РАЗДЕЛ IX. ФИЗИКА

Пылаев А.П.

О линейной и эллиптической поляризациях света

*Снежинский физико-технический институт
(Россия, Снежинск)*

doi: 10.18411/sr-10-02-2021-25

idsp: sciencerussia-10-02-2021-25

Аннотация

На основе анализа известных экспериментов рассмотрены существующие представления о линейной и эллиптической поляризации света. Показано, что представление о линейной поляризации не находит аргументов физического характера, а представление о существовании эллиптической поляризации основано только на математических формулах. Поскольку прямого экспериментального доказательства существования эллиптической поляризации не существует, проведен анализ экспериментальной схемы получения косвенного подтверждения. Показано, что эта схема не может дать такого подтверждения.

Ключевые слова: Световой пучок, поляризатор, кристаллическая пластинка, оптическая ось, поляризация световых волн.

Введение

Представление о линейной поляризации, возникающей при пропускании естественного пучка света через поляризатор (например, кристалл турмалина), появилось в начале XIX века при проведении такого рода экспериментов [1,2].

В естественном процессе излучения света обычно принимает участие огромное число атомов, каждый из которых спонтанно излучает свою электромагнитную волну со своим направлением поляризации. Следовательно, если естественный пучок света распространяется в некотором определенном направлении, то он содержит электромагнитные волны со всевозможными направлениями поляризации, и в таком пучке плоскости колебаний всех волн параллельны друг другу. Если спроектировать векторы напряженностей электрических полей такого пучка на плоскость, перпендикулярную направлению его распространения, то эти проекции будут выглядеть, как показано на рис. 1, то есть векторы заполняют весь условный круг. В работе [3] утверждается, что

Рис. 1. Поляризация волн в естественном световом пучке.

при пропускании такого пучка через поляризатор (одноосный кристалл) прошедшая часть пучка будет линейно поляризована, то есть все электрические векторы прошедших волн будут направлены параллельно оптической оси кристалла. При этом неявно подразумевается, что электрическое поле кристалла поворачивает все волны

естественного пучка таким образом. Однако существует и другая возможность, заключающаяся в том, что прошедшие кристалл волны сохраняют свою поляризацию. В этом случае поляризация прошедшего пучка будет иметь вид, показанный на рис. 2. Назовем такую поляризацию *всерной*, ее можно измерять угловой областью Δ поляризаций волн в пучке.

Рис. 2. Всерная поляризация светового пучка.

Обоснованность такого предположения подтверждается тем, что в работе [4] на основе существования такого рода поляризации впервые было получено аналитическое выражение экспериментально установленной Брюстером закономерности, называемой законом Брюстера [2].

Линейная или всерная поляризация?

Рассмотрим общеизвестные эксперименты по пропусканию естественного пучка света через одноосный кристалл – пластину турмалина. Пучок направляется перпендикулярно к поверхности пластины, параллельной ее оптической оси, при этом установлено, что интенсивность прошедшего пучка составляет половину падающего. Поскольку световые волны попадают в область электрического поля, имеющее определенное направление, то естественное объяснение этого состоит в том, что пластина пропускает только те волны, у которых параллельная оптической оси пластины компонента напряженности электрического поля превышает по величине перпендикулярную к этой оси компоненту. Следовательно, пластина пропускает волны, электрические векторы которых лежат в диапазоне углов $\pm\pi/4$ от оптической оси.

Чтобы разобраться, какую поляризацию имеет прошедшая половина пучка, рассмотрим эксперимент по пропусканию естественного пучка света через две параллельно расположенные пластины турмалина со скрещенными осями, как показано на рис. 3. Угол между осями пластин обозначен α .

Рис. 3. Схема эксперимента с двумя пластинами турмалина.

Если прошедший пластину 1 пучок света имеет линейную поляризацию, то электрические векторы всех волн этого пучка направлены вдоль оптической оси

пластины 1. Пластина 2, так же, как и пластина 1, должна пропускать только те волны, у которых параллельная оптической оси этой пластины компонента напряженности электрического поля превышает по величине перпендикулярную к этой оси компоненту. Это означает, что в диапазоне углов

$$0 < \alpha < \pi/4$$

пластина 2 пропустит весь пучок, прошедший пластину 1, а в диапазоне

$$\pi/4 < \alpha < \pi/2$$

не пропустит ни одной волны. Обозначим эту зависимость интенсивности от угла α символом $I_1(\alpha)$. Однако, такая зависимость не соответствует результатам экспериментов, интенсивность прошедшего пластину 2 пучка плавно уменьшается при увеличении угла α от 0 до $\pi/2$. Чтобы объяснить такой результат, обычно применяют другое, чем в первом случае, правило: интенсивность такого пучка пропорциональна $\cos^2 \alpha$ (так называемый закон Малюса), то есть пропорциональна квадрату проекции амплитуды волны на оптическую ось пластины. Обозначим эту зависимость символом $I_2(\alpha)$. Но если применить это правило к прохождению естественного пучка света через пластину 1, то интенсивность прошедшего пучка не будет равна половине интенсивности падающего. Таким образом, одно из правил противоречит результатам первого эксперимента, другое – результатам второго.

Рассмотрим, что получится, если в основу положить предположение о веерной поляризации прошедшего пластину 1 пучка. Эта пластина пропустит волны, направления электрических векторов которых лежат в пределах $\pm \pi/4$ от оптической оси пластины 1, то есть в диапазонах $E_1 - E_2$ и $E_3 - E_4$, как показано на рис. 4.

Рис. 4. Схема прохождения веерного пучка света через пластину 2.

Из совокупности этих волн пластина 2 пропустит только те, векторы которых лежат в пределах $\pm \pi/4$ от оси 2, то есть в диапазонах $E_2 - E_5$ и $E_4 - E_6$. Диапазон поляризаций этой области равен

$$\beta = \pi/2 - \alpha.$$

Отношение интенсивности пучка, пропущенного пластиной 2, к интенсивности пучка, пропущенного пластиной 1, будет равно отношению угловых размеров областей поляризаций этих пучков, то есть

$$I_3(\alpha) = \frac{\beta}{\pi/2} = 1 - \frac{2\alpha}{\pi}.$$

На рис. 5 приведены все три зависимости.

Рис. 5. Три типа зависимостей относительной интенсивности пучка света, прошедшего пластину 2.

Как сказано, зависимость I_1 не соответствует результатам экспериментов, зависимость I_2 приближенно описывает эти результаты, но ее волнообразный характер не имеет физического объяснения, в то время, как зависимость I_3 , основанная на веерном характере поляризации, получается естественным путем. Таким образом, из того факта, что с помощью представления о веерном характере поляризации света получено аналитическое выражение закона Брюстера, а также из результатов проведенного анализа следует, что поляризация света после прохождения поляризатора должна иметь веерный характер.

Существует ли эллиптическая поляризация света?

Общеизвестная схема получения так называемой эллиптической поляризации света, изложенная в работе [3], состоит в следующем.

Шаг 1. Естественный пучок света определенной длины волны пропускается через поляризатор – одноосный кристалл, аналогично тому, как описано в предыдущем разделе. Считается, что на выходе из поляризатора прошедший пучок света линейно поляризован, то есть представляет собой линейно поляризованную волну.

Шаг 2. Линейно поляризованная волна далее пропускается через одноосный кристалл, обладающий свойством двойного лучепреломления, оптическая ось которого составляет некоторый угол α с оптической осью поляризатора, аналогично тому, как описано в предыдущем разделе. При этом считается, что волна распадается на две линейно поляризованные волны: одна (необыкновенная) поляризована вдоль оптической оси кристалла, другая (обыкновенная) поляризована перпендикулярно этой оси. Таким образом, по кристаллу распространяются две волны в одном направлении, перпендикулярном поверхности кристалла, но с разной скоростью. На противоположную грань кристалла выходят две волны с различными фазами их электрических векторов. Разность фаз определяется разностью скоростей волн и толщиной кристаллической пластинки. Происходит векторное сложение электрических и магнитных полей этих волн, в результате чего по мере распространения суммарной волны концы ее электрического и магнитного векторов описывают в общем случае эллипс в плоскости, перпендикулярной направлению ее распространения. Такова математическая основа описанного процесса.

Шаг 3. Как удостовериться в эксперименте, что электрический и магнитный векторы волны действительно описывают эллипсы? Никто и никогда не наблюдал эти эллипсы в эксперименте. Для доказательства существования эллиптической поляризации прибегают к косвенному методу: полученный на выходе кристаллической пластинки световой пучок пропускают через кристаллическую пластинку-компенсатор,

причем ее положение и толщину выбирают так, чтобы компенсировать разность фаз проходящих волн. При этом считается, что в результате световой пучок становится снова линейно поляризованным, а такую поляризацию легко определить, используя обычный поляризатор, как это описано в предыдущем разделе. В результате обработки результатов измерений и описания их с помощью закона Малюса должна получиться зависимость, обозначенная $I_2(\alpha)$. Но, как установлено в предыдущем разделе, эта зависимость приближенно описывает веерную поляризацию.

Рассмотрим пошагово описанный выше эксперимент с точки зрения веерной поляризации. Шаг 1 приведет к тому, что в результате на выходе поляризатора поляризация светового пучка будет иметь вид, показанный на рис. 6.

Рис. 6. Поляризация светового пучка в результате осуществления шага 1 в эксперименте. OP – оптическая ось поляризатора.

Шаг 2 приведет к тому, что, в зависимости от угла α и толщины кристаллической пластинки, на выходе этой кристаллической пластинки появится световой пучок, поляризация которого показана на рис. 7.

Рис. 7. Веерная поляризация светового пучка на выходе из кристаллической пластинки. PP – оптическая ось поляризатора, KK – оптическая ось кристаллической пластинки.

Такой характер поляризации определяется тем, что кристаллическая пластинка с большей скоростью пропустит те волны, поляризация которых лежит в пределах $\pm\pi/4$ от ее оптической оси, стрелки этих волн на рисунке более длинные. Короткие стрелки соответствуют волнам, прошедшим кристаллическую пластинку с меньшей скоростью. Поскольку все волны сохраняют свою исходную поляризацию, не происходит никакого векторного сложения их электрических и магнитных полей. Вообще, говорить о

векторном сложении полей можно только при рассмотрении воздействия светового пучка на какой-либо объект, например, на фотопластинку.

На шаге 3 веерный световой пучок, прошедший кристаллическую пластинку, пропускают через компенсирующую кристаллическую пластинку, в результате чего поляризация светового пучка снова становится такой же, какой она была на выходе из поляризатора в конце шага 1. Дальнейшее прохождение этого пучка через анализатор даст зависимость I_3 , показанную на рис. 5. Таким образом, эксперименты, описанные в виде трех шагов, не дают возможности установить существование эллиптической поляризации.

В качестве дополнительного соображения можно сказать следующее: сложение электрических полей – это математический метод, который при анализе физических процессов позволяет, например, определять результирующую силу, когда заряженная частица оказывается в области действия нескольких электрических полей, или, как это имеет место при воздействии света на фотопластинку, при исследовании интерференции. Сложение же полей, которое приводит к представлению об эллиптической поляризации света, не несет никаких физических следствий. Можно было бы рассматривать эллиптическую поляризацию света как физическую реальность, если бы существовал физический процесс, в котором именно движение конца электрического вектора по эллиптической траектории приводило бы к реальному результату, регистрируемому в эксперименте. Но такого процесса в природе не существует.

Выводы

1. Световые волны естественного светового пучка при прохождении через поляризаторы сохраняют свою исходную поляризацию, представление же о линейной поляризации не находит физических аргументов.

2. Принятая в научной литературе экспериментальная схема косвенного подтверждения существования эллиптической поляризации света в действительности не дает такого подтверждения.

3. Поскольку не существует физического процесса, в котором именно движение конца электрического вектора по эллиптической траектории приводило бы к реальному результату, регистрируемому в эксперименте, эллиптическую поляризацию света следует рассматривать как одну из неподтвержденных физических гипотез.

1. Malus. Memoire sur de nouveaux phenomenes d'optiqu. In Nouveau bulletin des sciences de la Societe philomathique de Paris, 2 (1811), 291-295.
2. D. Brewster. On the laws which regulate the polarisation of light by reflexion from transparent bodies. Philosophical Transactions of the Royal Society, 105, 125 – 159, 1815.
3. Г. С. Ландсберг. Оптика, §110 - 112, с. 356 - 364. ФИЗМАТЛИТ (2003).
4. А. П. Пылаев. Поляризация света и закон Брюстера. Наука России: цели и задачи. Сб. научных трудов, стр.54 -61, 10 июня 2020 г.