

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра физики

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА

Методические указания
к лабораторной работе по физике
для студентов строительных специальностей

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Республики Беларусь
по образованию в области строительства*

Минск
БНТУ
2011

Составители:

П.Г. Кужир, И.А. Климович,
А.А. Иванов, С.В. Попко, В.А. Потачиц

Рецензенты:

Ю.В. Развин, Г.К. Савчук

Методические указания посвящены изучению свойств поляризованного света студентами строительных специальностей.

В работе последовательно вводятся понятия естественного, поляризованного света, изучаются законы Малюса, Брюстера, рассматриваются вопросы получения и анализа поляризованного света. Большое внимание уделено практическому использованию поляризованного света в технике.

Цель работы: определение интенсивности света, прошедшего через систему поляризатор – анализатор в зависимости от угла поворота анализатора.

Приборы и принадлежности: источник света, система поляризатор – анализатор, фотоэлектронный умножитель.

1. Естественный и поляризованный свет

В волновой теории свет рассматривается, как *поперечная электромагнитная волна*, или распространяющееся в пространстве переменное электромагнитное поле. В каждой точке такое поле характеризуется векторами напряженности электрического и магнитного полей $\vec{E}(t)$ и $\vec{H}(t)$, которые в непроводящей среде синфазно изменяются со временем. Векторы напряженностей электрических и магнитных полей направлены всегда перпендикулярно друг другу и вектору скорости распространения волны \vec{v} , при этом эта тройка векторов образует правовинтовую систему (рис. 1). Поскольку физиологические, фотоэлектрические, фотохимические и др. действия света обусловлены колебаниями вектора напряженности электрического поля (его поэтому называют световым вектором), в дальнейшем мы ограничимся рассмотрением вектора \vec{E} .

Свет, испускаемый естественным или искусственным источником, представляет собой наложение (суперпозицию) колебаний, испускаемых отдельными атомами. Излучение каждого атома продолжается около 10^{-8} с (время свечения) и вновь возобновляется через случайный промежуток времени, а следовательно, с иным, значением фазы. Случайным оказывается и направление, вдоль которого колеблется вектор $\vec{E}_i(t)$ в излучении какого-либо одного (например, i -го) атома. Так как в процессе излучения атомы беспорядочно, бессистемно сменяют друг друга, направление (MN на рис. 1), вдоль которого про-

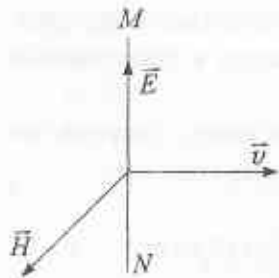


Рис. 1

исходят колебания результирующего вектора $\vec{E}(t) = \sum_i \vec{E}_i(t)$, также беспорядочно

изменяется в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

Свет, в котором направление колебаний вектора \vec{E} изменяется беспорядочно, называется *неполяризованным* или *естественным*.

Именно такой свет излучают большинство макроскопических источников.

Если в направлении колебаний вектора \vec{E} наблюдается определенная закономерность, свет называют *поляризованным*.

Частным случаем поляризованного света является *плоско-* (или *линейно-*) поляризованный свет, в котором направление колебаний вектора \vec{E} неизменно во всех точках на пути распространения волны (плоскость Ω на рис. 2). Плоскость, которая проходит через направление луча Ox и в которой колеблются векторы напряженности \vec{E} , называется *плоскостью поляризации*.

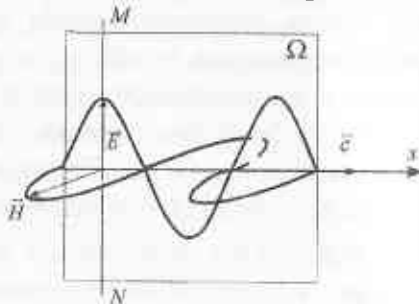


Рис. 2

2. Закон Малюса

Плоско-поляризованный свет можно получить из естественного света с помощью приборов, называемых *поляризаторами* (николь, поляроид). В качестве поляризаторов могут быть использованы среды анизотропные в отношении колебаний вектора \vec{E} , например, кристаллы (анизотропность — зависимость физических свойств от направления). Из природных

кристаллов, давно используемых в качестве поляризатора, следует отметить турмалин. Идеальный поляризатор свободно пропускает колебания, параллельные определенной плоскости, которую называют *плоскостью пропускания поляризатора*, и полностью задерживает колебания, перпендикулярные этой плоскости.

В естественном свете, падающем на поляризатор, колебания вектора \vec{E} в среднем одинаково часто происходят как в направлении плоскости поляризации, так и в перпендикулярном направлении и во всех промежуточных направлениях. Поэтому интенсивность I_0 , прошедшей через поляризатор поляризованной световой волны, будет равна половине интенсивности $I_{\text{ест}}$ падающего естественного света:

$$I_0 = \frac{1}{2} I_{\text{ест}}. \quad (1)$$

Таким образом, если вращать поляризатор вокруг направления естественного луча (как оси), интенсивность прошедшего света остается неизменной, изменяется лишь ориентация плоскости поляризации прошедшего света.

Поставим на пути плоско поляризованного света второй поляризатор. Вращая его вокруг направления луча, можно определить ориентацию плоскости поляризации, (а в случае частично поляризованного света (см. § 4 п. 2) — и степень поляризации из соотношения (8)). Поляризатор, используемый для анализа поляризованного света, называется *анализатором*. Обозначим через A_0 амплитуду колебаний падающего на анализатор света, через α — угол между плоскостью поляризации падающего на анализатор света и плоскостью анализатора (угол между плоскостью поляризатора и плоскостью анализатора).

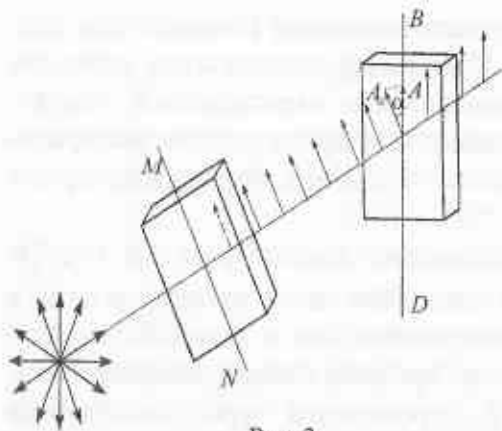


Рис. 3

На рис. 3 BD – плоскость пропускания анализатора, MN – направление плоскости поляризации падающего на анализатор света. Колебания с амплитудой A_0 , происходящие в направлении MN можно разложить на два колебания – в направлении BD с амплитудой $A = A_0 \cos \alpha$ и в перпендикулярном направлении (оно на рис. 3 не показано). Первое колебание с амплитудой A пройдет через анализатор, а второе будет задержано. Так как интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды, то интенсивность прошедшего через анализатор света определяется соотношением:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha, \quad (2)$$

где $I_0 \sim A_0^2$ – интенсивность падающего на анализатор плоско поляризованного света. Соотношение (2) носит название *закона Малюса: интенсивность света, прошедшего через систему поляризатор – анализатор прямо пропорциональна квадрату косинуса угла между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора.*

При $\alpha = \frac{\pi}{2}$ (поляризатор и анализатор скрещены) свет через систему не проходит. С учетом (1) выражение для интенсивности I прошедшего через поляризатор и анализатор света примет вид

$$I = \frac{I_{\text{ест}}}{2} \cos^2 \alpha. \quad (3)$$

Закон Малюса (2), (3) не учитывает потери энергии, обусловленные отражением и поглощением света. Если ввести коэффициент пропускания τ (доля пропущенной через прибор световой энергии), то с учетом потерь энергии соотношения (2) и (3) примут вид

$$I = \tau_a I_0 \cos^2 \alpha = \tau_a \tau_n \frac{I_{\text{ест}}}{2} \cos^2 \alpha,$$

где τ_n и τ_a – коэффициенты пропускания, соответственно, для поляризатора и анализатора.

3. Поляризация при отражении и преломлении

Если естественный свет падает на границу раздела двух прозрачных диэлектриков и угол падения не равен нулю, то отраженный и преломленный лучи оказываются частично поляризованными. В отраженном луче преобладают колебания, перпендикулярные плоскости падения, а в преломленном – параллельные. Степень их поляризации зависит от угла падения. Отраженный луч полностью поляризован при угле падения i_B , который определяется *законом Брюстера: если свет падает на границу раздела двух диэлектриков под углом Брюстера i_B , тангенс которого равен отношению показателю преломления второй среды относительно первой* ($\text{tg} i_B = n_{21}$), *то отраженный луч полностью линейно поляризован, а преломленный частично.* Отраженный луч поляризован в плоскости, перпендикулярной плоскости падения, а преломленный поляризован максимально в плоскости падения. При этом, если свет падает на границу раздела под углом Брюстера, то отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны ($\text{tg} i_B = \sin i_B / \cos i_B$, $n_{21} = \sin i_B / \sin i_2$ (i_2 – угол

преломления), откуда $\cos i_B = \sin i_2$). Следовательно, $i_B + i_2 = \pi/2$, но $i'_B = i_B$ (закон отражения), поэтому

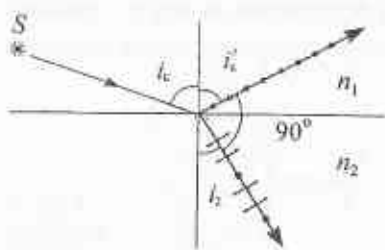


Рис. 4

$$i'_B + i_2 = \pi/2. \quad (4)$$

где $n_{21} = n_2/n_1$ — относительный показатель преломления граничащих сред.

Интенсивности поляризованных колебаний в отраженном и преломленном свете одинаковы, поэтому при угле $i = i_B$ степень поляризации преломленного луча достигает наибольшего значения, а интенсивность отраженного луча составляет примерно 5–8 % интенсивности падающего. При многократном преломлении, например, в стопке из большого числа пластинок (стопа Столетова), можно получить практически полностью поляризованный прошедший луч (рис. 5).

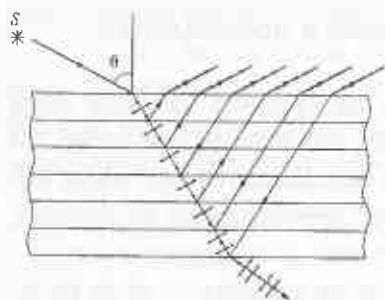


Рис. 5

4. Эллиптически и частично поляризованный свет

Рассмотрение свойств и поведения поляризованного света упрощается, если световую волну представить как наложение двух волн, распространяющихся в одном направлении и поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Тогда колебания светового вектора \vec{E} в некоторой точке O можно представить как результат сложения колебаний в двух взаимно перпендикулярных направлениях OX и OY :

$$E_x(t) = A_1 \cos \omega t; \quad E_y(t) = A_2 \cos(\omega t + \varphi). \quad (5)$$

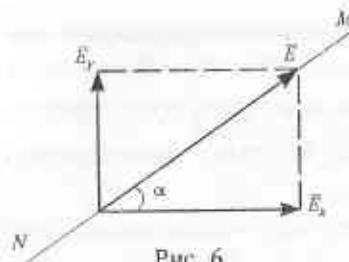


Рис. 6

Результирующая напряженность \vec{E} в некоторый момент времени равна векторной сумме $\vec{E}_x(t)$ и $\vec{E}_y(t)$ (рис. 6).

Угол α между направлениями E_x и E определяется из соотношения:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{E_y}{E_x} = \frac{A_2 \cos(\omega t + \varphi)}{A_1 \cos \omega t}. \quad (6)$$

Рассмотрим частные случаи:

1. Волны $E_x(t)$ и $E_y(t)$ когерентны, т.е. разность начальных фаз $\varphi = \text{const}$, но не равна $\pm\pi$ или нулю. Из теории колебаний следует, что в этом случае в результате сложения взаимно перпендикулярных колебаний одинаковой частоты точка с координатами $X = A_1 \cos \omega t$ и $Y = A_2 \cos(\omega t + \varphi)$ движется по эллипсу (рис. 7), уравнение которого имеет вид

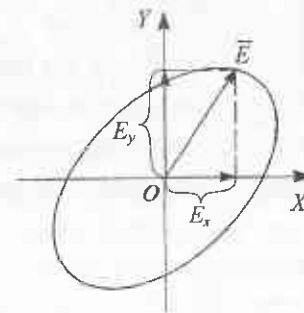


Рис. 7

$$\frac{X^2}{A_1^2} + \frac{Y^2}{A_2^2} - \frac{2XY}{A_1 A_2} \cos \varphi = \sin^2 \varphi. \quad (7)$$

Таким образом, в рассматриваемом случае конец вектора $\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y$ описывает эллипс (сам вектор \vec{E} вращается вокруг точки O с угловой скоростью ω). Такой свет называется **эллиптически поляризованным**. Если $A_1 = A_2$ и $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$, эллипс превращается в окружность. Световую волну в этом слу-

чае называют *поляризованной по кругу или циркулярно поляризованной*.

Если для наблюдателя, смотрящего навстречу лучу, вращение вектора \vec{E} происходит по часовой стрелке, поляризацию называют *правой*, если против – *левой*.

2. Если волны $E_x(t)$ и $E_y(t)$ некогерентны, имеют разные амплитуды и интенсивности ($A_1 \neq A_2$) и ($I_1 \neq I_2$), в результате наложения этих волн получится частично поляризованный свет – свет, в котором колебания одного направления преобладают (по амплитуде) над колебаниями других направлений. В таком свете направление MN , вдоль которого происходит колебания вектора \vec{E} , как и в естественном свете, беспорядочно меняется, но при колебаниях в каком-то одном направлении амплитуда максимальна $A = A_{\max}$, а когда колебания происходят в перпендикулярном направлении, $A = A_{\min}$. Степень поляризации P света определяется соотношением

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (8)$$

Если в (8) $I_{\min} = 0$, то $P = 1$ – свет плоско поляризован, если $I_{\max} = I_{\min}$, то $P = 0$, свет естественный.

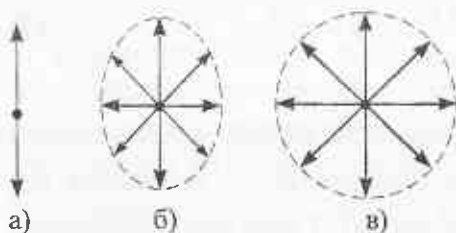


Рис. 8

На рис. 8 даны схематические изображения плоско поляризованного (а), частично поляризованного (б) и естественного (в) света для случая, когда направление распространения света перпендикулярно плоскости чертежа, а на рис. 9 – для плоско поляризованного света, когда луч лежит в плоскости чертежа, при этом а) соответствует случаю, когда плоскость колебаний

совпадает с плоскостью чертежа, б) – случаю, когда плоскость колебаний перпендикулярна плоскости чертежа.



Рис. 9

5. Двойное лучепреломление

Явление двойного лучепреломления заключается в том, что при прохождении света через прозрачные анизотропные веще-

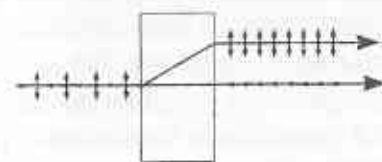


Рис. 10

ства световой луч разделяется на два луча (рис. 10). В зависимости от типа кристалла (в кристаллах, например, кубической системы двойного лучепреломления вообще не происходит) в кристаллах существует либо одно, либо два направления, в которых раздвоение луча не наблюдается. Любая прямая, параллельная направлению, вдоль которого не происходит двойного лучепреломления, называется *оптической осью кристалла*. Если такое направление одно, кристалл называется *одноосным*, если два – *двухосным*. Плоскость, которая проходит через оптическую ось кристалла и падающий луч, называется *главным сечением* кристалла.

В одноосных кристаллах один из лучей называется *обыкновенным (o)*, т.к. он подчиняется законам преломления, а другой – *необыкновенным (e)* – он не подчиняется законам преломления света и его показатель преломления n_e меняется в зависимости от угла падения.

Оба луча полностью поляризованы, причем у обыкновенного (o) луча плоскость колебаний вектора перпендикулярна главному сечению кристалла; у необыкновенного (e) плоскость колебаний совпадает с главным сечением.

Двойное лучепреломление объясняется анизотропией среды: диэлектрическая проницаемость ϵ в кристаллах в различных направлениях различна.

В некоторых кристаллах один из лучей (o) или (e) поглощается значительно сильнее, чем другой. Это явление называется **дихроизмом**. Оно наблюдается в кристаллах турмалина, сульфата йодистого хинина и в некоторых других веществах. Явление дихроизма лежит в основе действия **поляроидов**. Поляроиды представляют собой пленку из прозрачного полимера, в которой равномерно распределены одинаково ориентированные микрокристаллы дихроичного вещества.

Для получения поляризованного света широко применяется **призма Николя** (николь). Этот поляризатор представляет собой призму из исландского шпата, разрезанную по диагонали и вновь склеенную прозрачной смолой (канадским бальзамом), показатель преломления которой меньше, чем показатель преломления n_o обыкновенного луча в исландском шпате и больше n_e необыкновенного.

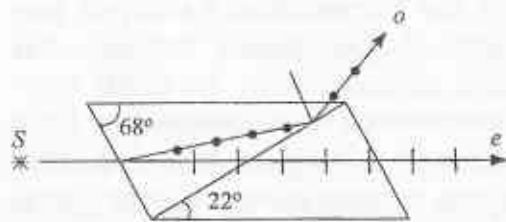


Рис. 11

Угол падения обыкновенного луча (рис. 11) на прослойку из смолы оказывается таким, что он испытывает полное внутреннее отражение и поглощается зачерненной оправой. Необыкновенный луч проходит через эту прослойку и, после выхода из кристалла является плоско поляризованным светом.

6. Пластика в четверть волны (пластинка $\lambda/4$)

На кристаллическую пластинку, вырезанную параллельно оптической оси OO' (рис. 12), нормально падает плоскополяризованный свет. Внутри пластинки он разделяется на обык-

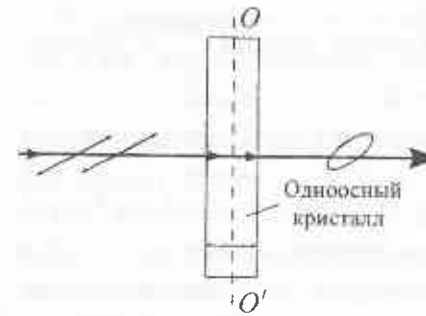


Рис. 12

новенный (o) и необыкновенный (e) лучи, которые в кристалле пространственно не разделены, но движутся с разными скоростями.

На выходе из пластинки при сложении взаимно перпендикулярных колебаний (световой вектор в o - и e -лучах колеблется во взаимно перпендику-

лярных направлениях) возникают световые волны, вектор \vec{E} в которых меняется со временем так, что его конец описывает эллипс, ориентированный произвольно относительно координатных осей. Уравнение этого эллипса

$$\frac{X^2}{E_o^2} - \frac{2XY}{E_o E_e} \cos \varphi + \frac{Y^2}{E_e^2} = \sin^2 \varphi, \quad (9)$$

где E_o и E_e — соответственно составляющие напряженности электрического поля волны в обыкновенном и необыкновенном лучах; φ — разность фаз колебаний. Таким образом, в результате прохождения через кристаллическую пластинку **плоско поляризованный свет превращается в эллиптически поляризованный**.

Если между o - и e -лучами оптическая разность хода Δ в пластинке равна $\lambda/4$, т.е.

$$\Delta = (n_o - n_e)d = \frac{\lambda}{4}$$

$$\text{или } (n_o - n_e)d = \left(m + \frac{1}{4}\right)\lambda, \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

d — путь, пройденный светом в кристалле,

то разность фаз $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0}(n_o - n_e)d$ станет равной $\frac{\pi}{2}$, а уравне-

ние (9) принимает вид: $\frac{X^2}{E_o^2} + \frac{Y^2}{E_e^2} = 1$ (эллипс, ориентированный

относительно координатных осей). При $E_e = E_o$: $X^2 + Y^2 = E_o^2$ (на выходе из пластинки свет *поляризован по кругу*).

Вырезанная параллельно оптической оси пластинка, для которой оптическая разность хода

$$\Delta = (n_o - n_e)d = \pm(m + \frac{1}{4})\lambda.$$

называется *пластинкой в четверть волны* (пластинкой $\lambda/4$). Знак плюс соответствует левой поляризации (результрующий вектор \vec{E} вращается против часовой стрелки), минус – правой.

7. Анализ поляризованного света

Для исследования плоско поляризованного света можно применять обычные *поляризаторы*. При вращении анализатора вокруг направления луча интенсивность прошедшего света изменяется, а если при некотором положении анализатора свет полностью гасится, то имеем дело с плоско поляризованным светом. Если падающий свет – естественный, то при вращении анализатора интенсивность проходящего света не изменяется.

Поляризаторы не позволяют отличить эллиптически и циркулярно поляризованный свет соответственно от частично поляризованного и естественного света. Для этих целей, в частности, можно использовать *пластинку в четверть волны* (пластинку $\lambda/4$).

Плоско поляризованный свет, пройдя пластинку $\lambda/4$, на выходе превращается в эллиптически поляризованный (в частном случае циркулярно поляризованный).

В *циркулярно поляризованном свете* разность фаз φ между любыми двумя взаимно перпендикулярными колебаниями равна $\pm\pi/2$. Заставляя такой свет пройти через пластинку $\lambda/4$, мы добавляем к этой разности $\pm\pi/2$. Результирующая разность фаз станет равной 0 или π . Тогда (см. формулу (9)) циркулярно поляризованный свет становится плоско поляризованным. Если теперь на пути луча поставить поляризатор, то можно добиться полного его гашения. Естественный свет при прохождении пластинки $\lambda/4$ таковым и останется (ни при каком положении пластинки и поляризатора гашения луча не достичь).

Если падающий свет представляет собой смесь естественного и циркулярно поляризованного света, то поворотом анализатора его полного гашения достичь нельзя.

Заставляя эллиптически поляризованный свет пройти через пластинку $\lambda/4$, оптическая ось которой ориентирована параллельно одной из осей эллипса, то она внесет дополнительную разность фаз $\pm\pi/2$. Результирующая разность фаз станет равной нулю или π . Следовательно, эллиптически поляризованный свет, пройдя пластинку $\lambda/4$, оптическая ось которой ориентирована параллельно одной из осей эллипса, превращается в плоско поляризованный и может быть погашен поворотом анализатора. Этим методом можно отличить эллиптически поляризованный свет от частично поляризованного или циркулярно поляризованный свет от естественного.

8. Применение поляризованного света

В последнее время широкое распространение получили устройства отображения информации на основе жидких кристаллов (ЖК): это индикаторы электронных часов, калькуляторов, ЖК-дисплеи мобильных телефонов и персональных компьютеров. Все они используют явление вращения плоско-

сти поляризации проходящего света закрученными слоями жидких кристаллов.

Геометрия наблюдения большинства деформационных эффектов в ЖК проста. Жидкокристаллическая ячейка содержит тонкий слой ЖК (~5...10 мкм), заключенный между двумя прозрачно проводящими электродами, нанесенными на оптические подложки из стекла. Начальная ориентация молекул ЖК

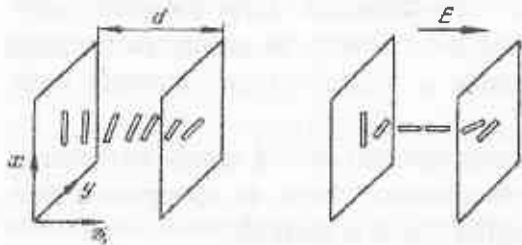


Рис. 13

длинными осями параллельна плоскости подложки и в заданном направлении осуществляется путем вакуумного распыления окислов кремния или германия под углом 80...85° к подложкам.

Если направление x и y ориентации молекул ЖК на противоположных электродах перпендикулярны друг другу, то распределение молекул по толщине слоя однородно и может быть представлено в виде четверти витка спирали.

Такая закрученная (*twist*) структура поворачивает плоскость поляризации вошедшего в нее вдоль оси z линейно поляризованного луча на угол 90°. Получается так, будто оптическая ось ЖК, поворачиваясь по мере продвижения вдоль координаты z , «ведет за собой» вектор поляризации света. Ячейка с такой структурой, помещенная между скрещенными поляризаторами оказывается светлой. Приложение электрического поля вызывает поворот осей молекул вокруг их центров параллельно вектору электрического поля, оптическая анизотропия слоя уменьшается, и закручивание структуры исчезает. Ячейка теряет оптическую активность; в скрещенных поляризаторах она становится непрозрачной, темной. На рис. 14 показано устройство сегментного ЖК-индикатора на твист эффекте.

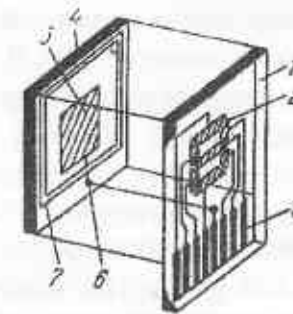


Рис. 14:

1 – передняя подложка; 2 – изображение знака на внутренней поверхности подложки в виде сегментного, прозрачного электрода; 3 – электрические контакты; 4 – задняя подложка; 5 – общий прозрачный электрод; 6 – электрический вывод общего электрода; 7 – слой герметика

Обычно на внешние поверхности подложек приклеиваются поляроидные пленки.

Приложение внешнего напряжения между сегментным и общим электродами вызывает переориентацию молекул ЖК и потерю оптической активности слоя в этом месте индикатора. На общем светлом фоне сегмент становится темным. Полисегментные электроды использовались в основном для нумерации чисел. Для отображения телевизионной информации большое распространение получили матричные дисплеи, состоящие из двух подложек с нанесенной системой взаимно ортогональных прозрачных электродов (строк и столбцов), между которыми заключен ЖК-слой. При адресном воздействии управляющего напряжения на соответствующие строки и столбцы у микроячеек ЖК, расположенных на пересечении электродов исчезает оптическая активность и, соответственно, прозрачность. Из множества точек создается изображение. ЖК-матрица экранов телевизоров и мониторов не является самосветящейся, поэтому используют неполяризованную тыловую подсветку светодиодами.

Поляризованный свет применяется также для получения объемного изображения в кинотеатрах. В этом случае киносъемка осуществляется двумя камерами, расположенными под разными углами к снимаемому объекту, в поляризованном свете (на объективах кинокамер расположены поляризаторы ориентированные во взаимно перпендикулярных направлениях). Затем изображение с двух камер монтируется синхронно на одну киноплёнку. Для просмотра объемного изображения необходимо надеть поляроидные очки, причем направление поляризатора для одного глаза совпадает с направлением поляризатора одной кинокамеры, для другого глаза – другой кинокамеры.

Таким образом, один глаз видит изображение, снимаемое одной кинокамерой, другой – это же изображение, снимаемое другой камерой, расположенной под некоторым углом к первой. Создается впечатление объемности. Подобным образом получается объемное телевизионное изображение или изображение в формате 3D.

Контрольные вопросы

1. Что собой представляет свет согласно волновой теории?
2. Какой свет называют: а) естественным; б) плоско поляризованным; в) поляризованным по кругу; г) частично поляризованным и д) эллиптически поляризованным?
3. Сформулируйте закон Малюса.
4. Сформулируйте закон Брюстера.
5. Явление двойного лучепреломления и пластинка $\lambda/4$.
6. Анализ поляризованного света.
7. Изобразите и объясните оптическую схему установки по изучению свойств поляризованного света.
8. Применение поляризованного света.

Литература

1. Савельев, И.В. Курс общей физики: в 5 т. / И.В. Савельев. – М.: Астрель, АСТ, 2003. – Т. 4.
2. Ландсберг, Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг. – М.: Гостехтеориздат, 1977.
3. Калитеевский, Н.И. Волновая оптика / Н.И. Калитеевский. – М.: Высшая школа, 1978.
4. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – М.: Высшая школа, 2003.