varphi(r_j) = -2\pi j. \quad (1.1.8)$$

$$\varphi(r_j) = -2\pi j. \quad (1.1.9)$$

Учитывая (1.1.5) для радиусов зон Френеля имеем

$$r_j = \sqrt{(2\lambda \times f \times j)}. \quad (1.1.10)$$

Число полных кольцевых зон j_0 на зонной пластинке определяется из условия $r_{j_0} \leq \frac{D}{2}$ и удовлетворяет соотношению

$$j_0 = \left\lfloor \frac{D^2}{8\lambda f} \right\rfloor, \quad (1.1.11)$$

где символ $\lfloor \rfloor$ - означает целую часть числа с округлением в меньшую сторону.

Ширина зон Френеля плоской сферической линзы

$$\Delta_j = r_j - r_{j-1}, \quad j = 1, 2, \dots \quad (1.1.12)$$

является переменной величиной и уменьшается к периферии сферической линзы с ростом параметра j .

Характерным параметром, с конструктивно-технологической точки зрения, является ширина самой узкой зоны, определяющей требования к технологическому оборудованию, в части разрешающей способности.

В более общем случае ДОЭ, с фазовой функцией $\varphi(x, y)$, можно определить ширину наиболее узкой зоны микро рельефа с максимальной фазовой высотой $2\pi m$. Используя в пределах этой зоны линейную аппроксимацию фазовой функции, получим выражение

$$\Delta = \frac{2\pi m}{\max|\nabla\varphi|}, \quad (1.1.13)$$

где процедура \max проводится вдоль поверхности ДОЭ; $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$ - градиент функции $\varphi(x, y)$.

Сравним между собой уравнения радиусов колец зонной пластинки Релея-Сорэ (к которой имеет место аппроксимация непрерывного профиля микро рельефа импульсным профилем)

$$r_j = \sqrt{(\lambda f j)} \quad (\text{пластинка Релея-Сорэ}) \quad (1.1.14)$$

и сферической (плоской) линзы по (1.1.10). Видим, что радиусы зон на линзе в $\sqrt{2}$ раз больше радиусов колец на зонной пластинке Релея-Сорэ. Соответственно, при заданном диаметре число колец на зонной пластинке в два раза больше, т.е. каждому кольцу сферической плоской линзы соответствует два кольца зонной пластины: темное и светлое. Плоская сферическая линза имеет

непрерывный (в пределах зоны) фазовый рельеф, а фазовая зонная пластинка Рэлея-Сорэ имеет аппроксимирующий его бинарный фазовый рельеф (см. рис. 1.3).

Рисунок 1.3. Сравнение микрорельефа плоской сферической линзы и пластинки Рэлея-Сорэ

С точки зрения практической реализации ДОЭ наибольшее распространение получили два типа фазового микрорельефа: ступенчатый и кусочно-непрерывный (см. рисунок 1.4). Ступенчатый многоуровневый профиль микрорельефа (см. рис. 1.4 варианты А и Б) соответствует квантованной по M уровням фазовой функции $\varphi(x,y)$ с шагом $\Delta\varphi$, определяемым из соображений технологичности процесса изготовления и эффективности ДОЭ. Основной характеристикой ступенчатого рельефа ДОЭ с точки зрения технологии изготовления является степень его соответствия профилю фазовой функции $\varphi(x,y)$.

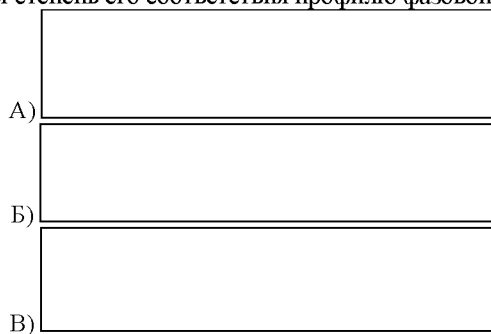


Рисунок 1.4. Варианты практической реализации фазового микрорельефа ДОЭ (А – ступенчатый бинарный; Б – ступенчатый многоуровневый; В – кусочно-непрерывный)

Наличие технологических ошибок приводит к снижению качества реализации заданного профиля микрорельефа, а следовательно, к снижению дифракционной эффективности ДОЭ в энергетическом и функциональном плане.

1.2. Дискретизация и квантование фазовой функции микрорельефа дифракционных оптических элементов

Широкие возможности дифракционной оптики ограничены характеристиками разрешения устройств расчета и генерации дифракционного микрорельефа оптических элементов. Дискретизация по аргументам и квантование по уровням функции фазового пропускания приводит в конечном счете, к отклонению характеристик ДОЭ от расчетных.

В данной главе рассматривается технология изготовления синтезированных оптических элементов с помощью растровых генераторов изображений, управляемых компьютером. Вначале формулируется математическая модель дискретизации, квантования. Далее рассматриваются свойства возмущений дискретизации, квантования и производится оценка погрешности фазы непосредственно во входной плоскости синтезированного оптического элемента. И, наконец, оценивается структура поля в выходной плоскости, параллельной плоскости синтезированного оптического элемента.

Все основные этапы синтеза фазовых дифракционных оптических элементов с помощью компьютера так или иначе связаны с дискретизацией и квантованием фазы. Гладкая фаза $\varphi(x, y) = \varphi(\vec{u})$ рассчитывается в виде матрицы отсчетов (пикселей) и приводится к интервалу $(0, 2\pi m)$, в результате чего образуется приведенная фаза $\Phi(x, y) = \Phi(\vec{u})$. Значения фазы затем квантуются по M уровням и подаются для управления генератором фотошаблонов, отображающим ее в виде вариаций плотности почернения: полутоновых или бинарных. Далее следует технологический процесс формирования микрорельефа: полутоновые фотошаблоны могут быть использованы для формирования непрерывного дифракционно-фазового микрорельефа; набор бинарных фотошаблонов позволяет литографически получить ступенчатый фазовый микрорельеф. Возмущения дискретизации и квантования являются принципиально неустранимыми для оптических элементов, синтезируемых на компьютере, и подлежат оценке.

Рассмотрим модель дискретизации оптических элементов, изготавливаемых на растровом генераторе изображений или на растровом литографе.

Синтезированные на сканирующем растровом генераторе фотошаблоны являются набранными из множества J непересекающихся ячеек разрешения G_j , в объединении составляющих рабочую область фотошаблона (см. рис. 1.5 и 1.6), где $\vec{j} = (j_1, j_2)$ - двумерный индекс-номер ячейки разрешения с центром \vec{u}_j . Размер ячеек G_j определяет разрешение фотошаблонов и формируемых с них оптических элементов.

Рисунок 1.5. Прямоугольная растровая структура фотошаблона

Важнейшей характеристикой растрового генератора является функция распределения энергии воздействия в сканирующем пятне $E_j(\bar{u})$. Эта функция должна иметь протяженность, в точности равную размеру ячейки разрешения. В противном случае будут иметь место эффекты взаимного наложения фазы в соседних ячейках.

Рисунок 1.6. Кольцевая растровая структура фотошаблона

Рассмотрим наиболее интересные частные случаи растровых генераторов. При использовании прямоугольно – растровых генераторов фотошаблонов с равномерным прямоугольным пятном размера $\delta_1 \times \delta_2$ и полем $2a \times 2b$ (см. рис. 1.5) можно пользоваться следующей моделью дискретизации:

$$G_j = \left\{ (u, v) : u_{j1} - \frac{\delta_1}{2} \leq u \leq u_{j1} + \frac{\delta_1}{2}, v_{j1} - \frac{\delta_2}{2} \leq v \leq v_{j1} + \frac{\delta_2}{2} \right\},$$

$$\bar{u}_j = (u_{j1}, v_{j2}); j_1 = \overline{1, N_1}, j_2 = \overline{1, N_2}, \quad (1.2.1)$$

где числа x_{j1}, y_{j2} образуют арифметическую прогрессию с шагом δ_1, δ_2 соответственно, $N_1 \delta_1 = 2a, N_2 \delta_2 = 2b$.

В этом случае:

$$E_j(x, y) = \text{rect}\left(\frac{x - x_{j1}}{\delta_1}\right) \text{rect}\left(\frac{y - y_{j2}}{\delta_2}\right), \quad (1.2.2)$$

где $\text{rect}(t) = \begin{cases} 1, & |t| < \frac{1}{2}, \\ 0, & |t| \geq \frac{1}{2}. \end{cases}$

При этом в пределах прямоугольного поля $2a \times 2b$ имеется $N_1 \times N_2$ возможных позиций пятна, лишь часть M из которых соответствует области G (кругу).

Прямоугольно-растровые генераторы позволяют изготавливать фотошаблоны произвольных ДОО. При этом фазовая функция выражается интерполяционной формулой:

$$\Phi(u) = \sum_{j=1}^M \Phi_j E_j(\bar{u}). \quad (1.2.3)$$

Соответственно функция пропускания ДОО имеет вид

$$\Gamma(\bar{u}) = \exp[i\Phi(\bar{u})]. \quad (1.2.4)$$

При использовании кольцевых растровых генераторов фотошаблонов (Рис. 1.6.) область G представляет собой круг радиуса a , ячейки G_j нумеруются одним индексом $j = 1, \dots, N$ и являются кольцами:

$$G_j = \left[\bar{u} : r_j - \frac{\delta}{2} \leq |\bar{u}| \leq r_j + \frac{\delta}{2} \right], \quad (1.2.5)$$

$$E_j(\bar{u}) = E_j(r) = \text{rect}\left(\frac{r - r_j}{\delta}\right). \quad (1.2.6)$$

Числа r_j образуют арифметическую прогрессию с шагом δ , $r = |\bar{u}|$. Кольцевые генераторы ориентированы на изготовление фотошаблонов радиально-симметричных оптических элементов с функцией пропускания

$$\Gamma(\bar{u}) = \Gamma(r), \quad \text{где } r = \sqrt{(x^2 + y^2)}, \quad (1.2.7)$$

и фазовой функцией

$$\Phi(\bar{u}) = \Phi(r) = \sum_{j=1}^N \Phi_j E_j(r). \quad (1.2.8)$$

Рассмотрим далее модель квантования значений фазы. При создании фотошаблонов отсчета фазы (пиксели) Φ , - подвергаются квантованию по M эквидистантным уровням с постоянным шагом

$$h_m = \frac{2\pi m}{M} \quad (1.2.9)$$

и преобразуются в отсчеты $\Phi_j, j \in J$ квантованной фазы (см. рис. 1.7)

Рисунок 1.7. Равномерное квантование фазы микрорельефа ДОО

Квантованные значения Φ , являются управляющими сигналами растрового генератора фотошаблонов.

С учетом квантования фазы по уровням фазовая функция и функция пропускания записываются соответственно в виде

$$\Phi(\bar{u}) = \Phi(r) = \sum_{j \in J}^N \Phi_j E_j(r). \quad (1.2.10)$$

В ряде случаев погрешность дискретизации практически отсутствует. В частности, если радиально-симметричный оптический элемент изготавливается с помощью кольцевого растрового генератора, то при правильном подборе радиуса колец погрешность дискретизации удастся свести к пренебрежимо малой величине. Погрешность дискретизации при реализации микрорельефа ДОО стремятся свести к минимуму, однако ограничения здесь диктуются разрешением генератора фотошаблонов и возможностями используемого технологического оборудования. В случае, когда разрешающая способность имеющегося генератора фотошаблонов не позволяет получать достаточно малую погрешность квантования, следует отказаться от его использования.

Приведем некоторые рекомендации по выбору оптимального шага дискретизации. Рассмотрим непрерывную функцию $f(x)$, $-a \leq u \leq a$, подлежащую дискретизации с шагом Δ :

$$f(n) = f(u)_{u=m\Delta}, \quad n = 0, 1, \dots, N, \quad (1.2.11)$$

где $N = \left[\frac{2a}{\Delta} \right]$.

Из теории сигналов известно: для того чтобы дискретизация была обратимой, т.е. чтобы имелась возможность по функции $f(x)$ восстановить функцию, следует выполнить условие

$$\Delta < \frac{1}{2F}, \quad (1.2.12)$$

где F – ширина спектра фазовой функции $f(x)$.

Неравенство (1.2.12) является отправным пунктом в выборе шага дискретизации, однако оно не указывает количественно, каким же должен быть он выбран. Дадим некоторые дополнительные количественные оценки. Для этого рассмотрим фазовую функцию $\varphi(x, y)$ и наложим достаточно очевидное условие допустимости дискретизации в виде

$$\left| \delta_1 \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial x} + \delta_2 \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y} \right| \ll 2\pi, \quad (1.2.13)$$

или сокращенно $|\nabla_s \varphi| \ll 2\pi$.

Оценим погрешность кусочно-постоянной аппроксимации функции $\varphi(u)$ в каждой ячейке G_j . Функция $\varphi(u)$ может быть разложена в ряд Маклорена и аппроксимирована выражением

$$\varphi(x, y) = \varphi(x_{j_1}, y_{j_2}) + (x - x_{j_1})\varphi_x + (y - y_{j_2})\varphi_y, \quad (1.2.14)$$

где $\varphi_x = \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{y=y_j}$; $\varphi_y = \left. \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right|_{x=x_j}$.

Предложенные соотношения позволяют выразить погрешность дискретизации в виде

$$\Delta \varphi_j \left(\bar{u} \right) = - \left(\bar{u} - \bar{u}_j \right) \nabla \varphi \left(\bar{u}_j \right). \quad (1.2.15)$$

Следует заметить, что в силу условия (1.2.13) имеет место неравенство

$$\left| \Delta \varphi_j \left(\bar{u} \right) \right| \ll 2\pi. \quad (1.2.16)$$

Влияние дискретизации может быть охарактеризовано максимальной или среднеквадратичной погрешностью (флуктуацией) фазы, выражения для которых соответственно имеют вид

$$\left| \Delta \varphi_{\max} \left(\bar{u} \right) \right| = \max_{u \in G} \left| \Delta \varphi \left(\bar{u} \right) \right|, \quad (1.2.17)$$

$$\left| \Delta\varphi_s(\bar{u}) \right| = \left[\frac{1}{|G|} \int_G \left| \Delta\varphi(\bar{u}) \right|^2 d^2u \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1.2.18)$$

где $|G|$ - площадь области G .

Оценим величины (1.2.17) и (1.2.18) для прямоугольного сканирующего пятна (см. рис. 1.5) и гладкой функции $\varphi(x, y)$. Подставляя представление (1.2.14), (1.2.15) в уравнение (1.2.17), после преобразований получаем удобную оценку максимальной погрешности дискретизации фазы

$$\left| \Delta\varphi_{\max}(\bar{u}) \right| \leq \frac{1}{2} \max_{u \in G} \left| \nabla_s \varphi(\bar{u}) \right|_+, \quad (1.2.19)$$

где G - площадь области G ; где символ $I \cdot I_+$ означает сумму модулей компонент вектора.

После преобразований (1.2.18) получаем удобную оценку среднеквадратичной погрешности дискретизации фазы

$$\Delta\varphi_s \left[\frac{1}{12|G|} \int_G \left[\nabla_s \varphi(\bar{u}) \right]^2 d^2 \bar{u} \right]. \quad (1.2.20)$$

Приведенные оценки позволяют подсчитать погрешности дискретизации $\Delta\varphi_s$ непосредственно по параметрам дискретизации δ_1, δ_2 и первым производным фазы. Эти оценки дают непосредственную связь возмущений дискретизации с производными гладкой фазовой функции.

В качестве примера в таблице 1.1 приведены данные среднеквадратичного уклонения $\Delta\varphi_s$, при дискретизации фазы

$$\varphi(r) = -k \frac{1 + (n-1)^{-2}}{8f_0^3} r^4 \quad (1.2.21)$$

с параметрами $\lambda=0.63$ мкм, $m = 1$, $n = 1.5$, разрешение δ [мкм] является варьируемым параметром.

Таблица 1.1. Среднеквадратичное уклонение при дискретизации фазы - $\Delta\varphi_s / 2\pi$

$2a / f_0$	δ			
	3	6	12	24
0.2	<0.001	<0.001	<0.001	0.001
0.4	0.001	0.010	0.030	0.040
0.6	0.010	0.035	0.65	0.135
0.8	0.040	0.75	0.140	0.315
1.0	0.075	0.145	0.255	0.650

Из данных таблицы 1.1. видно, например, что при разрешении генератора фотошаблона ≤ 6 мкм удается реализовать оптический элемент (1.2.21.) с погрешностью дискретизации фазы, не превышающей 5% в диапазоне изменения

параметра «относительное отверстие» ДОЭ $0 < 2a/f < 0.8$, а при разрешении $\delta = 24$ мкм соответствующий диапазон сужается в 2 раза.

Перейдем к рассмотрению эффектов квантования. Следует различать ситуацию бинарного квантования ($M=2$) и примыкающего к ней «грубого» квантования с малым числом уровней $M=3,4$, а также квантования с большим числом уровней $M \gg 2$. В случае бинарного квантования фаза ДОЭ принимает два значения: 0 и π (отсюда используемый термин «бинарная описка»).

ДОЭ работает как фазовая дифракционная решетка (или зонная пластина), т.е. дает большое количество дифракционных порядков. Рабочим обычно является первый порядок дифракции, в который попадает до 40% энергии, что и определяет предельную дифракционную эффективность ДОЭ в данном случае. При большом числе уровней квантования можно ввести в рассмотрение понятие о шуме квантования. При шаге квантования (1.2.9) максимальное значение погрешности квантования фазы составит

$$\Delta\varphi_{\max} = \frac{m\pi}{M}. \quad (1.2.22)$$

Если допустить, что $\Delta\varphi$ принимает равновероятные значения в диапазоне $[-\pi m/M, \pi m/M]$, то нетрудно вычислить среднеквадратичное значение погрешности квантования фазы в виде

$$\Delta\varphi_{\max} = \frac{1}{2\pi m} \int_{-\frac{\pi m}{M}}^{\frac{\pi m}{M}} (\Delta\varphi)^2 d(\Delta\varphi) = \frac{1}{3} \left(\frac{\pi m}{M} \right)^2. \quad (1.2.23)$$

При больших значениях M величина среднеквадратичной погрешности квантования фазы составляет доли процента. В этом случае эффект квантования фазы может быть сведен к появлению в плоскости ДОЭ дополнительного фазового транспаранта со случайной по полю апертуры фазой, варьирующейся в узком диапазоне $[-\pi m/M, \pi m/M]$.

1.3. Специфика технологии формирования фазового микро рельефа.

Среди способов формирования рельефа плоских оптических элементов особое место занимает технология литографии, позволяющая получить ступенчатый рельеф, аппроксимирующий заданную форму поверхности в каждой точке кусочно-непрерывной функцией. Суть фотолитографической технологии состоит в следующем. На плоскую подложку, на которой нужно сформировать рельеф, наносится слой фоторезиста. Затем он засвечивается через бинарную амплитудную маску – фотошаблон, состоящий из прозрачных и непрозрачных зон. В местах засветки структура фоторезиста меняется и при дальнейшей химической обработке в зависимости от состава резиста удаляются либо засвеченные, либо незасвеченные участки. В результате на фоторезисте образуются окна, через которые производится травление подложки.

После травления и удаления оставшегося резиста на подложке остается рельеф, соответствующий рисунку на фотошаблоне. Глубина полученного рельефа зависит от времени травления. При необходимости получения ступенчатого рельефа процесс фотолитографии и травления повторяется нужное количество раз. При операции совмещения нового шаблона с уже протравленным рисунком должна быть обеспечена высокая точность, зависящая от минимальных размеров зоны. Погрешность совмещения должна быть в 5 – 10 раз меньше минимального размера зон в последней маске.

Использование электронного литографа в качестве генератора фотошаблонов позволяет существенно упростить технологию синтеза ДОЭ, так как в этом случае исключаются операции фотоуменьшения, необходимые при выводе фотошаблонов на фотопостроителе. Средством, применяющимся в целях совершенствования технологии, является метод неравномерного травления, позволяющий уменьшить число необходимых бинарных фотошаблонов и совмещений.

Идея метода неравномерного травления заключается в следующем. При первом экспонировании создается двухградационный элемент с высотой рельефа h (набег фазы π). Следующее травление проводится через маску, имеющую вдвое большее число зон на глубину $h/2$ (набег фазы $\pi/2$). Затем через третью маску производится травление на глубину $h/4$ (набег фазы $\pi/4$) и т.д. В этом случае для получения M градаций рельефа необходимо $\log_2 M$ фотошаблонов в отличие от $(M-1)$ фотошаблонов при равномерном травлении. Кроме уменьшения числа шаблонов такая технология привлекательна еще и тем, что после каждого последующего травления получается вполне работоспособный ДОЭ. При двух градациях получается зонная пластинка с эффективностью 40%, при четырех – 80%. При 8 градациях эффективность составляет 95%, что практически соответствует эффективности «гладкого» элемента.

Начиная со второй ступени фотолитографии необходимо совмещать рисунок фотошаблона с рисунком на подложке. При визуальном методе точность совмещения определяется принципом работы и качеством выполнения микроманипуляторов, размером и контрастностью знаков совмещения, формой знаков, а также постоянством этих параметров в процессе технологических обработок подложки.

Толщина фотошаблона и его коэффициент поглощения сильно влияют на время экспозиции. Так как поглощенная доза не измеряется в процессе экспонирования, то время экспозиции приходится увеличивать при работе с более толстыми пленками. Величина коэффициента поглощения резиста очень важна, так как определяет разрешение и скорость растворения резиста. В фоторезистах сильное поглощение ведет к подтравливанию профилей, а слишком слабое поглощение ведет к сужению верхних частей воспроизводимого рельефа и проявлению эффекта влияния соседних зон. Время экспозиции подбирается так, чтобы после проявления на засвеченных участках не оставалось следов резиста.

В настоящее время в технологии микроэлектроники происходит постепенный переход от изотропных процессов жидкого химического травления к анизотропным процессам плазмохимического травления. Это объясняется криволинейностью получаемого рельефа и уходом ширины линий порядка 0.5 мкм в структурах, полученных жидкостным травлением. Установки плазменного травления являются одним из наиболее высокоточных видов литографического оборудования и обеспечивают уход ширины линии порядка 0.1 мкм, что определяет их выбор в технологии ДОЭ.

Рассмотрим два способа переноса фазового микрорельефа оптического элемента на полимерные материалы.

Во-первых, копирование с помощью фотополимеризующейся композиции и, во-вторых, перенос рельефа с помощью горячей штамповки на полимерный материал из полиметилметакрилата (ПММА).

Для получения реплик может быть использован целый ряд органических олигомеров. В зависимости от химического состава и способа иницирования реакцией полимеризации используемых смол существенно изменяется число технологических операций получения реплики и условия их проведения.

Для копирования микрорельефа зонных пластинок и других ДОЭ можно использовать смолу олигокарбонатметакрилат – нетоксичный, дешевый, производимый промышленным способом продукт. Повышенная чувствительность олигокарбонатметакрилатов к действию УФ-излучения обусловлена, по видимому, особенностями электронного строения карбонатной группы. В смолу вводится фотосенсибилизатор – метиловый эфир бензоина, разлагающийся на радикалы под действием УФ-облучения. Продолжительность фотоиницируемой полимеризации смолы – 20 мин. Коэффициент преломления смолы $n = 1,149$.

Технология копирования микрорельефа заключается в следующем: поверхность стеклянной подложки, с вытравленным рельефом, обрабатывают специальным раствором для создания антиадгезионного слоя. Поверхность же другой стеклянной подложки, наоборот, обрабатывают так, чтобы повысить адгезию смолы к поверхности стекла. После этого на рабочую поверхность первой подложки наносят каплю смолы и накрывают другой, следя за тем, чтобы смола растекалась равномерным слоем, покрывая весь оптический элемент, и не было пузырьков воздуха. Затем этот «сэндвич» помещают под УФ лампу и выдерживают 20 -30 мин. После окончания засветки пластины разбирают и на одной из них должна остаться тонкая пленка полимера с копией рельефа, а другая должна быть свободной и готовой к повторению процесса копирования. Мы можем отделить пленку от стеклянной подложки и таким образом получить оптический элемент на тонкой гибкой полимерной пленке.

Технология изготовления оптических элементов из ПММА заключается в следующем: между двумя матрицами, представляющими собой плоскости с обратной копией ДОЭ, зажимают заготовку из ПММА и нагревают до температуры, при которой ПММА переходит из твердого в вязкое состояние. При

приложении достаточного давления ПММА растекается по всей поверхности матрицы и заполняет весь свободный объем. При остывании происходит обратный процесс перехода из вязкого состояния в твердое, без нарушения кристаллической решетки, поэтому сохраняются оптические свойства ПММА. Однако следует учесть, что при остывании происходит усадка и преломляющие поверхности получаются с большим радиусом кривизны для линз и с меньшей глубиной модуляции фазового рельефа для дифракционного элемента. Усадка в среднем составляет 3-5 % и это необходимо учесть при изготовлении исходных матриц.

Еще одним методом копирования микрорельефа может служить гальванопластика. Гальванопластика – электрохимический способ изготовления разнообразных изделий, в процессе которого выделяющийся при электролизе металл достигает значительных толщин (нескольких мм) и пластически воспроизводит форму поверхности, на которой осаждается.

При электролитическом формировании микрорельефа оптических элементов возникает необходимость получения осадков большой толщины (до 3-4 мм), поэтому низкие скорости осаждения резко сокращают производительность процесса. В связи с этим выбирают электролиты, позволяющие вести процесс осаждения при высоких плотностях тока. Наиболее часто используют осаждение меди. Высокие показатели коэффициентов отражения и теплопроводности, дешевизна и доступность используемых реактивов, достаточная изученность процессов электролитического наращивания меди предопределили выбор меди в качестве основного материала для изготовления фокусирующих оптических фазовых элементов, выполненных в виде отражающей поверхности.

В качестве формы для гальванического наращивания оптических элементов используется стеклянная пластина с нанесенной на ее поверхность копией микрорельефа в виде пленки полимерного материала. Размер стеклянной подложки определяется размером активной части оптического элемента, обычно это круглое стекло диаметром 70-100 мм. Перед нанесением токопроводящего слоя поверхность очищают в растворах щелочи и смывают дистиллированной водой. Токопроводящий слой формируют напылением меди в установке вакуумного напыления, при этом толщина медного слоя получается около 1 мкм, и для дальнейшего электроосаждения меди дополнительного обезжиривания не требуется. После нанесения токопроводящего слоя формы помещают в оправу и переносят в ванну с электролитом первичного покрытия. Для интенсификации процесса осаждения используют перемещение и прокачку электролита, движение формы в процессе осаждения, реверсирование тока, наложение переменного тока на постоянный и т.д.

Весь процесс наращивания, вместе с затяжкой, занимает 72 часа непрерывного осаждения меди и достигается толщина 3-4 мм. В процессе электролиза состав электролита постоянно меняется, поэтому необходимо производить периодические замеры кислотности и количества меди в отработанном электролите и при необходимости доукреплять раствор.

1.4. Подготовка поверхности подложки перед формированием микрорельефа дифракционных оптических элементов

Очистка тлеющим зарядом – наиболее широко используемый метод очистки подложек непосредственно перед осаждением пленки. Он осуществляется при помещении подложек в плазму тлеющего разряда. При очистке в тлеющем разряде удаление примесей и другие изменения на поверхности подложки вызываются одним или несколькими следующими механизмами:

1. Непосредственный нагрев из-за ударов заряженных частиц и их рекомбинации.
2. Десорбция примесей, вызванная бомбардировкой электронами.
3. Десорбция примесей, вызванная бомбардировкой ионами малых энергий или нейтральными частицами.
4. Улучшение органического остатка за счет химической реакции с диссоциированным кислородом.
5. Изменение поверхности стекла из-за взаимодействия с кислородом.
6. Усиленное ядрообразование при последующем осаждении пленки.

Механизмы 4 и 5, являясь наиболее важными, в процессе очистки подложек, сопровождались довольно высоким давлением остаточных газов. В ряде исследований было показано, что очистка тлеющим разрядом эффективна только при наличии кислорода. Механизм 5 особенно важен для стекол с высоким содержанием SiO_2 , где он, по-видимому, способствует образованию «окисных мостиков» между стеклом и активными металлами типа *Al* или *Ce*. Однако повышение адгезии, обусловленное очисткой тлеющим разрядом в кислороде, известно также и для таких неактивных металлов, как золото.

Это может быть связано с наблюдениями усиленной диффузии золота в объем SiO_2 в присутствии кислорода. Отмечено также, что влияние очистки тлеющим разрядом сохраняется, даже если подложку удалить из вакуумной системы и напылить после повторного помещения ее в систему. Предполагается, что это поведение обусловлено отрицательным поверхностным зарядом, образованным при очистке тлеющим разрядом; если между операциями очистки и осаждения заряд удалялся, то адгезия пленки была так же слаба, как если бы очистка не имела места.

Поскольку большинство подложек являются изоляторами, необходимо применять высокочастотное напряжение. Сама подложка не является частью цепи тлеющего разряда, как это имеет место при очистке распылением. Хотя последний способ и является менее эффективным по сравнению с очисткой распылением, однако он исключает бомбардировку подложки частицами с высокими энергиями и, как следствие, распыление и осаждение другого материала с противоиэлектрода, а также получение более шероховатой поверхности подложки.

При отсутствии кислорода, если для очистки тлеющим разрядом используется аргон, причиной улучшения поверхности подложки является обычно ме-

ханизм 1. Механизм 2 эффективен в определенных формах. Однако, как было показано, бомбардировка поверхности подложки электронами вызывает образование полимерных пленок, составляющие которых образуются из паров масла в вакуумной камере.

Перспективным способом профилирования поверхности подложки является выполнение изотропного плазмохимического травления в одном вакуумном цикле с анизотропным процессом травления. Таким образом, задача очистки поверхности и получения сглаженного микрорельефа на подложках различных материалов, тесно связана с решением проблемы изотропного плазмохимического травления, когда скорость бокового (горизонтального) травления равна скорости вертикального. Скорость процесса травления (V_{Tr}) и геометрия профиля в этом случае определяются: общим давлением газовой смеси и парциальным давлением каждого из компонентов в реакционной камере, соотношением между объемами газов, расходом газов, температурой подложкодержателя и величиной ВЧ-мощности.

Для повышения эффективности очистки от органических загрязнений в состав газовой смеси вводили кислород. Удаление кислородоустойчивых загрязнений и при обеспечении сглаженного микрорельефа достигается при минимальном воздействии ионов на обрабатываемую поверхность. Это достигается повышением общего давления газовой смеси до 100 Па при минимальной величине ВЧ-напряжения. При использовании фторсодержащей газовой смеси для очистки стеклянных подложек необходимо использовать вакуумные камеры как можно большего объема, чтобы края электродов были удалены от стенок камеры как минимум на 10 см.

Кроме того, при изотропном плазмохимическом травлении имеющая место хотя и слабая ионная бомбардировка усиливает травление поверхности стекла благодаря тому, что реакционные частицы, такие как атомарный фтор, образуются на поверхности подложки в результате ионно-индуцированной диссоциации нейтральных молекул и радикалов, которые были первоначально адсорбированы из газовой фазы. Соответственно, освобождающиеся реакционные частицы тут же образуют связи Si—F без какой-либо миграции по поверхности. Применение изотропного плазмохимического травления для глубокой очистки поверхности подложек различных материалов ограничено недостаточными исследованиями в этой области.

Результаты исследования технологических режимов глубокой очистки поверхности подложек различных материалов методом плазмохимического травления рассмотрены ниже. В качестве исследуемых образцов использовали подложки типа СТ – 50-1 и стеклянные фотографические пластины В-Р-П 50 X 50 мм, поскольку шероховатость необработанных образцов не превышает 5 нм и 3 нм соответственно (см. таблицу 1.2).

Таблица 1.2. Шероховатость поверхности исследуемых образцов подложек

Материал	H(нм)	A(мм)	Материал	H(нм)	A(мм)
Стекло	3	20	Сг на стекле	7,5	20
СТ-50	5	20	Ni на СТ-50	2	20
Кремний	2	10	Cu на СТ-50	2	20
Сг на СТ-50	7,5	20	Поликор	10	20

Очистка исследуемых подложек осуществлялась на установке плазмохимического травления пластин УПТ ПДЭ – 125-008. В ней используется кварцевый реактор с ВЧ-индуктором, т.е. реактор на базе высокочастотной безэлектродной разрядной системы, позволяющей получать высокую концентрацию радикалов фтора при повышенном давлении газовой смеси. Варьирование $P_{общ}$ газовой смеси $CF_4 + O_2 + N_2$ в реакционной камере проводилось от 10 до 100 Па при постоянном $P_{нар}$ тетрахлорметана (CF_4) 10 Па, при величине подводимой к подложке НЧ – мощности 200 -700 Вт и температуре подложка держателя 358 К. Время обработки 2- 10 минут. Шероховатость пластин измерялась микроинтерферометром фирмы *ZYGO Corporation* и сканирующим зондовым микроскопом *SOLVER P4-SPM-MDT*.

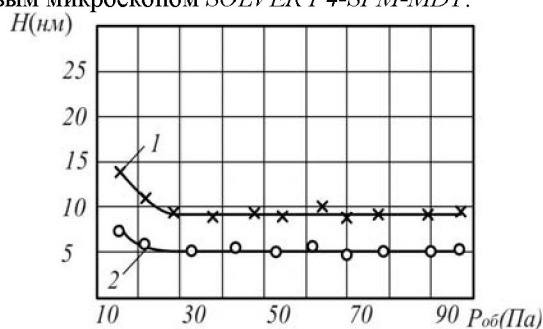


Рисунок 1.8. Зависимость шероховатости поверхности подложки типа СТ-50 (1), стекла (2) после травления в плазме от общего рабочего давления газовой смеси. Расход $2,1 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. $W_{ВЧ} = 300 \text{ Вт}$

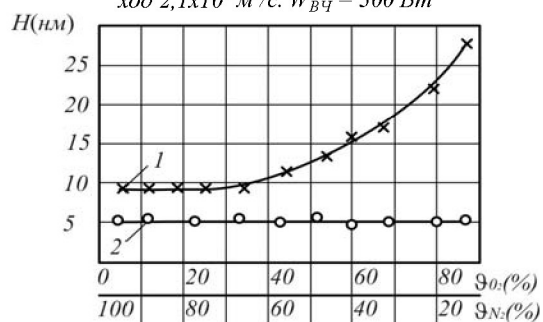


Рисунок 1.9 Зависимость шероховатости поверхности подложки типа СТ-50 (1), стекла (2) после травления в плазме от состава газовой смеси. Расход $2,1 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. $P_{общ} = 30 \text{ Па}$. $W_{ВЧ} = 300 \text{ Вт}$

Зависимость шероховатости поверхности подложки типа СТ-50 (1), стекло (2) после травления в плазме $CF_4 + O_2 + N_2$ от общего рабочего давления газовой смеси приведена на рисунках 1.8 и 1.9. При уменьшении $P_{общ}$ газовой смеси CF_4 -10%, O_2 - 15%, N_2 – 75% наблюдается увеличение шероховатости поверхности. Это связано с увеличением энергии активных радикалов у поверхности подложки и, как следствие, с увеличением скорости доставки их к ее поверхности. При увеличении процентного содержания кислорода в газовой смеси наблюдается увеличение шероховатости поверхности только для стеклянных пластин. На поверхности подложек типа СТ-50, Поликор и пленках металлов это явление не наблюдается.

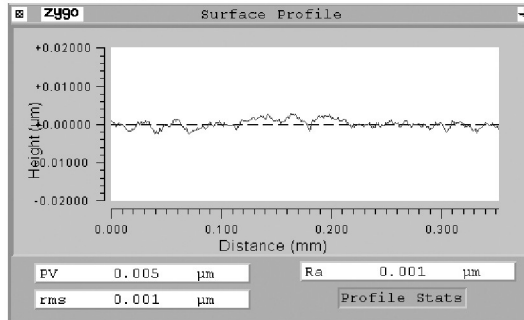


Рисунок 1.10. Профилограмма поверхности стеклянной пластины, очищенной травлением в плазме. Состав: CF_4 -10%, O_2 - 15%, N_2 – 75%. Расход $2,1 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. $P_{общ}$ – 30 Па.
 $W_{ВЧ}$ = 300 Вт

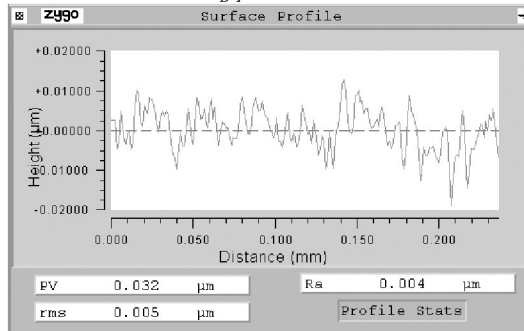


Рисунок 1.11 Профилограмма поверхности стеклянной пластины, очищенной травлением в плазме. Состав: CF_4 -10%, O_2 - 60%, N_2 – 30%. Расход $2,1 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. $P_{общ}$ – 30 Па.
 $W_{ВЧ}$ = 600 Вт

На рисунках 1.10 и 1.11 представлены профилограммы поверхности двух стеклянных пластин, очищенных травлением в плазме $CF_4 + O_2 + N_2$. Первая пластина была очищена при оптимальных режимах очистки, шероховатость не превышает 5 нм. При очистке второй пластины режимы очистки были не оптимальны, шероховатость 32 нм.

Шероховатость поверхности является одним из важных свойств подложки, поскольку именно на ней осуществляется взаимодействие пленка — подложка. Различные типы нерегулярностей составляют общую поверхностную текстуру. К ним относятся:

- Дефекты субмикронного размера: царапины после полировки; шероховатости после вытягивания стекла, поры.
- Дефекты микронного размера: царапины после шлифовки, границы кристаллитов в поликристаллических материалах, поры, линии вытягивания на стекле.

Для контроля поверхностей подложек широко используются 3D микроинтерферометры и зондовые сканирующие микроскопы. Они позволяют с высокой точностью измерять параметры шероховатости поверхности.

На рисунках 1.12 и 1.13 представлены профилограммы и объемные изображения поверхности стеклянной пластины, очищенной плазмохимическим травлением, полученные на 3D микроинтерферометре фирмы *ZYGO Corporation* и зондовом сканирующем микроскопе *Solver Pro*.

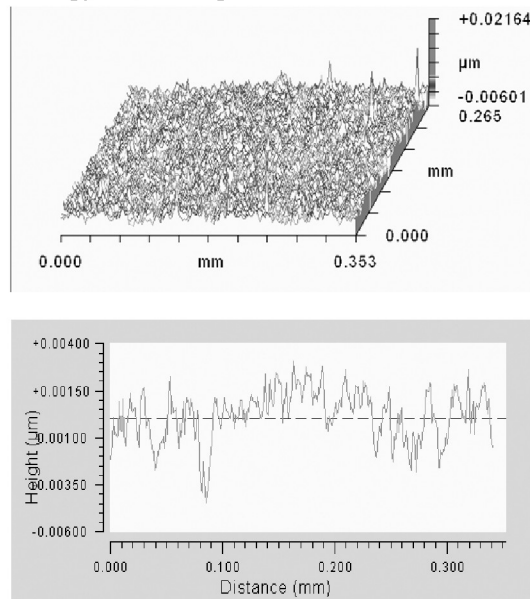


Рисунок 1.12. Профилограмма поверхности стеклянной пластины, полученной на 3D микроинтерферометре фирмы *ZYGO Corporation*

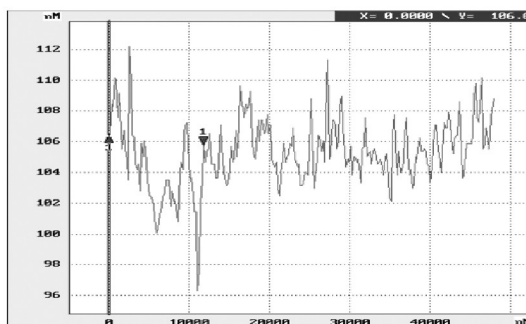
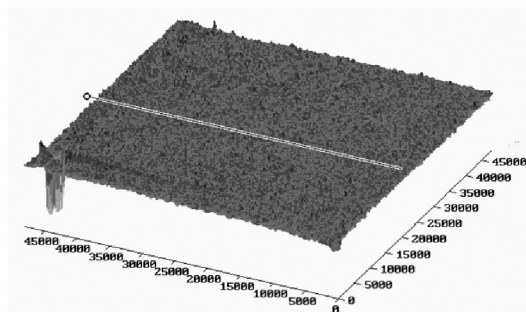


Рисунок 1.13. Профилограмма поверхности стеклянной пластины, полученная на зондовом сканирующем микроскопе P4-SPM-MDT

2. ОСНОВНЫЕ ОПЕРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРИ СОЗДАНИИ МИКРОРЕЛЬЕФА ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

2.1. Методы контроля степени чистоты диэлектрических оснований дифракционных оптических элементов

Ниже рассматриваются физические основы различных методов определения чистоты поверхности подложек. Наиболее эффективным методом контроля чистоты поверхности подложек является оптический. Оптический контроль основан на взаимодействии светового излучения с контролируемым объектом и регистрации результатов этого взаимодействия. Методы, характерные для оптического контроля, используют электромагнитное излучение в диапазоне длин волн в вакууме от 10^{-5} до 10^3 мкм и охватывают диапазоны ультрафиолетового, видимого и инфракрасного света. Оптические методы контроля условно разделены на три группы:

1. Визуальный и визуально-оптический методы характерны тем, что результаты контроля в наибольшей степени определяются личными качествами оператора.
2. Фотометрический, денситометрический, спектральный и телевизионный методы в основном строятся на результатах аппаратурных измерений и обеспечивают меньшую субъективность контроля.
3. Интерференционный, дифракционный, фазоконтрастный, рефрактометрический, поляризационный, стробоскопический, голографический используют волновые свойства света и позволяют производить неразрушающий контроль объектов с чувствительностью до десятых долей длины волны источника излучения.

В технологической практике используются как стандартные оптические контрольно-измерительные методы и оборудование, так и устройства, разработанные или модернизированные с целевым назначением – для проведения специальных исследований. В частности, нашли широкое распространение методы, основанные на использовании контактных явлений на границе раздела фаз системы «жидкость-твердое тело».

Наиболее интересные решения, разработанные методы и устройства контроля параметров формируемого микрорельефа, оценки параметров ДОЭ и устройств на их основе представлены в настоящем разделе.

2.1.1. Метод окунания

Особенность этого процесса состоит в том, что чем больше молекулярное сродство между контактирующими веществами, тем лучше смачивание, а значит, тем больше растекание жидкости по поверхности твердого тела. Представим в виде векторов составляющие сил поверхностного натяжения, действующие на край капли жидкости, находящейся на поверхности твердого тела (рисунок 2.1).

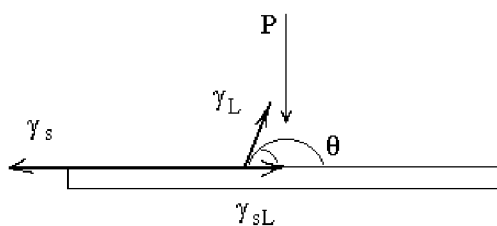


Рисунок 2.1. Равновесие сил поверхностного натяжения

Для смачиваемой поверхности условия равновесия сил поверхностного натяжения, если они значительно больше силы тяжести, определяются уравнением Юнга для краевого угла смачивания θ :

$$\cos\theta = (\gamma_s - \gamma_{sL})/\gamma_L, \quad (2.1.1)$$

где γ_s - сила поверхностного натяжения на границе твердое тело – окружающая среда; γ_L – сила поверхностного натяжения на границе жидкость – окружающая среда; γ_{sL} - сила поверхностного натяжения на границе жидкость – твердое тело.

Как видно из рис 2.1, смачивание и растекание тем больше, чем меньше угол θ , это удовлетворяется при большой величине γ_s и малых γ_L и γ_{sL} . Для хорошего растекания жидкости по подложке должно выполняться условие $\gamma_s \geq \gamma_L$. Поверхностное натяжение большинства материалов, находящихся в жидкой фазе, изменяется при изменении температуры по закону, близкому к линейному, уменьшаясь с нагревом:

$$\gamma_L = \gamma_0 (1 - T/T_{кр}), \quad (2.1.2)$$

где $T_{кр}$ - критическая температура, при которой поверхностное натяжение практически равно нулю; γ_0 - некоторая экспериментальная константа.

На эффекте смачиваемости разработано большое количество способов контроля чистоты поверхности, однако наибольшее распространение получили методы, основанные на смачиваемости исследуемой поверхности очищенной водой. Контролируемая пластина опускается в деионизированную воду. При подъеме пластины из воды в вертикальном положении на ее поверхности образуется пленка последней. Если на пластине имеются локальные области, содержащие органические или другие виды загрязнений, которые делают поверхность гидрофобной, то в этих областях пленка воды разрывается до начала ее интенсивного высыхания (время выдержки ~1 мин). Этим методом можно обнаружить на пластинах органические загрязнения в количествах от $9 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ г/см².

2.1.2. Метод компенсации

Является более чувствительным по сравнению с методом окупания. Исследуемая пластина охлаждается ниже температуры точки росы окружающего воздуха. В процессе охлаждения поверхность пластины покрывается пленкой

иния или воды. Если поверхность пластины плохо отмыта от гидрофобных загрязнений, то влага на пластине собирается в мелкие капельки. Чувствительность метода $2 \cdot 10^{-8}$ - $2 \cdot 10^{-7}$ г/см². По мере повышения чистоты пластины изменяется угол смачиваемости θ : чем меньше угол θ , тем меньше на поверхности пластины органических загрязнений.

Для измерения угла смачивания разработана установка УКУС-1. На этой установке в специальном агрегате с оптической системой профиль одной из капель воды проецируется на экран матового стекла. Угол измеряется угломерным приспособлением с цифровой индикацией результата. С помощью этого метода можно проводить только качественную оценку чистоты пластины из-за сложности построения градуировочных графиков и невозможности создания одинаковых условий при калибровке и измерениях.

2.1.3. Оптические методы

Наиболее просто контроль в производстве осуществляется оптическими методами, в основе которых лежит измерение краевого угла смачиваемости θ . Так, например, авторы работы [4] предложили измерять краевой угол смачивания следующим образом (рисунок 2.2). Каплю освещают параллельным пучком света в направлении, перпендикулярном плоскости подложки. При этом капля является собирающей линзой. Отклонение световых лучей на краях капли определяется локальными значениями краевого угла. Капля может находиться по отношению к источнику света с любой стороны плоской прозрачной подложки. Преломленные лучи создают на матовом экране картину, периметр которой определяет непрерывное распределение углов вдоль периметра капли. Для нахождения краевых углов измеряют расстояние X для точек периметра, лежащих на радиусах.

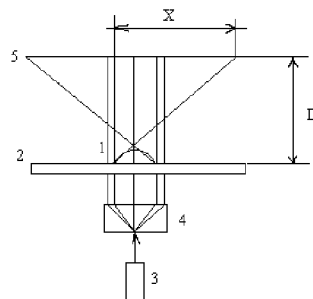


Рисунок 2.2. Схема устройства для определения краевого угла смачивания:

1- капля, 2- подложка, 3- лазер, 4- коллиматор, 5- экран

Краевой угол θ для каждой точки периметра капли рассчитывают по формуле [5]

$$Q = \operatorname{arctg} \frac{x/D}{n\sqrt{x^2/D^2 + 1}}, \quad (2.1.3)$$

где x – расстояние от точки на периметре теневого изображения капли на экране до соответствующей ей точки на периметре картины преломления; D – расстояние от основания капли до экрана; θ – искомый краевой угол; n – показатель преломления жидкости.

Оригинальный способ измерения угла θ заключается в том, что над каплей, сформированной на твердой плоскости поверхности, располагают предмет на расстоянии L от подложки таким образом, чтобы одновременно наблюдать изображение предмета в подложке и в краевой области капли, затем измеряют расстояние между изображениями предмета в капле и подложке и находят краевой угол смачивания θ по формуле

$$\operatorname{tg} \theta = L / 2h. \quad (2.1.4)$$

Определение краевого угла смачивания на границе жидкость – твердое тело возможно также путем измерения объема капли, помещенной на плоскую подложку, ее максимального радиуса и высоты над экватором. Однако этот способ не отличается высокой точностью. Точность измерения θ можно повысить, если определение краевого угла смачивания заменить измерением объема капли, помещенной на плоскую подложку. При этом ее максимальный радиус и расстояние от вершины капли до вершины прямого угла определяются прямыми, касающимися контура капли, биссектриса которого совпадает с осью вращения капли.

Однако такой способ измерения краевого угла смачивания трудоемкий, так как необходимо измерить параметры капли и только затем обратной интерполяцией определяется искомое значение краевого угла. Для упрощения анализа результатов измерений можно измерять центральный угол окружности, сегментом которой является проекция капли. Причем построение центрального угла производят путем совмещения изображения капли с окружностью определенного радиуса. Соединяя отрезками прямой центр и точки пересечения окружности шаблона с основанием капли, получают удвоенное значение краевого угла.

Использование предлагаемого способа определения краевого угла смачивания увеличивает надежность измерений, так как исключаются сложные расчеты и построения при определении краевого угла смачивания. Однако измерение угла θ возможно лишь при установлении равновесного состояния, длительность которого составляет единицы, десятки минут. Большая длительность процесса смачиваемости приводит к тому, что некоторая часть поверхностных атомов успевает раствориться в жидкости. Измерение состава жидкости приводит к изменению направления действия сил поверхностного

направления и величина краевого угла θ изменяется. Кроме того, величина θ определяется не только концентрацией атомов примеси, но и структурой поверхности подложки. Из-за неоднородности этой структуры θ по периметру капли является переменной величиной, поэтому эффект смачивания позволяет определить лишь качественную картину степени загрязнения поверхности подложки. Это является основным недостатком оптических методов, использующих для измерения чистоты поверхности эффект смачиваемости.

2.1.4. Триботехнический метод

Другим широко применяемым на практике методом является трибометрия. В основе метода лежит известный принцип: величина коэффициента трения μ покоя тем меньше, чем больше поверхностная концентрация примеси C_n . Это справедливо, если измерения проводятся при равных условиях. Неизменность материалов, однородность поверхностей и конструкции фрикционных пар, одинаковая нагрузка, одни и те же внешние условия, постоянная температура являются неперемными условиями проведения опытов.

Методика измерения основана на сравнении величины μ исследуемой подложки с величиной μ_{max} подложки, очищенной стандартным способом, причем ее поверхность принимается за условно чистую (очищенная пластина). Экспериментально установлено, что количественное изменение величины в зависимости от C_n наблюдается лишь в интервале $C_{min} - C_{кр}$, где C_{min} – предел обнаружения примеси, $C_{кр}$ - максимальное (критическое) значение C_n . Для большинства органических соединений C лежит в пределах $5 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-6}$ г/см². Вне этого интервала величина μ может принять только два значения: μ_{max} ($C_n < C_{min}$) и μ_n ($C_n > C_{кр}$), где μ_n – коэффициент трения насыщения, т. е. минимальная величина μ , которая достигается загрязнением очищенной пластины. Обе эти величины не зависят от количества загрязнений, поэтому взяты за триботехнические константы. Коэффициент μ_n характеризует смазочную способность вещества, чем выше эта способность, тем меньше μ_n . Однако для каждой конкретной контактирующей пары существует предел $\mu_o \leq \mu_n$.

Случай, когда $\mu_o = \mu_n$, наблюдается для веществ, поверхностная пленка которых полностью уничтожает слипание (адгезию) трущихся тел. Величина μ_o характеризует затраты энергии лишь на механическую деформацию поверхности. С ростом молекулярного веса величина μ_n уменьшается до определенного предела и затем остается постоянной. Для разных гомологических рядов (например, карбоновых кислот, спиртов, парафинов) величина μ_o одинакова независимо от природы смазывающих веществ и опреде-

ляется лишь механическими свойствами поверхностей, контактирующих между собой. Внутри интервала $C_{min} - C_{кр}$ зависимость между μ и C_n описывается одним из уравнений:

$$\lg Cn = m \lg \frac{\mu_{max} - \mu}{\mu_{max} - \mu_n} - B, \quad (2.1.5)$$

$$\lg Cn = m \lg \frac{\mu_{max} - \mu}{\mu - \mu_n}, \quad (2.1.6)$$

где m и B – эмпирические константы.

Уравнение (2.1.5) справедливо при неравномерном, а (2.1.6) – при равномерном распределении загрязнений. Величины μ_{max} , μ_n , μ_0 являются константами лишь для данного типа контактирующих пар и в рамках однотипных условий измерения.

Одним из стандартных методов измерения коэффициента трения, является схематически представленный на рисунке 2.3.

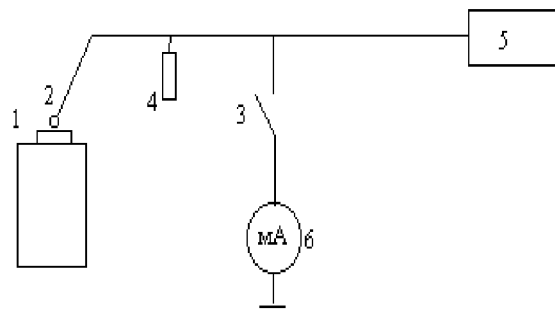


Рисунок 2.3. Схема устройства для измерения коэффициента трения:
1-подложка, 2- датчик, 3- контактное устройство, 4- нагрузка,
5- соленоид, 6- измерительный прибор

Датчик 2 в виде шарика опускается на измеряемую поверхность 1. В соленоиде 5 электромагнита постепенно увеличивается ток. Когда сила тяги электромагнита сравняется с силой трения, сердечник электромагнита втягивается, сдвигается датчик, размыкаются контакты 3. Показания гальванометра 6 в этот момент характеризуют в условных единицах величину μ . В таблице 1.3 приведены значения для подложек, полированных до 14 класса шероховатости.

Таблица 1.3-Величина μ для некоторых веществ

Класс веществ	Вещества	Величина μ		Молекулярн. вес
		Единиц ИЧ-2	$\mu = \frac{F_{тр}}{N}$	
Жирные одноосновные кислоты	Капроновая	19	0,1	116
	Пальмитиновая	10	0,06	256
	Стеариновая	10	0,06	284
Технические органические вещества сложного состава	Машинное масло	20	0,12	-
	Масло ВМ-4	20	0,12	-
	Воск	10	0,06	-
	Канифоль	25 – 30	0,24	-
	Пицеин	18	0,08	-
Растворители	Трихлорэтилен			131
	Толуол	40	0,6	92
	Этиловый спирт	45	0,72	46
	Изопропиловый спирт	42	0,65	60
	Ацетон	40	0,6	58
	Вода дистиллированная	45	0,72	18
Неорганические соединения	Сернокислая медь	40	0,6	249
	Окись меди	37	0,5	79
	Металлическая медь	45	0,72	63
		42	,65	

Примечание: $F_{тр}$ – сила трения, N - нормальная нагрузка.

2.1.5. Контроль физической чистоты поверхности подложек

Различают два вида чистоты поверхности подложек: физическую, т.е. отсутствие пыли и жировых загрязнений, и химическую – отсутствие загрязнений, которые могут появляться не только в естественных условиях, но и в технологическом процессе. Если контроль на наличие пылинок достаточно легко осуществляется микроскопическими методами, то определение степени жировых и химических загрязнений представляет достаточно сложную техническую задачу.

Из существующих методов контроля наиболее применяемым на практике является капиллярный метод, основанный, прежде всего, на явлении смачивания поверхности подложки жидкостью. Явление это вызывается взаимным притяжением атомов или молекул жидкости либо твердого тела (в газах теп-

ловое движение преодолевает это притяжение). В результате минимум свободной энергии достигается в жидкости или твердом теле, когда поверхность их минимальна. Таким образом, поверхности стремятся сократиться и возникают силы поверхностного натяжения.

Рассматривая каплю жидкости, лежащую на поверхности твердого тела (рисунок 2.4), можно выделить элементарный цилиндр в тройной точке А, где соприкасаются твердое тело, жидкость и окружающий газ. На единицу длины этого цилиндра действуют три силы поверхностного натяжения: твердое тело-газ $F_{тг}$, твердое тело-жидкость $F_{тжс}$ и жидкость-газ $F_{жсг}$. Когда капля находится в состоянии покоя, равнодействующая проекций этих сил на поверхность твердого тела равна нулю: $F_{жсг} \cos \theta + F_{тжс} - F_{тг} = 0$; $\cos \theta = (F_{тг} - F_{тжс}) / F_{жсг}$. Если $F_{тг} > F_{тжс}$, то угол θ острый, т.е., значит, жидкость смачивает твердое тело (рисунок 2.4.а): чем меньше θ , тем сильнее смачивание. В пределе $F_{тг} > F_{тжс} + F_{жсг}$ означает, что дробь $(F_{тг} - F_{тжс}) / F_{жсг}$ больше единицы, чего не может быть, так как косинус угла всегда по модулю меньше единицы.

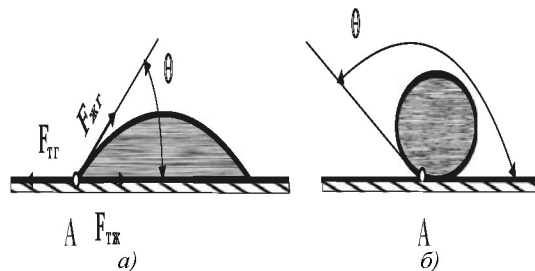


Рисунок 2.4. Оценка смачиваемости поверхности подложки жидкостью:
а) смачивание, б) несмачивание

Предельный случай будет соответствовать полному смачиванию, т.е. растеканию жидкости по всей поверхности твердого тела. Если $F_{тжс} > F_{жсг}$, то $\cos \theta$ отрицателен, следовательно, угол θ тупой (рисунок 2.4.б). Это означает, что жидкость не смачивает твердое тело. В пределе $F_{тжс} > F_{тг} + F_{жсг}$, что соответствует полному отсутствию смачивания.

2.1.6. Контроль чистоты поверхности подложки по критерию площади калиброванной капли жидкости

Как это следует из анализа существующих методов, для контроля степени чистоты поверхности подложек могут быть применены различные способы и устройства, но в основном они являются неэффективными (электрохимические, контроль запотевания подложки, КРП и т.д.) или дорогостоящими (флуоресценция, ЭПР, микроскопы с высоким разрешением и т.д.). Более быстрый и наглядный результат все-таки дает метод смачивания. На эффекте смачиваемости разработано большое количество способов контроля чистоты

поверхности, однако наибольшее распространение получили методы, основанные на смачиваемости исследуемой поверхности очищенной водой.

Наиболее просто контроль в производстве осуществляется оптическими методами, в основе которых лежит измерение краевого угла смачиваемости подложки каплей жидкости, находящейся в «стационарном состоянии». Однако анализ показал, что процесс оценки является относительно длительным и составляет несколько минут, и использование в качестве критерия чистоты краевого угла нецелесообразно ввиду низкой воспроизводимости результатов измерения трудоемкости количественной оценки степени чистоты. При изготовлении полупроводниковых интегральных схем на больших подложках (сотни квадратных сантиметров), гибридных интегральных схем СВЧ-диапазона, дифракционных оптических элементов (ДОЭ) и устройств на их основе для оценки степени загрязнения поверхности подложек потребуется несколько часов.

Предложено использовать в качестве критерия площадь калиброванной капли. Это значительно упростило процесс измерения. Однако, как было установлено, с ростом степени чистоты, начиная с некоторого критического значения, форма капли на подложке деформировалась, что приводило к значительному усложнению процесса определения площади взаимодействия капли с поверхностью подложки. Для уменьшения временных затрат при выполнении контрольных операций для оценки степени чистоты поверхности исходной подложки предложен более простой способ контроля степени чистоты поверхности подложки, состоящий в оценке изменения коэффициента прохождения светового потока через структуру жидкость-подложка непосредственно в процессе растекания зондирующей капли жидкости.

2.1.7 Комбинированные методы контроля чистоты поверхности

Если рассматривать процесс взаимодействия капли жидкости с поверхностью подложки в динамике, то, как уже было отмечено ранее, ее форма претерпевает изменения от формы шара до шарового сегмента, геометрические формы которого, по крайней мере в центре сегмента, близки к форме плоскопараллельного слоя жидкости. Отсюда следует, что при выполнении условия $S_o \gg S$, где S_o – площадь взаимодействия капли жидкости с поверхностью подложки, S – площадь сечения светового потока, прошедшего через структуру жидкость-подложка, фиксируемый измерительным устройством, в качестве физической модели можно использовать структуру, изображенную на рисунке 2.5.

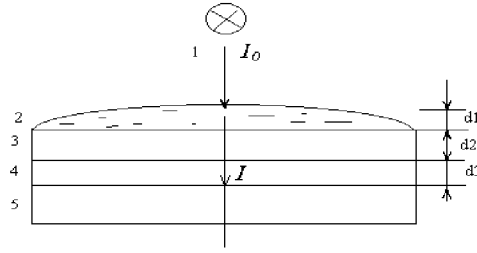


Рисунок 2.5. Схема прохождения светового потока:
световой луч, 2- жидкость, 3- подложка, 4- воздух, 5- фотоэлемент

Согласно этой модели, свет с интенсивностью I_0 падает перпендикулярно на плоскопараллельную слоистую структуру. При этом интенсивность света уменьшается пропорционально пути, пройденному световым лучом в поглощающей среде согласно закону Бугера-Ламберта:

$$I = I_0 e^{-\mu d}, \quad (2.1.7)$$

где I и I_0 – интенсивность плоской монохроматической волны на входе в слой поглощающего вещества толщиной d и на выходе из него соответственно, μ – линейный коэффициент поглощения.

Кроме этого, на границе раздела двух оптически прозрачных сред происходит частичное отражение светового потока согласно выражения

$$R = [(n_{21} - 1) / (n_{21} + 1)]^2, \quad (2.1.8)$$

где R – коэффициент отражения; n_{21} – относительный показатель преломления. Интенсивность света, входящего в слой жидкости толщиной d_1 из воздушной среды:

$$I_1 = I_0(1-R) = I_0 \{1 - [(n_{21} - 1) / (n_{21} + 1)]^2\}, \quad (2.1.9)$$

где I_1 – интенсивность падающего потока, входящего в слой жидкости; n_{21} – относительный показатель преломления воздух-жидкость.

Интенсивность света I_2 , проходящего через слой жидкости толщиной d_1 :

$$I_2 = I_1 \exp(-\mu_1 d_1) = I_0 \{1 - [(n_{21} - 1) / (n_{21} + 1)]^2\} \exp(-\mu_1 d_1), \quad (2.1.10)$$

где μ_1 – линейный коэффициент поглощения жидкости.

Интенсивность света I_3 , прошедшего границу раздела слоя жидкость-подложка:

$$I_3 = I_2 \{1 - [(n_{21} - 1) / (n_{21} + 1)]^2\} = I_0 \{1 - [(n_{21} - 1) / (n_{21} + 1)]^2\} \exp(-\mu_1 d_1) \{1 - [(n_{32} - 1) / (n_{32} + 1)]^2\}, \quad (2.1.11)$$

где n_{32} – относительный показатель преломления для границы жидкость-подложка.

Интенсивность света I_4 на границе подложка-воздух:

$$I_4 = I_3 \exp(-\mu_2 d_2) = I_0 \{1 - [(n_{21} - 1) / (n_{21} + 1)]^2\} \exp(-\mu_1 d_1) \{1 - [(n_{32} - 1) / (n_{32} + 1)]^2\} \exp(-\mu_2 d_2), \quad (2.1.12)$$

где μ_2 – линейный коэффициент поглощения материала подложки; d_2 – толщина подложки.

Интенсивность света при переходе границы подложка-воздух:

$$I_v = I_4 \{1 - [(n_{43}-1)/(n_{43}+1)]^2\}, \quad (2.1.13)$$

где n_{43} – относительный показатель преломления для границы подложка-воздух.

Потерями светового потока в слое воздуха толщиной менее 1 мм можно пренебречь. Тогда интенсивность светового потока I_5 , попадающего на поверхность фотодиода, можно рассчитывать по формуле

$$I_5 = I_0 \{1 - [(n_{21}-1)/(n_{21}+1)]^2\} \exp(-\mu_1 d_1) \{1 - [(n_{32}-1)/(n_{32}+1)]^2\} \exp(-\mu_2 d_2) \cdot \{1 - [(n_{43}-1)/(n_{43}+1)]^2\}. \quad (2.1.14)$$

В этом уравнении переменной величиной является толщина слоя жидкости d_1 , поэтому формулу можно представить в виде

$$I_5 = I_0 K \exp(-\mu_1 d_1), \quad (2.1.15)$$

где $K = \{1 - [(n_{21}-1)/(n_{21}+1)]^2\} \{1 - [(n_{32}-1)/(n_{32}+1)]^2\} \exp(-\mu_2 d_2) \{1 - [(n_{43}-1)/(n_{43}+1)]^2\}$.

Очевидно, что K является постоянной величиной для данного типа исследуемой структуры.

Изменение интенсивности света регистрировали с помощью фотодиода типа ФД-6, вольт-амперная характеристика которого для фотодиодного режима описывается выражением

$$J = J_s \{ \exp[q(\varphi - U) / kT] - 1 \} - J_\phi, \quad (2.1.16)$$

где U – напряжение, приложенное к фотодиоду; J – ток в цепи фотодиода; φ – контактная разность потенциалов фотодиода; J_ϕ – фототок в структуре фотодиода; J_s – ток насыщения; q – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Для реальных фотоэлементов экспериментальным данным лучше соответствует выражение

$$J = J_s [\exp(q\varphi / AkT) - 1] - J_\phi, \quad (2.1.17)$$

где φ – разность потенциалов, приложенная в прямом направлении; A – коэффициент, зависящий от толщины p - n перехода.

Величина фототока p - n перехода прямо пропорциональна числу квантов света, поглощаемых в полупроводнике за единицу времени в единице объема:

$$J_\phi = q\alpha\omega\eta S I_5 = k_\lambda I_5, \quad (2.1.18)$$

где α – спектральный коэффициент поглощения полупроводника; ω – толщина светочувствительного слоя фотоэлемента, на которую проникает световой поток; η – квантовый выход, рассчитанный на падающий световой поток; S – площадь фотоприемника; q – заряд электрона; I_5 – световой поток, попавший на фотоприемник.

Подставив (2.17) в (2.18) получим

$$J = J_s \{ \exp[q(\varphi - U) / AkT] - 1 \} - k_\lambda I_5. \quad (2.1.19)$$

Из соотношения (2.20) видно, что при постоянных величинах φ и U закон изменения тока в цепи фотодиода полностью определяется величиной I_5 , т.е. высотой капли жидкости на поверхности подложки. Для экспериментальной реализации вышеприведенных методов используется схема, краткое описание

которой приведено ниже. Задачей электрической схемы устройства измерения чистоты является преобразование светового потока в электрический сигнал, осуществляемое с помощью фотозлемента. Для линейного преобразования тока фотодиода в напряжение использовался операционный усилитель (ОУ). С выхода усилителя тока напряжение подается на дифференцирующую цепь, с помощью которой осуществляется преобразование импульса напряжения и выделяется информативная часть. Далее импульс напряжения поступает на вход линейного усилителя, включенного по схеме инвертирующего усилителя. Усиление сигнала до значений порядка сотен милливольт необходимо для уменьшения погрешности измерения амплитудного значения импульса. Регистрировался сигнал ЭВМ, на которую были установлена плата с аналоговым входом и программное обеспечение, позволяющее работать в режиме запоминающего осциллографа.

Для повышения воспроизводимости результатов измерения питание источника света осуществлялось от стабилизированного источника напряжения, воздействие на фотодиод дополнительных (паразитных) источников света, например ламп накаливания и дневного освещения, устранялось проведением процесса измерения в светонепроницаемой камере. Формирование калиброванных капель жидкости осуществлялось при вращении толкателя механизма подачи поршня и выталкивании жидкости через калиброванную полую иглу. Если рассмотреть этот процесс во времени, то на конце иглы начинает расти капля жидкости. Геометрические размеры этой капли определяются размерами полости в игле, а также смачиваемостью поверхности иглы жидкостью, силами поверхностного натяжения и тяжести. При нарушении баланса этих сил капля срывается с конца иглы и падает на поверхность подложки. В качестве жидкости в устройстве использовалась дистиллированная вода, применение которой позволило использовать подложки, прошедшие процесс измерения в технологическом процессе без их дополнительной очистки, причем для визуализации иногда в воду добавлялся краситель. На выходе усилителя электрической схемы величина сигнала, описывающего закон изменения величины I_3 , принимает следующие значения и вид (рисунок 2.6.).

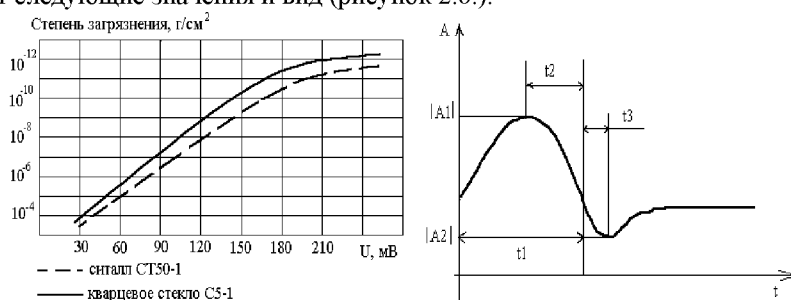


Рисунок 2.6. Зависимость амплитуды сигнала от чистоты поверхности и его вид

Для определения критерия оценки степени чистоты поверхности подложек могут быть использованы параметры $|A1|$, $|A2|$, t_1 , t_2 , t_3 (см. рис.2.7) Методика определения критерия оценки степени чистоты состоит в следующем. Подложки, прошедшие стандартную химическую очистку, подвергались дополнительной очистке их поверхности реактивно-ионным травлением. При вскрытии рабочей камеры установки реактивно-ионного травления осуществляется контакт исследуемой поверхности с газовой средой, т.е. поверхность подложек начинает заполняться газовыми молекулами. Процесс адсорбции на поверхности твердых тел продолжается до установления равновесного состояния и описывается уравнением

$$dN/dt = [f p (1 - \theta) / (\sqrt{2\pi m k T})] - N_m \theta / \tau_a, \quad (2.1.20)$$

где m - масса адсорбированной молекулы; N - количество адсорбированных молекул; N_m - количество молекул, образующих монослой; $\theta = N/N_m$ - степень покрытия поверхности адсорбированными молекулами; f - вероятность поглощения молекулы газа на свободной поверхности; τ_a - время адсорбции; p - давление; T - температура; k - постоянная Больцмана.

С течением времени появление адсорбированных молекул на поверхности подложек приводит к ее загрязнению и изменению физических свойств, например, изменению процесса смачиваемости, причем

$$\tau_a = \tau_o \exp(Q_a / RT), \quad (2.1.21)$$

где τ_o - период колебания молекулы адсорбированного газа (равный по порядку величины 10^{-13} с); Q_a - теплота адсорбции; R - универсальная газовая постоянная, равная 8,31 КДж/Кмоль.

Следовательно, если проводить измерения чистоты через определенные промежутки времени, то можно определить связь между параметрами $|A1|$, $|A2|$, t_1 , t_2 , t_3 и степенью чистоты поверхности подложек. Действительно, как следует из рис.2.6., такая зависимость существует, и наиболее чувствительным параметром является величина $|A1|$. Для объяснения этого момента рассмотрим механизм растекания капли по поверхности подложек и связанное с ним изменение светового потока I_3 . В момент касания капли с поверхностью подложки капля представляет собой шар, освещаемый потоком света с равномерным распределением интенсивности по площади. Примем, что $S_1 > S_2$, где S_1 - площадь светочувствительного слоя фотоэлемента, S_2 - площадь сечения капли, проходящего по диаметру шара, а поверхность светочувствительного слоя фотодиода совпадает с фокальной плоскостью линзы, которой является свободно падающая капля жидкости. Для сферической линзы в воздухе фокусное расстояние определяется соотношением

$$f_1 = n_1 D / 4(n_1 - 1), \quad (2.1.22)$$

где n_1 - коэффициент преломления жидкости, D - диаметр капли, I_3 - световой поток, сфокусированный в точку во время нахождения капли на расстоянии f_1 от поверхности фотодиода.

Под действием силы тяжести и гидрофильного эффекта капля деформируется и при $h = D/2$ капля жидкости превращается в плосковыпуклую линзу, фокусное расстояние которой определяется выражением

$$f_2 = R' / (n_1 - 1), \quad (2.1.23)$$

где R' – радиус шара, сегментом которого является капля на поверхности подложки.

Продолжение процесса растекания капли и соответственно увеличения радиуса шара R' приводит к увеличению фокусного расстояния и увеличению площади освещенного участка поверхности светочувствительного слоя фотоэлемента. Зависимость площади освещенного участка фотоэлемента от радиуса капли на поверхности подложки можно рассчитать, выразив отношение радиусов расфокусированного пятна в плоскости фотоэлемента и освещающего параллельного пучка через параметры плоско-выпуклой линзы и расстояние между поверхностями подложки и фотоэлемента. В результате для радиуса освещенного участка фотоэлемента R_{oy} в общем случае имеем

$$R_{oy} = R_0 \left[1 - \frac{(n_1 - n)S'}{nR'} \right], \quad (2.1.24)$$

где R_{oy} – радиус освещенного участка фотоэлемента; R_0 – радиус осветителя; n – показатель преломления окружающей среды; $S' = (d_2 + d_3)$ – расстояние между поверхностями подложки и фотоэлемента.

Отсюда легко считается площадь освещенного участка. Учитывая нелинейный характер зависимости фототока от плотности светового потока, можно заключить, что фототок с увеличением радиуса R' растет и при $h = R'$ достигает максимального значения. При дальнейшем растекании, т.е. $h < R'$, ток фотоэлемента уменьшается вследствие уменьшения плотности светового потока I_5 в плоскости светочувствительного слоя фотоэлемента и величина его изменяется согласно соотношению (2.1.18). В экспериментах использовались капли диаметром около 3 мм, то есть фокусное расстояние в начальный момент касания капель подложки составляло порядка 2...2,5 мм, а измерения начинались сразу после касания капель поверхности подложки.

Таким образом, величина $|A1|$ определяется практически процессами взаимодействия свободных поверхностных связей жидкости и подложки. Установление сплошного переходного слоя между ними значительно ослабляет явление отражения светового потока от поверхности подложки, что увеличивает долю светового потока, падающего на фотодиод.

Установление переходного слоя существенным образом зависит от типа атомов примесей, адсорбированных поверхностью подложки, поэтому величина $|A1|$, характеризующая процессы установления связей между жидкостью и подложкой, и является основным критерием оценки чистоты поверхности подложки. Однако более внимательное рассмотрение механизма появления участка $t = t_1 - t_2$ (рисунок 2.7) позволяет сделать вывод, что, по-видимому, величина $|A1|$ или крутизна участка t могут характеризовать еще и типы при-

месных атомов, загрязняющих поверхность подложки. Слабая зависимость параметров $|A2|$, t_1 , t_2 , t_3 от времени выдержки исследуемого образца на воздухе объясняется слабым влиянием на формирование светового потока I_5 оптической линзы.

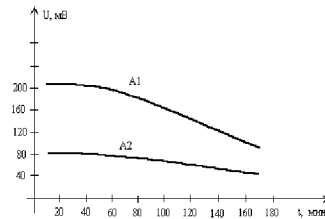


Рисунок 2.7. Зависимость амплитуды импульса от времени выдержки подложек на воздухе.

Чувствительность параметров капли к чистоте поверхности подложек можно повысить увеличением высоты ее падения, т.е. увеличением ее кинетической энергии (E_k). При ударе капли о поверхность подложки величина E_k переходит в энергию растекания капли и скорость движения жидкости по поверхности подложки увеличивается. Однако рост чувствительности наблюдается лишь в диапазоне $h = 3,5 \dots 13,5$ мм. При достижении некоторых критических значений $h \geq 13,5$ мм кинетическая энергия, приобретаемая каплей, начинает превышать энергию связи поверхностных атомов жидкости и капли при ударе о поверхность подложки начинают разбрызгиваться. Это приводит к росту эффекта рассеяния светового потока за счет отражения и преломления лучей света на локальных каплях. Другими словами, при $h > h_{кр}$ оптическая линза разбивается на несколько линз, соединенных между собой слоем жидкости. Это уменьшает долю светового потока, падающего на фотодиод, и чувствительность параметров $|A1|$, $|A2|$, t_1 , t_2 падает. Таким образом, учитывая вышеизложенное, в качестве рабочих параметров устройства измерения чистоты поверхности подложек можно принять значения $|A1|$ и $h = 9$ мм.

Как отмечалось выше, существующие в настоящее время методы контроля по измерению краевого угла смачивания не находят широкого применения в микроэлектронике по причине сложности измерения малых углов смачивания и невозможности по этой причине пользования этими методами для оперативного контроля технологического процесса. С этой точки зрения вышеописанный метод, безусловно, предпочтителен для отработки техпроцесса, но для экспресс-контроля, для упрощения и увеличения производительности вполне применим упрощенный способ определения загрязнения поверхности подложек по площади растекания калиброванной капли жидкости на исследуемой поверхности, т.е. критерием степени чистоты поверхности служит диаметр растекания малой капли определенного объема. Как это следует из элементар-

ных выкладок, краевой угол смачивания θ однозначно связан с диаметром растекания капли $d_n = 2r$:

$$\operatorname{tg}\theta = r / (R-h), \quad (2.1.25)$$

где r – радиус основания капли; R – радиус сферической поверхности капли; h – высота капли.

Решая (25) относительно R и учитывая, что решение должно находиться в области действительных чисел, получим

$$R = \sqrt{V / \pi h^2 + 1/3 h}, \quad (2.1.26)$$

где V – объем жидкости, образующий каплю.

На основании (2.1.25) и (2.1.26) имеем

$$\theta = \arccos [(3V - 2\pi h^3) / (\pi h^3 + 3V)]. \quad (2.1.27)$$

Устройство, реализующее способ определения степени чистоты поверхности по растеканию капли жидкости, позволяет отмерять объем исходной капли и наносить калиброванные капли на исследуемую поверхность.

Капля жидкости, образующаяся на конце иглы диаметром 0,6 мм, под действием силы тяжести падает на поверхность исследуемой подложки. Диаметр иглы, высота падения капли выбраны по критерию минимального разброса диаметров серии капель дистиллированной воды и минимального искажения формы капель на поверхности подложек (см. рисунок 2.8).

Рисунок 2.8 Зависимость погрешности диаметра растекания капли от высоты падения

Из графиков следует, что оптимальный диаметр капель $d_k = 3,0 - 3,5$ мм, высота падения капель $h = 8-12$ мм. В предлагаемом устройстве диаметр капель $d_k = 3,0$ мм, высота падения $h = 10$ мм. Жестко закрепленная игла ориентируется по центру приемной площадки фотодиода с точностью $\pm 0,1$ мм, (диаметр приемной площадки около 11 мм). В качестве индикаторной жидкости используется (как правило) дистиллированная вода, как вещество с хорошо изученными свойствами, однородное по структуре.

На рисунках 2.9. – 2.10. видно, что диаметр капель на поверхности подложек различной степени очистки существенно отличается. Это позволяет проводить контроль, не прибегая к измерительным устройствам.



Рисунок 2.9. Растекание капли по поверхности неочищенной подложки из кварцевого стекла. (Диаметр капль в среднем равен 4, 6, 10 мм)



Рисунок 2.10. Растекание капли по поверхности неочищенной подложки из ситалла СТ-50-1. (Диаметр капль в среднем равен 4,8,12 мм)

На поверхность подготовленной подложки сразу после очистки с помощью дозатора жидкости наносили каплю дистиллированной воды. Процесс ее падения и растекания по поверхности фиксировался скоростной видеокамерой со скоростью 1000 кадров в секунду и после перекодирования кодаком *DivX521XP2K*, просматривали на скорости 30 кадров в секунду. Процесс активного взаимодействия капли с поверхностью не превышал 50 мс. Из снятого видеоматериала с помощью программы *VirtualDub-1.6.1* вырезали информационные фрагменты, представленные на нижеследующих рисунках.



Рисунок 2.11. Формирование калиброванной капли за 1 мс до падения

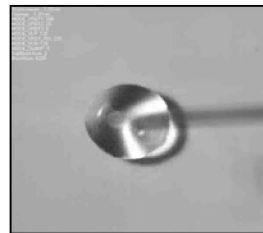


Рисунок 2.12. Касание капли загрязненной поверхности через 1 мс после падения

На рисунке 2.11. представлено формирование калиброванной капли за 1 мс до падения. Капля имеет идеально круглую форму. На рисунке 2.12. представлен момент касания каплей загрязненной поверхности. После касания капля в течение 180 мс будет совершать колебательные движения вверх и вниз, принимая форму сплюсненного или вытянутого по вертикали эллипсоида. На ри-

сунке 2.13. представлен момент касания капли очищенной поверхности через 1мсек после падения.

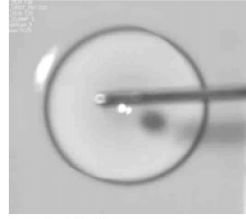


Рисунок 2.13. Касание капли очищенной поверхности через 1мс после падения

Рисунок 2.14. Растекание капли по очищенной поверхности. Время растекания 18 мс

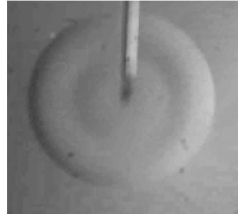


Рисунок 2.15. Растекание капли по очищенной поверхности с образованием волны. Время растекания 12 мс



Рисунок 2.16. Растекание капли по некачественно очищенной поверхности. Время растекания 12 мс

Скорость растекания капли превышает скорость падения. На рисунке 2.14. представлено изображение капли жидкости, растекающейся до максимально возможной площади. На рисунке 2.15. представлен фрагмент растекания капли по очищенной поверхности с образованием поверхностной волны. Это происходит в том случае, когда скорость растекания жидкости в объеме превышает скорость радиального фронта капли. Растекание жидкости в объеме определяется высотой падения капли, а скорость радиального фронта капли параметрами поверхности подложки. На рисунке 2.16. представлен фрагмент растекания капли по некачественно очищенной поверхности. Этот процесс также сопровождается поверхностной волной, пробежавшей от центра капли до ее края и обратно. Нарушение геометрии растекания показывает, что поверхность имеет локально и неравномерно расположенные участки загрязнения.

2.2. Контроль структуры конструкционных материалов и покрытий методом растровой электронной микроскопии

2.2.1. Физические основы растровой электронной микроскопии

Растровый электронный микроскоп (РЭМ) широко используется в научно-исследовательских лабораториях. По своим техническим возможностям он сочетает в себе качества как светового (СМ), так и просвечивающего электрон-

ного (ПЭМ) микроскопов, но является более многофункциональным. В основе РЭМ лежит сканирование поверхности образца электронным зондом и детектирование (распознавание) возникающего при этом широкого спектра излучений. Сигналами для получения изображения в РЭМ служат вторичные, отраженные и поглощенные электроны. Другие эффекты, в частности рентгеновское излучение, используется для получения дополнительной информации о химическом составе материала исследуемого образца (РСМА – рентгеноспектральный микроанализ). Все это определяет методические особенности использования РЭМ и создает целый ряд новых дополнительных аналитических возможностей в области электронной микроскопии. Высокая информативность, простота изготовления объектов для исследования, высокая степень автоматизации количественного анализа изображения и обработки результатов измерений и др. делают РЭМ наиболее универсальным прибором для исследования структуры материалов и топографии поверхности.

По степени распространения и использования РЭМ превзошел просвечивающие электронные микроскопы и близок к СМ. Он применяется в различных областях научной и практической деятельности, например в металлвоведении, медицине, химии и др.

Проведение исследований на электронных микроскопах, в том числе и на РЭМ, является довольно дорогостоящей операцией. Ее выполняет специально подготовленный оператор и от разработчика требуется четко сформулированное техническое задание на проведение исследования. Поэтому учебное пособие предусматривает ознакомление учащихся, будущих "потребителей" результатов исследований на РЭМ, с устройством и принципом работы микроскопа и микроанализатора, техническими возможностями и программным обеспечением аппаратуры, областями ее использования. Учащиеся должны также знать о специальных требованиях, предъявляемых к объектам для исследования. Они должны уметь определять круг задач, которые наиболее целесообразно решать с использованием РЭМ, обоснованно и квалифицированно составлять техническое задание на проведение соответствующих исследований, расшифровывать и анализировать полученную информацию.

Принцип действия основан на использовании некоторых эффектов, возникающих при облучении поверхности объектов тонко сфокусированным пучком электронов - зондом. Как показано на рис.2.17. в результате взаимодействия электронов 1 с образцом (веществом) 2 генерируются различные сигналы. Основными из них являются поток электронов: отраженных 3, вторичных 4, Оже-электронов 5, поглощенных 6, прошедших через образец 7, а также излучений: катодолюминесцентного 8 и рентгеновского 9.

Для получения изображения поверхности образца используются вторичные, отраженные и поглощенные электроны. Остальные излучения применяются в РЭМ как дополнительные источники информации. Важнейшей характеристикой любого микроскопа является его разрешающая способность. Она определяется: 1 - площадью сечения или диаметром зонда, 2 - контрастом,

создаваемым образцом и детекторной системой, 3 - областью генерации сигнала в образце.

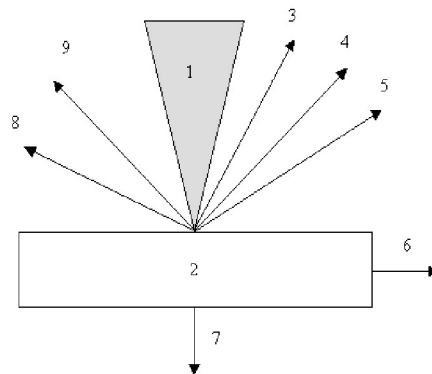


Рис. 2.17. Эффекты взаимодействия электронного луча с объектом: 1 – электронный луч, 2 – объект, 3 – отраженные электроны, 4 – вторичные электроны, 5 – Оже-электроны, 6 – ток поглощенных электронов, 7 – прошедшие электроны, 8 – катодолюминесцентное излучение, 9 – рентгеновское излучение

Диаметр зонда в основном зависит от конструктивных особенностей и качества узлов микроскопа и, прежде всего, электронной оптики. В современных РЭМ достигнуто высокое совершенство компонентов конструкции, что позволило уменьшить диаметр зонда до 5...10 нм. Влияние контраста на разрешающую способность проявляется в следующем. Формирование контраста в РЭМ определяется разностью детектируемых сигналов от соседних участков образца, чем она больше, тем выше контраст изображения. Контраст зависит от нескольких факторов: топографии поверхности, химического состава объекта, поверхностных локальных магнитных и электрических полей, кристаллографической ориентации элементов структуры. Важнейшими из них являются топографический, зависящий от неровностей поверхности образца, а также композиционный, зависящий от химического состава. Уровень контраста определяется также и эффективностью преобразования падающего на детектор излучения, которое создает сигнал на его выходе. Если получаемый в итоге контраст недостаточен, то его можно повысить, увеличив ток зонда. Однако большой поток электронов в силу особенностей электронной оптики не может быть хорошо сфокусирован, то есть диаметр зонда возрастет и, соответственно, снизится разрешающая способность.

Другой фактор, ограничивающий разрешение, зависит от размеров области генерации сигнала в образце. Схема генерации различных излучений при воздействии электронного пучка на образец представлена на рис.2.18. При проникновении первичных электронов в образец они рассеиваются во всех направлениях, поэтому внутри образца происходит расширение пучка электро-

нов. Участок образца, в котором первичные электроны тормозятся до энергии $E=0$, имеет грушевидную форму. Боковое расширение электронного пучка в образце в этом случае имеет величину от 1 до 2 мкм, даже когда зонд имеет диаметр 10 нм. Расхождение электронов приводит к тому, что площадь выхода на поверхность образца электронов будет больше фокуса электронного пучка. В связи с этим процессы рассеивания электронов внутри образца оказывают большое влияние на разрешающую способность изображений, получаемых в отраженных, вторичных и поглощенных электронах.

Отраженные электроны. Они образуются при рассеивании первичных электронов на большие (до 90°) углы в результате однократного упругого рассеивания или в результате многократного рассеивания на малые углы. В конечном итоге первичные электроны, испытав ряд взаимодействий с атомами образца и теряя при этом энергию, изменяют траекторию своего движения и покидают поверхность образца. Размеры области генерации отраженных электронов (рис.2.18.) значительны и зависят от длины пробега электронов в материале образца. Протяженность области возрастает с увеличением ускоряющего первичные электроны напряжения и уменьшения среднего атомного номера Z элементов, входящих в состав образца, и может изменяться от 0,1 до 1 мкм.

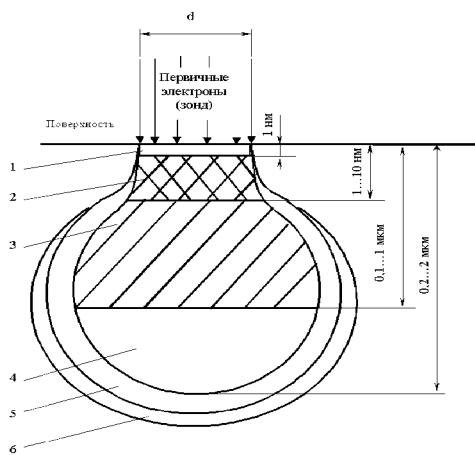


Рис. 2.18. Области сигналов и пространственное разрешение при облучении поверхности объекта потоком электронов (зонд). Области генерации: 1 – Оже-электронов, 2 – вторичных электронов, 3 – отраженных электронов, 4 – характеристического рентгеновского излучения, 5 – тормозного рентгеновского излучения, 6 – флуоресценции

Электроны, потерявшие в процессе отражения часть энергии, покидают образец на относительно больших расстояниях от места падения электронного зонда. Соответственно сечение, с которого получают сигнал, будет существенно больше сечения зонда. Поэтому разрешение РЭМ в режиме регистрации отраженных электронов небольшое и изменяется от десятков нанометров при работе с невысокими ускоряющими напряжениями и тяжелыми материалами

до сотен нанометров при работе с большими ускоряющими напряжениями и легкими материалами. Важной особенностью эмиссии отраженных электронов является ее зависимость от атомного номера элементов. Если атомный номер атомов материала в точке падения первичного пучка электронов мал (легкие атомы), то образуется меньшее количество отраженных электронов с малым запасом энергии. В областях образца, содержащих высокую концентрацию атомов с большим атомным номером (тяжелые атомы), большее число электронов отражается от этих атомов и на меньшей глубине в образце, поэтому потери энергии при их движении к поверхности меньше. Эти закономерности используются при получении изображений в отраженных электронах.

Вторичные электроны. Первичные электроны, проникающие в образец, взаимодействуют с электронами внешних оболочек атомов объекта, передавая им часть своей энергии. Происходит ионизация атомов образца, а высвобождающиеся в этом случае электроны могут покинуть образец и быть выявлены в виде вторичных электронов. Они характеризуются очень малой энергией до 50 эВ и поэтому выходят из участков образца, очень близких к поверхности. Глубина слоя, дающего вторичные электроны, составляет 1...10 нм. В пределах этого слоя рассеивание электронов пренебрежимо мало, и поэтому при получении изображений во вторичных электронах разрешающая способность определяется прежде всего диаметром первичного зонда. Вторичные электроны обеспечивают максимальную в сравнении с другими сигналами разрешающую способность порядка 5...10 нм. Поэтому они являются в РЭМ главным источником информации для получения изображения поверхности объекта, и именно для этого случая приводятся паспортные характеристики прибора. Количество образующихся вторичных электронов слабо зависит от атомного номера элемента. Основным параметром, определяющим выход вторичных электронов, является угол падения пучка первичных электронов на поверхность объекта. Таким образом, вариации наклона микроучастков поверхности вызывают резко выраженные изменения в выходе вторичных электронов. Этот эффект используется для получения информации о топографии поверхности. С целью увеличения эмиссии вторичных электронов часто образец устанавливается под углом к оси зонда. При этом будет ухудшаться резкость изображения – его размытие по краям. Для ее исправления в РЭМ предусмотрена система компенсации угла наклона. Метод наклона образца применяют при исследовании плоских объектов (металлографических шлифов и др.). Для образцов с сильно развитым рельефом полностью провести коррекцию угла наклона не удастся.

Поглощенные электроны. При воздействии зонда часть генерируемых электронов остается в объеме образца (рис.2.18). Так, при энергиях первичного пучка 10...20 кэВ примерно 50% от общего числа образующихся вторичных и отраженных электронов достигают поверхности образца и покидают ее. Оставшиеся электроны образуют ток поглощенных электронов (рис.2.17). Его величина равна разности между током зонда и токами отраженных и вторичных электронов. Эта разность является сигналом для по-

лучения изображения, на которое оказывают влияние как топографический, так и композиционный эффекты.

Поглощенные электроны генерируются в большом объеме. Разрешающая способность при получении изображений в этом случае имеет такой же порядок, как и для отраженных электронов. Данный метод получения изображений используется редко из-за малой разрешающей способности.

2.2.2. Устройство и работа растрового электронного микроскопа

Рассмотрим основные узлы микроскопа и их функции. Схема растрового электронного микроскопа приведена на рис. 2.19 Он состоит из следующих основных узлов: электронной пушки 1...3, эмитирующей электроны; электронно-оптической системы 4...10, формирующей электронный зонд и обеспечивающей его сканирование на поверхности образца 12; системы, формирующей изображение 11...17. РЭМ имеет вакуумную камеру, которая служит для создания необходимого разряжения ($\sim 10^{-3}$ Па) в рабочем объеме электронной пушки и электронно-оптической системы. Составными частями микроскопа являются механические узлы (шлюзы, гониометрический стол и т.д.), обеспечивающие установку и перемещение образца.

Электронная пушка состоит из катода 1, цилиндра Венельта 2 и анода 3. Обычно в качестве катода используется вольфрамовая V-образная проволока, согнутая под углом, как это показано на рисунке. При нагреве катода прямым пропусканием тока происходит термоэмиссия электронов. Электроны ускоряются напряжением, приложенным между катодом и анодом, которое можно изменять от 1 до 50 кВ. Цилиндр Венельта имеет высокий отрицательный потенциал и служит для регулировки потока электронов.

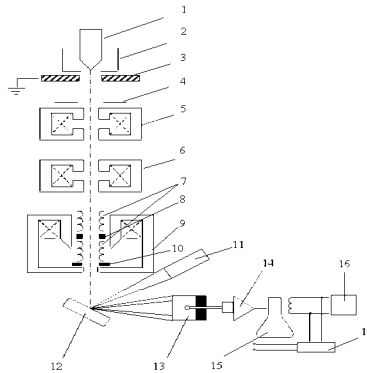


Рис. 2.19. Принципиальная схема растрового электронного микроскопа

Пучок электронов от пушки проходит через три электромагнитные линзы 5, 6, 9. Фокусировка потока электронов осуществляется магнитным полем, имеющим осевую симметрию. Оно создается электромагнитной линзой, которая представляет собой соленоид. Магнитное поле возникает при пропускании

электрического тока через обмотку соленоида, концентрируется с помощью так называемого полюсного наконечника и воздействует на проходящий через него поток электронов. Фокусное расстояние линзы можно плавно регулировать путем изменения силы тока в обмотке соленоида. В системе имеются две диафрагмы 4, 10, ограничивающие расходимость пучка электронов. несовершенства электронной оптики, как указывалось ранее, оказывают влияние на разрешающую способность микроскопа. К несовершенствам оптики относятся хроматическая, сферическая аберрации и астигматизм. Хроматическая аберрация возникает из-за различной скорости (т.е. длины волны) электронов и изменении ее по времени, что приводит к непостоянству фокусных расстояний линз. Хроматическую аберрацию уменьшают путем стабилизации ускоряющего электроны напряжения и электрического тока в линзах.

Сферическая аберрация возникает вследствие того, что электроны проходят на различных угловых расстояниях от оптической оси линзы и поэтому по-разному фокусируются. Сферическую аберрацию уменьшают наложением строгих ограничений на геометрию полюсных наконечников линз, увеличением ускоряющего напряжения и уменьшением диафрагмы. В этом случае поток формируется электронами, в меньшей степени отклоненными от оптической оси линзы. Возникновение астигматизма связано с нарушением магнитной или геометрической симметрии линзы. Устранение асимметрии достигается обеспечением высокой геометрической точности изготовления полюсного наконечника линзы и введением специальной системы, называемой стигматором 8, который корректирует магнитное поле линзы, восстанавливая его симметрию.

Стигматор расположен в объективной линзе 9. Внутри нее также находятся две пары электромагнитных отклоняющих катушек 7, каждая из которых служит для отклонения зонда соответственно в x и y направлениях в плоскости, перпендикулярной оси потока электронов. Катушки соединены с генератором 16, обеспечивающим синхронность передвижения электронного зонда по образцу и электронного луча по экрану электронно-лучевой трубки 15. Образец 12 крепится на предметном столике, который может перемещаться в трех взаимно перпендикулярных направлениях, допускает наклон образца до 90° к электронно-оптической оси и вращение вокруг оси от 0 до 360° . Электронный пучок, сфокусированный на поверхности образца, вызывает появление отраженных, вторичных и поглощенных электронов, которые используются для получения изображения поверхности образца. Эти сигналы улавливаются специальными детекторами. На схеме РЭМ (рис.2.19) представлен только один из возможного набора тип детектора, используемый для регистрации вторичных электронов 13. В детекторе поток электронов преобразуется в электрический сигнал (ток). После прохождения тока через усилитель 14 модулируется яркость экрана.

В качестве детектора вторичных электронов используется детектор Эверхарта-Торнли. Схема детектора представлена на рис. 2.20. Коллектор 1 имеет положительный потенциал, приблизительно $+250$ В, благодаря чему траекто-

рии вторичных электронов искривляются и они попадают в коллектор. На первичные и отраженные электроны, имеющие высокие значения энергии, этот потенциал существенного влияния не оказывает.

Внутри коллектора электроны ускоряются. Для этого на сцинтиллятор 3 подается высокое напряжение порядка 12 кВ. Его влияние на электронный зонд экранируется корпусом коллектора. Вследствие ускорения вторичные электроны получают достаточную энергию, чтобы вызвать световое излучение материала сцинтиллятора, которое по световоду 2 попадает на фотоумножитель 4, где преобразуется в электрический сигнал. Мощность этого сигнала и, следовательно, яркость соответствующей точки на экране при использовании вторичных электронов определяется топографическим контрастом. Характерная особенность топографического контраста в РЭМ - повышенная яркость изображения острых вершин и выступов рельефа поверхности образца - вызывается увеличением выхода электронов с этих участков.

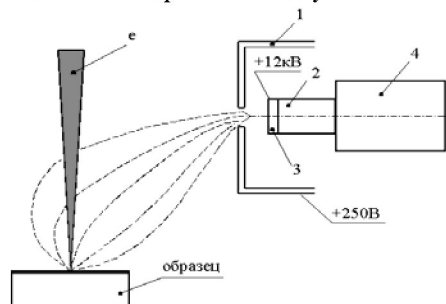


Рис.2.20. Схема детектора эмитированных электронов Эверхарта-Торнли (1 – коллектор, 2 – световод, 3 – сцинтиллятор, 4 – фотоумножитель)

Большая разрешающая способность РЭМ при работе в режиме регистрации вторичных электронов служит причиной того, что именно он используется при изучении топографии поверхности (поверхность излома, протравленного шлифа и др.). При формировании изображения в режиме детектирования вторичных электронов возможно появление композиционного контраста. Однако он относительно невелик.

Для регистрации отраженных электронов могут использоваться различные типы детекторов, в том числе и детектор Эверхарта-Торнли, но с некоторым изменением. Это вызвано тем, что отраженные электроны имеют высокую энергию, движутся прямолинейно, не отклоняясь электрическим полем в отличие от вторичных электронов. Поэтому нет необходимости использовать в детекторе высокие напряжения и, следовательно, коллектор. Эффективность сбора отраженных электронов зависит от угла наклона детектора к поверхности генерации электронов и расстояния между ними. Получение изображения в отраженных электронах вызвано тем, что эмиссия этих электронов зависит от порядкового номера химического элемента. Поэтому, например, на плоской поверхности образца участок материала с более высоким средним порядковым номером атомов отражает большее количество электронов. Он выглядит на эк-

ране более светлым относительно других участков образца. Полученный контраст называют композиционным.

Изображение в отраженных электронах позволяет определить количество фаз в материале, наблюдать микроструктуру материала без предварительного травления шлифа и др. Выявление структуры материала становится возможным, поскольку химический состав зерен в многокомпонентных системах отличается от химического состава их границ. В том случае, когда поверхность образца имеет ярко выраженные неровности, то дополнительно к композиционному возникает топографический контраст. Для разделения композиционного и топографического контрастов применяют два детектора отраженных электронов Эверхарта-Торнли. На рис. 2.21 приведен пример разделения контрастов. В случае сложения сигналов детекторов Д1 и Д2 усиливается композиционный и устраняется топографический контраст. При вычитании сигналов аннулируется композиционный и усиливается топографический контраст.

При получении изображения в поглощенных электронах сигналом служит ток поглощенных электронов, который равен току первичных электронов за вычетом тока отраженных и вторичных электронов. В итоге он зависит от количества эмитированных отраженных и вторичных электронов. Соответственно в сигнале присутствуют как композиционная, так и топографическая составляющая, причем они не разделяются. При сканировании зонда по поверхности образца, имеющего химическую неоднородность и сильно выраженный рельеф, интенсивность сигнала будет меняться. Для улавливания сигнала не требуется специальный детектор. Его роль выполняет образец, в котором образуются поглощенные электроны. Поток поглощенных электронов только усиливается, а затем передается в блок изображения. Метод широко использовался в ранних конструкциях сканирующих микроскопов.

Сигналы, преобразованные детектором в электрический ток, после усиления служат для модулирования яркости точек на экране. Формирование изображения поверхности объекта на экране будет происходить следующим образом. С помощью отклоняющих катушек осуществляется сканирование тонко сфокусированного зонда по поверхности образца. Совокупность параллельных линий (растр) дает представление о площади объекта. Генератор развертки, соединенный с отклоняющими катушками и монитором, обеспечивает синхронность передвижения электронного зонда по образцу и электронного луча по экрану. Благодаря этому каждая точка на образце соответствует определенной точке на экране. В свою очередь, яркость точки на экране определяется интенсивностью сигнала, поступающего от соответствующей точки образца.

Совокупность сигналов различной интенсивности создает контраст яркости (изображение) на экране трубки. Увеличение РЭМ определяется соотношением амплитуд развертки луча по экрану (L) и зонда по поверхности образца (l) и равно L/l . Так как максимальная длина развертки L на экране фиксирована, то повышение увеличения микроскопа достигается путем уменьшения l .

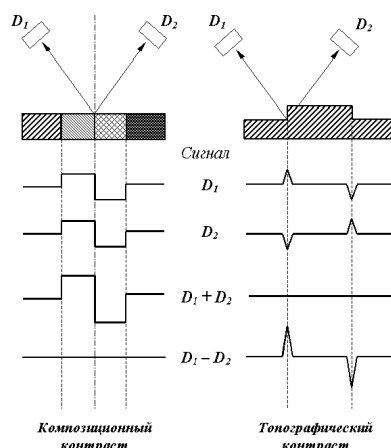


Рис. 2.21. Использование парного детектора (D_1 , D_2) для разделения композиционного (I) и топографического контрастов (II)

Изменение амплитуды колебания зонда задается с помощью блока управления увеличением, путем изменения тока в отклоняющих катушках. Обычно рабочий диапазон изменения увеличений, обеспечивающий высокую четкость изображения поверхности, составляет 10...50000.

2.2.3. Подготовка объектов для исследований и особые требования к ним

На РЭМ могут исследоваться как шлифы, так и поверхности объектов без предварительной подготовки. Изготовление шлифов к исследованию в РЭМ в общем осуществляется так же, как и для светомикроскопического исследования. Однако есть и некоторые особенности. Большая глубина резкости изображения в РЭМ позволяет получать дополнительную информацию, проводя глубокое травление шлифов. В то же время при получении изображений в отраженных электронах шлифы травлению не подвергаются. Размеры образцов для РЭМ определяются габаритами камеры микроскопа. Образцы должны быть электропроводящими. Для обеспечения их хорошего электрического контакта с предметным столиком и для фиксации образцов при наклоне стола используют специальные токопроводящие клеи. При исследовании непроводящих ток материалов - диэлектриков на их поверхность наносится напылением тонкая пленка электропроводников - золото, графит и т.д. При работе с органическими материалами нужно учитывать, что при длительном контакте зонда с образцом возможно его термическое разрушение.

Перед испытанием образцы должны быть тщательно очищены, чтобы не образовывались газообразные продукты, затрудняющие получение требуемого вакуума при откачке микроскопа и загрязняющие его колонну. Рекомендуется проводить очистку образцов в различных растворителях с использованием

ультразвука. При проведении топографических исследований нельзя допускать окисления поверхностей излома.

2.2.4. Технические возможности растрового электронного микроскопа

Электронный растровый микроскоп позволяет:

1. Непосредственно исследовать большие площади поверхностей на массивных образцах и даже деталях в широком диапазоне увеличений от 10 до 50000 и выше с достаточно высоким разрешением. При этом не требуется, как для ПЭМ, выполнения сложных и длительных операций по изготовлению специальных объектов - реплик, прозрачных для электронного луча. Исключается возможность погрешностей вследствие деформации реплик при снятии их с объекта и под действием электронного луча.
2. На РЭМ можно исследовать общий характер структуры всей поверхности объекта при малых увеличениях и детально изучить любой интересующий исследователя участок при больших увеличениях. При этом отпадает необходимость в разработке специальных прицельных методов. Переход от малых увеличений к большим на РЭМ осуществляется быстро и просто. Возможность быстрого изменения увеличения в процессе работы микроскопа от 10 до 50000 позволяет легко устанавливать полезное увеличение. Оно определяется как $M_{пол} = 200 \text{ мкм}/d$, где d - диаметр соответствующего элемента изображения в мкм. Нужно также иметь в виду, что изображение будет точно сфокусировано, когда область зондирования пучком на образце меньше, чем размер элемента изображения.
3. РЭМ имеет большую глубину фокуса, что позволяет наблюдать объемное изображение структуры с возможностью ее количественной оценки. Создаются условия прямого изучения структуры поверхностей с сильно развитым рельефом, например, изломов.
4. РЭМ обычно снабжен микроанализаторами химического состава, что позволяет получать более полную информацию о поверхности изделия.

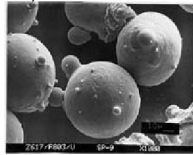
2.2.5. Области применения растрового электронного микроскопа

РЭМ обеспечивает широкие возможности для изучения структуры материалов:

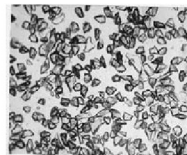
1. Высокая разрешающая способность РЭМ делает целесообразным его использование для металлографического исследования дисперсных элементов структуры: частиц второй фазы, ямок травления, пор, а также начальных очагов разрушения металла при коррозии, эрозии,

износе и других видах внешнего воздействия. Современные РЭМ снабжены программным обеспечением, позволяющим проводить автоматизированную обработку изображений, включающую оценку дисперсности среднего размера, протяженности границ, формы и других параметров структуры материалов. Варьирование увеличений в широком диапазоне и большая глубина резкости, достигаемая в микроскопе, значительно упрощают исследование поверхностей тонких объектов - торцевой поверхности тонкого листа, микронной проволоки и др.

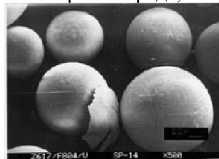
2. На РЭМ успешно изучают порошки, в которых важно оценить морфологию частиц, их дисперсию и другие параметры, требующие получение объемной информации. Большая глубина фокуса РЭМ позволяет отчетливо и одновременно наблюдать частицы порошка, сильно отличающиеся по размерам, например, с радиусом частиц 0,05 мкм и 1 мм. Обилие полутонов на изображениях, получаемых в РЭМ, создает впечатление объемности и часто позволяет правильно представить себе пространственную конфигурацию элементов структуры исследуемого объекта. Для более сложных случаев можно использовать метод стереопар, обеспечивающий объемное изображение. В качестве примера приведены фотографии порошков, отличающихся химическим составом и технологией получения (рис 2.22).



Сплав Ni-Co-Cr-Al-Y – распыление в инертной среде, x1000



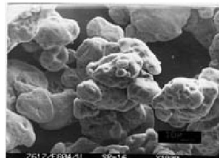
Al₂O₃ – механическое измельчение, x150



Al₂O₃ – сжигание раствора, x500



WC планкированный никелем, x200



Cr-Ni гидридный метод, x1000



Дендрит Zn, полученный электрохимическим осаждением

Рис. 2.22. Фотографии порошков

В отличие от других видов микроскопов РЭМ позволяет наблюдать высокопористую структуру порошковых материалов на различных технологических стадиях получения.

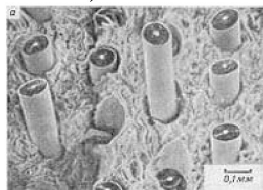
Эффект композиционного контраста позволяет на РЭМ наблюдать и ранжировать по среднему атомному номеру имеющиеся в образце фазы. Метод не требует предварительного травления шлифа, что позволяет одновременно осуществлять локальный микрорентгеноспектральный анализ химического состава образца. В настоящее время практически все РЭМ имеют приставки-микроанализаторы.

Используя композиционный контраст, выявляют фазы, границы зерен и, исследуя их с помощью микроанализатора, устанавливают характер распределения элементов по сечению зерна, химический состав различных включений. Компьютерная система РЭМ с использованием банка данных позволяет по химическому составу идентифицировать фазы.

Для проведения фрактографических исследований наиболее целесообразно в сравнении с другими микроскопами использовать РЭМ. Фрактографические исследования дают информацию о строении излома. Она используется для изучения механизма разрушения материалов и выявления причин поломки деталей и конструкций при эксплуатации, а также для определения порога хладноломкости материалов, связанного с переходом от вязкого к хрупкому разрушению и др. РЭМ имеет автоматический анализатор изображений. ЭВМ в системе РЭМ позволяет количественно анализировать изображение изломов методами математической статистики, корреляционного анализа и др. В качестве примера приведены различные изломы (рис. 2.23.) .



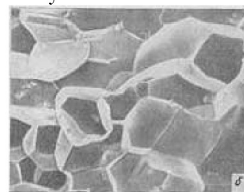
Вязкий усталостный излом



Вязкий усталостный излом



Хрупкий внутризеренный излом, x500



Хрупкий межзеренный излом, x100

Рис. 2.23. Изображение различных типов изломов металла

На РЭМ возможно получение картин каналирования электронов, дающих уникальную информацию о структуре материалов. Лежащий в основе этого метода эффект каналирования проявляется в следующем. Если первичные электроны при облучении объекта движутся между рядами атомов (по "каналам"), то вероятность их взаимодействия с атомами мала и они проникают на большую глубину. В этом случае выход вторичных электронов снижается и на экране возникает темная линия. Изменяя наклон зонда к поверхности образца на различные углы, получают картину каналирования электронов, представляющую собой сетку темных линий, пересекающих светлое поле в различных направлениях. Сравнивая полученную картину с атласом карт, рассчитанных на ЭВМ, определяют кристаллографическую ориентацию зерен и параметры кристаллической решетки. По картинам каналирования выявляют также дислокации, блочную структуру и степень ее разориентации. Поскольку каждое зерно имеет определенную картину каналирования, возникает зеренный контраст, который используется для выявления различных дисперсных фаз.

В РЭМ предусматривается установка различных приставок для получения дополнительной информации о материалах. Характеристическое рентгеновское излучение служит для оценки химического состава материала, в том числе его локальных областей. Катодолюминисценция позволяет определять включения и фазовый состав неметаллических и полупроводниковых материалов. Анализ потока прошедших через образец электронов дает представление о структуре фольг, подобно ПЭМ. РЭМ позволяет регистрировать магнитные поля и выявлять доменную структуру. Большие камеры для образцов в РЭМ дают возможность монтировать в них приспособления для проведения различных испытаний. Большая глубина фокуса РЭМ позволяет исследовать кинетику процессов в образце под действием механических нагрузок, магнитного и электрического полей, химических реактивов, нагрева и охлаждения. В настоящее время для РЭМ может быть использовано до 60 приставок различного функционального назначения.

2.3. Методы контроля геометрических характеристик микрорельефа дифракционных оптических элементов

2.3.1. Механические средства контроля

Существенным преимуществом механических методов измерения толщины пленок является независимость результатов измерения от диэлектрических, 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 щупа.

Недостатком этого метода является появление погрешности, возникающей вследствие углубления щупа в пленку, поэтому измерение толщины не будет точным.

Определение толщины слоя по количеству осажденного вещества.

Такого рода измерения наиболее удобно проводить, когда процесс 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.

Профилометр - профилограф

Прибор предназначен для измерения в лабораторных условиях шероховатости и волнистости поверхности изделий, сечение которых в плоскости измерения представляет прямую линию. Действие профилометра-профилографа основано на ощупывании неровностей исследуемой поверхности алмазной иглой датчика и преобразовании возникающих колебаний щупа в электрические сигналы, пропорциональные этим колебаниям. Прибор используется для контроля качества микрорельефа оптических элементов среднего ИК-диапазона, так как имеет не слишком высокие точностные характеристики (по высоте: 0,2 мкм – 500 мкм).

Оптические средства контроля

А. Общая характеристика оптических средств контроля

Более эффективным видом контроля является оптический. Оптический контроль основан на взаимодействии светового излучения с контролируемым объектом и регистрации результатов этого взаимодействия. Методы, характерные для оптического контроля, используют электромагнитное излучение в диапазоне длин волн в вакууме от 10^{-5} до 10^3 мкм и охватывают диапазоны ультрафиолетового, видимого и инфракрасного света. Оптические методы контроля условно разделены на три группы:

1. Визуальный и визуально-оптический методы характерны тем, что результаты контроля в наибольшей степени определяются личными качествами оператора.
2. Фотометрический, денситометрический, спектральный и телевизионный методы в основном строятся на результатах аппаратурных измерений и обеспечивают меньшую субъективность контроля.
3. Интерференционный, дифракционный, фазоконтрастный, рефрактометрический, поляризационный, стробоскопический, голографический методы используют волновые свойства света и позволяют про-

изводить неразрушающий контроль объектов с чувствительностью до десятых долей длины волны источника излучения.

Микроинтерферометр. Предназначен для визуальной оценки, измерения и фотографирования высоты неровностей обработанных поверхностей, а также для фотографирования поверхности и ее интерферограммы. Серийно выпускаемые в России на ЛОМО (Санкт-Петербург) микроинтерферометры Линника (МИИ-4, МИИ-10) обеспечивают измерение высот в пределах от 0,1 мкм до 8 мкм с отклонением от предела измерений 37% и 14%. В поле зрения микроинтерферометра одновременно видны интерференционные полосы и измеряемая поверхность. Если на измеряемой поверхности есть выступ или впадина, то произойдет искривление полос интерферограммы (см., например, рис.2.25.). Искривление интерференционной полосы на величину, равную расстоянию между соседними светлыми (или темными) полосами (на один период), означает изменение микрорельефа поверхности на $\lambda/2$ (на половину длины волны света).

Микроскоп контроля дефектов (МКД-Р) используется для визуального контроля дефектов фотошаблонов и поверхности подложек, а также микрорельефа ДОЭ.

Рефрактометр предназначен для измерения показателя преломления, линии спектра и средней дисперсии неагрессивных жидкостей и твердых тел. Точное определение показателя преломления n необходимо для правильного расчета высоты микрорельефа ДОЭ, работающего на пропускание.

Фотометр универсальный предназначен для измерения коэффициентов пропускания (или оптической плотности) твердых и жидких прозрачных (нерассеивающих) спектрально-неизбирательных сред, для измерения ряда других параметров и используется для контроля параметров полутонковых шаблонов при использовании ЖФПК.

Б. Интерференционные методы определения толщины пленки

Состояние вещества в пленке и его свойства могут отличаться от их значений в массивном образце. При очень тонких пленках (толщина менее 1 мкм) параметры, характеризующие свойства пленки: ϵ - для диэлектриков и ρ - для резисторов и полупроводников, резко меняют свои значения, поэтому при расчете микросхем важно знать зависимость ϵ и ρ от толщины пленки. На данном этапе развития микропленочной техники вопрос измерения толщины пленок представляет серьезную трудность, существующие методы не дают достаточно точных результатов при измерении пленок тоньше 1 мкм. Рассмотрим несколько различных способов замеров толщины тонких пленок. 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.

*Определение толщины пленки на подложке
при помощи воздушного клина*

При этом методе часть пленки, нанесенной на подложку, удаляется ножом или иным способом и сверху накладывается другая стеклянная плоскопараллельная пластинка, которая прижимается таким образом, что при освещении монохроматическим светом возникают интерференционные полосы, перпендикулярные границе удаленного слоя. Поскольку толщина воздушного клина, образованного двумя стеклянными пластинками, 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.2.24.), которые сдвинуты относительно друг друга на величину, определяемую разностью толщин воздушного клина. Толщину пленок можно определить, сравнивая толщины обоих клиньев в определенном месте по формуле

$$d = d_I - d_{II} = (q_I - q_{II} + a^{II} / a) \lambda / 2 = (a^{II} / a) (\lambda / 2), \quad (2.3.1)$$

где q_I и q_{II} - интерференционные полосы q - порядка для систем I и II; a^{II} - расстояние между двумя соседними полосами, имеющими соответственно порядки q_I и q_{II} ; a - расстояние между двумя полосами (в одной системе полос); λ - длина волны монохроматического света в вакууме.

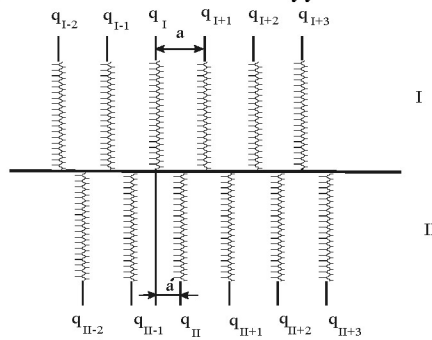


Рис. 2.24. Картина интерференционных полос

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

$$d = d_I - d_{II} = (q_I - q_{II} + a^{II} / a) \lambda / 2 = (a^{II} / a) (\lambda / 2), \quad (2.3.2)$$

где d - толщина измеряемой пленки, a_q - радиус кольца, q - порядок 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.

В. Микроинтерферометр Линника

Когда измеряемые толщины очень малы (менее 1мкм), 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.

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 тонко обработанных поверхностей. Через микроинтерферометр можно увидеть исследуемую поверхность и интерференционные полосы, искривляющиеся в местах выступов или впадин. Величина искривления дает возможность определить высоту неровности на исследуемой поверхности, измерить ее можно винтовым окулярным микрометром МОВ- I – 15^X. Прибор МИИ- 4 позволяет измерять высоты неровностей в пределах от I до 0,03 мкм.

Увеличение микроинтерферометра при визуальном наблюдении с винтовым окулярным микрометром и симметричным окуляром составляет – 490^X, увеличение при фотографировании – 290^X. Столик прибора имеет координатное перемещение в двух направлениях (по 10 мм каждое) и вращение на 360⁰. Цена деления барабана микрометрических винтов 0,005 мм. Микроинтерферометр позволяет вести наблюдение в обычном и монохроматическом свете. Обычное освещение осуществляется электролампочкой СЦ- 80 (8В, 9Вт), питаемой от осветительной сети 127/220В, через понижающий трансформатор 110-127-220/8В.

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, на два пучка. В микроинтерферометре МИИ- 4 в качестве разделяющей системы используется наклонная плоскопараллельная пластина, имеющая полупрозрачное светоотделительное покрытие (рис. 2.25). Половину падающего света пластина отражает, половину пропускает, вследствие чего

образуется две системы волн, способных интерферировать. В результате сложения (интерференции) двух систем волн в фокальной плоскости 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.

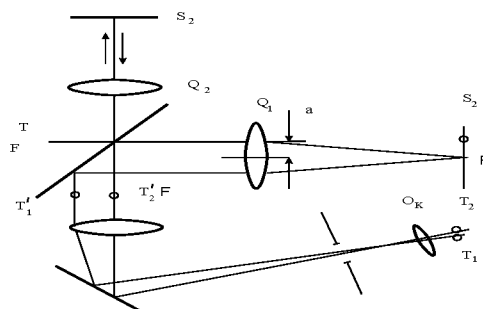


Рис. 2.25. Принципиальная схема измерения расстояния между изображениями источника света

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: основание с фотокамерой, штатив, интерференционная головка, предметный столик, визуальный тубус. Микроинтерферометр (рис.2.26) имеет круглое основание, на котором установлена фотокамера или рамка с матовым стеклом. К верхнему торцу основания привинчена цилиндрическая полая колонка с предметным столиком. При помощи двух микрометрических винтов столик перемещается в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Интерференционную картину можно наблюдать как в белом, так и в монохроматическом свете и фотографировать на пленку фотокамерой, входящей в состав прибора. Микроинтерферометр позволяет производить измерения с помощью винтового окулярного микрометра МОВ или фотоэлектрического окулярного микрометра ФОМ с автоматической обработкой результатов измерений. Использование микроинтерферометра с фотоэлектрическим окулярным микрометром позволяет повысить точность измерения параметров шероховатости в 2 раза, значительно сократить утомляемость оператора. Микроинтерферометр применяется в машиностроительной промышленности и в лаборатор-

риях научно-исследовательских институтов, занимающихся вопросами качества поверхностей.

Основные технические характеристики микроинтерферометра МИИ-4 представлены ниже:

- Диапазон измерения параметров шероховатости R_{\max} и R_z и толщины пленок: 0,1...0,8 мкм.
- Увеличение при визуальном наблюдении, 500 крат.
- Линейное поле зрения в пространстве предмета 0,3 мм.
- Габаритные размеры микроинтерферометра 300 x 300 x 420 мм.
- Масса 30 кг.

Оптическая схема микроинтерферометра показана на рис. 2.27. Нить лампы накаливания 1 проектируется коллектором 2 в плоскость апертурой диафрагмы 3. В фокальной плоскости проекционного объектива 4 помещена полевая диафрагма 5, которая изображается объективом 4 в бесконечности.

После проекционного объектива параллельный пучок лучей попадает на разделительную пластинку 6, на одной стороне которой нанесено светоделительное покрытие. Разделительная пластинка делит падающий на нее пучок света пополам: одну половину она отражает, другую — пропускает.

Пучок лучей, отраженный от пластинки 6, собирается в фокусе объектива 7 на исследуемой поверхности, после отражения от которой снова проходит через объектив 7, пластинку 6 и собирается в фокусе объектива 8, где наблюдается изображение исследуемой поверхности. Зеркало 9 направляет пучки лучей в визуальный тубус.

Второй пучок лучей, пройдя через разделительную пластинку 6, падает на компенсатор 10, после чего собирается в фокусе объектива // на эталонном зеркале 12, отразившись от которого, снова проходит через объектив 11, компенсатор 10 и падает на разделительную пластинку 6. При этом часть лучей проходит через пластинку 6 и не участвует в образовании изображения, а другая часть лучей отражается от пластинки 6 и интерферирует с лучами первой ветви микроинтерферометра, образуя резкое изображение интерференционных полос в бесконечности. Это изображение объективом 8 переносится в фокальную плоскость окуляра 13.

Для работы с монохроматическим светом, т. е. светом определенной длины волны, микроинтерферометр снабжен двумя интерференционными светофильтрами 14, которые включаются и выключаются из хода лучей перемещением направляющей. Светофильтры отличаются друг от друга своими характеристиками.

Рис. 2.26. Оптическая схема

Таким образом, изображения интерференционных полос и исследуемой поверхности получаются в фокальной плоскости окуляра и налагаются друг на друга.

При вынутом окуляре наблюдаются два изображения апертурой диафрагмы 3, которые являются выходными лучами системы; от их положения относительно друг друга зависят форма и положение полос, а также интервал между полосами.

При фотографировании зеркало 9 выключается из хода лучей и свет, пройдя через узел 15 и отразившись от зеркала 16, падает на поверхность матового стекла или фотопленку 17.

Перемещение отсчитывается по барабанам винтов, цена деления которых 0,005 мм. Кроме того, столик может поворачиваться вокруг вертикальной оси, и стопориться винтом. В колонке, 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 устанавливаются винтовой окулярный микрометр (МОВ – I – 15). На тубусе имеется кольцо, вращением которого можно вводить в оптическую систему или выводить из нее отражательное зеркало. При визуальном наблюдении или измерении зеркало должно быть введено в оптическую систему, а при фотографировании выведено. Вращением микрометрического винта осуществляется фокусировка микроскопа на объект. Величина вертикального перемещения интерференционной головки может быть отсчитана по барабану микрометрического винта, цена деления которого равна 0,003 мм.

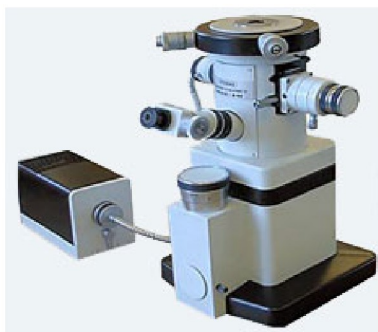


Рис. 2.27. Внешний вид микроинтерферометра

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

Интерференционная головка состоит из трех частей:

- 1) левой, включающей в себя фонарь с винтами для центровки лампы и трубку, внутри которой вмонтирована осветительная часть системы. В трубке установлена горизонтально выдвигающаяся пластина с тремя отверстиями. В двух крайних отверстиях этой пластины поставлены светофильтры монохроматического света; среднее отверстие свободное (используется при работе в обычном белом свете). Вращением кольца с накаткой изменяется диаметр открытия апертурной диафрагмы;
- 2) средней, в которую постоянно ввинчен объектив. Внутри корпуса средней части головки расположена рукоятка, 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 нанесена стрелка, ориентирующая положение шторки;
- 3) правой, содержащей в себе второй объектив и эталонное зеркало. Эта часть имеет устройство для измерения ширины и направления интерференционных полос. Ширина полос измеряется вращением винта вокруг своей оси. Изменение направления полос производится этим же винтом путем вращения его вокруг оси всей интерференционной головки.

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 (8В,9Вт) прибора производится через трансформатор переменного тока 110,127 или 220В. В одном корпусе с трансформатором помещается реостат, рукояткой которого можно изменять яркость свечения лампы. Трансформатор выпускается включенным на напряжение 220В.

При работе на микроинтерферометре наблюдатель не должен быть обращен лицом к окну или сильному источнику света, так как при этом глаза ослеплены

пляются 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 такой последовательности:

1. Включить лампу и положить измеряемый объект на столик прибора исследуемой поверхностью вниз (к объективу).
2. После настройки освещения вставить окуляр в тубус. Далее повернуть рукоятку так, чтобы указатель (стрелки) на ней стоял вертикально. С помощью микрометрического винта сфокусировать микроинтерферометр на испытуемую поверхность. Затем поворотом рукоятки включить объективную головку (стрелка на рукоятке в горизонтальном положении), при этом в поле зрения должны быть интерференционные полосы. Микрометрическим винтом 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 вокруг его оси. Затем поворотом винта вокруг оси объективной головки необходимо установить интерференционные полосы, перпендикулярные к грани измеряемой пленки. Для работы с монохроматическим светом необходимо перемещением до упора выдвигающейся пластинки включить один из светофильтров.

Измерение толщины пленок

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

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.

Измерение с помощью винтового окулярного микрометра

Для измерения с помощью винтового окулярного микрометра МОВ – I – 15^x 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 по-

верхности. После этого закрепить винтовой окулярный микрометр зажимным винтом.

Последовательность определения толщины пленки такая:

а) измерение величины интервала между полосами; б) измерение величины изгиба полос; в) вычисление толщины пленки.

Измерение величины интервала между полосами

При работе с белым светом все измерения производятся по двум черным полосам, величина интервала между которыми выражается числом делений барабанчика окулярного микрометра. Для большей точности измерения наводку нити перекрестия лучше всего производить по середине, а не по краю полосы. Первый отсчет N_1 производится по шкалам винтового окулярного микрометра, при совмещении одной из нитей перекрестия подвижной сетки с серединой полосы; затем совмещают эту же нить перекрестия с серединой следующей полосы и получают N_2 .

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 , а затем нить перекрестия совмещают с серединой той же полосы на пленке и получают второй отсчет N_4 .

Величина изгиба полосы в долях интервала между полосами выражается формулой

$$\Delta N = (N_3 - N_4) / (N_1 - N_2) \text{ (в полосах)}. \quad (2.3.3)$$

Вычисление толщины пленки.

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

$$d = 0,27 (N_3 - N_4) / (N_1 - N_2), \quad (2.3.4)$$

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 полосы.

Для монохроматического света:

$$d = \lambda (N_3 - N_4) / (N_1 - N_2). \quad (2.3.5)$$

Для измерения с помощью винтового окулярного микрометра МОВ-1-16х 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 (рис. 2.28.).

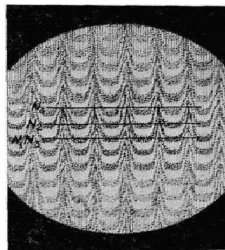


Рис. 2.28. Проведение измерения высоты неровности

После этого закрепить винтовой окулярный микрометр зажимным винтом. Для определения величины неровности необходимо измерить величину интервала между полосами, величину изгиба полос и вычислить высоту неровности.

2.4. Сканирующие зондовые микроскопы

2.4.1. Сканирующий зондовый микроскоп

Сканирующая зондовая микроскопия охватывает в настоящее время широкий спектр методов исследования поверхности. Среди них – сканирующая туннельная и сканирующая силовая микроскопия (ССМ), сканирующая микроскопия ближнего светового поля, магнитосиловая микроскопия и целый ряд других методов, родоначальником которых стал сканирующий туннельный микроскоп, в основе которых лежит использование острого зонда (иглы), перемещаемого пьезодвигателями вдоль образца на расстоянии в несколько ангстрем от поверхности без соприкосновения с нею или при очень слабом взаимодействии, исключающем повреждение поверхности зондом.

К настоящему времени сменилось уже два поколения сканирующих зондовых микроскопов. К первому поколению относятся сканирующие туннельные микроскопы (СТМ), изобретенные в 1981 году. Это сверхвысоковакуумные приборы, на которых впервые было получено атомарное разрешение при исследовании поверхности кристаллических образцов. Также были созданы и получили распространение жидкостные, воздушные, вакуумные и сверхвысоковакуумные варианты приборов.

В основе работы СТМ лежит регистрация туннельного тока между проводящим образцом и микроиглой. Микроигла формирует туннельный ток, локализованный на малой площади. Например, если микрозонд удален на фиксированное расстояние от поверхности, то высота физического рельефа в исследуемой точке определит величину туннельного тока. Поддерживая при сканировании неизменную величину туннельного перемещения микрозонда, определяют микрорельеф поверхности. Применение СТМ ограничивается проводящими поверхностями, и исследования в основе имеют чисто научное значение. Кроме того, интерпретация СТМ данных неоднозначна, поскольку ток зависит не только от расстояния, но и плотности электронных состояний, энергии связи электронов, присутствия адсорбционных слоев.

В 1986 году были изобретены ССМ, названные так, поскольку с их помощью регистрировалась одна из сил межатомного взаимодействия, так называемая сила ближнего поля. ССМ построены подобно патефону: острая подпружиненная игла скользит вдоль поверхности и при этом измеряется отклонение пружинки. Первоначально пружинки изготавливались из тонкой платиновой фольги и к ним приклеивалась острая маленькая иголочка – кантилевер, выбранная, например, из осколков монокристалла сапфира. Одним из основных требований к кантилеверу является то, что его острие должно быть предельно острым: заканчиваться единичными атомами (рис. 2.29). Технология промышленного производства таких кантилеверов была создана в 1990 году, после чего и начало развиваться второе поколение зондовых микроскопов.

Сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) – это настольный прибор с компьютерным управлением, который производит «ощупывание» объекта микрозондом. Причем «ощупывание» возможно как в вакууме, так и на воздухе и даже под водой. В качестве твердого зонда используется микробалка с кантилевером на свободном конце. Изменение угла наклона балки регистрируется с помощью чувствительного датчика (лазер – фотодиод).

Изменение положения кантилевера в процессе сканирования можно измерять разными способами: иглой сканирующего туннельного микроскопа (СТМ), интерферометрически, оптико-позиционной схемой, датчиком давления (тензодатчиком). Наиболее широко распространена оптико-позиционная схема регистрации.

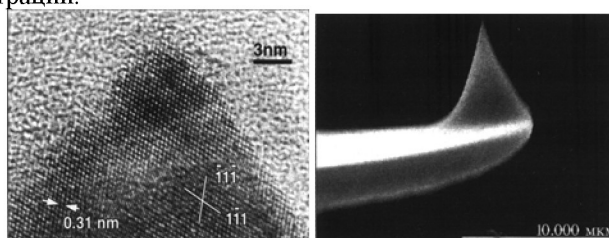


Рис. 2.29. Кремниевые кантилеверы

При приближении иглы к образцу между ними возникает обменное взаимодействие, приводящее к взаимному притяжению. Притяжение начинает чувствоваться кантилевером на расстояниях порядка десятков ангстрем. Сканируя поверхность и поддерживая постоянную силу притяжения, можно получить информацию о рельефе поверхности. Такой режим называется бесконтактной модой. Устойчивость достигается за счет обратной связи.

На рис. 2.30 схематично изображены составляющие компоненты СЗМ.

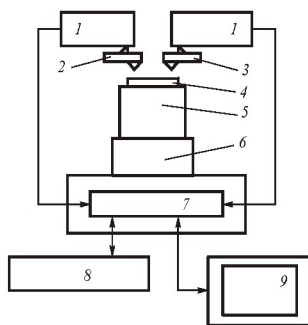


Рис. 2.30. Блок-схема СЗМ:

1 – датчик, регистрирующий отклонение зонда; 2 – кантилевер ССМ; 3 – игла СТМ; 4 – исследуемый образец; 5 – сканер, чье вертикальное перемещение по оси Z контролируется обратной связью; 6 – движитель с системой грубого подвода, обеспечивающий подведение образца к зонду в зону рабочего диапазона сканера; 7 – процессор; 8 – блок питания; 9 – рабочая станция

В режиме ССМ используется регистрация отклонений кантилевера с радиусом кривизны от 0,010 до 0,05 мкм (рис. 4.63), которая, являясь относительно несложной, позволяет регистрировать субангстремные отклонения кантилевера.

Источником является полупроводниковый лазер ($\lambda=0,65$ мкм, $P=0,7-4$ мВт), луч которого фокусируется на зеркальной поверхности кантилевера в районе острия. Отраженный от кантилевера свет попадает на четырехсекционный фотодиод, усиленный разностный сигнал от которого позволяет определить угловое отклонение кантилевера с точностью до $0,1''$, что обеспечивает разрешение 0,0001 мкм.

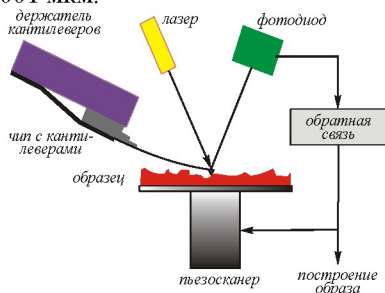


Рис. 2.31. Схема работы СЗМ в режиме ССМ

В режиме СТМ фиксируется ток, протекающий через диэлектрический промежуток между сверхострой иглой (радиус кривизны 0,003-0,005 мкм) и образцом, который возникает при подводе иглы на расстояние около 10 \AA к поверхности образца. Для его возникновения необходимо, чтобы образец и игла были проводниками либо полупроводниками. Туннельный ток усиливается в предусилителе, установленном на том же юстировочном столике, что и игла, и попадает в цепь обратной связи, а также после АЦП становится сигналом,

который регистрируется программой обработки и построения изображений сканируемой поверхности.

Неотъемлемым элементом в СЗМ, служащим для измерения положения зонда относительно образца с субангстремной точностью по трем взаимно перпендикулярным осям, является пьезосканер. Управление пьезосканером осуществляется программным заданием электрических потенциалов посредством ЦАП процессора через высоковольтные усилители на контактах пьезосканера, благодаря свойству пьезокерамики сжиматься или растягиваться под действием приложенной к ней разности потенциалов.

Процессор состоит из электронной платы, монтирующейся под основанием микроскопа. Вся электроника, управляющая микроскопом, сосредоточена в нем. Тип процессора определяет площадь и минимальный шаг сканирования. Например, использование 18-разрядного процессора позволяет сканировать площадь 7×7 мкм с минимальным шагом пьезосканера – $0,26 \text{ \AA}$.

Общее управление и обработка полученной с помощью СЗМ информации ведется с помощью персонального компьютера, которым комплектуется СЗМ. Имеющееся программное обеспечение позволяет наглядно и удобно представлять полученные изображения микрорельефа. Пример изображения фрагмента микрорельефа, полученного с помощью зондового микроскопа, представлен на рис. 2.32. Высокая точность и существенно меньшая цена по сравнению с традиционными электронными микроскопами (на несколько порядков) позволяют классифицировать СЗМ как эффективное средство контроля при создании дифракционной оптики ближнего ИК, видимого диапазона и более коротких длин волн.

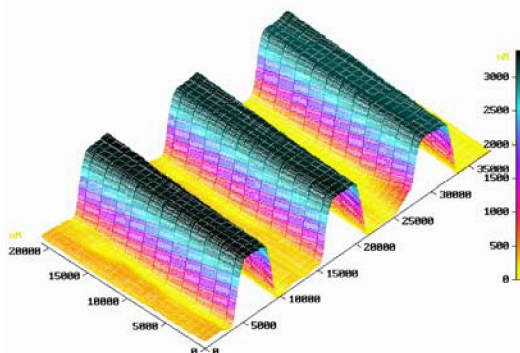


Рис. 2.32. Фрагмент дифракционного микрорельефа, полученный с помощью СЗМ. При выполнении работ используются как стандартное контрольно-измерительное оборудование, так и устройства, разработанные или модернизированные с целевым назначением – для проведения необходимых исследований

2.4.2. Исследование поверхности твердых тел методом сканирующей туннельной микроскопии

Как отмечалось выше, в основе СТМ лежит явление квантово-механического туннельного эффекта, заключающегося в способности частиц

преодолевать потенциальные барьеры, высота которых превышает полную энергию частицы. Согласно квантово-механическим представлениям, положение электрона в пространстве описывается волновой функцией, являющейся решением уравнения Шредингера. Прозрачность потенциального барьера в квазиклассическом приближении определяется вероятностью прохождения частицы через барьер. При сближении двух металлов на расстояние, меньшее расстояния, на котором волновые функции покинувших потенциальные ямы электронов затухают, возникает туннельный контакт типа «металл №1 – вакуум – металл №2» (см. рис. 2.33.).

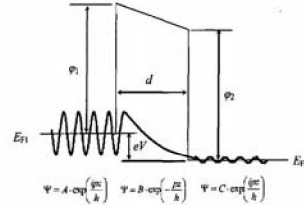


Рис. 2.33. Зонная диаграмма туннельного контакта двух проводников и огибающие волновые функции электронов в металле и в барьере в приближении эффективной массы

В такой системе при наличии внешнего напряжения, называемого напряжением смещения V , между двумя металлами возможно протекание туннельного тока. Если напряжение смещения не велико ($eV \ll \phi$) то величина туннельного тока I_T пропорциональна приложенному напряжению:

$$I_T = AVe^{-b\sqrt{\phi}d}, \quad (2.4.1)$$

где d - расстояния между двумя металлами, A и b - константы.

Важным выводом из этого соотношения является экспоненциальный характер зависимости величины туннельного тока от ширины туннельного барьера A . С помощью зависимости (2.4.1) можно получить, что увеличение ширины туннельного барьера на 1Å (ангстрем) приводит к уменьшению величины туннельного тока на порядок.

В СТМ используется туннелирование электронов между проводящими зондом и образцом при наличии внешнего напряжения; шириной туннельного перехода является расстояние между зондом и поверхностью образца. В качестве зонда в СТМ используется остро заточенная металлическая игла. Предельное пространственное разрешение СТМ определяется в основном радиусом закругления острия (которое может достигать нескольких ангстрем) и его механической жесткостью. Если механическая жесткость в продольном и поперечном направлениях оказывается достаточно малой, механические, тепловые и квантовые флуктуации иглы могут существенно ухудшить разрешение СТМ. В качестве материала для зонда обычно используются металлы с высокой твердостью и химической стойкостью: вольфрам или платина.

Между зондом и образцом прикладывается напряжение. Когда кончик зонда оказывается на расстоянии около 10 Å от образца, электроны из образца на-

чинают туннелировать через промежуток в иглу или наоборот, в зависимости от знака напряжения. Возникающий в результате туннельный ток изменяется от величины зазора между зондом и образцом по экспоненциальному закону и измеряется туннельным сенсором 5 (Рис. 2.34.).

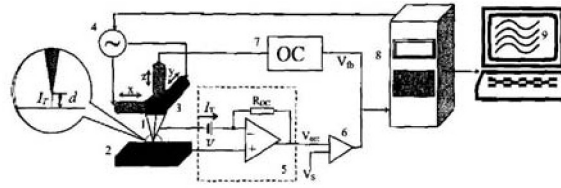


Рис. 2.34. Схема сканирующего туннельного микроскопа. Обозначения:
 1 - зонд; 2 - образец; 3 - пьезоэлектрические двигатели x, y, z ; 4 - генератор развертки x, y ; 5 - туннельный сенсор; 6 - компаратор; 7 - электронная цепь обратной связи;
 8 - компьютер; 9 - изображение $z(x, y)$

В режиме постоянного тока (рис. 2.35. а) величина туннельного тока между зондом и образцом поддерживается постоянной за счет приближения и отвода зонда системой обратной связи. Сигнал для получения изображения топографии поверхности берется из канала z -пьезопривода. Альтернативный метод регистрации, применяемый при исследовании малых, достаточно плоских участков (атомно-гладких поверхностей), - это работа в режиме с очень большой постоянной времени цепи обратной связи, так что при сканировании изображения среднее расстояние системы «острие – образец» поддерживается постоянным (рис. 2.35.б) и регистрируются быстрые изменения туннельного тока («токовое изображение»). Этот способ позволяет максимально использовать быстродействие системы регистрации и получать изображения «в режиме реального времени».

Рис. 2.35. Режимы постоянного тока (а) и постоянной высоты (б)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сойфер, В.А.** Введение в дифракционную микрооптику / В.А. Сойфер. – Самара: СГАУ, 1996. - 94с.
2. **Борн, М.** Основы оптики/ М. Борн, Э. Вульф. – М.: Наука, 1973. - 576 с.
3. **Неволин, В.К.** Зондовые нанотехнологии в электронике / В.К. Неволин. – М.: Техносфера, 2005. - 152 с.
4. **Бахтизин, Р.З.** Физические основы сканирующей зондовой микроскопии / Р.З. Бахтизин, Р.Р. Галлямов. – Уфа: РИО Баш.ГУ, 2003.- 82 с.
5. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике / под ред. А.Л. Асеева.- Новосибирск: Изд.-во Сибирского отделения РАН, 2004. - 367 с.
6. **Адамсон, А.** Физическая химия поверхностей/ А. Адамсон.- М.: Мир, 1979. - 568 с.
7. **Матвеев, А.Н.** Молекулярная физика: учеб. пособие. / А.Н.Матвеев.- М.: Высшая школа, 1981. - 400 с.
8. **Зенгуил, Э.** Физика поверхности / Э. Зенгуил.- М.: Мир, 1990. - 537 с.
9. **Юдина, Н.К.** Исследование и контроль плазмохимических процессов / Н.К. Юдина [и др.] // Зарубежная электронная техника. 1980. № 3,- С. 3-54.
10. **Данилин, Б.С.** Применение низкотемпературной плазмы для очистки и травления материалов/ Б.С. Данилин, В.Ю. Кирсеев.- М.: Энергоиздат, 1987. – 372 с.
11. **Айнспрук, П.** Плазменная технология в производстве/ П. Айнспрук, Д. Браун.// СБИС. М.: Мир, 1987.- С. 92-100.
12. Пат. №54677 РФ. Устройство контроля чистоты поверхности подложки / Н.Л. Казанский [и др.] - Приоритет от 10.01.2006г.
13. **Анищенко, Л.М.** Влияние параметров обработки диэлектрических подложек в плазме тлеющего разряда на адгезию металлических пленок. / Л.М. Анищенко, С.Е. Кузнецов, В.А. Яковлева.// Физика и химия обработки материалов. 1984. №5. - С.82-84.

ПРИЛОЖЕНИЕ №1. ЗАДАЧИ И УПРАЖНЕНИЯ

По разделу №1

Задание № 1.1. Уравнение фазовой функции сферической линзы в параксиальном приближении имеет вид

$$\varphi(x, y) = \varphi(r) = -k \frac{x^2 + y^2}{2f} \text{ при } r \leq \frac{D}{2},$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - модуль волнового числа; f - фокусное расстояние линзы; D - диаметр линзы; $r = \sqrt{(x^2 + y^2)}$ - текущая радиальная координата.

Для известного фокусного расстояния $f=0,5$ м построить функцию $\varphi(x, y)$.

Вариант №	D, м	λ , А	Вариант №	D, м	λ , А
1	0,01	100	5	1	100
2	0,01	500	6	1	500
3	0,01	2000	7	1	2000
4	0,01	5000	8	1	5000

Задание № 1.2. Определить максимальную высоту микрорельефа ДОЭ (см. выражение (1.1.6)).

Вариант №	n	λ , А	Вариант №	n	λ , А
1	1,5	1000	5	2	1000
2	1,5	5000	6	2	5000
3	1,5	10000	7	2	10000
4	1,5	20000	8	2	20000

Задание № 1.3. Число полных кольцевых зон j_0 на зонной пластинке удовлетворяет соотношению

$$j_0 = \left\lfloor \frac{D^2}{8\lambda f} \right\rfloor,$$

где символ $\lfloor \rfloor$ - означает целую часть числа с округлением в меньшую сторону.

Задание № 1.4. Рассчитать j_0 для случая $f=0,5$ м:

Вариант №	D, м	λ , А	Вариант №	D, м	λ , А
1	0,05	100	5	0,15	100
2	0,05	500	6	0,15	500
3	0,05	2000	7	0,15	2000
4	0,05	5000	8	0,15	5000

Задание № 1.5. Определить радиусы зон Френеля ДОЭ.

$$r_j = \sqrt{(2\lambda j f)}.$$

Вариант №	λ , А	f , м
1	100	0,1
2	500	0,2
3	2000	0,5
4	5000	1,0
5	1000	2,0

По разделу № 2

Задание № 2.1. Интенсивность света уменьшается пропорционально пути, пройденному световым лучом в поглощающей среде (закон Бугера-Ламберта):

$$I = I_0 e^{-\mu d}, \quad (2.1.7)$$

где I и I_0 – интенсивность плоской монохроматической волны на входе в слой поглощающего вещества толщиной d и на выходе из него соответственно, μ – линейный коэффициент поглощения.

Определить протяженность пути прохождения, при которой имеет место ослабление интенсивности светового потока в n раз.

Вариант №	μ , А	n	Вариант №	μ , А	n
1	1000	1	5	1000	20
2	2000	2	6	2000	50
3	3000	5	7	3000	200
4	5000	10	8	5000	500

Задание № 2.2. Используя условия задачи № 1, определить отношения интенсивностей световых потоков при различных глубинах залегания поглощающих слоев.

Вариант №	d_1 , мкм	d_2 , мкм
1	1	2
2	1	3
3	1	4
4	1	5
5	10	20
6	10	30
7	10	40
8	10	50

Задание № 2.3. Определить отношения скоростей протекания фотохимических процессов, если известны значения глубин залегания поглощающих слоев.

Вариант №	d_1 , мкм	d_2 , мкм
1	0,1	0,2
2	0,1	0,3
3	0,1	0,4
4	0,1	0,5
5	0,5	0,6
6	0,5	0,7
7	0,5	0,8
8	0,5	0,9

Задание № 2.4. Определить параметры волны де Бройля для электронов, прошедших ускоряющее напряжение U ($E_e = h \cdot \nu$; $p = \frac{h}{\lambda}$).

Вариант №	1	2	3	4	5	6	7
U, В	1	10	100	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶

Задание № 2.5. Определить величину ускоряющего напряжения U , обеспечивающую необходимую разрешающую способность d электронного микроскопа.

Вариант №	1	2	3	4	5	6	7
d, А	1	5	10	20	50	100	200

Задание № 2.6. Определить резонансную частоту кантилевера по известным значениям упругой константы k и массы кантилевера m .

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7
k, н/м	10	15	20	25	50	75	90
m, кг	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸

Задание № 2.7. Определить добротность колебательной системы (кантилевер) (воспользоваться значениями ω_0 из задачи 2.6 и использовать выражение 2.4.1).

Вариант №	1	2	3	4	5	6	7
τ , с	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²

Задание № 2.8. Построить график зависимости амплитуды стационарных колебаний зонда при различных значениях амплитуды возбуждающих колебаний Δz (воспользоваться значениями ω_0 из задачи 2.6, Q из 2.7, использовать выражение 2.4.1).

Вариант №	1	2	3	4	5	6	7
Δz , м	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁶	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁶	10 ⁻⁹

Задание № 2.9. Определить сдвиг фазы φ колебаний свободного конца кантилевера относительно закрепленного, используя значения, полученные в задачах 2.6-2.7.

Вариант №	1	2	3	4	5	6	7
ν , 1/с	10 ⁹	10 ⁸	10 ⁷	10 ⁶	10 ⁵	10 ⁴	10 ³

Задание № 2.10. Определить дестабилизирующее влияние термического фактора на параметры электронного луча, используемого в микроскопии.

U, В	T, К			
	300	600	900	1200
10	Вариант №1	Вариант №6	Вариант №11	Вариант №16
100	Вариант №2	Вариант №7	Вариант №12	Вариант №17
1000	Вариант №3	Вариант №8	Вариант №13	Вариант №18
10000	Вариант №4	Вариант №9	Вариант №14	Вариант №19
50000	Вариант №5	Вариант №10	Вариант №15	Вариант №20

Задание № 2.11. Определить массу и геометрические размеры кантилевера по известным значениям упругой константы k и резонансной частоты ω .

$k, \text{н/м}$	$\omega, 1/\text{с}$			
	10^9	10^8	10^7	10^6
10	Вариант №1	Вариант №6	Вариант №11	Вариант №16
20	Вариант №2	Вариант №7	Вариант №12	Вариант №17
50	Вариант №3	Вариант №8	Вариант №13	Вариант №18
75	Вариант №4	Вариант №9	Вариант №14	Вариант №19
100	Вариант №5	Вариант №10	Вариант №15	Вариант №20

Учебное издание

*Волков Алексей Васильевич,
Саноян Ашот Геворкович,
Бородин Сергей Александрович,
Агафонов Андрей Николаевич.*

**ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ
МИКРОРЕЛЬЕФА
ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Учебное пособие

Редакторская обработка Т.К. Крестина,
Компьютерная вёрстка: С. В. Смагин,
Я.Е. Тахтаров, М.А. Вахе.

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 5,0
Тираж 120 экз. Заказ . ИП-88/2007

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.