

ЛК №5. Оптическая структуроскопия-2. Полярископы. Вращение плоскости поляризации. Эллипсометрия.

Поляризация света

Как известно, свет - это поперечные электромагнитные волны. Три вектора \vec{E} , \vec{H} и \vec{v} взаимно перпендикулярны и составляют правовинтовую систему. В силу того, что различные виды воздействия света на вещество (биологическое, химическое и т.д.) обусловлены колебаниями электрического

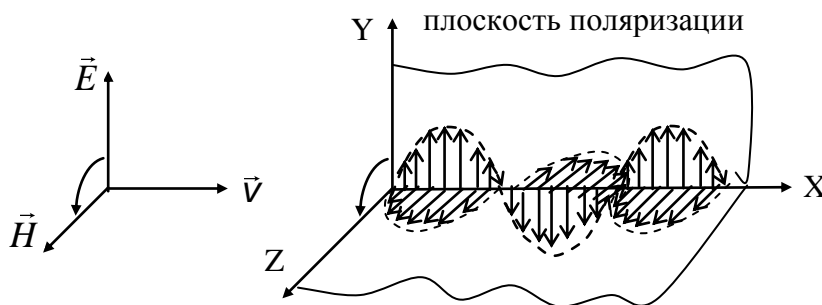


Рис. 5.1

вектора \vec{E} , его называют световым вектором, и в дальнейшем речь будем вести только о нем, подразумевая всегда наличие вектора \vec{H} .

Параметрами световой волны являются $|\vec{E}|$, λ , ν , v . $v = \lambda \cdot \nu$

Скорость распространения света в изотропной среде с показателем преломления n определяется законом Максвелла

$$v = \frac{c}{n} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}},$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, ϵ , μ - относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости сред, соответственно, n - абсолютный показатель преломления среды, который показывает во сколько раз скорость света в вакууме больше, чем в данной среде.

Частота ν света в веществе не изменяется, потому что под действием света электроны вещества совершают вынужденные колебания с частотой вынуждающей силы ν . Т.к. $v = \lambda \cdot \nu$, то в среде будет уменьшаться длина волны: $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$, где λ_0 - длина волны в вакууме.

В обычных условиях источник света испускает неполяризованный или естественный свет. Свет является суммарным электромагнитным излучением множества атомов. Атомы излучают независимо друг от друга, поэтому световая волна характеризуется равновероятными колебаниями вектора \vec{E} в плоскости, \perp направлению распространения. Такой свет называется естественным. Колебания вектора \vec{E} можно разложить на две взаимно перпендикулярные составляющие. Очевидно, результирующие векторы составляющих в естественном свете по величине будут одинаковыми, поэтому математически естественный свет можно описать двумя взаимно перпендикулярными векторами (рис. 5.2). Свет, в котором колебания вектора \vec{E} каким-то образом упорядочены, называется поляризованным. Если колебания вектора \vec{E} происходят вдоль одной линии, свет называют линейно поляризованным, если конец вектора \vec{E} описывает эллипс - эллиптически поляризованным, а если описывает окружность



Рис. 5.2

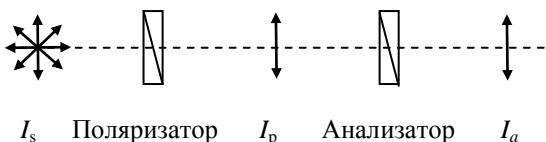


Рис. 5.3

\vec{E} описывает эллипс - эллиптически поляризованным, а если описывает окружность

– циркулярно поляризованным. С помощью специальных устройств, называемых поляризаторами, из пучка естественного света можно выделить поляризованный луч (рис. 5.3). Действие поляризаторов основывается на таких физических явлениях как поляризация при отражении или преломлении света на границе раздела двух прозрачных сред, на явлениях линейного дихроизма и двойного лучепреломления. Те же устройства можно использовать в качестве анализаторов для определения характера и степени поляризации света. В отсутствие поглощения после прохождения поляризатора интенсивность поляризованного света $I_p = 0,5I_s$. Интенсивность света I_a , пропущенная анализатором, определяется законом Малюса (5.1)

$$I_a = I_p \cos^2 \varphi, \quad (5.1)$$

где φ – угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора. Главной плоскостью поляризатора (или анализатора) называется плоскость поляризации света, пропускаемого поляризатором (или анализатором).

Поляризация при отражении и преломлении

Рассмотрим поведение электромагнитных волн на границе раздела двух сред. Пусть плоская световая волна падает под углом i на границу раздела двух изотропных диэлектриков (рис. 5.4). Когда свет достигает границы раздела двух сред с различными оптическими свойствами, он частично проходит во вторую среду, изменяя направления в случае наклонного падения, и частично возвращается в первую среду. Направление отраженного и преломленного света описывается хорошо известными законами геометрической

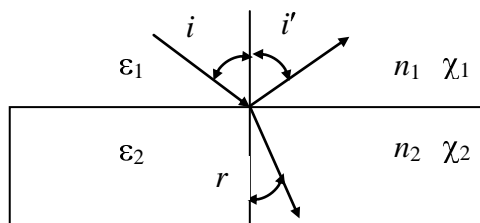


Рис. 5.4

оптики. $i = i'$. $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$ - закон Снеллиуса.

Таким образом, важным оптическим параметром, характеризующим вещество, является n - абсолютный показатель преломления среды.

Свет, проходя через любую среду, в той или иной мере поглощается. Для поглощающих сред вводится в рассмотрение комплексный показатель преломления среды

$$N = n - i\chi,$$

где $i = \sqrt{-1}$, χ - показатель поглощения (коэффициент экстинкции, который связан с линейным коэффициентом поглощения μ соотношением $\mu = \frac{4\pi\chi}{\lambda_0}$).

Представим световой вектор в виде $\vec{E}_1 = \vec{E}_{s1} + \vec{E}_{p1}$, $\vec{E}_2 = \vec{E}_{s2} + \vec{E}_{p2}$, где p - компонента в плоскости падения, s - компонента в \perp плоскости. Используя уравнения Максвелла, можно получить для коэффициентов отражения $R = E_1' / E_1$ и пропускания $T = E_2 / E_1$ формулы Френеля, которые определяют коэффициенты Френеля для отражения и пропускания:

$$\left. \begin{aligned} R_p &= \frac{n_2 \cos i - n_1 \cos r}{n_2 \cos i + n_1 \cos r} = \frac{\operatorname{tg}(i - r)}{\operatorname{tg}(i + r)}, & T_p &= \frac{2n_1 \cos i}{n_2 \cos i + n_1 \cos r} = \frac{2 \sin r \cos i}{\operatorname{tg}(i + r)}, \\ R_s &= \frac{n_1 \cos i - n_2 \cos r}{n_1 \cos i + n_2 \cos r} = \frac{-\sin(i - r)}{\sin(i + r)}, & T_s &= \frac{2n_1 \cos i}{n_1 \cos i + n_2 \cos r} = \frac{2 \sin r \cos i}{\sin(i + r)}. \end{aligned} \right\} (5.2)$$

При отражении и преломлении света на границе раздела двух прозрачных сред всегда происходит его частичная поляризация. Степень поляризации зависит от угла падения i лучей и показателей преломления сред n_1 и n_2 . Исследуя явление поляризации при отражении, Брюстер установил, что при угле падения, определяемом законом Брюстера (5.3), отраженный свет будет полностью поляризованным.

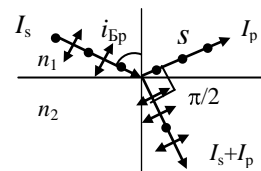


Рис. 5.5

$$\operatorname{tgi}_{\text{Бр}} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (14.3)$$

Угол $i_{\text{Бр}}$ называют углом Брюстера или углом полной поляризации. Для стекла с $n_2 = 1,5$ и воздуха с $n_1 = 1$ $i_{\text{Бр}} = 57^\circ$.

Чтобы добиться полной поляризации преломленного света, используют стопу - набор прозрачных плоскопараллельных пластинок, установленных так, что свет, выходящий из первой пластинки, падает на вторую под углом Брюстера и т.д. Стопа из 16 пластин дает практически полную поляризацию преломленного света.

Поляризация света в кристаллах

В современном оптическом производстве широко применяются детали из кристаллических материалов не только природных, но и искусственных. Все кристаллы, кроме кубических, оптически анизотропны. Их относительная диэлектрическая проницаемость и показатель преломления зависят от направления: $\varepsilon = f(\text{направления})$ и $n = f(\text{направления})$. В оптически анизотропных кристаллах наблюдается явление двойного лучепреломления, которое состоит в том, что луч света, падающий на поверхность кристалла, раздваивается в нем на два преломленных луча (рис. 5.6).

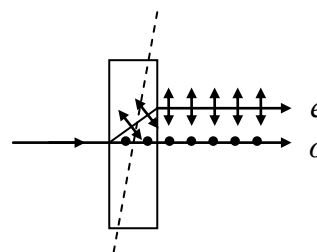


Рис. 5.6

Оптической осью кристалла называется направление в оптически анизотропном кристалле, вдоль которого свет распространяется, не испытывая двойного лучепреломления (пунктирная линия на рис. 5.6). Главной плоскостью или главным сечением одноосного кристалла называется плоскость, проходящая через луч и оптическую ось.

В одноосном кристалле один из лучей, образующихся при двойном лучепреломлении, подчиняется обычным законам преломления, лежит в плоскости падения и удовлетворяет закону Снеллиуса. Его называют обыкновенным лучом и обозначают буквой o . Второй луч не лежит в плоскости падения и не подчиняется закону Снеллиуса. Его называют необыкновенным лучом и обозначают буквой e .

Двойное лучепреломление свидетельствует о том, что падающая на оптически анизотропный кристалл световая волна возбуждает в нем две волны, линейно поляризованные в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, распространяющиеся в

кристалле по различным направлениям. Направления векторов \vec{E} в o и e лучах условно показаны на рис. 5.6.

Все двоякопреломляющие кристаллы в той или иной степени поглощают свет, причем необыкновенный и обыкновенный лучи поглощаются по-разному. Это явление называется дихроизмом. Примером сильно дихроичного кристалла является турмалин, в котором o луч поглощается во много раз сильнее e луча. Еще более ярко выраженным дихроизмом обладают кристаллы герпатита, которые используют для изготовления тонких пленок (поляроидов), преобразующих естественный свет в линейно поляризованный.

Типы состояний поляризованного света.

Двойное лучепреломление не возникает, если лучи распространяются параллельно оптической оси кристалла. При распространении света перпендикулярно оптической оси двойное лучепреломление также отсутствует, но разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей будет максимальна. Если на кристалл перпендикулярно его оптической оси падает естественный свет, возникающие o и e лучи некогерентны. Если на кристалл толщиной d перпендикулярно его оптической оси падает линейно поляризованный свет с длиной волны в вакууме λ_0 , то по одному и тому же направлению в кристалле будут распространяться две когерентные волны с разными скоростями $v_1 = c/n_o$ и $v_2 = c/n_e$, поляризованные в двух взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 5.8). В зависимости от толщины пластинки d на выходе эти лучи будут иметь оптическую разность хода

$$\Delta = (n_o - n_e)d, \quad (5.4)$$

и разности фаз $\Delta\varphi$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_e - n_o)d. \quad (5.5)$$

В результате сложения взаимно перпендикулярных o и e волн возникает эллиптически поляризованный свет.

Пусть пучок естественного света от источника 1 проходит объектив 2, и поляризатор 3 (рис. 5.7а). На кристаллическую пластинку 4, вырезанную вдоль оптической оси, падает линейно поляризованный свет с амплитудой A . Амплитуды колебаний обыкновенного a_o и необыкновенного a_e лучей будут проекциями амплитуды A падающего света на главные направления кристалла. Положим, что ось y соответствует оптической оси кристаллической пластинки. Как видно из рисунка 5.9, для амплитуд o и e лучей получим выражения

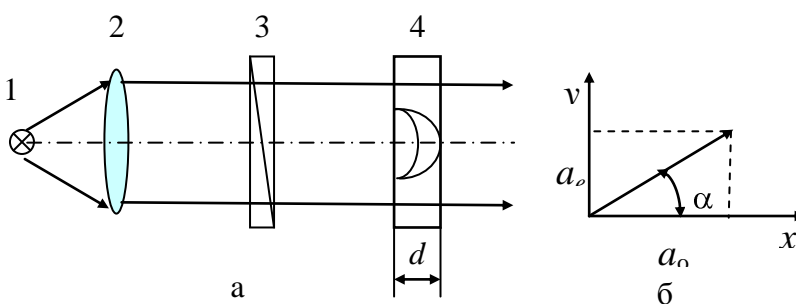


Рис. 5.7

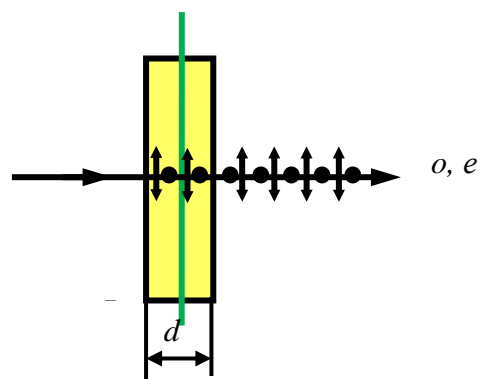
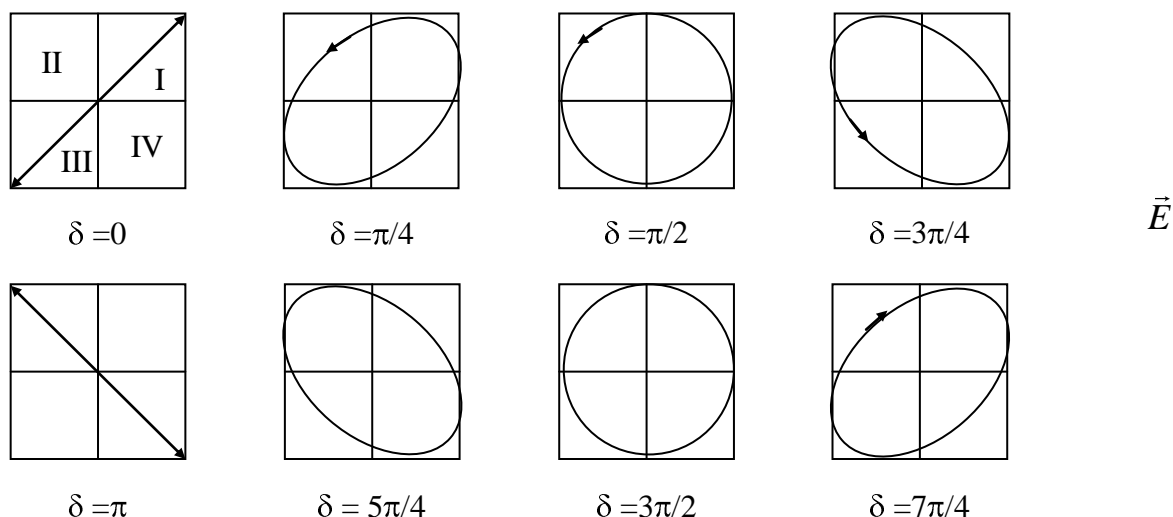


Рис. 5.8

$$a_o = A \cos \alpha, \quad a_e = A \sin \alpha,$$

Рис. 5.9 $\alpha = \pi/4$

а интенсивности обыкновенного и необыкновенного лучей определяются соотношениями:

$$I_o = A^2 \cos^2 \alpha, \quad I_e = A^2 \sin^2 \alpha \quad (5.6)$$

Выражения 5.6 соответствуют закону Малюса. Этот закон устанавливает зависимость между интенсивностью света для обыкновенного и необыкновенного лучей и углом α между направлением колебаний вектора входящего в кристаллическую пластинку поляризованного света и оптической осью кристалла.

Запишем уравнения колебаний для o и e лучей, прошедших пластину

$$E_x = a_o \cos(\omega t + \varphi), \quad (5.7)$$

$$E_y = a_e \cos[(\omega t + \varphi) + \delta], \quad (5.8)$$

где ω - циклическая частота колебаний, φ - начальная фаза, δ - разность фаз для o и e лучей, определяемая соотношением 5.5. Сложение двух взаимно перпендикулярных колебаний с разными амплитудами и фазами в общем случае формирует эллиптически поляризованную волну. Траекторию результирующего вектора можно определить, исключив время t из уравнений (5.7) и (5.8).

$$\frac{E_x^2}{a_o^2} + \frac{E_y^2}{a_e^2} - \frac{2E_y E_x}{a_o a_e} \cos \Delta\varphi = \sin^2 \Delta\varphi \quad (5.9)$$

Выражение (5.9) - это уравнение эллипса. Форма эллипса и его ориентация относительно осей (оптической оси и направления, перпендикулярного ей) зависят от угла α и разности фаз δ , вносимой пластинкой. Чаще всего на практике встречается случай, когда $\alpha = \pi/4$, а разность фаз δ различна (рис. 5.9). Виды эллипса при постоянном угле $\alpha = \pi/4$ при различной разности фаз δ показаны на рис. 5.9. Они соответствуют линейной, циркулярной и эллиптической поляризации. Поляризацию называют правой, если наблюдателю, смотрящему навстречу лучу, кажется, что конец вектора \vec{E} описывает эллипс, двигаясь по часовой стрелке, и левой при противоположном движении. Направление поляризации зависит от знака разности фаз. Начальную фазу δ всегда можно выбрать так, чтобы она была заключена между $-\pi$ и

π . Если $-\pi < \delta < 0$ имеет место левая поляризация (движение против часовой стрелки), если $0 < \delta < \pi$ - правая (по часовой стрелке).

Оптические системы, в которых формируется эллиптически поляризованный свет, используются для ряда измерительных задач.

Пластинки в четверть и половину длины волны.

Как следует из формулы (5.5), разность фаз $\delta = \pi/2$ может быть создана пластинкой толщиной

$$d = \lambda/[4(n_e - n_o)]. \quad (5.10)$$

Это соответствует оптической разности хода обыкновенным и необыкновенным лучами $\Delta = d(n_o - n_e) = (\lambda/4)(2m+1)$, $m = 0, 1, 2, \dots$

Такую пластинку, толщина которой определяется выражением (5.10), называют пластинкой в четверть длины волны (в $\lambda/4$). Пластинка в $\lambda/4$ играет большую роль в поляризационных измерениях.

Если на пластинку в $\lambda/4$ направить линейно поляризованный свет, то из нее выйдет эллиптически поляризованный или поляризованный по кругу свет. Пластинку в $\lambda/4$ можно применять и для компенсации разности фаз и превращения круговой и эллиптической поляризации в линейную.

Если пластинка такова, что $\Delta = d(n_o - n_e) = (\lambda/2)(2m+1)$, то она создает разность фаз $\delta = \pi$ или $\delta = \pi(2m+1)$. В этом случае в соответствии с формулой (14.10) эллипс вырождается в прямую ($E_x/a_o + E_y/a_e = 0$), свет остается линейно поляризованным, но изменяется направление колебаний (называют пластинкой в половину длины волны (в $\lambda/2$)).

Если пластинка такова, что $\Delta = d(n_o - n_e) = \lambda m$ (пластинка в целую длину волны), то она создает разность фаз $\delta = 0$ или $\delta = 2m\pi$. В этом случае в соответствии с формулой эллипс вырождается в прямую ($E_x/a_o - E_y/a_e = 0$), свет остается линейно поляризованным, без изменения направления колебаний.

Компенсаторы

Приборы, называемые компенсаторами, могут скомпенсировать до нуля (или дополнить до π) любую разность фаз. Для плавного изменения разности фаз применяют устройства из двух клиновидных пластин с взаимно перпендикулярными оптическими осями. Одна из пластин скользит плавно по другой вдоль гипотенузы, при этом общая толщина пластины плавно меняется.

Компенсатор Бабинэ состоит из двух призм-клиньев с взаимно перпендикулярными оптическими осями, изготовленных из кварца (положительного одноосного кристалла), с одинаковыми острыми углами. Клинья, расположенные так, как показано на рис. 5.10, могут смещаться вдоль плоскости соприкосновения, образуя таким образом плоскопараллельную пластину варьируемой толщины. На неподвижном клине 1 нанесено перекрестие. При перемещении подвижного клина 2 при помощи микрометрического винтового механизма 3, снабженного точным отсчетным устройством, разность хода плавно меняется:



Рис.5.10

$$\Delta = (n_e - n_o)(d_1 - d_2), \quad (5.11)$$

где n_e и n_o показатели преломления необыкновенного и обыкновенного лучей, d_1 и d_2 – толщина сечений клиньев.

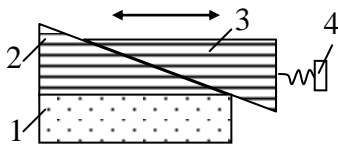


Рис. 5.11

Компенсатор Солейля (рис. 5.11) представляет собой сочетание как бы двух плоскопараллельных пластин, одна из которых (пластина 1) имеет постоянную толщину, а другая переменную. Пластина переменной толщины составная: Клин 3 с помощью микрометричного винтового механизма 4 может перемещаться по поверхности клина 2. Такая конструкция позволяет получить одинаковую разность хода лучей по всей длине клина при его перемещении. При работе с компенсатором Солейля анализатор устанавливают на затемнение всего поля и после введения объекта смещением клиньев компенсируют возникшее просветление поля зрения и измеряют, таким образом, разность хода:

$$\Delta = (n_e - n_o)(d_1 - d_2), \quad (5.12)$$

где d_1 постоянная толщина плоскопараллельной пластинки, d_2 - переменная сумма толщины клиньев.

Интерференция поляризованных лучей

Интерференционные явления, наблюдаемые с помощью поляризатора, кристаллической пластинки и анализатора, называют интерференцией поляризованных лучей. Известно, что лучи, поляризованные в двух взаимно перпендикулярных направлениях, не интерферируют. Но если эти ортогональные колебания свести в одну плоскость и обеспечить некоторую разность фаз между ними, то можно наблюдать интерференционную картину поляризованных лучей. Пример схемы для наблюдения такой интерференции приведен на рис. 5.12.

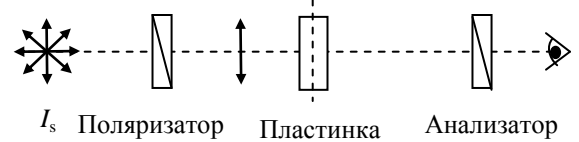


Рис. 5.12

Пучок естественного света падает на поляризатор, затем линейно поляризованный свет проходит кристаллическую пластинку, вырезанную вдоль оптической оси (пунктирная линия на рисунке), и анализатор, который сводит колебания o и e -лучей в одну плоскость. Т.к. свет падает \perp к оптической оси, двойного лучепреломления не наблюдается.

Полярископы.

Многие оптически прозрачные материалы (стекло, полимеры, кристаллы), изотропные в обычных условиях, становятся анизотропными после механической нагрузки. При прохождении света в таких материалах возникает двойное лучепреломление, величина которого характеризует степень напряженного состояния контролируемого объекта.

Известно, что под термином "напряжением" подразумевается сила, отнесенная к единице площади: $\sigma = F/S$. Напряжение можно разложить на нормальную и касательную составляющие соответственно \parallel и \perp рассматриваемой площадке. Если на грани действуют только нормальные напряжения, то касательные равны нулю по площадкам, \parallel этим граням. Главные напряжения σ_1 и σ_2 - это нормальные напряжения, действующие на площадки, вдоль которых отсутствуют касательные напряжения. Любая напряженная система может быть охарактеризована величинами главных напряжений σ_1 и σ_2 и их направлениями.

С помощью приборов, называемых полярископами или поляриметрами, можно обнаружить остаточные напряжения в кусках оптического стекла, возникающих

после его отжига или механической обработки. Если кусок стекла сжать в каком-либо направлении, то растянутые и сжатые участки будут анизотропны, и свет, пройдя через них, испытывает двойное лучепреломление. Это явление используют для исследования упругих напряжений в моделях различных деталей. Модели изготавливают из прозрачных изотропных материалов (стекла, целлулоида, фенолформальдегидных пластмасс) и помещают между скрещенными поляризатором и анализатором. Если модель не нагружена, то свет через анализатор не проходит; при наложении нагрузки в полярископе наблюдается изображение модели со светлыми и темными полосами разной формы. Эти полосы появляются вследствие интерференции поляризованных лучей. После поляризатора свет проходит через модель и разделяется, причем оба луча когерентны. Т.к. показатели преломления этих лучей различны, то они, проходя через модель, приобретают разность хода и интерферируют с помощью анализатора. Разность хода зависит от напряжений, возникающих в модели. Этим методом можно определять главные нормальные напряжения. При расчетах от напряжений модели переходят к напряжениям в детали.

Количественное исследование напряжений основано на экспериментальном законе Вертгейма, согласно которому разность хода Δ обыкновенного и необыкновенного лучей определяется по формуле

$$\Delta = cl(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (5.12)$$

где σ_1 и σ_2 - разность главных напряжений, l - толщина изделия, c - оптическая постоянная материала изделия (оптический коэффициент напряжения), определяемая экспериментально.

В качестве примера использования явления интерференции поляризованных лучей для определения внутренних напряжений рассмотрим принципиальную оптическую схему полярископа, типовая схема которого показана на рис. 5.13.

Параллельный пучок естественного света падает на поляризатор 3, из которого выходит линейно поляризованный свет. Далее свет попадает на объект 4, где испытывает двойное лучепреломление, если объект анизотропный (нагруженный). Анализатор приводит колебания обыкновенного и необыкновенного лучей в одну плоскость и создает условия для их интерференции. При этом на экране видна система темных и светлых полос, соответствующих интерференции обыкновенного и необыкновенного лучей. Порядок полосы определяется в процессе возрастания нагрузки. В белом свете видны цветные полосы и процесс измерения заключается в оценке цвета поля после введения контролируемого объекта и его сопоставления с цветом тарировочной таблицы.

Для более точных измерений разности хода вводят компенсатор Бабиня, Солейля или четверть волновую пластинку (6 на рис. 5.13) и измеряют сдвиг фаз в определенном месте исследуемой детали.

Методы исследования напряжений в оптически прозрачных изделиях с помощью поляризованного света широко применяются в различных отраслях промышленности – стекольной, химической, в производстве электровакуумных приборов, полимеров, алмазных инструментов, различных

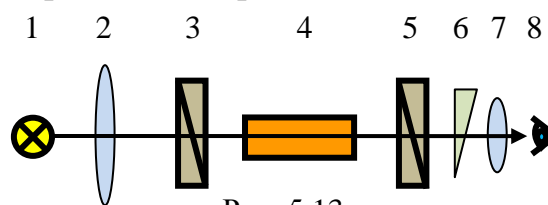


Рис. 5.13

1 - источник света, 2 - конденсор, 3 - поляризатор, 4 - объект, 5 - анализатор, 6 - поляризационный компенсатор, 7 - окуляр, 8 - наблюдатель.

искусственных кристаллов (в том числе лазерных) и др. Например, в практике сборочных цехов в оптическом производстве часто возникает необходимость контроля напряжений в линзах, помещенных в механические оправы (возможно пережатие). Для этого можно использовать полярископ или поляриметр. В сопряженных точках, расположенных примерно на двойном фокусном расстоянии от исследуемой системы, устанавливают в скрещенном положении поляризатор и анализатор. Картины напряжений в объективе или линзе рассматривают через анализатор и оценивают так же, как при испытании стекла. Эти оценки носят качественный характер. При равномерном зажатии оптической детали, интерференционная картина имеет вид темного креста на светлом фоне. Кривые полосы возникают при неравномерном распределении напряжений в детали. Степень "пережатия" и ее допустимое значение определяют в каждом конкретном случае в зависимости от требований к оптической системе.

Успехи в создании преобразователей изображения позволили распространить методы фотоупругого анализа на материалы, непрозрачные в видимом свете (полупроводники германий и кремний, инфракрасные стекла и ряд других). Известны телевизионные инфракрасные полярископы, системы с лазерным сканированием, полярископы с оптико-механическим сканированием объекта.

Контроль качества изделий вращением плоскости поляризации.

Некоторые вещества являются оптически активными, т.е. они могут поворачивать плоскость поляризации проходящего сквозь них линейно поляризованного света.

Различают естественную оптическую активность, встречающуюся у различных твердых и жидких веществ, и искусственную, возникающую у некоторых материалов при воздействии на них электрического (эффект Керра) и магнитного поля (эффект Фарадея).

Электрооптические и магнитооптические эффекты находят применение преимущественно в системах модуляции и сканирования света. Естественная оптическая активность широко используется в пищевой и химической промышленности для контроля качества различных веществ, в основном, растворов.

Для растворов угол вращения плоскости поляризации $\varphi = |\alpha| \cdot l \cdot c$, где $|\alpha|$ - постоянная вращения, l - толщина слоя, c - концентрация раствора.

Явление вращения плоскости поляризации используют для определения концентрации растворов сахара, никотина, камфоры, кокаина и других веществ. Этот метод определения концентрации вещества в растворе отличается быстротой и надежностью, поэтому его особенно широко применяют в сахарной промышленности. Например, для водного раствора тростникового сахара при 20°C при $\lambda = 589,3$ нм, $|\alpha| = 66,5^{\circ}$. Приборы, которые позволяют определить концентрацию растворов по повороту плоскости поляризации, называют поляриметрами или сахариметрами. Принципиальная оптическая схема сахариметра такая же, как приведенная на рис. 5.3. Эти приборы удобны и конструктивно совершенны. Для измерения угла вращения анализатор дважды (до вещества и с веществом в измерительной кювете) устанавливают на одинаковую яркость и регистрируют полученную разницу отсчетов по угломерному устройству.

Для повышения точности измерения применяют полутеневые устройства. В общем случае полутеневое устройство представляет собой два поля с общей грани-

цей раздела. В одном из них плоскость колебаний вектора \vec{E} повернута на угол φ относительно другого. Угол φ называют полутеневым углом. Если плоскость пропускания анализатора ориентирована относительно векторов \vec{E} в обоих полях симметрично (т.е. составляет с ними равные углы), то проекции векторов на плоскость пропускания анализатора равны. Следовательно, равны и освещенности обоих полей. Если теперь электрические векторы в обоих полях повернутся синхронно в одну и ту же сторону на один и тот же угол α вследствие прохождения света через оптически активное вещество, то равенство проекций освещенностей нарушится. Чтобы восстановить равенство освещенностей, надо повернуть анализатор на тот же угол α . Анализатор крепится в градуированной оправе. Таким образом, измерение сводится к установлению фотометрического равновесия соприкасающихся полей, что значительно точнее метода гашения яркости.

Поляризационные микроскопы

Поляризационные микроскопы предназначены для качественного и количественного исследования оптически анизотропных объектов в поляризованном свете. Их широко используют для наблюдения препаратов в увеличенном виде, определения оптических свойств кристаллов, фотографирования микрообъектов (с помощью специальных фотоприставок) в геологии, минералогии, петрографии (наука о горных породах), биологии и других отраслях науки и техники. Особенно следует отметить применение поляризационных микроскопов в кристаллографии, где они являются основными приборами для всестороннего изучения кристаллов как природных, так и искусственных.

Основное отличие поляризационных микроскопов от микроскопов других типов заключается в наличии в их схемах поляризационных деталей и узлов (поляризатора, анализатора, фазовых пластинок и компенсаторов), что позволяет изучать объекты в поляризованных пучках лучей. Источником информации выступает интерференционная картина поляризованных лучей. Анизотропия ОК проявляется в поляризованном свете, что позволяет судить о структуре и свойствах ОК.

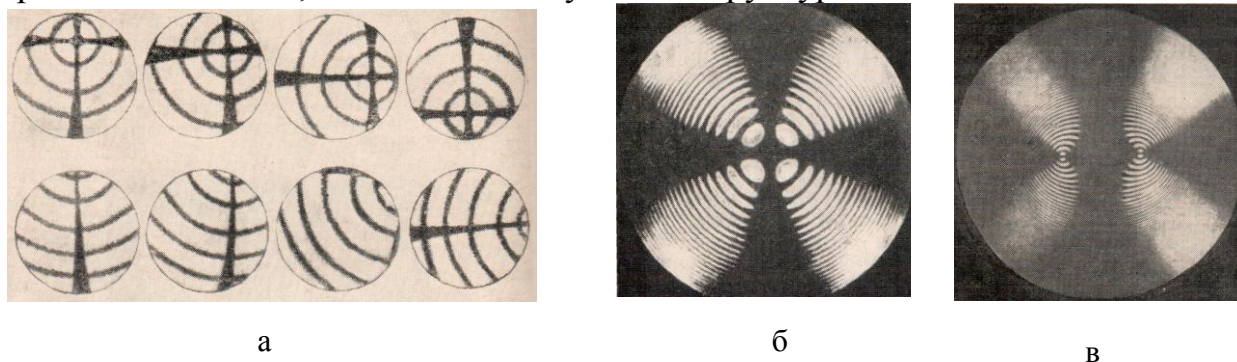


Рис. 5.14. Коноскопические фигуры.

а – одноосного кристалла, вырезанных под различными углами к оптической оси. б – одноосного кристалла (ось конуса лучей совпадает с оптической осью), в – двухосного кристалла

В поляризационных микроскопах используются две возможные схемы наблюдения интерференции линейно поляризованных лучей: ортоскопическая и коноскопическая. В первой объект освещается пучком параллельных линейно поляризованных лучей, во второй - пучком сильно сходящихся линейно поляризованных лучей. Наблюдаемые картины интерференции сильно отличаются друг от друга.

Для параллельных лучей обычно образуется окраска, равномерно распределенная по поверхности ОК, или общее просветление или потемнение поля. Это позволяет определить ориентировку сечения кристалла относительно кристаллографического направления, силу двойного лучепреломления ($n_0 - n_e$). Во втором случае наблюдаются конускопические интерференционные фигуры, определяемые типом решетки кристалла и ориентировкой их оптических осей, что позволяет определить осность кристалла, наличие вращательной способности, оптический знак кристалла (рис. 5.14).

Дополнительным узлом в конускопической схеме является линза Бертрана, обеспечивающая возможность рассмотрения с помощью окуляра рассмотрения с помощью окуляра интерференционной картины, образованной в задней фокальной плоскости объектива микроскопа.

Принципиальные оптические схемы поляризационных микроскопов для ортоскопического и конускопического наблюдения показаны на рис. 5.15.

В зависимости от назначения и сложности устройства принято условное деление поляризационных микроскопов на студенческие, рабочие, лабораторные, рудные и универсальные. Широко распространены микроскопы серии «Полам», общее увеличение которых может быть от 26,4 до 720 \times .

§§Эллипсометрия

Область применения поляризационных приборов очень обширная. Рассмотрим более подробно эллипсометрию – прецизионный оптический метод контроля поверхностных свойств и процессов на границе раздела двух сред (фаз). В эллипсометрии используется высокая чувствительность состояния поляризации света к свойствам и параметрам приповерхностных областей исследуемой системы при наклонном падении пучка света (рис. 5.16).

В полупроводниковой промышленности эллипсометрия является одним из наиболее точных методов контроля процесса роста пленок. Этот метод позволяет наблюдать изменение толщины пленок до 0,07 Å, что составляет 0,03 монослоя. Может быть также измерен показатель преломления пленки, хотя если пленка поглощает свет, то необходимы либо измерения на нескольких пленках различной толщины, либо на пленках, нанесенных на различные подложки, либо на пленках, погруженных в жидкости с различными показателями преломления. Если толщина

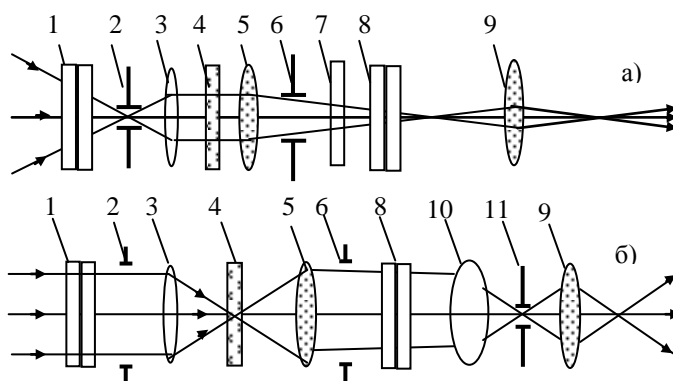


Рис.5.15. Ход лучей в поляризационном микроскопе при схемах наблюдения а- ортоскопической, б- конускопической

1-поляризатор, 2-апертурная диафрагма, 3-конденсор, 4-ОК, 5-объектив, 6-выходной зрачок, 7-компенсатор, 8-анализатор, 9-окуляр, 10-диафрагма, 11-линза Бертрана

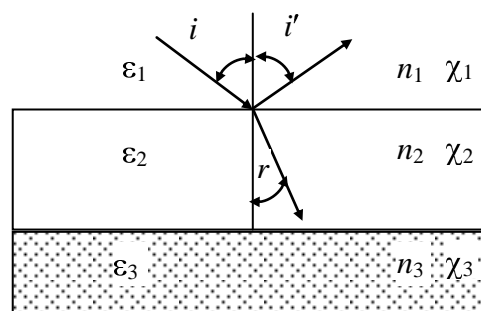


Рис. 5.16

поглощающей пленки достаточно велика так, что пленка в целом непрозрачна, то ее оптические константы также можно определить, проведя эллипсометрические измерения на единственном образце.

Отличительная черта эллипсометрии состоит в том, что измеряемой величиной является не интенсивность прошедшего или отраженного света, а углы, разности фаз и отношения амплитуд компонент световой волны.

Если ось OZ направлена по лучу в сторону наблюдателя, то вектор \vec{E} в плоской монохроматической волне будет иметь компоненты

$$E_x = A \cos(\omega t + \delta_x) \quad (5.13)$$

$$E_y = B \cos(\omega t + \delta_y), \quad (5.14)$$

а его конец будет описывать эллипс, главные оси которого не совпадут с осями x и y :

$$\left(\frac{E_x}{A}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{B}\right)^2 - 2\frac{E_x E_y}{AB} \cos \delta = \sin^2 \delta, \quad (5.15)$$

$\delta = \delta_x - \delta_y$. Это так называемый эллипс поляризации. Эллипс поляризации можно описать двумя способами: либо в произвольных осях (x, y), либо вводя собственные

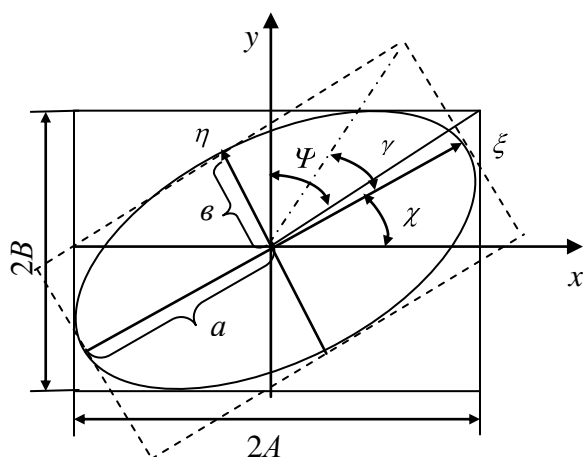


рис. 5.17

оси эллипса (ξ, η) (рис. 5.17). В первом случае достаточно использовать отношение амплитуд A, B , и сдвиг фаз δ , во втором – отношение малой и большой полуосей и ориентацию одной из осей (например, большой) относительно заданной полуплоскости. В первом случае используют углы

$$\Psi = \arctg\left(\frac{A}{B}\right); \Delta = \delta_x - \delta_y. \quad (5.16)$$

Во втором случае углы

$$\gamma = \pm \arctg\left(\frac{b}{a}\right); \chi. \quad (5.17)$$

Угол χ , отсчитываемый от оси ox против часовой стрелки (для наблюдателя, смотрящего навстречу лучу) до направления большей полуоси, называется *азимутом*. Угол γ называется *эллиптичностью*; знак плюс берется для левополяризованного, а минус – для правополяризованного света. Пределы изменений углов следующие:

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq \Psi \leq \pi/2, \quad -\pi/4 \leq \gamma \leq +\pi/4, \\ \Delta - \text{любое}, \quad 0 \leq \chi \leq \pi. \end{aligned} \right\} \quad (5.18)$$

Легко убедиться, что $\Delta > 0$ для левополяризованного света и $\Delta < 0$ для правополяризованного света.

Таким образом, эллипс поляризации описывается либо углами (ψ, Δ), либо углами (χ, γ). Эти углы представляют собой основные эллипсометрические параметры, которые и подлежат измерению в методе эллипсометрии. Зная два из них, всегда можно определить два других.

$$\boxed{\operatorname{tg} \Psi e^{i\Delta} = R_p / R_s}. \quad (5.19)$$

Уравнение (5.19) - основное уравнение эллипсометрии отраженного света. Оно устанавливает важную связь между экспериментально измеряемыми параметрами и оптическими характеристиками отражающей границы (а также толщинами поверхностных слоев). Конкретный вид уравнения (5.19) для каждой системы получается, если в него подставить соответствующие (обобщенные) коэффициенты Френеля (5.2).

Теперь полезно рассмотреть последовательность действий, которые в эллипсометрии необходимо выполнить, чтобы из анализа эллиптической поляризации получить сведения об оптических константах поверхностных слоев и пленок.

Первым этапом служит определение параметров эллипса поляризации Δ , ψ или χ , γ .

Анализ эллиптической поляризации осуществляется с помощью эллипсометров. Схематически (рис. 5.18) эллипсометр представляет собой двухплечий оптический прибор, в котором свет источника S , пройдя через монохроматический фильтр F и коллиматор C , линейно поляризуется призмой P , отражается от образца M (рис. 5.18а) или преломляется в нем (рис. 5.18б), проходит через анализатор A (представляющий собой линейно-поляризующее устройство, аналогичное P) и регистрируется либо визуально, либо фотоэлектрически (D).

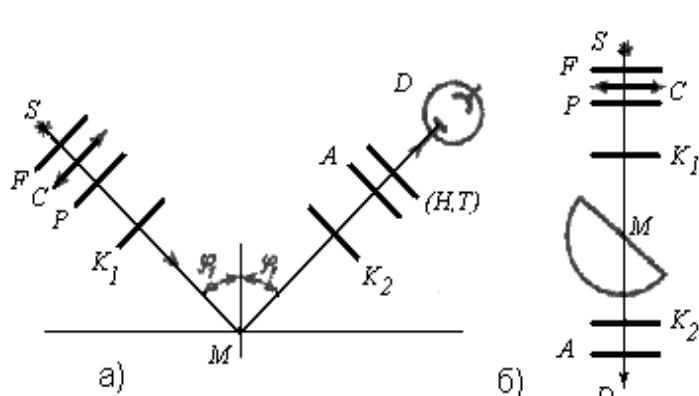


Рис. 5.18 Схема расположения элементов эллипсометров при работе в а) отраженном б) проходящем свете

Между поляризатором P и анализатором A устанавливается компенсатор K , изменяющий соответствующим образом фазовый сдвиг между p - и s -компонентами. Ориентация элементов P , K , A задается с помощью азимута, который, по определению, равен углу между плоскостью падения и характерным направлением данного элемента, отсчитываемым наблюдателем, смотрящим навстречу лучу, против часовой стрелки; для P и A такими направлениями служат направления пропускания, для компенсатора Сенармона F - направление. Все поляризующие элементы крепятся в градуированных оправках для измерения азимутов. Компенсатор может быть установлен как до, так и после образца. В дальнейшем условимся обозначать схемы с компенсатором до образца через $K1$, а после образца - через $K2$. В схемах с ручным управлением или с сервоприводами измерения параметров эллипса поляризации осуществляются вращением двух из трех поляризующих элементов при фиксированном третьем элементе (вращение P и A при фиксированном K , вращение K и P или A при фиксированном A или P , соответственно). Для краткости условимся отмечать фиксированный элемент соответствующей буквой (P , K , A) при $K1$ или $K2$ (например, $K2,A$ означает схему с компенсатором, установленным после образца при фиксированном анализаторе). В модуляционных автоматических схемах в простейшем варианте можно использовать периодическое вращение одного из элементов (обычно P или A); в точных схемах все поляризующие элементы остаются неподвижными, а на пути луча дополнительно вводятся магнито- или электрооптические модуляторы, осуществляющие фазовую или ази-

метрию отраженного света. Оно устанавливает важную связь между экспериментально измеряемыми параметрами и оптическими характеристиками отражающей границы (а также толщинами поверхностных слоев). Конкретный вид уравнения (5.19) для каждой системы получается, если в него подставить соответствующие (обобщенные) коэффициенты Френеля (5.2).

мутальную (или ту и другую одновременно) модуляцию. Технически эллипсометры различаются в зависимости от расположения изучаемой отражающей поверхности - горизонтального или вертикального, при визуальной регистрации вместе с анализатором вводятся (для повышения точности) полутеневые устройства Н, а наблюдение ведется через телескопическое устройство Т.

Поляризатор Р позволяет выбрать плоскость поляризации освещающего слой светового пучка. Компенсатор К компенсирует эллиптическую поляризацию, создаваемую исследуемым слоем. Анализатор А служит для гашения входящего в него линейно поляризованного света. В процессе измерения один из поляризационных элементов, например, Р или К, остается фиксированным, а два других вращаются вокруг оптической оси до момента гашения отраженного от слоя светового пучка (нулевой метод измерения). По углам поворота (положениям гашения, азимутам) определяются эллипсометрические параметры Ψ и Δ .

Следующим (и с точки зрения интерпретации результатов наиболее ответственным) этапом является выбор модели отражающей (преломляющей) поверхности (чистая поверхность, одно- или двухслойная система, частичное покрытие и т.д.). Использование определенной модели необходимо потому, что два независимых параметра Δ и ψ неоднозначно зависят от оптических параметров и толщины поверхностных слоев, т.е. одна и та же пара значений Δ и ψ может наблюдаться при отражении от совершенно различных поверхностей. (Существует 32 независимые комбинации азимутов Р и К при неподвижном К.) Переход от Δ и ψ к параметрам поверхности составляет предмет обратной задачи эллипсометрии, которая в общем виде не решена (за исключением случая чистых поверхностей). Поэтому для такого перехода пользуются предварительным многократным решением прямой задачи: при известных λ и i , задаваясь в выбранной модели всевозможными (в разумных пределах) значениями соответствующих параметров (толщины, показателей преломления), вычисляют значения коэффициентов Френеля и из них выбирают те, которые удовлетворяют основному уравнению эллипсометрии (5.19) при измеренных

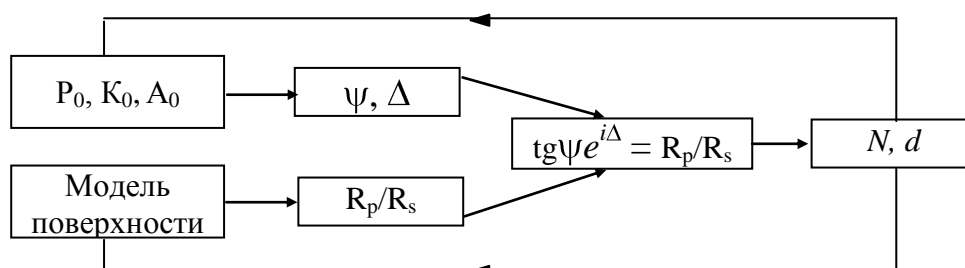


Рис. 5.19

Δ , ψ . В качестве характеристик поверхностей выбирают соответствующие величины толщины и показателей преломления, которые были использованы в прямой задаче при вычислении коэффициентов Френеля, удовлетворяющих основному уравнению.

Объем вычислительной работы настолько при этом велик, что использование ЭВМ становится неизбежным. Обычно на основе расчетов строят рабочие номограммы, которыми в дальнейшем и можно ограничиться, если работать с определенным выбранным объектом (например, пленки SiO_2 на поверхности кремния).

Никогда, однако, нельзя быть уверенным в справедливости выбранной модели (например, для однослойной непоглощающей системы исходный показатель пре-

ломления подложки может быть выбран неверно). Поэтому далее необходим контроль – повторное определение параметров системы при иных условиях, которые заведомо не должны влиять на исследуемые величины. Если выбранная модель справедлива, то результаты, получаемые при различных условиях, должны совпадать (в пределах допустимых ошибок), и наоборот. Например, если данные эллипсометрии отраженного и проходящего света не согласуются, или, если результаты, полученные для разных углов падения, расходятся между собой, то модель требует уточнения или изменения. Фактически подобная многократная проверка представляет собой итерационный процесс, позволяющий определить более двух параметров исследуемой поверхности. Вычислительная работа еще более усложняется и может быть выполнена только с использованием быстродействующих ЭВМ.

Схематически основные этапы измерений и вычислений в эллипсометрии представлены на рис. 5.19.