

Лабораторная работа №10

ПОЛУЧЕНИЕ И АНАЛИЗ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА В ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Цель работы — экспериментальное определение зависимости степени поляризации поляроида от длины волны падающего излучения; исследование закона Малюса при использовании в измерительной системе двух и трех поляризаторов, отличающихся взаимным расположением и поляризующей способностью.

В настоящее время чрезвычайно расширилось применение поляризованного света в оптических измерительных системах (ОИС). Они используются как в научных исследованиях разнообразных объектов природы – от молекул до галактик, так и для практических нужд – от светотехники до медицины [26]. Эта область прикладной оптики интенсивно развивается: углубляются и расширяются известные направления, возникают новые. При этом совершенствуются и изобретаются новые методики и поляризационная аппаратура.

Поляризационно-оптические методы позволяют решать задачи, которые вообще неразрешимы другими методами и отличаются очень большой чувствительностью. Это достоинство поляризационных ОИС предъявляет высокие требования к тщательности эксперимента и глубине анализа результатов, поскольку ОИС содержат большое количество оптических элементов, которые могут изменить состояние поляризации света.

Типы состояний поляризованного света.

Как известно, свет – это поперечные электромагнитные волны. Любую электромагнитную волну можно представить в виде колебаний двух взаимно перпендикулярных векторов: вектора напряженности электрического поля \vec{E} и вектора напряженности магнитного поля \vec{H} . Оба вектора колеблются в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения луча, т.е. к вектору скорости \vec{v} (рис. 10.1).

Три вектора \vec{E} , \vec{H} и \vec{v} взаимно перпендикулярны и составляют



Рис. 10.1. Направления колебаний векторов \vec{E} и \vec{H} в электромагнитной волне

правовинтовую систему. Поскольку векторы \vec{E} и \vec{H} электромагнитной волны перпендикулярны друг другу, для полного описания состояния светового пучка требуется зада-

ние поведения лишь одного из них. В силу того, что различные виды воздействия света на вещество (физиологическое, химическое и т.д.) обусловлены колебаниями электрического вектора \vec{E} , его называют световым вектором, в дальнейшем речь можно вести только о нем, подразумевая всегда наличие вектора \vec{H} .

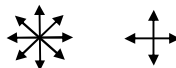


Рис. 10.2. Направление колебаний вектора \vec{E} в естественном свете

Свет является суммарным электромагнитным излучением множества частиц-излучателей, из которых состоит макроскопический источник. Пространственные ориентации векторов \vec{E} и моменты актов испускания света отдельными частицами в большинстве случаев распределены хаотически. Поэтому в общем излучении источника направление вектора напряженности электрического поля непредсказуемо, световая волна характеризуется равновероятными колебаниями вектора \vec{E} в плоскости, перпендикулярной направлению

распространения (рис. 10.2). Такой свет называется естественным или неполяризованным. Математически он может быть описан при помощи двух взаимно перпендикулярных векторов.

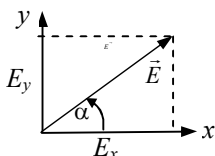


Рис. 10.3. Разложение вектора \vec{E} на составляющие

Свет, в котором колебания вектора \vec{E} каким-то образом упорядочены, называется поля-

ностью поляризованным. Если конец вектора \vec{E} описывает эллипс – эллиптически поляризованным, если описывает окружность – циркулярно поляризованным (поляризованным по кругу), если колебания вектора \vec{E} происходят вдоль одной линии, свет называют линейно (плоско) поляризованным.

Колебания вектора \vec{E} можно разложить на две взаимно перпендикулярные составляющие E_x и E_y (рис.10.3). В общем случае, уравнение плоской бегущей волны, распространяющейся вдоль оси z , можно записать таким образом:

$$E_x = A \cos(\omega t - kz), \quad (10.1)$$

$$E_y = B \cos(\omega t - kz + \Delta\varphi), \quad (10.2)$$

где $\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота волны, ν – линейная частота волны, $\Delta\varphi$ – разность фаз, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны, $A = E \cos\alpha$, $B = E \sin\alpha$.

Составляющие вектора напряженности электрического поля E_x и E_y изменяются с разными фазами. Свет будет полностью поляризованным, если две взаимно перпендикулярные компоненты вектора \vec{E} светового пучка совершают колебания с постоянной во времени разностью фаз.

Исключая из уравнений (1) и (2) переменную часть фазы, получим геометрическое место точек, определяющих возможные значения E_x и E_y :

$$\frac{E_x^2}{A^2} + \frac{E_y^2}{B^2} - \frac{2E_y E_x}{AB} \cos \Delta\varphi = \sin^2 \Delta\varphi. \quad (10.3)$$

Уравнение (10.3) – это уравнение эллипса. Состояние поляризации изображается при помощи эллипса поляризации – проекции траектории конца вектора \vec{E} на плоскость, перпендикулярную лучу (рис. 10.4). Эллипс вписан в прямоугольник со сторонами $2A$ и $2B$, касается его в четырех точках, которые легко найти подставляя в (10.3) сначала

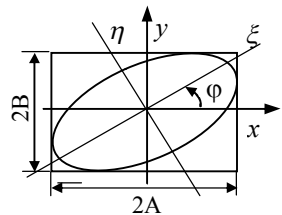


Рис. 10.4. Эллипс поляризации

$E_x = \pm A$, затем $E_y = \pm B$.

Таким образом, волна (10.3) поляризована эллиптически: конец вектора \vec{E} движется по эллипсу, весь эллипс обходится в данной точке z за период колебания $T = 1/\nu$.

Эллиптическая поляризация называется правой, если для наблюдателя, смотрящего навстречу световому лучу, вектор \vec{E} вращается по часовой стрелке, и левой – если против часовой.

Форма эллипса зависит от трех параметров: A , B и разности фаз $\Delta\varphi$. В общем случае оси эллипса ξ и η не параллельны осям x и y .

На рис. 10.5 показаны примеры различных поляризаций светового

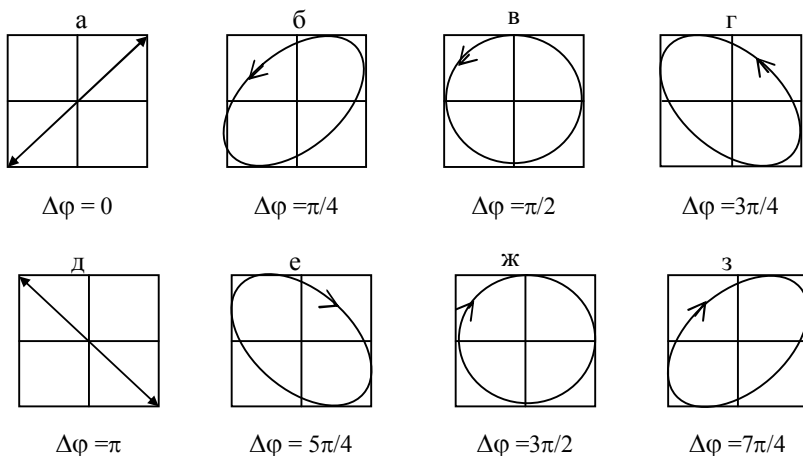


Рис. 10.5 Примеры различной поляризации при различных значениях разности фаз между компонентами E_x и E_y . $\alpha = \pi/4$

луча при различных разностях фаз между взаимно перпендикулярными компонентами вектора напряженности электрического поля E_x и E_y . Плоскость рисунков перпендикулярна направлению распространения света. а и д – линейные поляризации, б, г, е, з – эллиптические поляризации, в и ж – круговые поляризации. Наибольший интерес представляют предельные случаи эллиптической поляризации – линейная

($\Delta\varphi = \pi m$, m – целое число), когда эллипс поляризации вырождается в отрезок прямой линии, определяющей положение плоскости поляризации, и циркулярная (или круговая $-\Delta\varphi = (2m \pm 1/2)\pi$) поляризация, когда эллипс поляризации представляет собой окружность. В первом случае свет называется плоско- или линейно поляризованным, а во втором – циркулярно поляризованным.

Однако свет может быть поляризован не полностью, а частично. Свет, у которого имеется предпочтительное, наиболее вероятное направление колебаний вектора \vec{E} , называется частично поляризованным. Частичная поляризация количественно характеризуется степенью поляризации. Для света, обладающего частичной линейной поляризацией, степень поляризации определяется следующим образом:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (10.4)$$

где I_{\max} и I_{\min} – максимальная и минимальная интенсивности света, соответствующая двум взаимно перпендикулярным компонентам вектора \vec{E} . С помощью специальных устройств, называемых поляризаторами, из пучка естественного света можно выделить поляризованный луч (рис. 10.6). В отсутствие поглощения после прохождения поляризатора интенсивность поляризованного света уменьшается вдвое: $I_p = 0,5I_s$. Действие поляризаторов основывается на таких физических явлениях как поляризация при отражении или преломлении света на границе раздела двух прозрачных сред, на явлениях двойного лучепреломления в анизотропных кристаллах и явлении линейного дихроизма. Те же устройства можно использовать в качестве анализаторов для определения характера и степени поляризации света.

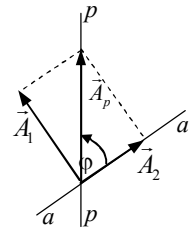


Рис. 10.7. Разложение амплитуды линейно поляризованного света на взаимно перпендикулярные составляющие

Пусть на анализатор падает перпендикулярно плоскости рисунка (рис.10.7) линейно поляризованный свет, вектор напряженности электрического поля которого \vec{E}_p направлен вдоль линии $p-p$ и колеблется с амплитудой \vec{A}_p . Пусть вектор света \vec{E}_a , пропускаемого анализатором,

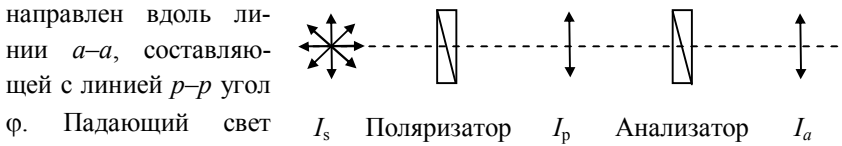


Рис. 10.6 Принципиальная схема получения поляризованного света из естественного.

направлен вдоль линии $a-a$, составляющей с линией $p-p$ угол φ . Падающий свет можно представить в виде двух волн, линейно поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Волна, вектор напряженности электрического поля \vec{E}_1 которой колеблется вдоль направления, перпендикулярного $a-a$, с амплитудой \vec{A}_1 ($A_1 = A_p \sin\varphi$) не может пройти через анализатор. Зато вторая волна, электрический вектор которой \vec{E}_2 колеблется вдоль направления $a-a$, ($A_2 = A_p \cos\varphi$), полностью проходит через анализатор. Следовательно, амплитуда света, выходящего из анализатора,

$$A_a = A_p \cos\varphi. \quad (10.5)$$

Интенсивность света I_a , пропущенная анализатором, определяется законом Малюса:

$$I_a = I_p \cos^2\varphi, \quad (10.6)$$

где φ – угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора, т.к. $I \sim A^2$. Главной плоскостью поляризатора (или анализатора) называется плоскость поляризации света, пропускаемого поляризатором (или анализатором).

Поляризация при отражении и преломлении

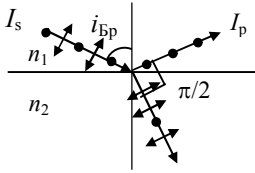


Рис. 10.8. Поляризация естественного света при отражении и преломлении

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, отраженный свет будет полностью поляризованным (рис.10.8)

$$\operatorname{tg} i_{\text{Бр}} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}. \quad (10.7)$$

Угол $i_{\text{Бр}}$ называют углом Брюстера или углом полной поляризации. Для стекла с $n_2=1,5$ и воздуха с $n_1=1$ $i_{\text{Бр}} = 57^\circ$. Стрелки на рисунке означают, что колебания вектора \vec{E} происходят в плоскости падения, точки – в перпендикулярной плоскости.

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. Дихроизм.

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. 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. 10.9).

Оптической осью кристалла называется направление в оптически анизотропном кристалле, вдоль которого свет распространяется, не ис-

пытывая двойного лучепреломления (пунктирная линия на рис. 10.9). 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 преломления 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 с разными скоростями: $v_1 = c/n_o$ и $v_2 = c/n_e$, где n_o и n_e показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Направления векторов \vec{E} в o и e лучах условно показаны на рис. 10.9.

Все двоякопреломляющие кристаллы в той или иной степени поглощают свет, причем необыкновенный и обыкновенный лучи поглощаются по-разному. Это явление называется дихроизмом или плеохроизмом. 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.

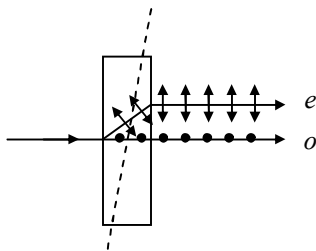


Рис. 10.9. Двойное лучепреломление в одноосных кристаллах

Интерференция поляризованных лучей

В поляризационных оптических измерительных системах широко используется интерференция поляризованных o и e 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 o и e лучей. Пример схемы для наблюдения такой интерференции приведен на рис. 10.10.

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 перпендикулярно к оптической оси, двойного лучепреломления не наблюдается.

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.

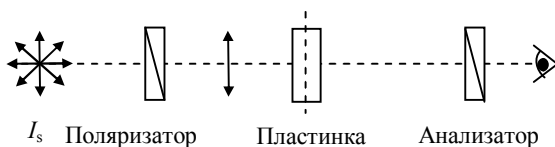


Рис.10.10. Схема наблюдения интерференции поляризованных лучей

Если на кристалл перпендикулярно его оптической оси падает естественный свет, возникающие o и e лучи некогерентные. 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. В зависимости от толщины пластинки d на выходе эти лучи будут иметь оптическую разность хода

$$\Delta = (n_o - n_e)d \quad (10.8)$$

и разность фаз $\Delta\varphi$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_e - n_o) d. \quad (10.9)$$

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

Пластинки в четверть и половину длины волны.

Как следует из формулы (10.9), разность фаз $\Delta\varphi = \pi/2$ может быть создана пластинкой толщиной

$$d = \lambda/[4(n_e - n_o)]. \quad (10.10)$$

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 (10.10), 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 линейную фаз и превращения круговой и эллиптической поляризации в.

Если пластинка такова, что $\Delta = d(n_o - n_e) = (\lambda/2)(2m+1)$, то она создает разность фаз $\Delta\varphi = \pi$ или $\Delta\varphi = \pi(2m+1)$. В этом случае в соответствии с формулой (10.3) эллипс вырождается в прямую, 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 $\Delta\varphi = 0$ или $\Delta\varphi = 2m\pi$. В этом случае в соответствии с формулой (10.3) эллипс вырождается в прямую, 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 измене-

ния 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 Бабине состоит из двух призм-клиньев с взаимно перпендикулярными оптическими осями (на рис. 10.11 показаны точками и линиями), изготовленных из кварца (положительного одноосного кристалла), с одинаковыми острыми углами. Клинья, расположенные так, как показано на рис. 10.11, могут смещаться вдоль плоскости соприкосновения, образуя, таким образом, плоскопараллельную пластину варьируемой толщины. На неподвжном клине 1 нанесено перекрестие. При перемещении подвижного клина 2 при помощи микрометричного винтового механизма 3, снабженного точным отсчетным устройством, разность хода плавно меняется:

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

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

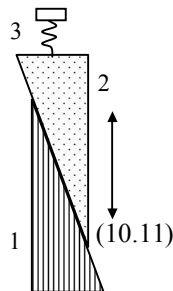


Рис. 10.11. Компенсатор Бабине

Компенсатор Солейля (рис. 10.12) представляет собой сочетание как бы

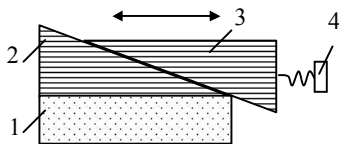


Рис. 10.12. Компенсатор Солейля

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, определяемую соотношением (10.11), где d_1 постоянная толщина плоскопараллельной пла-

стинки, d_2 - переменная сумма толщины клиньев.

Устройство поляризационных приборов.

Как уже упоминалось, устройства, с помощью которых преобразуют естественный свет в поляризованный, называются поляризаторами. Поляризаторы, применяемые для анализа поляризованного света, называют анализаторами. Если поляризатор и анализатор ориентированы так, что пропускают максимальный световой поток, то говорят, что они параллельны. Если их взаимная ориентация такова, что система пропускает минимальный световой поток, то говорят, что они скрещены.

На различии показателей преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей основано применение кристаллов для разделения лучей, поляризованных в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для получения поляризованного света применяют не отдельные кристаллы, а их различные комбинации – поляризационные призмы, изготовленные из двух трехгранных призм, склеенных прозрачным веществом.

Различают два типа поляризационных призм: однолучевые, на выходе из которых имеется только один линейно поляризованный луч, и двухлучевые или двоякопреломляющие призмы, дающие два пучка, линейно поляризованные в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

В однолучевых поляризационных призмах выделение одного из двух линейно поляризованных пучков, образующихся в результате двойного лучепреломления, основано на явлении полного внутреннего отражения от границы раздела для одного из лучей, в то время как другой луч, имеющий другой показатель преломления, проходит через эту границу.

В устройствах второго типа используется различие в показателях преломления обыкновенного и необыкновенного лучей n_o и n_e , что позволяет развести их как можно дальше друг от друга. Один из лучей выделяют с помощью диафрагмы, и призму используют в качестве поляризатора.

Поляризационные призмы чаще всего изготавливают из исландского

шпата CaCO_3 , который прозрачен для длин волн $\lambda = 0,2\text{--}2$ мкм и кристаллического кварца SiO_2 , прозрачного в области $\lambda = 0,185\text{--}3$ мкм. Компоненты призм склеивают клеем, химически устойчивым и прозрачным в области спектра, для которой используется поляризатор. Показатели преломления для желтой линии натрия ($\lambda_D = 589,3$ нм) у шпата: $n_o = 1,659$, $n_e = 1,486$; у кварца: $n_o = 1,543$, $n_e = 1,552$. Материалами для склейки служат: канадский бальзам ($n_D = 1,550$), льняное масло ($n_D = 1,48$), глицерин ($n_D = 1,474$) и др.

На рис. 10.13 для примера показаны схемы некоторых однолучевых поляризационных призм.

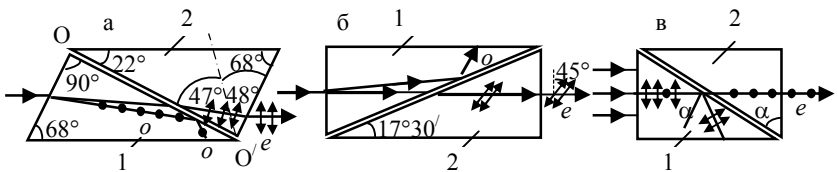


Рис. 10.13. Однолучевые поляризационные призм: а – Николя, б – Франка-Риттера, в – Глана-Томпсона

Первая поляризационная призма изобретена в 1828 году шотландским физиком Николем. Её сокращенно называют николем. Призма Николя – косоугольный параллелепипед – состоит из двух компонентов 1 и 2 (рис. 10.13а), вырезанных из кристалла исландского шпата и склеенных по линии OO' канадским бальзамом. Оптическая ось призмы составляет угол 48° с входной гранью.

Пучок естественного света, войдя в призму Николя, разделяется на два: обыкновенный ($n_o = 1,659$) и необыкновенный лучи ($n_e = 1,486$). Обыкновенный луч, показатель преломления которого больше показателя преломления бальзама, испытывает полное внутреннее отражение от слоя бальзама и поглощается зачерненной поверхностью поляризатора. Необыкновенный луч, показатель преломления которого меньше показателя преломления бальзама, беспрепятственно проходит через призму и дает на выходе линейно поляризованный свет. Полная апертура поляризации (разность углов наклона между крайними лучами падающего пучка, при которой на выходе будет один поляризованный

⋮

луч) равна 29° . Однако хотя призмённые поляризаторы практически 100 % поляризуют свет в широком спектральном интервале, большие качественные кристаллы исландского шпата встречаются редко и изготовление таких поляризаторов обходится дорого. Кроме того, поле поляризации в призме Николя несимметричное, форма призмы вызывает параллельное смещение падающих на нее лучей, что приводит к кругообразному перемещению выходящего луча при вращении призмы вокруг ее оси.

Призма Франка–Риттера (материал призмы – исландский шпат) обеспечивает симметричное поле поляризации (рис. 10.13б). Склеивающим веществом служит канадский бальзам, льняное масло, акриловый клей.

Призма Глана–Томпсона представляет собой склеенные по гипотенузам две прямоугольные призмы из исландского шпата (рис. 10.13в). Оптическая ось направлена перпендикулярно к плоскости чертежа. Пучок параллельных лучей естественного света падает на поверхность призмы и в призме превращается в обыкновенный и необыкновенный лучи, идущие в одном направлении. На границе кристалл–клей обыкновенный луч испытывает полное внутреннее отражение, т.к. для этого луча клей оказывается менее плотной средой. Необыкновенный луч проходит через призму, на выходе призмы будет один линейно поляризованный луч.

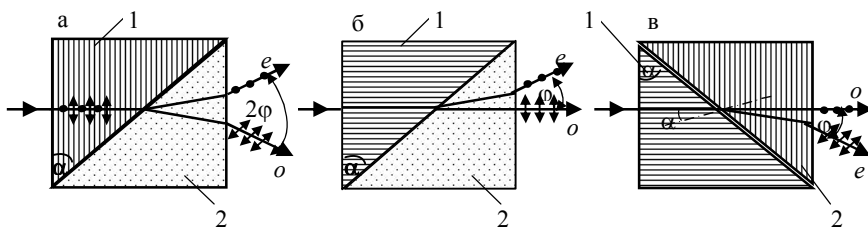


Рис. 10.14. Двухлучевые поляризационные призмы: а – Волластона, б – Рошона, в – Сенармона

На рис. 10.14 приведены схемы некоторых двухлучевых призм. Призма Волластона (рис. 10.14а) состоит из двух прямоугольных компонентов 1 и 2 из исландского шпата со взаимно перпендикулярными оптическими осями. Компоненты склеены по гипотенузам слоем бальзама или глицерина. Луч, падающий перпендикулярно на первую поверхность призмы 1, превращается в два луча (обыкновенный и необыкновенный), которые идут без преломления до границы склейки и приходят с некоторой разностью фаз. На границе склейки оба луча преломляются. В силу того, что оси призм 1 и 2 взаимно перпендикулярны, обыкновенный луч в призме 1 станет необыкновенным в призме 2, и, наоборот, в результате оба луча разойдутся на значительный угол. После второго преломления на выходе из призмы 2 получаются два луча, поляризованные в ортогональных плоскостях и разведенные на угол 2φ . Угол φ зависит от угла α между призмами 1 и 2: $\varphi = 2(n_e - n_o)\text{tg}\alpha$. Разведение лучей симметрично. Для $\lambda_D = 589,3$ нм и $\alpha = 30^\circ$ угол расхождения $2\varphi = 5^\circ 45'$.

Призмы Сенармона и Рошона отличаются от призмы Волластона тем, что от первоначального направления отклоняется только один из лучей – необыкновенный, а луч обыкновенный проходит через призму без преломления. Это удобно при конструировании оптических приборов, т.к. оптическая ось системы не меняет направления при прохождении луча через поляризатор.

В призме Рошона (рис. 10.14б) луч вначале проходит вдоль опти-

ческой оси без изменения направления, а на границе раздела разделяется на два луча, т.к. падает на нее под некоторым углом. Обыкновенный луч проходит через призму без преломления, необыкновенный луч преломляется и выходит из призмы в сторону под углом φ .

Призма Сенармона (рис. 10.14в) отличается от призмы Рошона направлением оптической оси во втором компоненте призмы. В этой призме оба луча подойдут к гипотенузной поверхности без разности хода, а обыкновенный луч пройдет без отклонения.

Как уже отмечалось, у некоторых кристаллов поглощение света зависит от направления вектора \vec{E} в световой волне. Это явление называется линейным дихроизмом и также используется для получения линейно поляризованного света в так называемых дихроичных пластинках. К ним относятся кристаллы турмалина и поляроиды. Кристалл турмалина сильно поглощает обыкновенный, но хорошо пропускает необыкновенный луч, давая на выходе линейно поляризованный свет. В турмалине происходит селективное (избирательное) поглощение, и прошедший свет имеет жёлто-зелёный оттенок. Поэтому пластинку турмалина можно использовать в качестве светофильтра в жёлто-зелёной области спектра. Турмалин, как поляризатор, имеет ограниченное применение.

Широко используются пленочные дихроичные поляризаторы, называемые поляроидами или поляризационными светофильтрами. Существует несколько видов поляроидов, отличающихся материалом или способом изготовления. Поляроид представляет собой пленку полимера или другого прозрачного материала, в которую вкраплены определенным образом ориентированные микроскопические кристаллики сильно дихроичного вещества, например, герпатита. Более совершенными и дешевыми являются йодно-поливиниловые, поливиниленовые и йодно-поливиниленовые поляроиды.

Герпатит – комплексное соединение хинина с серной кислотой, иодисто-водородной кислотой и иодом. Дихроизм этого соединения обусловлен дихроизмом комплексного аниона. Герпатитовые поляризаторы выпускались двух типов: 1) фильтры из монокристаллических

пленок герпатита, 2) фильтры в виде пленок, приготовленных из суспензий субмикроскопических кристалликов герпатита в растворах нитро- или ацетилцеллюлозы. При изготовлении этих пленок кристаллики герпатита ориентируются так, что их оптические оси располагаются параллельно друг другу. Герпатитовые поляризационные фильтры пропускают $(28 \pm 5) \%$ и рассеивают $(3,5 \pm 1) \%$ падающего на них белого света. Их апертурный угол поляризации (телесный угол, в пределах которого не наблюдается изменения степени поляризации с изменением направления луча) составляет около 60° .

Иодно-поливиниловые поляризационные светофильтры представляют собой сильно растянутые в одном направлении пленки поливинилового спирта, окрашенные раствором иода в иодистом калии. Ориентированные растяжением молекулярные цепи поливинилового спирта с присоединенными к ним анионами иода образуют упорядоченную структуру дихроичных молекул, почти полностью поляризующих проходящий свет. Спектральная область, в которой они поляризуют свет шире, чем у герпатитовых, а апертурный угол поляризации достигает 80° . Как герпатитовые, так и иодно-поливиниловые поляризационные светофильтры не выдерживают длительного нагревания до температур больше 80°C и продолжительного пребывания в атмосфере. Поливиниловые поляризационные светофильтры (упорядоченную структуру дихроичных молекул образуют молекулы поливинилена) отличаются от иодно-поливиниловых большей тепло- и влагоустойчивостью.

Преимуществом поляроидов перед призмными поляризаторами является их компактность, экономичность, технологичность, удобство использования, большие площади (до 1 м^2). Конструктивно их оформляют в виде круглых пластинок: тонкую поляризационную пленку заклеивают между двумя прозрачными стеклами для ее защиты от механических повреждений и действия влаги.

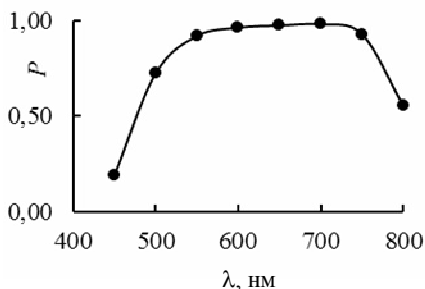


Рис. 10.15. Зависимость степени поляризации поляроида от длины волны [27]

Недостатки поляроидов связаны со спектральной селективностью поглощения: их степень поляризации p зависит от длины волны падающего излучения [27]. Из графика на рис. 10.15 видно, что в спектральном интервале 550 - 700 нм степень поляризации близка к единице, тогда как фиолетовая часть спектра оказы-

вается поляризованной лишь частично. Это необходимо учитывать при использовании поляроида в измерительных схемах, например, при проверке закона Малюса в данной области спектра.

Порядок выполнения работы.

1. Определение зависимости степени поляризации поляроида от длины волны падающего излучения.

1.1. Собрать и отъюстировать установку, схема которой изображена на рис. 10.16. Параллельный пучок света от источника сплошного спектра 1 падает на поляроид 2, который является поляризатором, дальше на поляроид 3 (анализатор), который находится в обойме и может поворачиваться вокруг горизонтальной оси. Конденсором 4 свет направляется на щель монохроматора 5, после выхода из которого попадает на фотоприемник 6 – фотодиод, подключенный к регистрирующему устройству – цифровому вольтметру 7.

- 1.2. Вставить в монохроматор насадочную щелевую обойму [лб №7]. Открыть входную и выходную щели монохроматора с помощью микрометрических винтов на обоймах.
- 1.3. Установить деления барабана монохроматора, соответствующие длине волны 800 нм. Для этого можно использовать градуировочную кривую монохроматора, которая имеется на рабочем месте, или интерполяционную формулу Гартмана

$$\nu = \nu_0 + \frac{a}{\lambda_0 - \lambda},$$

где λ – длина волны света, пропускаемого монохроматором, ν – деление барабана монохроматора, ей соответствующее, ν_0 , a и λ_0 – постоянные, определяемые экспериментально, их значения приведены на рабочем месте.

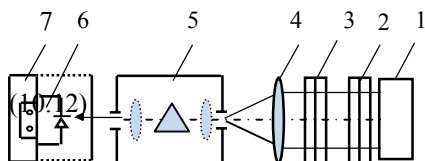


Рис. 10.16. Схема установки для определения зависимости степени поляризации поляроида от длины волны

- 1.4. Подвести к выходной щели фотодиод в кожухе.
- 1.5. Установить дихроичные поляризатор и анализатор между конденсором и источником света.
- 1.6. Установив поляризатор и анализатор параллельно, измерить напряжение на милливольтметре U_{\max} , предварительно отрегулировать ширину входной и выходной щелей таким образом, чтобы показания милливольтметра не превышали значения $U_{\text{гран}}$, приведенного на рабочем месте. Интенсивность лазерного излучения пропорциональна показаниям милливольтметра, если используется линейный участок люкс-вольтовой характеристики фотодиода.
- 1.7. Повернуть поляризатор на 90° , измерить напряжение на милливольтметре U_{\min} .
- 1.8. Определить степень поляризации лазерного излучения по формуле

$$P = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}}. \quad (10.13)$$

- 1.9. Повторить измерения U_{\max} и U_{\min} для области спектра 800–400 нм через 50 нм, определяя степень поляризации по формуле (10.13).
- 2.0. Построить зависимость степени поляризации от длины волны. Сравнить полученную зависимость с приведенной на рис. 10.15.

2. Проверка закона Малюса, когда поток излучения проходит через два поляризатора.

2.1. Рассмотреть случай, когда оба поляризатора имеют степень поляризации $P \neq 100\%$. Для этого нужно воспользоваться схемой, приведенной на рис. 10.16

2.2. Установить на барабане монохроматора деление, соответствующее длине волны 780 нм (см. п. 1.3).

2.3. Включить источник. Ввести луч во входную щель.

Снять зависимость показаний милливольтметра U от угла поворота φ поляризатора с шагом $\Delta\varphi = 15^\circ$ от 0° до 180° , выключить блок питания источника и милливольтметр.

2.4. Построить графическую зависимость $\Delta U/\Delta U_{\max} = f(\varphi)$, где $\Delta U = (U - U_{\min})$, U_{\min} – минимальное показания милливольтметра. На том же графике построить зависимость $I_a/I_p = f_1(\varphi) = \cos^2\varphi$ – закон Малюса. Сравнить полученные зависимости, проанализировать полученный результат.

2.5. Рассмотреть случай, когда один поляризатор имеет степень поляризации $P = 100\%$, а второй поляризатор имеет степень поляризации $P \neq 100\%$. Измерения провести для длины волны 780 нм по схеме,

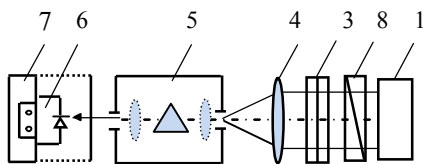


Рис. 10.17. Схема установки для проверки закона Малюса, когда свет проходит через два поляризатора

приведенной на рис. 10.17, для этого в схеме, приведенной на рис. 10.16, один поляризатор, например, 2, заменить призмным поляри-

затором 8. Остальные элементы схемы соответствуют рис. 10.16.

2.6. Повторить пункты 2.2–2.4.

2.7. Рассмотреть случай, когда оба поляризатора имеют степень поляризации 100%. Для этого можно воспользоваться схемой, приведенной на рис. 10.17, но измерения провести для длины волны 600 нм, или схемой, приведенной на рис.10.18, убрав из нее поляририд 2. Вместо источника сплошного спектра в схему включен гелий-неоновый лазер 1 с длиной волны 633 нм, излучение которого имеет практически 100% поляризацию [28, лб №1]. Все остальные элементы схемы те же, что и на рис.10.16. Дихроичный анализатор 3 на длине волны 633 нм также имеет $P = 100\%$, как следует из [27] или результатов предыдущих измерений.

2.8. Повторить пункты 2.2-2.4.

3. Проверка закона Малюса, когда поток излучения проходит через три поляризатора.

3.1. Воспользоваться схемой, приведенной на рис. 10.18. Установить на барабане монохроматора деление, соответствующее длине волны 633 нм (см. п.1.3), поляриды 2 и 3 установить на максимум пропускания лазерного поляризованного излучения.

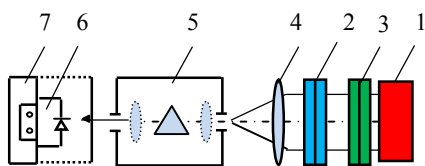


Рис. 10.18. Схема установки для проверки закона Малюса, когда свет проходит через три поляризатора

- 3.2. Включить лазер 1, ввести луч во входную щель.
- 3.3. Снять зависимость показаний милливольтметра U от угла поворота φ поляроида 3 с шагом $\Delta\varphi = 15^\circ$ от 0° до 180° , выключить блок питания лазера и милливольтметр.
- 3.4. Построить графическую зависимость $\Delta U/\Delta U_{\max} = f(\varphi)$, где $\Delta U = (U - U_{\min})$, U_{\min} – минимальное показание милливольтметра.
- 3.5. Получить теоретическую зависимость закона Малюса для этого случая, пользуясь рис. 10.19а. Плоскости пропускания поляроидов 2 и 3 показаны тонкими линиями. На том же графике построить зависимость $I_a/I_p = f_2(\varphi) = \cos^4\varphi$ – закон Малюса для этого случая. Сравнить экспериментальную и теоретическую зависимости, проанализировать полученный результат.
- 3.6. Установить поляроид 2 на минимум пропускания (в скрещенное положение по отношению к поляридоу 3).
- 3.7. Повторить пункт 3.3.
- 3.8. Построить графическую зависимость $\Delta U/U_0 = f(\varphi)$, где $\Delta U = (U - U_{\min})$, U_{\min} – минимальное показание милливольтметра, U_0 – показание милливольтметра, когда из схемы удаляются поляроиды 2 и 3.
- 3.9. Получить теоретическую зависимость закона Малюса для этого случая, пользуясь рис. 10.19б. На том же графике построить зависимость

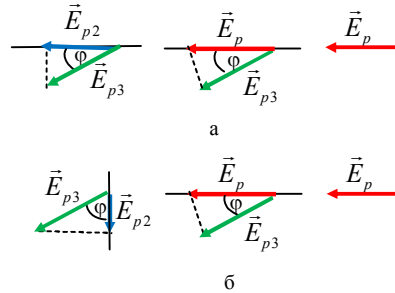


Рис. 10.19. Направления колебаний вектора \vec{E} в гелий-неоновом лазере (\vec{E}_p), в поляроиде 2 (\vec{E}_{p2}), в поляроиде 3 (\vec{E}_{p3}). а: поляроид 2 установлен на максимум пропускания; б: поляроид 2 установлен на минимум пропускания лазерного излучения. Плоскости пропускания поляроидов 2 и 3 показаны тонкими линиями.

$I_a / I_p = f_3(\varphi) = (1/4) \sin^2 2\varphi$ - закон Малюса для этого случая. Сравнить экспериментальную и теоретическую зависимости, проанализировать полученный результат.

Контрольные вопросы.

1. Какой свет является естественным, а какой – поляризованным?
2. Какой свет называют эллиптически, циркулярно и линейно поляризованным?
3. Как происходит распространение света в анизотропных кристаллах?
4. Что называют оптической осью кристалла?
5. Чем отличаются обыкновенной и необыкновенный лучи? Как их получают?
6. Как можно наблюдать интерференцию обыкновенного и необыкновенного лучей?
7. В чем заключаются преимущества поляризационных призм по сравнению с поляроидами?
8. Как определяется степень поляризации частично поляризованного света?
9. В чем заключается физическая сущность закона Малюса?
10. По какому соотношению в данной работе определяется степень поляризации? Почему?