

## Поляризатор для фотографии

[Волновая природа света](#) | [Поляризация. Степень поляризации](#) | [Анизотропные среды: двулучепреломление и плеохроизм \(дихроизм\)](#) | [Изменение поляризации света при отражении от поверхностей прозрачных сред](#) | [Изменение поляризации света при отражении от зеркальных металлических поверхностей](#) | [Изменение поляризации света при отражении от рассеивающих поверхностей](#) | [Рэлеевское рассеяние в земной атмосфере](#) | [Экспокоррекция для поляроидной пленки](#) | [Являются ли поляроиды нейтрально серыми](#) | [Пластинка  \$\lambda/4\$](#)  | [Круговой поляризатор](#)

## Волновая природа света

Видимый свет, благодаря которому мы получаем информацию об окружающем нас мире, это узкий диапазон электромагнитного излучения с длинами волн от 400 нм до 750 нм.



Рис. 1. Шкала электромагнитных волн

Еще в середине XVII века при наблюдении дифракционных явлений было высказано предположение о волновой природе света. В 70-х годах XVII века великим голландским ученым Гюйгенсом была создана волновая теория света, которая получила признание лишь более ста лет спустя. До этого времени царила корпускулярная теория света, созданная Ньютоном, который рассматривал свет как поток частиц-корпускул. В конце концов физики сошлись на том, что свет можно рассматривать и как волну, и как поток частиц - фотонов.

В конце XIX века Максвеллом было высказано предположение о том, что световые волны имеют электромагнитную природу, что получило подтверждение в опытах Герца. При изучении поляризационных явлений была доказана поперечность электромагнитных волн. Современные знания о волновой природе света кратко выражаются таким рисунком:

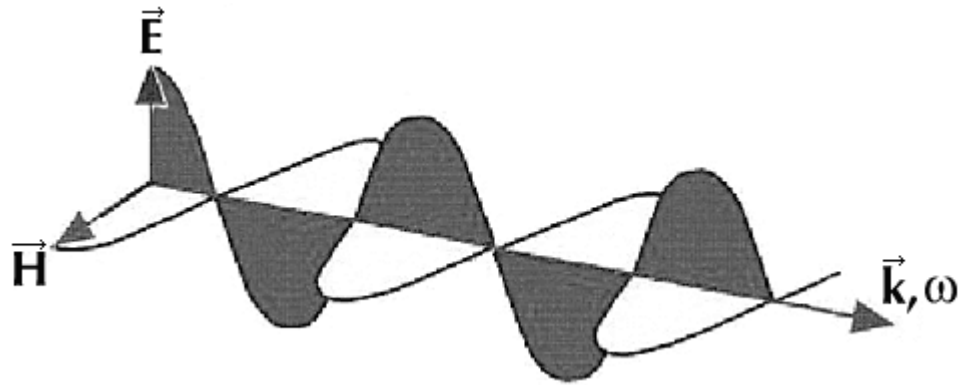


Рис. 2. Электромагнитная волна:  $E$  - вектор напряженности электрического поля,  $H$  - вектор напряженности магнитного поля,  $k$  - вектор направления волны,  $\omega$  - частота колебаний.

Но мало кому известно, что за этим простым рисунком скрываются сотни лет открытий, заблуждений, споров и трудов великих ученых.

### Поляризация. Степень поляризации

Определим понятия естественно, частично и линейно поляризованного света.

**Естественно поляризованный свет** состоит из множества волн, колеблющихся с различной частотой, с различной амплитудой и поляризованных относительно друг друга в различных направлениях. Распределение вектора  $E$  по углам симметрично относительно направления распространения волны. Схематично естественный свет можно представить таким образом:

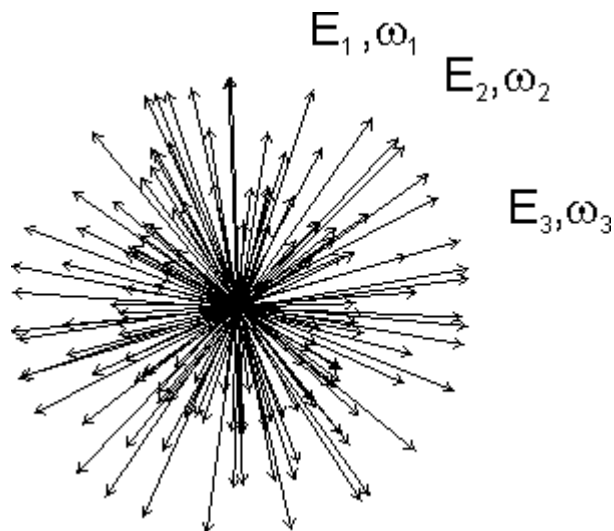


Рис. 3. Естественно поляризованный свет

Вектора  $E$  и  $H$  перпендикулярны друг другу, поэтому часто в поясняющих рисунках оставляют только вектор  $E$ , перпендикулярный вектор  $H$  подразумевается.

**Частично поляризованный свет** - то же, что и естественный, но

распределение вектора  $E$  по углам несимметрично.

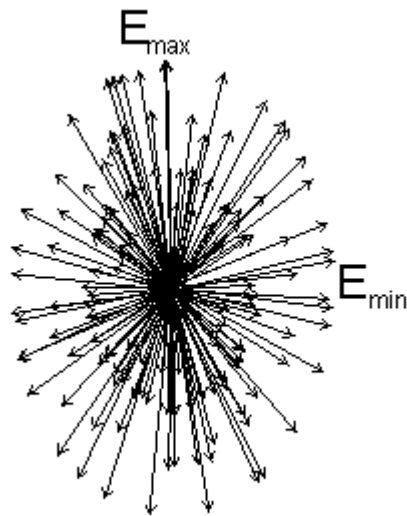


Рис. 4. Частично поляризованный свет

Частично поляризованный свет характеризуется такой величиной, как степень поляризации - отношением  $E_{\max}$  к  $E_{\min}$ . Для естественно поляризованного света степень поляризации равна единице.

Под **линейно поляризованным светом** понимают свет, у которого все волны имеют строго определенную ориентацию вектора  $E$ .

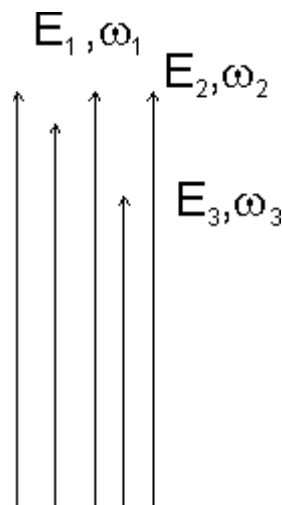


Рис. 5. Линейно поляризованный свет

Линейно поляризованного света в природе не существует. Это - математическая абстракция. Говоря о линейно поляризованном свете, в действительности имеют в виду частично поляризованный свет с высокой степенью поляризации. В некоторых случаях, говоря о линейной поляризованном свете, подразумевают частично поляризованный свет со степенью поляризации 10. В других случаях свет со степенью поляризации 103 рассматривается как частично поляризованный. Все зависит от конкретной задачи.

Используя понятие степени поляризации, можно определить

следующие явления: **поляризация света** - взаимодействие света с веществом, при котором степень поляризации увеличивается; **деполяризация света** - взаимодействие света с веществом, при котором степень поляризации уменьшается. При взаимодействии с веществом - прохождении, отражении, преломлении, поглощении - свет может поляризоваться, деполяризоваться и не менять степени поляризации.

Здесь нужно заметить, что существует понятие поляризации как явления, при котором нарушается симметрия в распределении ориентации векторов  $E$  и  $H$  относительно направления распространения волны, и поляризации как свойства световой волны.

Теперь определим, что такое **поляризатор**: это приспособление, увеличивающее степень поляризации.

### **Анизотропные среды: двулучепреломление и плеохроизм (дихроизм)**

**Анизотропия** (от греч. *anisos* - неравный и *tropos* - свойство) - различие в зависимости от направления. Структура вещества может быть анизотропной и это приводит к тому, что и свойства материи становятся анизотропными.

В 1669 году датский физик и математик Эразм Бартолин открыл **явление двулучепреломления** в кристаллах исландского шпата. В то время законы преломления и отражения света были хорошо известны, но поведение второго луча было необычным (он до сих пор называется необыкновенным). Этот необычный луч исчезает при определенной ориентации кристалла, преломляется таким образом, будто показатель преломления материала постоянно меняется.

Открытие двулучепреломление положило начало развитию оптики кристаллов - материалов, имеющих анизотропную структуру и анизотропию показателя преломления.

После того, как стало известно, что обыкновенный и необыкновенный лучи полностью поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях, стали создавать **поляризационные призмы**. В призмных конструкциях необыкновенный луч отводится в сторону за счет явления полного внутреннего отражения, проходит только обыкновенная линейно-поляризованная волна (степень поляризации 103-104). Наибольшее распространение получили призмы Глана и Николя.

Но поляризационные призмы слишком громоздки и дороги для фотографов. В фотографии используются более дешевые и удобные поляроидные пленки. Их изготовление стало возможным с открытием явления плеохроизма (дихроизма).

**Плеохроизм** - анизотропия поглощения света. Если анизотропия поглощения наблюдается только в двух направлениях, то говорят о дихроизме. Явление дихроизма было обнаружено в кристаллах турмалина, в котором обыкновенная волна поглощается значительно сильнее, чем необыкновенная (заметим, что в исландском шпате ни та, ни другая волна

не испытывают поглощения). При толщине в 1 мм турмалин практически полностью поглощает обыкновенную волну и лишь частично необыкновенную. В итоге выходящий свет становится поляризованным. Это дало возможность изготавливать поляризаторы из пластинок турмалина.

Позже стали изготавливать **поляроидные пленки** - поляроиды, представляющие собой полимерную основу со множеством мелких, ориентированных одинаковым образом кристалликов герпатита (полиидит сульфата хирина, назван в честь ученого-химика Герпатита). Герпатит, как и турмалин, обладает дихроизмом, но в значительно большей степени поглощает обыкновенную волну, уже при толщине в 0.1 мм обыкновенная волна не проходит сквозь кристалл.

### Изменение поляризации света при отражении от поверхностей прозрачных сред

Среды, не поглощающие волны видимого диапазона, мы воспринимаем как прозрачные - это стекла, вода, воздух, хрусталь, бриллианты и много других бесцветных кристаллов. Для гладких поверхностей (неровности много меньше длины волны) законы отражения и преломления хорошо изучены и описаны формулами Френеля.

Воспользуемся этими формулами, чтобы построить кривые отражения света от обычного оконного стекла (показатель преломления 1,52).

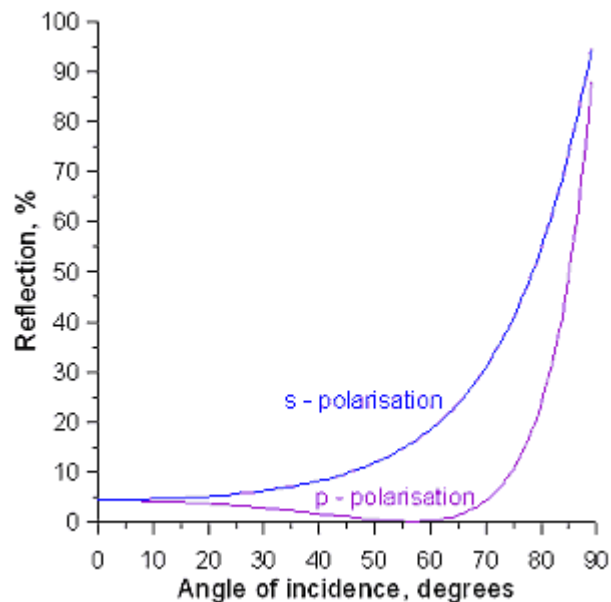


Рис. 6. Коэффициент отражения стекла в зависимости от угла падения.

При отражении света различают две поляризации: **S-поляризация**, при которой вектор  $E$  перпендикулярен плоскости падения, **P-поляризация**, при которой вектор  $H$  перпендикулярен плоскости падения. Угол падения отсчитывается от нормали к поверхности.

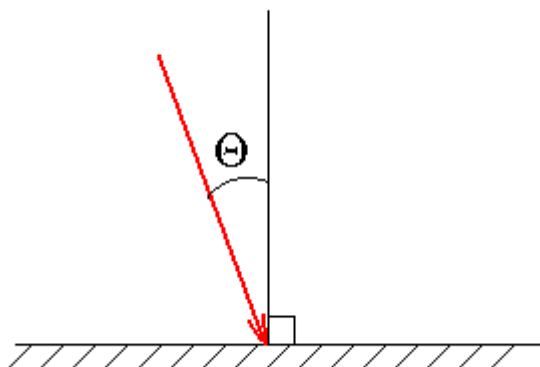


Рис. 7.  $\theta$  - угол падения света.

Когда угол  $\theta$  равен нулю, говорят о нормальном падении, когда угол  $\theta$  близок к 90 градусам, говорят о скользющем падении.

Из графика видно, что при нормальном падении света коэффициенты отражения и S- и P-поляризации равны, это значит, что степень поляризации волны не меняется. При угле 57 градусов коэффициент отражения для P-поляризации равен нулю, отражается только S-поляризация и свет полностью поляризован (степень поляризации 103-104). Это и есть **угол Брюстера**, для стекла он равен 57 градусам. Если вы встанете под углом Брюстера к стеклу, то поворотом поляризатора можно полностью убрать блики.



без поляризатора

с поляризатором

Рис. 8. Встав под углом Брюстера к оконному стеклу, вы можете с помощью поляризатора убрать отражения

При углах падения света, отличных от угла Брюстера, свет поляризуется лишь частично, и вы не сможете убрать блики полностью.

Давайте построим те же кривые для воды (показатель преломления 1,33).

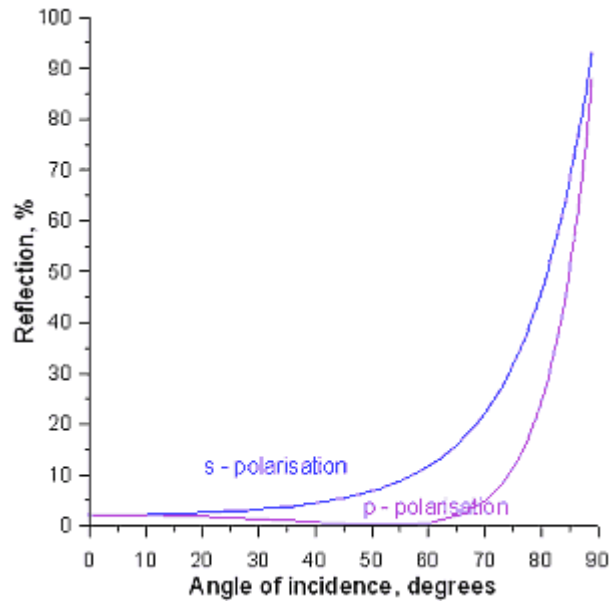


Рис. 9. Коэффициент отражения воды в зависимости от угла падения.

Кривые похожи по форме на кривые отражения для стекла (так же они выглядят и для других непоглощающих сред). Угол Брюстера для воды равен 53 градусам. Если вы будете смотреть на воду под углом, близким к углу Брюстера, вы увидите блики, отраженные водой, но с помощью поляризатора вы можете убрать их и увидеть то, что находится под водной поверхностью, и сфотографировать жизнь подводного мира.

Если уж речь зашла об отражении под различными углами, нельзя обойти и скользящее падение света. При скользящем падении коэффициент отражения стремится к 100%. Прозрачные среды при скользящем падении имеют высокое отражение.

### **Изменение поляризации света при отражении от зеркальных металлических поверхностей**

Иногда можно услышать утверждение о том, что металлические поверхности не поляризуют свет. Посмотрим, так ли это, на примере алюминия. Построим те же зависимости коэффициента отражения от угла падения света, что и для прозрачных сред.

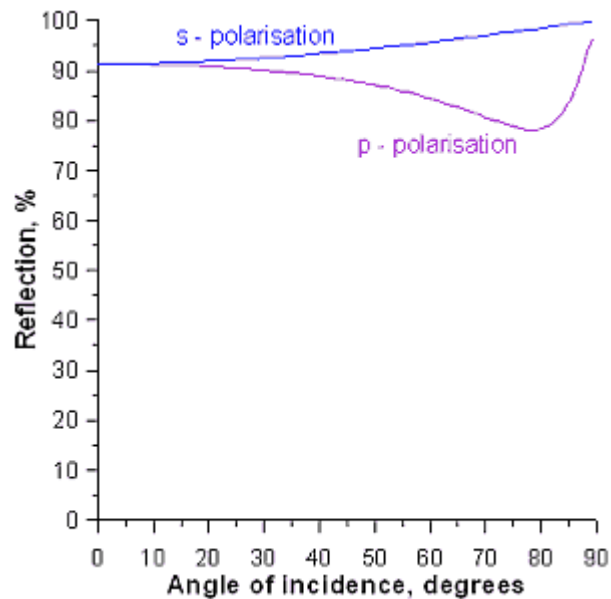


Рис. 10. Коэффициент отражения алюминия в зависимости от угла падения

Из графика прекрасно видно, что при наклонном падении коэффициенты отражения S- и P-поляризации различаются, значит свет частично поляризуется и наибольшая степень поляризации достигается при угле 78 градусов. Но какова степень поляризации для этого угла? Давайте подсчитаем: при угле 78 градусов коэффициент отражения для S-поляризации равен 78%, для P-поляризации - 98%. Поделив одно значение на другое, получим степень поляризации 1,3; но это очень малая степень поляризации, учитывая, что при других углах значение еще меньше. Таким образом, при наклонном отражении от металла свет все-таки частично поляризуется, но степень поляризации очень мала и мы просто не заметим никакой разницы, поворачивая поляризатор.

## Изменение поляризации света при отражении от рассеивающих поверхностей

Возьмите белый лист бумаги. При отражении от него свет рассеивается и практически полностью деполяризуется.

Возьмите глянцевую бумагу. В отраженном свете присутствуют две компоненты - зеркально отраженная и диффузно рассеянная. При зеркальном отражении под углом свет поляризуется, при диффузном рассеянии - деполяризуется.

Возьмите матированный алюминий и серебристую ткань. Деполяризуется ли свет при рассеянном отражении от этих поверхностей? Нет, поляризация света не изменяется. Поэтому эти материалы используются в качестве экранов при просмотре стереофильмов сквозь поляризационные очки. Изображения для левого и правого глаза линейно поляризованы, их поляризации перпендикулярны друг другу. При рассеянном отражении от экрана поляризация должна сохраняться, иначе мы не сможем разделить два изображения с помощью стереоочков.

Большинство предметов, окружающих нас, при отражении света рассеивают его. Поэтому можно сказать, что мы живем в мире рассеянного



света. И при этом рассеянное отражение - наименее изученная область оптики.

Существуют различные теории, рассматривающие лишь частные случаи, например, рэлеевское рассеяние, рассеяние Ламберта, рассеяние Ми и т. д. Но возьмите любого ученого-оптика под руки, подведите его к какому-нибудь предмету, укажите на него пальцем и спросите: "А как этот предмет отражает свет и как при этом меняется поляризация?" Вряд ли он даст полный вразумительный ответ. Поэтому смело берите поляризатор в свои руки и исследуйте окружающий мир сами.

### Рэлеевское рассеяние в земной атмосфере

Теория рэлеевского рассеяния применима в тех случаях, когда материальные частицы малы в сравнении с длиной волны излучения. Рассеяние в атмосфере происходит на флуктуациях молекул кислорода и азота. Более короткие длины волн видимого излучения, которые мы воспринимаем как синие, рассеиваются сильнее, чем красные. Это объясняет синий цвет дневного неба. Рассеянные лучи частично поляризованы, наибольшая степень поляризации достигается в направлении 90 градусов от солнца. Если вы повернетесь к солнцу боком, то поворотом поляризатора можете затемнить небо, не изменив яркости остальных объектов. Но кроме этого хотелось бы обратить ваше внимание и еще на один факт.

Земная атмосфера сильнее всего рассеивает синюю составляющую солнечного излучения, пропуская желтую и красную, поэтому дневной свет можно условно разделить на две компоненты: прямые солнечные лучи красного и желтого цвета и рассеянный синий свет неба. Делая фотографии, вы должны были заметить, что предметы, попадающие под яркие прямые солнечные лучи, получают желтоватых, красноватых оттенков. Более естественную окраску приобретают предметы, освещенные рассеянным светом. Синие лучи поляризованы в большей степени, чем красные и желтые, поэтому поворотом поляризатора вы можете не только изменить насыщенность неба, но и придать ему красноватый оттенок.



*Рис. 11. С помощью поляризатора можно затемнить яркий свет неба по сравнению с другими объектами съемки. При этом появляются красноватые оттенки*

В действительности результат использования поляризатора непредсказуем, поскольку зависит от множества природных факторов и явлений, которые не вписываются ни в какую ныне существующую теорию о свете.

## **Экспокоррекция для поляроидной пленки**

Поляроидная пленка практически полностью поглощает свет, поляризованный вдоль определенной оси (при поляризации деполяризованного света его интенсивность ослабляется в два раза), и поглощает 40% света, поляризованного перпендикулярно (ослабленный в два раза свет ослабляется еще в 0,6 раза, итого ослабление света в 0,3 раза, т.е. проходит только треть). Получаем значение экспокоррекции  $\lg 2(0,3)=1,7$ . Но это значение характерно для стандартизированной толщины поляроидной пленки. В действительности различные производители могут выпускать поляроиды различной толщины. Чем больше толщина поляроидной пленки, тем больше поглощение и светопотери. Толщина поляроида от различных производителей может меняться в широких пределах и необходимое значение экспокоррекции располагаться в диапазоне от 1 до 3,5. Значение экспокоррекции нужно измерять для каждого конкретного поляризатора отдельно.

Но все вышеприведенные рассуждения верны в том случае, если поляризованная часть света составляет малую долю от деполяризованной. Обычно так и бывает - поляризованные блики от различных поверхностей лишь малая часть естественного (деполяризованного) освещения.

Совсем другое дело, если весь свет линейно поляризован, тогда его ослабление будет зависеть от поворота поляризатора: если поляризация света параллельна оси поляроида (она отмечена красными точками на оправе), то, как уже говорилось выше, поглотится 40% света; если мы повернем поляризатор на 90 градусов, то свет поглотится полностью.

## **Являются ли поляроиды нейтрально серыми**

К сожалению, поляроидные пленки не являются нейтрально серыми. Пропускание в различных областях видимого диапазона немного различается и поляроид имеет слабую окраску. Какова эта окраска - опять же зависит от фирмы-производителя.

## **Пластинка $\lambda/4$**

Двулучепреломляющие кристаллы, которые сейчас выращиваются искусственно, используют не только для изготовления поляризационных призм Николя или Глана, но и для изготовления пластинок, превращающих линейную поляризацию в круговую. Пластинки вырезаются параллельно оптической оси кристалла. Линейно поляризованный свет должен быть повернут под углом 45 градусов к этой оси, тогда на выходе мы получим две перпендикулярно поляризованные волны - обыкновенную и необыкновенную, колеблющиеся с одинаковой частотой и одинаковой амплитудой. Показатели преломления в кристалле для обыкновенной и необыкновенной волны немного различаются, в результате при выходе из кристалла необыкновенная волна колеблется с некоторым запозданием относительно обыкновенной, или, говоря научно, со сдвигом фазы. Две

волны, поляризованные в перпендикулярном направлении к друг к другу, колеблющиеся с одинаковой частотой, одинаковой амплитудой и некоторой разностью фаз, складываются. Если разность фаз равна  $\pi/2$ , в результате их сложения вектор электрического поля поворачивается по кругу по часовой стрелке (правое вращение), делая один оборот на 360 градусов за один период колебания. Если разность фаз равна  $-\pi/2$ , то вектор  $E$  вращается против часовой стрелки (левое вращение). Если разность фаз равна нулю, то результатом сложения будет линейно-поляризованная волна, повернутая на 45 градусов к вектору необыкновенной или обыкновенной волны. В общем случае, при сложении двух перпендикулярно поляризованных волн вектор  $E$  будет, вращаясь, описывать эллипс. Круговая и линейная поляризации - частные случаи вращения по эллипсу.

При определенной толщине кристалла и для определенной длины волны  $\lambda$  разность фаз между колебаниями обыкновенной и необыкновенной волн равна  $\pi/2$  или  $-\pi/2$ . В волновом эквиваленте это сдвиг на четверть длины волны, поэтому эти пластинки и называются  $\lambda/4$ . Для длины волны  $\lambda$  мы получаем либо правовращательную, либо левовращательную круговые волны.

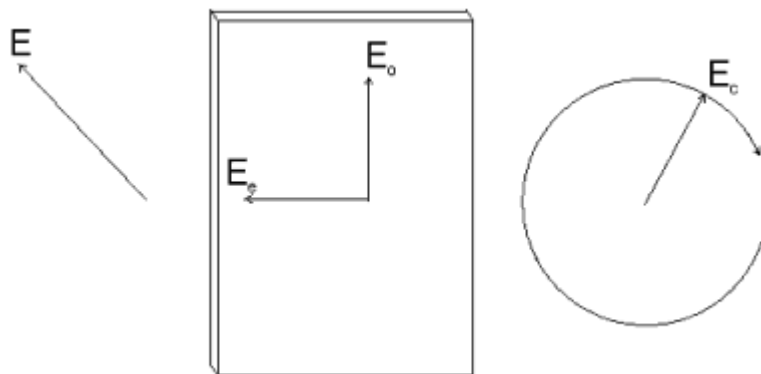


Рис. 12. Пластика  $\lambda/4$ .  $E$  - линейно поляризованная волна,  $E_o$  - обыкновенная волна (ordinary),  $E_e$  - необыкновенная волна (extraordinary),  $E_c$  - круговая волна (circular)

## Круговой поляризатор

Некоторые фотоаппараты используют системы замера света через объектив. Это позволяет наиболее точно определить экспозицию, учесть изменения, которые происходят при смене объектива, использовании цветных фильтров и прочих насадок. Но подобные системы содержат поворотные устройства, которые поляризуют свет, и при определенных условиях могут внести большую ошибку в определение экспозиции, если вы будете использовать линейный поляризатор.

Для таких фотоаппаратов необходимо использовать круговые поляризаторы, которые состоят из поляроида и пластинки  $\lambda/4$ . Вначале свет проходит через поляризатор и линейно поляризуется, затем пластинка  $\lambda/4$  превращает линейную поляризацию в круговую. Для поляризующих элементов нет никакой разницы между естественно поляризованным светом и светом с круговой поляризацией, поэтому больших ошибок в экспозиции уже не возникнет. Но тем не менее, может возникнуть некоторая ошибка, связанная со следующим. Как говорилось выше, линейная поляризация превращается в круговую только на определенной длине волны  $\lambda$ . Но

видимый диапазон включает в себя излучение с длинами волн от 400 нм до 750 нм. Толщина пластинок  $\lambda/4$  рассчитана так, что круговая поляризация возникает на длине волны 510 нм (зеленый цвет) или 580 нм (желтый цвет), а на других длинах волн поляризация эллиптическая.



*Рис. 13. Изменение эллиптической поляризации для видимого диапазона.*

Если в источнике освещения преобладает фиолетовая или красная компонента, то ваши фотографии могут получиться слегка переэкспонированными.

© [Е. А. Вазенмиллер](#)