

Сегодня: \*

# Лекция 10

## Тема: **ПОЛЯРИЗАЦИЯ**

- 10.1. Естественный и поляризованный свет. Закон Малюса;**
- 10.2. Поляризация света при отражении и преломлении на границе двух сред;**
- 10.3. Двойное лучепреломление;**

## 10.1. Естественный и поляризованный свет. Закон Малюса.

Следствием теории Максвелла является поперечность световых волн: векторы напряженности  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей волны взаимно перпендикулярны и колеблются перпендикулярно вектору скорости  $\vec{v}$  распространения волны (перпендикулярно лучу). Поэтому для описания закономерностей поляризации света достаточно знать поведение лишь одного из векторов.

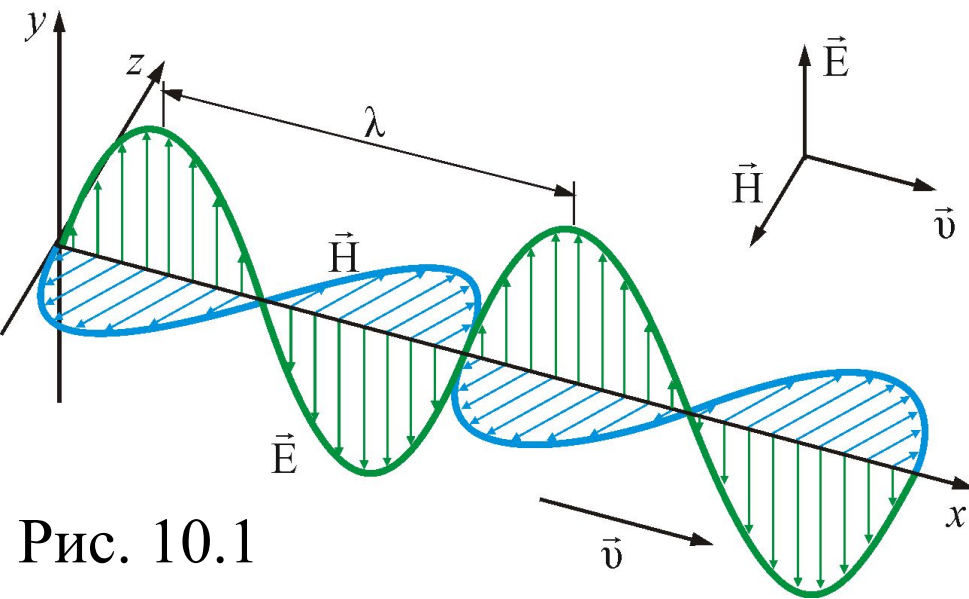


Рис. 10.1

Поэтому для описания закономерностей поляризации света достаточно знать поведение лишь одного из векторов. Обычно все рассуждения ведутся относительно *светового вектора*

– вектора напряженности **E** электрического поля - это название обусловлено тем, что

*при действии света на вещество основное значение имеет электрическая составляющая поля волны, действующая на электроны в атомах вещества.*

Понять поляризацию света нам поможет более простое явление поляризация волны, бегущей по веревке. Веревку можно заставить колебаться в вертикальной плоскости (рис. 10.2, а) или в горизонтальной плоскости (рис. 10.2,б). И в том и в другом случае волна оказывается *плоскополяризованной* (или *линейно-поляризованной*), т. е. все колебания происходят в одной плоскости.



Рис. 10.2. Поперечные волны на веревке, поляризованные в вертикальной плоскости (а) и в горизонтальной плоскости (б).

Если на пути волны поставить какое-нибудь препятствие с вертикальной щелью (рис. 10.3), то вертикально поляризованная волна пройдет через него,

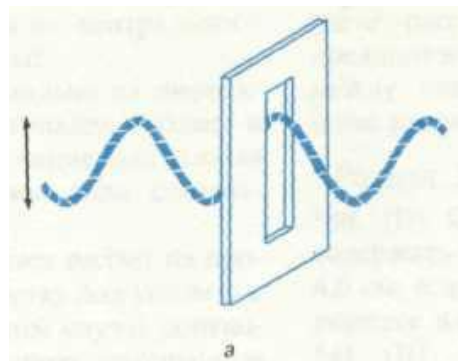


Рис. 10.3,а. Вертикально поляризованные волны проходят через вертикальную щель

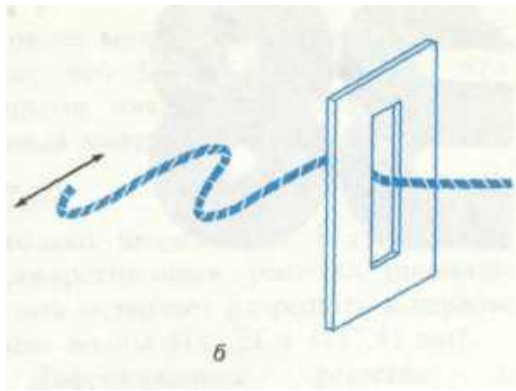


Рис. 10.3,б. Горизонтально поляризованные волны не проходят через вертикальную щель

а горизонтально поляризованная волна препятствие не преодолевает. Если бы щель в препятствии была горизонтальной, то оно оказалось бы непреодолимым для вертикально поляризованных волн. Если на пути таких волн поставить оба препятствия, то через них не сможет пройти ни одна из поляризованных волн. Заметим, что **поляризация может существовать только у поперечных волн!**, но не у продольных. В продольных волнах колебания совершаются только вдоль направления их распространения, и никакой ориентацией щели нельзя эти волны погасить.

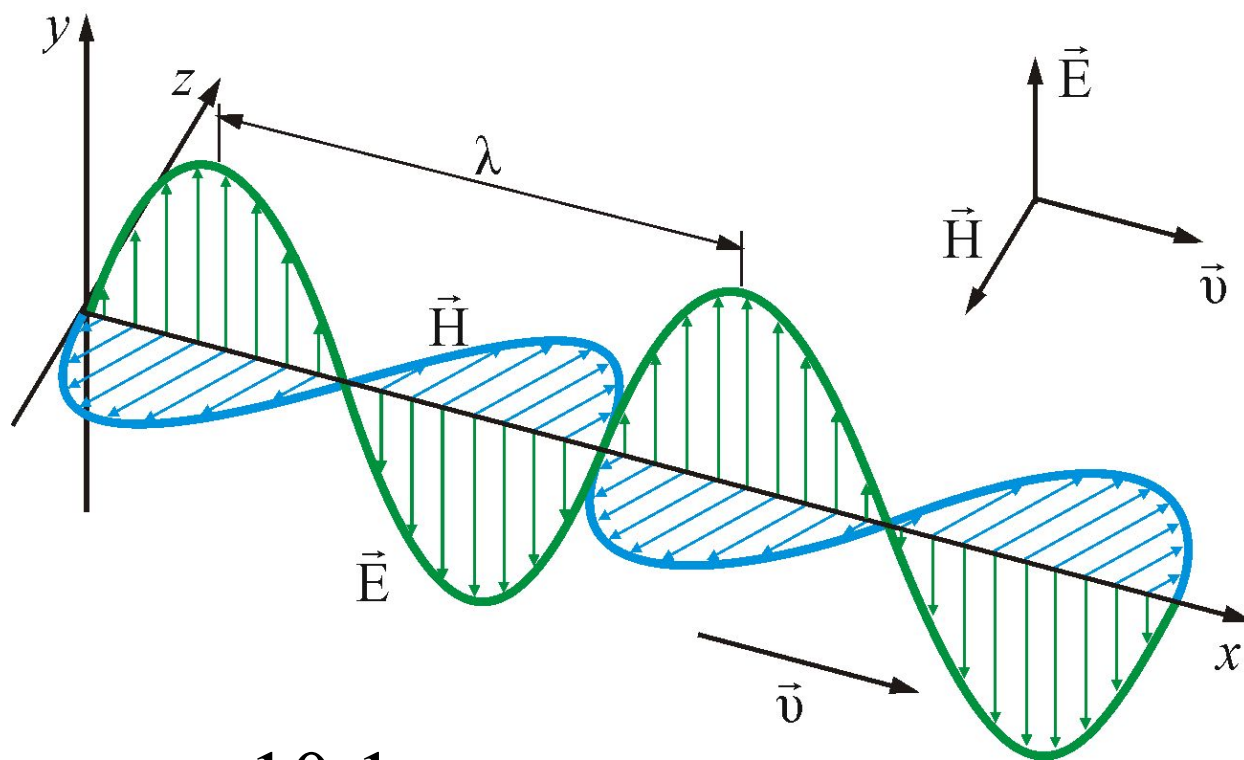


Рисунок 10.1

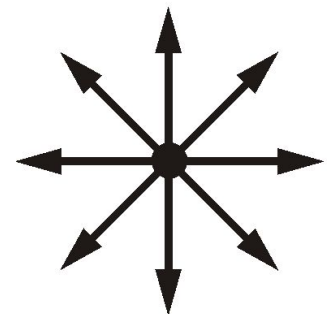
О возможности поляризации света стало известно только в XIX в. Но еще современники Ньютона знали явление, связанное с поляризацией света: при преломлении света в некоторых кристаллах, например в исландском шпате, возникают два преломленных луча. Такие кристаллы получили название *двойко преломляющих*. Некоторые другие кристаллы, например турмалин, в зависимости от их ориентации не пропускают тот или иной из преломленных лучей. В настоящее время известно, что *лучи в двойко преломляющем кристалле плоско поляризованы во взаимно перпендикулярных направлениях и что турмалин действует подобно «щели», которая пропускает только луч с подходящей поляризацией*. Но лишь после работ Юнга и Френеля, выполненных в начале XIX в., в этом явлении увидели доказательство того, что свет представляет собой поперечную волну. Спустя полвека развитая Максвеллом электромагнитная (ЭМ) теория света оказалась в полном соответствии с таким объяснением поляризации, так как ЭМ-волна является поперечной. Если ЭМ-волна плоско поляризована, то в качестве направления ее

поляризации принято выбирать направление вектора напряженности электрического поля.

Свет не обязательно поляризован. Он может быть и *неполяризованным*. Это означает, что колебания источника происходят одновременно во многих плоскостях (рис. 10.4,*a*). Обычная лампа накаливания испускает, как и Солнце, *неполяризованный свет*. Свет представляет собой суммарное электромагнитное излучение множества атомов. Атомы же излучают световые волны независимо друг от друга, поэтому световая волна, излучаемая телом в целом, характеризуется всевозможными равновероятными колебаниями светового вектора (рис. 10.4, *a*; луч перпендикулярен плоскости рисунка).

Рис.10.4.

*a*) неполяризованный свет





В данном случае равномерное распределение векторов  $\mathbf{E}$  объясняется большим числом атомарных излучателей, а равенство амплитудных значений векторов  $\mathbf{E}$  – одинаковой (в среднем) интенсивностью излучения каждого из атомов.

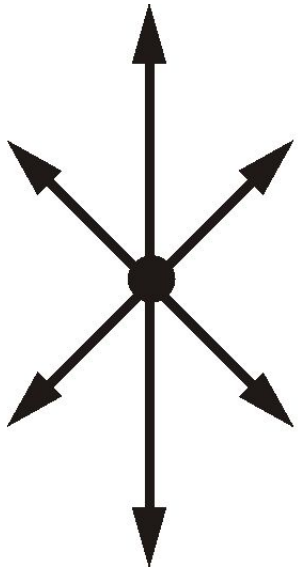
Свет со всевозможными равновероятными ориентациями вектора  $\mathbf{E}$  называется **естественным**.

Плоскополяризованный свет можно получить из неполяризованного с помощью некоторых кристаллов, например турмалина.

Плоскость, в которой происходят колебания вектора  $\mathbf{E}$ , называется **плоскостью поляризации**.

Свет, в котором направления колебаний светового вектора каким-то образом упорядочены, называется **поляризованным**.

Так, если в результате каких-либо внешних воздействий появляется преимущественное (но не исключительное!) направление колебаний вектора  $\mathbf{E}$  (рис.10.4, б), то имеем дело с **частично поляризованным светом**.



Свет, в котором вектор  $\mathbf{E}$  (и, следовательно,  $\mathbf{H}$ ) колеблется в определенной плоскости, перпендикулярно лучу (рис. 10.4, в), называется **плоскополяризованным (линейно поляризованным)**.

Плоскость, проходящая через направление колебаний светового вектора  $\mathbf{E}$  плоско поляризованной волны и направление распространения этой волны, называется **плоскостью поляризации**.

Рис.10.4.

б) частично поляризованный свет

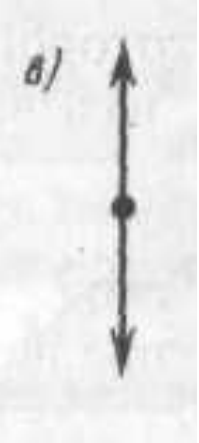


Рис.10.4.

Плоскополяризованный свет является предельным случаем эллиптически поляризованного света — света, для которого световой вектор **E** (вектор **H**) изменяется со временем так, что его конец описывает эллипс, лежащий в плоскости, которая перпендикулярна лучу.

в)  
линейно-  
поляризо-  
ванный  
свет

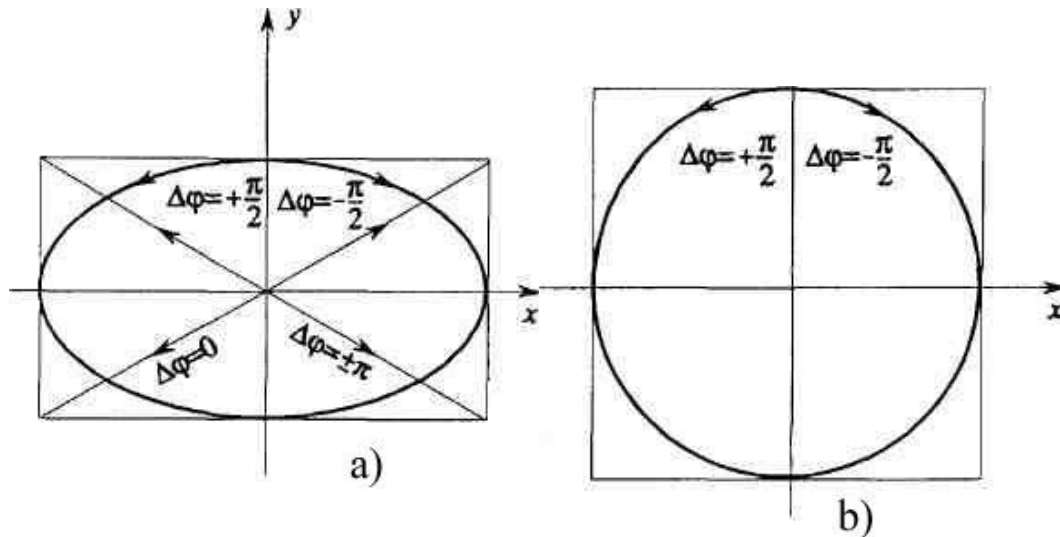


Рис.10.4.

Если эллипс поляризации вырождается в прямую (при разности фаз, равной нулю или  $\pi$ ), то имеем дело с рассмотренным выше плоскополяризованным светом, если в окружность (при разности фаз, равной  $\pm\pi/2$ ), то имеем дело с циркулярно поляризованным (поляризованным по кругу) светом. Пространственную структуру эллиптически-поляризованных волн поясняет рисунок 10.5

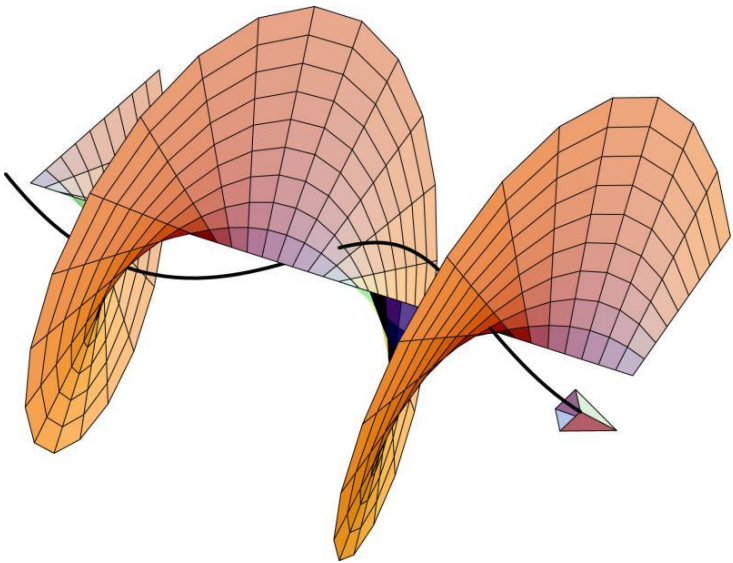


Рис.10.5.

Винтовая линия, геометрическое место концов вектора  $\vec{E}$ . Шаг винта равен длине волны  $\lambda$ .

Винтовая линия, не деформируясь, перемещается со скоростью света в направлении распространения волны

В реальных средах возможно превращение неполяризованных волн в полностью поляризованные и наоборот. За меру степени поляризации принимают

$$P = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}),$$

где  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  — максимальная и минимальная интенсивности света, соответствующие двум взаимно перпендикулярным компонентам вектора  $\mathbf{E}$ . Для естественного света  $I_{\max} = I_{\min}$  и  $P = 0$ , для плоскополяризованного —  $I_{\min} = 0$  и  $P = 1$ . Естественный свет можно преобразовать в плоскополяризованный, используя так называемые **поляризаторы**, пропускающие колебания только определенного направления (например, пропускающие колебания, параллельные плоскости поляризации, и полностью

задерживающие колебания, перпендикулярные этой плоскости). В качестве поляризаторов могут быть использованы среды, анизотропные в отношении колебаний вектора  $\mathbf{E}$ , например кристаллы (их анизотропия известна). Из природных кристаллов, давно используемых в качестве поляризатора, следует отметить турмалин.

Рассмотрим классические опыты с турмалином (рис. 10.4). Направим естественный свет перпендикулярно пластинке турмалина  $T_1$ ,



Рис.10.4

вырезанной параллельно **оптической оси  $OO'$**  (направление в кристалле, относительно которого атомы (или ионы) кристаллической решетки расположены симметрично). Вращая кристалл  $T_1$  вокруг направления луча, никаких изменений интенсивности прошедшего через турмалин света не наблюдаем. Если на пути луча поставить вторую пластинку турмалина  $T_2$  и вращать ее вокруг направления луча, то интенсивность света, прошедшего через пластинки, меняется в зависимости от угла  $\alpha$  между оптическими осями кристаллов по закону Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha,$$

(10.1.1)

где  $I_0$  и  $I$  — соответственно интенсивности света, падающего на второй кристалл и вышедшего из него. Следовательно, интенсивность прошедшего через пластинки света изменяется от минимума (полное гашение света) при  $\alpha = \pi/2$  (оптические оси пластинок перпендикулярны) до максимума при  $\alpha = 0$  (оптические оси пластинок параллельны). Однако, как это следует из рис. 10.4, амплитуда  $E$  световых колебаний, прошедших через  $T_2$ , будет меньше амплитуды световых колебаний  $E_0$ , падающих на  $T_2$ :

$$E = E_0 \cos \alpha.$$

Так как интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды, то и получается выражение (10.1.1).

Результаты опытов с кристаллами турмалина объясняются довольно просто, если исходить из изложенных выше условий пропускания света поляризатором. Первая пластинка турмалина пропускает колебания только определенного направления (на рис. 10.4 это направление показано стрелкой  $AB$ ), т. е. преобразует естественный



свет в плоскополяризованный. Вторая же пластинка турмалина в зависимости от ее ориентации из поляризованного света пропускает большую или меньшую его часть, которая соответствует компоненту  $E$ , параллельному оси второго турмалина. На рис. 10.4 обе пластинки расположены так, что направления пропускаемых ими колебаний  $AB$  и  $A'B'$  перпендикулярны друг другу. В данном случае  $T_1$  пропускает колебания, направленные по  $AB$ , а  $T_2$  их полностью гасит, т. е. за вторую пластинку турмалина свет не проходит.

Пластинка  $T_1$ , преобразующая естественный свет в плоскополяризованный, является поляризатором. Пластинка  $T_2$ , служащая для анализа степени поляризации света, называется анализатором. Обе пластинки совершенно одинаковы (их можно поменять местами).

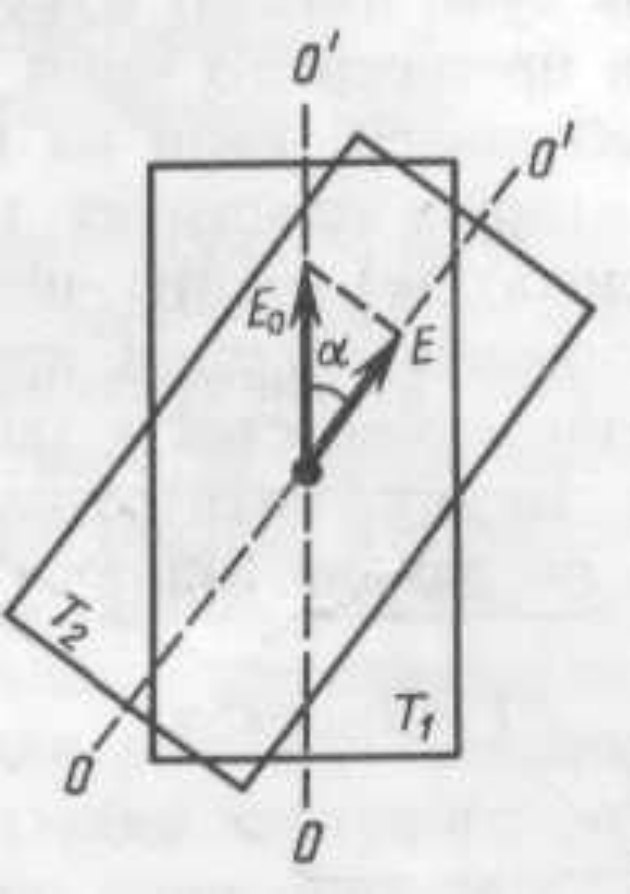


Рис.10.5

Если пропустить естественный свет через два поляризатора, плоскости которых образуют угол  $\alpha$ , то из первого выйдет плоскополяризованный свет, интенсивность которого  $I_0 = \frac{1}{2}I_{\text{ест}}$ , из второго, согласно (10.1.1), выйдет свет интенсивностью

$I = I_0 \cos^2 \alpha$ . Следовательно, интенсивность света, прошедшего через два поляризатора,

$$I = \frac{1}{2}I_{\text{ест}} \cos^2 \alpha,$$

откуда  $I_{\text{max}} = \frac{1}{2}I_{\text{ест}}$ , (поляризаторы параллельны) и  $I_{\text{min}} = 0$  (поляризаторы скрещены).

## 10.2. Поляризация света при отражении и преломлении на границе двух сред

Получить поляризованный свет из неполяризованного можно еще одним способом - отражением. Когда свет падает на немаetalлическую поверхность под любым углом, кроме прямого, отраженный луч оказывается плоско поляризованным преимущественно параллельно отражающей поверхности (рис. 10.6). Иначе говоря, компонента с поляризацией в плоскости,

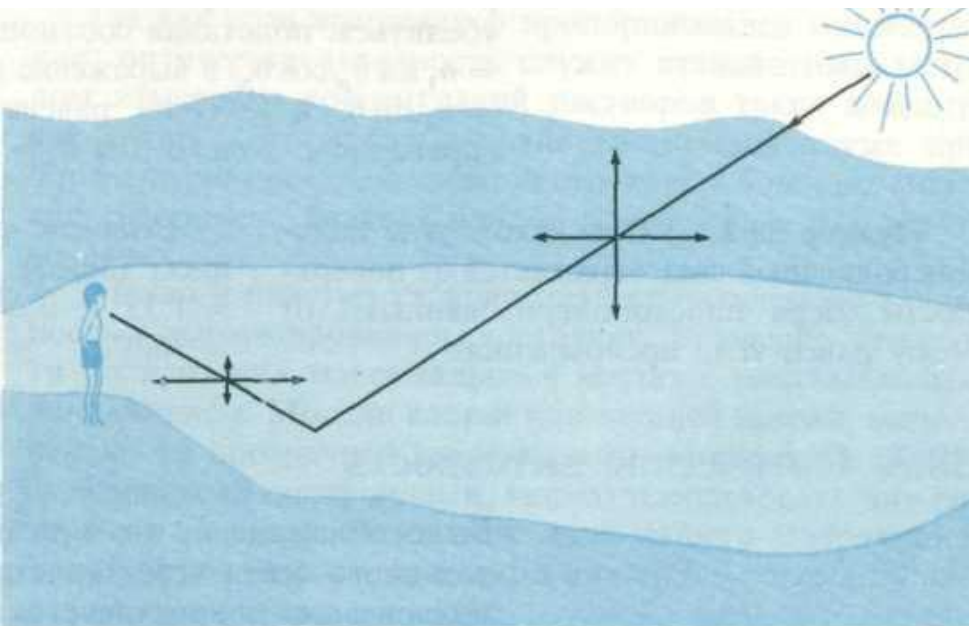


Рис.10.6

перпендикулярной отражающей поверхности, почти полностью проходит или поглощается. В этом можно убедиться, поворачивая поляроидные очки, когда вы смотрите в них на поверхность озера или дороги. Поскольку, большинство поверхностей под открытым небом горизонтальны, ось поляроидных очков направляют по вертикали, с тем, чтобы погасить самую интенсивную компоненту света и тем самым ослабить отблески. Это хорошо знают рыбаки, использующие поляроидные очки, чтобы избавиться от бликов на поверхности озера или реки и тем самым лучше видеть, что происходит под водой.

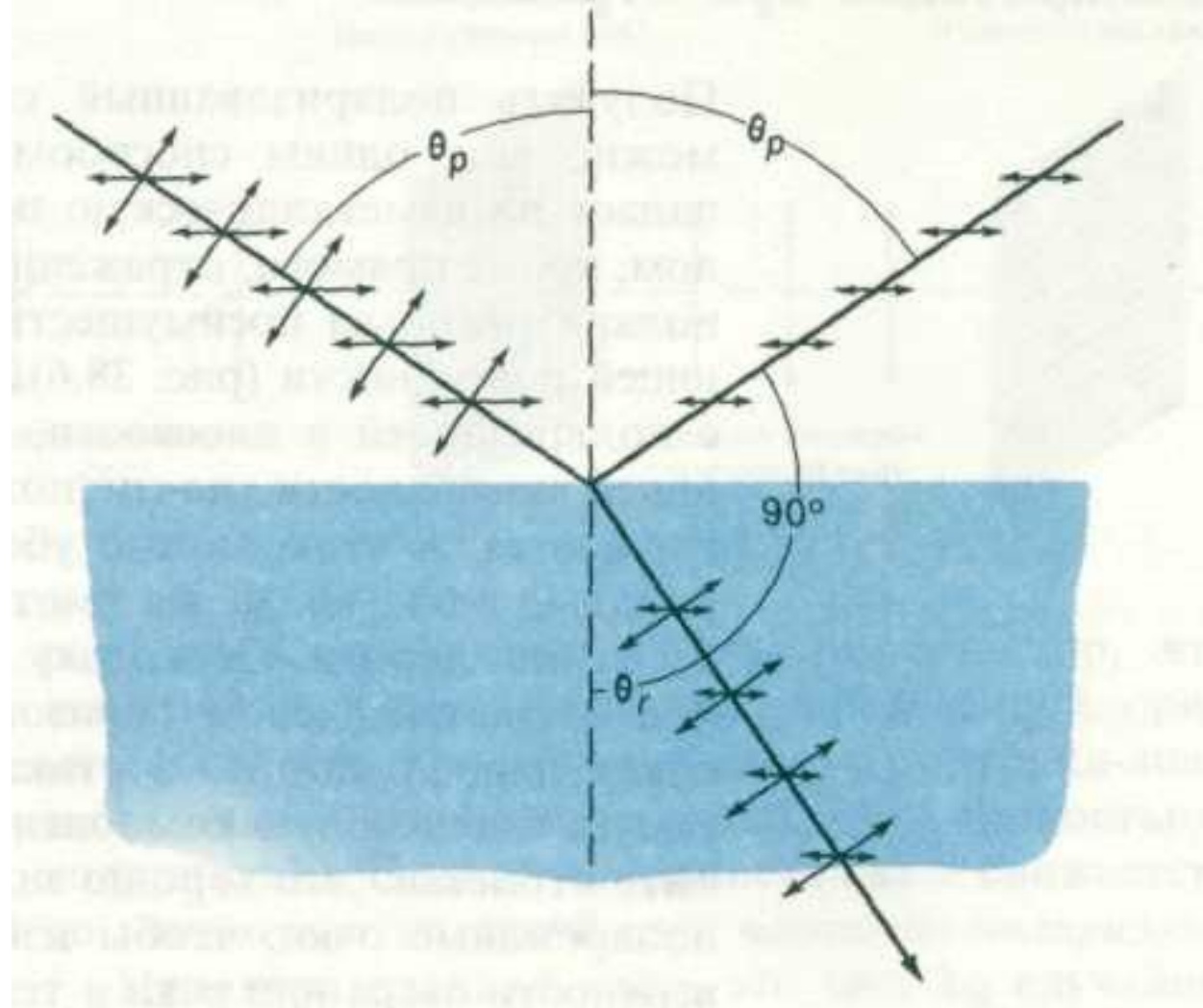
Степень поляризации отраженного пучка зависит от угла: при нормальном падении свет полностью не поляризован, а при падении под углом, который называется *углом полной поляризации*  $\theta_B$ , отраженный свет поляризован на 100%. Угол полной поляризации связан с показателями преломления сред по обе стороны границы их раздела соотношением

$$\operatorname{tg}\theta_B = \frac{n_1}{n_2}, \quad (10.2.1, \text{a})$$

где  $n_1$  - показатель преломления среды, в которой распространяется луч, а  $n_2$  - показатель преломления среды, лежащей по другую сторону отражающей границы. Если свет распространяется в воздухе, то  $n_1 = 1$ , и

$$\operatorname{tg}\theta_{\text{Б}} = \frac{1}{n_2}, \quad (10.2.1, \text{б})$$

Угол полной поляризации называют также *углом Брюстера*, а соотношение (10.2.1) - *законом Брюстера* в честь шотландского физика Дэвида Брюстера (1781-1868), открывшего его экспериментально в 1812 г. Формулы могут быть получены на основе электромагнитной теории света. Интересно отметить, что при падении под углом Брюстера отраженный и преломленный лучи образуют угол  $90^\circ$ , т.е.  $\theta_{\text{Б}} + \theta_{\text{Г}} = 90^\circ$  (рис. 10.7). В этом можно убедиться, подставив соотношение (10.2.1, а) ( $n_2 = n_1 \operatorname{tg}\theta_{\text{Б}} = n_1 \sin\theta_{\text{Б}} / \cos\theta_{\text{Б}}$ ) в выражение для закона Снелля  $n_1 \sin\theta_{\text{Б}} = n_2 \sin\theta_{\text{Г}}$  и получив равенство  $\cos\theta_{\text{Б}} = \sin\theta_{\text{Г}}$ , которое справедливо только для  $\theta_{\text{Б}} = 90^\circ - \theta_{\text{Г}}$ .



10.7. Свет, отраженный под углом  $\theta_p$ , плоско поляризован параллельно поверхности, и  $\theta_B + \theta_r = 90^\circ$ , где  $\theta_r$  - угол преломления.

Если естественный свет падает на границу раздела двух диэлектриков (например, воздуха и стекла), то часть его отражается, а часть преломляется и распространяется во второй среде. Устанавливая на пути отраженного и преломленного лучей анализатор (например, турмалин), убеждаемся в том, что отраженный и преломленный лучи частично поляризованы: при вращении анализатора вокруг лучей интенсивность света периодически усиливается и ослабевает (**полного гашения не наблюдается!**). Дальнейшие исследования показали, что в отраженном луче преобладают колебания, перпендикулярные плоскости падения (на рис. 10.8 они обозначены точками), в преломленном — колебания, параллельные плоскости падения (на рисунке эти колебания изображены стрелками).

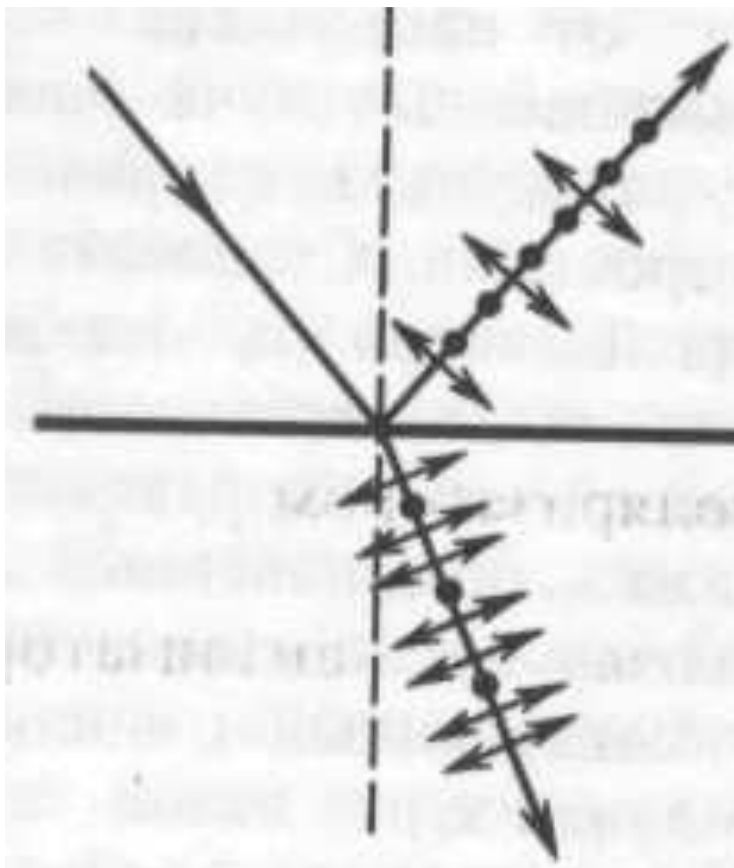


Рис.10.8

Степень поляризации отраженного и преломленного света при различных углах падения можно рассчитать из уравнений Максвелла, если учесть граничные условия для электромагнитного поля на границе раздела двух изотропных диэлектриков (так называемые формулы Френеля).



Степень поляризации преломленного света может быть значительно повышена путем многократного преломления при условии падения света каждый раз на границу раздела под углом Брюстера. Если, например, для стекла ( $n = 1,53$ ) степень поляризации преломленного луча составляет  $\approx 10\%$ , то после преломления на 8÷10 наложенных друг на друга стеклянных пластинок вышедший из такой системы свет будет практически полностью поляризованным. Такая совокупность пластинок называется **стопой**. Стопа может служить для анализа поляризованного света как при его отражении, так и при его преломлении.