

Лабораторная работа 3-04

ЗАКОН МАЛЮСА

Т.М. Ахметчина

Цель работы

Изучение явления поляризации света и экспериментальная проверка закона Малюса.

Теоретическое введение

Естественный и поляризованный свет

Естественный свет представляет собой набор большого числа близких по амплитуде световых волн, в которых направления колебаний электрического (и, соответственно, магнитного) векторов распределены случайным (равновероятным) образом. Равномерное распределение направлений колебаний векторов \vec{E} объясняется большим числом спонтанно испускающих свет атомов вещества, а равенство амплитудных значений векторов \vec{E} — одинаковой (в среднем) интенсивностью излучения каждого атома.

Излучение обычных источников света (например, Солнца, ламп накаливания и т. п.) *не поляризовано*. Свет таких источников в каждый момент времени состоит из вкладов огромного числа независимо излучающих атомов с различной ориентацией светового вектора (вектора \vec{E}). При спонтанном излучении различные атомы источника испускают отдельные цуги волн независимо друг от друга в случайные моменты времени. Процесс излучения отдельного атома длится $\approx 10^{-8}$ с. Фазы колебаний и направления колебаний вектора \vec{E} в излучении различных атомов не скоррелированы друг с другом. Поэтому в результирующей световой волне вектор \vec{E} беспорядочно изменяет свою

ориентацию во времени, так что в среднем все направления колебаний оказываются равноправными.

Свет, в котором направления колебаний вектора \vec{E} упорядочены каким-либо образом, называют *поляризованным*.

Если электрический вектор колеблется вдоль некоторого фиксированного направления, то такой свет называется *линейно поляризованным* или *плоско поляризованным*. Плоскость, в которой все время лежит вектор \vec{E} , а также расположен волновой вектор \vec{k} , называется *плоскостью колебаний*. При этом *плоскостью поляризации* принято называть плоскость, в которой колеблется магнитный вектор световой волны (*плоскость поляризации перпендикулярна плоскости колебаний*)

Кроме линейной поляризации существуют и другие типы поляризации света:

- *частично поляризованный свет* - свет с преимущественным (но не исключительным) направлением колебаний вектора \vec{E} ;
- *циркулярно поляризованный свет* - свет, в котором конец вектора \vec{E} описывает со временем окружность, лежащую в плоскости перпендикулярной волновому вектору;
- *эллиптически-поляризованный свет* - свет, в котором вектор \vec{E} изменяется со временем так, что его конец описывает эллипс, лежащий в плоскости, перпендикулярной световому лучу. В эллиптически поляризованной световой волне в любой плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, конец результирующего вектора за один период колебания обегает эллипс, который называется *эллипсом поляризации*.

Поляризаторы. Закон Малюса

Линейно поляризованный свет получают, пропуская естественный свет через оптические приборы, называемые *поляризаторами*. Плоскость, в которой колеблется вектор \vec{E} в световой волне, прошедшей через поляризатор, называется *плоскостью пропускания*.

На рис. 4.1 показано прохождение линейно поляризованного света через поляризатор.

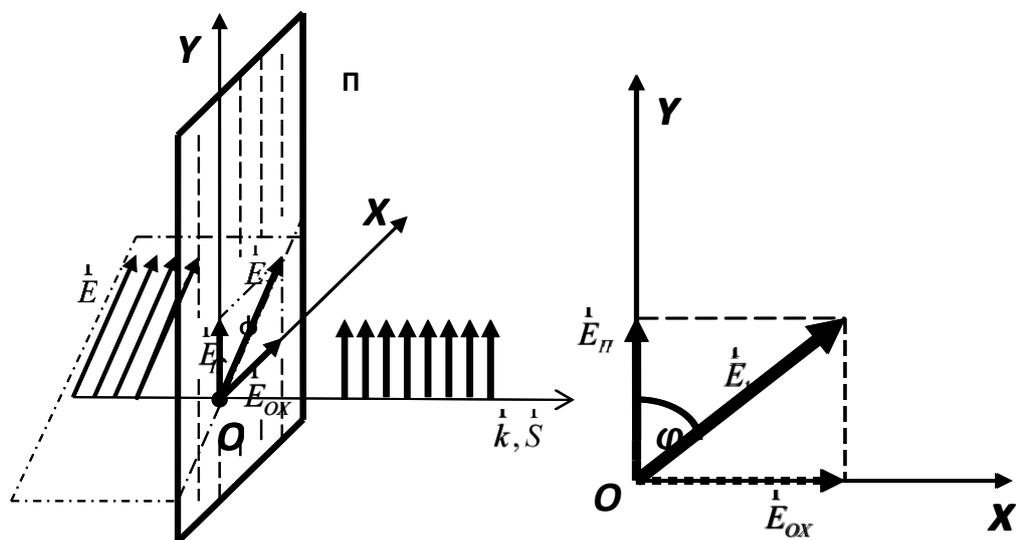


Рис.4.1. Прохождение линейно поляризованного света через поляризатор.

(OY – направление пропускания поляризатора, XOY - плоскость пропускания поляризатора).

Пусть \vec{E}_1 - вектор амплитуды линейно поляризованной световой волны, падающей на поляризатор; \vec{E}_{\parallel} - вектор амплитуды линейно поляризованной световой волны, прошедшей через поляризатор; φ – угол между плоскостью пропускания поляризатора (направлением пропускания поляризатора) и плоскостью колебаний вектора \vec{E}_1 падающей линейно поляризованной волны.

Поляризатор Π пропускает световые волны, вектор \vec{E}_{\parallel} в которых параллелен плоскости пропускания поляризатора OY . Из рис.4.1 видно, что пропускаемая поляризатором световая волна имеет амплитуду

$$E_{\parallel} = E_1 \cdot \cos \varphi. \quad (4.1)$$

Интенсивность волны пропорциональна квадрату ее амплитуды ($I \sim E_m^2$), поэтому через поляризатор пройдет свет интенсивности

$$I_{\Pi} = I_1 \cos^2 \varphi, \quad (4.2)$$

где I_1 - интенсивность линейно поляризованного света, падающего на поляризатор; I_{Π} - интенсивность линейно поляризованного света, прошедшего через поляризатор.

Формула (4.2) выражает собой **закон Малюса**.

Пусть на поляризатор падает естественный свет, интенсивность которого I_0 (рис. 4.2).

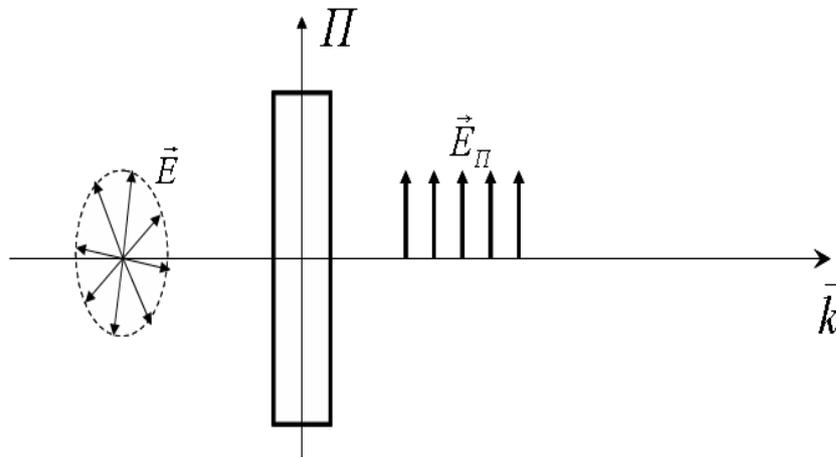


Рис. 4.2. Прохождение естественного света через поляризатор.

Поскольку в естественном свете представлены все возможные ориентации вектора \vec{E} , т.е. угол $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, а среднее значение $\langle \cos^2 \varphi \rangle = \int_0^{2\pi} \cos^2 \varphi \cdot d\varphi = \frac{1}{2}$, то согласно закону Малюса (4.2), средняя интенсивность светового потока, прошедшего через поляризатор, будет:

$$I_{\Pi} = I_0 \langle \cos^2 \varphi \rangle = \frac{1}{2} I_0 \quad (4.3)$$

Если поворачивать плоскость пропускания поляризатора (оставляя поляризатор в одной плоскости), то, как показывает формула (4.3), в случае падения на поляризатор

естественного света, интенсивность света, прошедшего через поляризатор, будет оставаться постоянной, равной половине интенсивности падающего естественного света. Поэтому, если интенсивность света, прошедшего через поляризатор не изменяется при повороте плоскости пропускания, то это означает, что свет, падающий на поляризатор – естественный. При этом свет, прошедший через поляризатор, будет линейно поляризованным.

Если естественный свет падает на несовершенный поляризатор (поляризатор, который частично задерживает колебания вектора \vec{E} , перпендикулярные к его плоскости пропускания), то на выходе из такого поляризатора получается *частично поляризованный* свет, т.е. свет, в котором колебания одного направления преобладают над колебаниями других направлений. Частично поляризованный свет можно рассматривать как смесь естественного и линейно поляризованного света.

Если пропускать частично поляризованный свет через поляризатор, то при вращении поляризатора вокруг направления луча интенсивность прошедшего света будет меняться в пределах от I_{\max} до I_{\min} , причем переход от одного из этих значений к другому будет совершаться при повороте на угол, равный $\frac{\pi}{2}$. За один полный поворот поляризатора на 360° интенсивность проходящего света два раза будет достигать своего максимального и два раза минимального значений.

Степенью поляризации частично поляризованного света называется величина P , равная:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (4.4)$$

Для линейно поляризованного света $I_{\min} = 0$ и $P = 1$; для естественного света $I_{\max} = I_{\min}$, поэтому $P = 0$.

В данной работе источником света служит гелий-неоновый лазер, излучение которого является частично поляризованным. Частично поляризованный свет, излучаемый лазером,

можно представить как смесь естественного света интенсивности I_O и линейно поляризованного света интенсивности I_{II} :

$$I_{ч.л.} = I_O + I_{II}; \quad (4.5)$$

В соответствии с (4.2) и (4.3), интенсивность лазерного луча, прошедшего через поляризатор, будет:

$$I = \frac{1}{2} I_O + I_{II} \cdot \cos^2 \varphi. \quad (4.6)$$

Как видно из формулы (4.6), интенсивность прошедшего через поляризатор света зависит от углового положения поляризатора. Максимальная интенсивность света будет при значении $\cos^2 \varphi = 1$, следовательно:

$$I_{\max} = \frac{1}{2} I_O + I_{II}; \quad (4.7)$$

минимальная интенсивность света после поляризатора будет при значении $\cos^2 \varphi = 0$, следовательно:

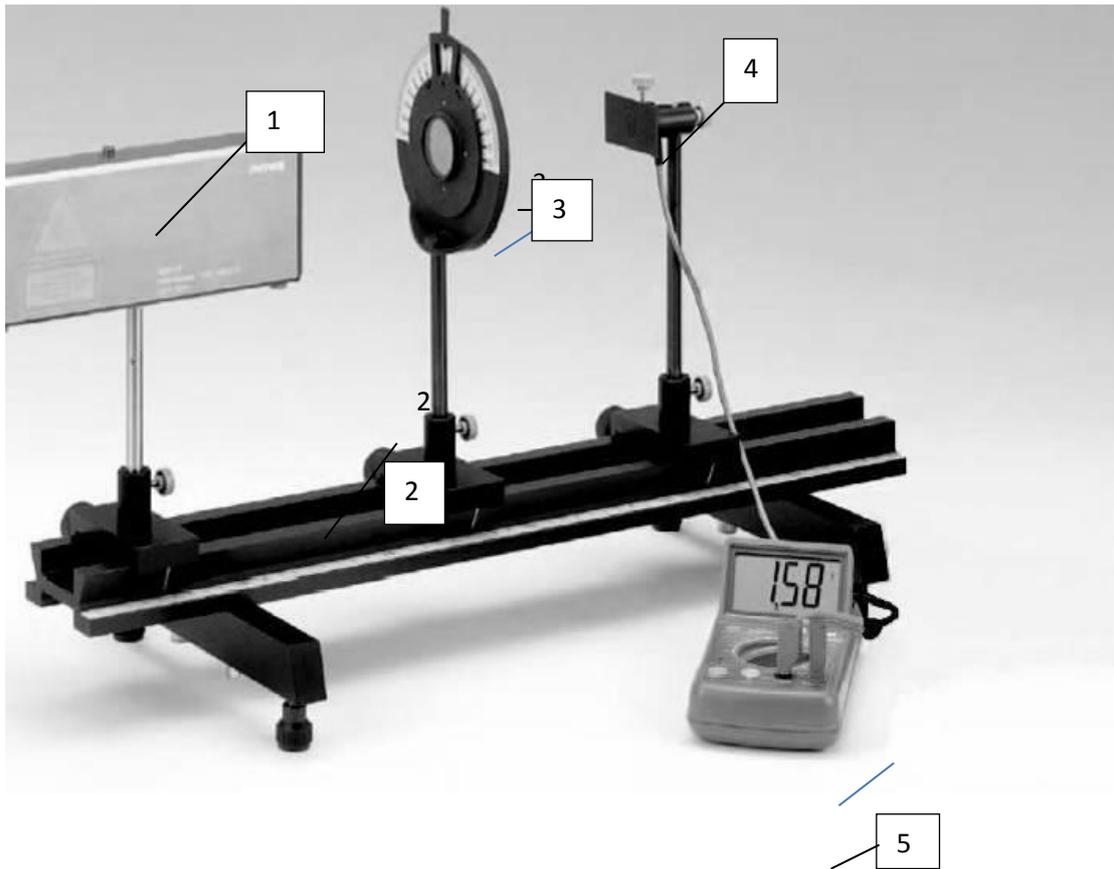
$$I_{\min} = \frac{1}{2} I_O. \quad (4.8)$$

Исключая с помощью (4.7) и (4.8) неизвестные величины I_O и I_{II} в (4.6), окончательно находим:

$$I = I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) \cdot \cos^2 \varphi. \quad (4.9)$$

Описание экспериментальной установки

Общий вид установки представлен на рис.4.3.



P

ис.4.3. Экспериментальная установка.

В состав установки входят:

- He-Ne лазер 1 мощностью 1,0 мВт (используется как источник света);
- оптическая скамья 2;
- поляризатор 3 в держателе с поворотным устройством с радиально нанесенными делениями, расположенными через равные угловые промежутки с шагом в 5° (используется как анализатор);
- фотоэлемент 4;
- цифровой мультиметр 5, используемый для измерения фототока (регистрирует величину напряжения сигнала в вольтах).

Перед началом выполнения работы необходимо внести данные технических характеристик приборов в табл. 4.1.

Технические данные приборов

Гелий-неоновый лазер	Мощность	Напряжение питания
Поляризатор с угловой шкалой	Цена деления шкалы	Погрешность
Мультиметр	Цена деления шкалы	Погрешность

Порядок выполнения работы

Лабораторную работу необходимо выполнять, строго соблюдая правила техники безопасности и охраны труда, установленные на рабочем месте студента в лаборатории.

Задания, выполняемые с использованием одного поляризатора

1. Теория метода

Чтобы проверить выполнение закона Малюса данным методом, необходимо получить экспериментальное подтверждение зависимости интенсивности света, прошедшего через поляризатор I_k , от углового положения поляризатора φ_k , т.е. построить график зависимости $I_k = f(\cos^2 \varphi_k)$ (см. формулу (4.9)), и убедиться в том, что это линейная зависимость вида $y = kx + b$.

Интенсивность света, прошедшего через поляризатор и падающего на фотоэлемент, в соответствии с законом фотоэффекта Столетова, прямо пропорциональна силе тока насыщения фотоэлемента. С другой стороны, фототок насыщения прямо пропорционален напряжению сигнала, который регистрируется цифровым мультиметром. Поэтому об интенсивности света, прошедшего через поляризатор, можно судить по величине снимаемого мультиметром напряжения сигнала (интенсивность света при этом измеряется в относительных единицах).

В данной работе для проверки закона Малюса необходимо получить значения интенсивности света, прошедшего через поляризатор I_k , максимальной интенсивности света I_{\max} и

минимальной интенсивности I_{\min} , представив их через величину напряжения сигнала, идущего от фотоэлемента к мультиметру: значение $I_{\max} \sim U_{\max}$, значение $I_{\min} \sim U_{\min}$, а значение $I_k \sim U_k$.

При проведении эксперимента в незатемненной комнате, следует также учесть фоновое значение интенсивности $I_{\text{фон.}}$, создаваемое посторонними источниками света (значение интенсивности $I_{\text{фон.}}$ определяется в относительных единицах по величине напряжения сигнала мультиметра $U_{\text{фон.}}$). С учетом среднего фонового значения интенсивности $I_{0\text{cp.}}$, получим:

$$I_k - I_{0\text{cp.}} = (I_{\min} - I_{0\text{cp.}}) + \left[(I_{\max} - I_{0\text{cp.}}) - (I_{\min} - I_{0\text{cp.}}) \cdot \cos^2 \varphi_k \right],$$

или

$$I_k = I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) \cdot \cos^2 \varphi_k,$$

что соответствует формуле (4.9).

2. Экспериментальная проверка закона Малюса

1. Собрать экспериментальную установку (рис.4.3).
2. При проведении эксперимента в незатемненной комнате, следует до начала измерений (не включая лазер) определить фоновое значение интенсивности $I_{\text{фон.1}}$, создаваемое посторонними источниками света.

Значение интенсивности $I_{\text{фон.1}}$ записать в табл.4.2 в относительных единицах (по величине напряжения сигнала мультиметра $U_{\text{фон.1}}$).

3. Перед началом работы лазер необходимо разогреть в течение 5-ти минут. Затем проверить юстировку установки, т.е. убедиться в том, что фотоэлемент полностью освещен и луч лазера попадает точно в середину щели фотоэлемента. Угловое положение поляризатора определяется углом α_k по шкале поляризатора;

3. Поворачивая поляризатор с шагом 10° между положениями $\alpha_k = \pm 90^\circ$, снять зависимость величины интенсивности I_k (в относительных единицах, по величине напряжения сигнала мультиметра) от угла α_k . Результат записать в табл.4.3.

4. После окончания измерений, определить фоновое значение интенсивности $I_{фон.2}$ (для этого, перекрывая лазерный луч экраном, необходимо записать величину $U_{фон.2}$ напряжения сигнала мультиметра). Результат записать в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Результаты измерений с использованием одного поляризатора

$I_{фон.1}$, отн. ед.	$I_{фон.2}$, отн. ед.	$(I_{фон.})_{ср.} = \frac{I_{фон.1} + I_{фон.2}}{2}$, отн. ед.	I_{max} , отн. ед.	I_{min} , отн. ед.	$(I_{max} - I_{min})$, отн. ед.

Таблица 4.3

Результаты измерений (с использованием одного поляризатора)

α_k , град	I_k , отн. ед.	α_0 , (соотв. I_{max})	$\varphi_k, \varphi_k = \alpha_k - \alpha_0$	$\cos^2 \varphi_k$
90				
80				
...				
-80				
-90				

3. Определение степени поляризации лазерного излучения

Для определения степени поляризации частично поляризованного света, излучаемого лазером, необходимо получить значения для максимальной I_{\max} и для минимальной интенсивности I_{\min} света, прошедшего поляризатор, через величину напряжения сигнала, идущего от фотоэлемента к мультиметру: значение $I_{\max} \sim U_{\max}$, значение $I_{\min} \sim U_{\min}$.

При проведении эксперимента в незатемненной комнате, следует учитывать фоновое значение интенсивности $I_{\text{фон.}}$, создаваемое посторонними источниками света (значение интенсивности $I_{\text{фон.}}$ записывается в относительных единицах по величине напряжения сигнала мультиметра $U_{\text{фон.}}$). С учетом фонового значения интенсивности

степень поляризации P , согласно (4.4), будет рассчитываться по формуле:

$$P = \frac{(I_{\max} - I_{\text{фон.}}) - (I_{\min} - I_{\text{фон.}})}{(I_{\max} - I_{\text{фон.}}) + (I_{\min} - I_{\text{фон.}})} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min} - 2I_{\text{фон.}}} . \quad (4.10)$$

Обработка результатов измерений

Проверка закона Малюса с использованием одного поляризатора

1. По данным табл. 2 рассчитать среднее фоновое значение интенсивности

$$I_{\text{фон.ср.}} = \frac{I_{\text{фон.1}} + I_{\text{фон.2}}}{2} .$$

2. Из всех значений I_k необходимо выбрать максимальное I_{\max} и минимальное значения I_{\min} интенсивности света, прошедшего через поляризатор ($I_{\max} \sim U_{\max}$, $I_{\min} \sim U_{\min}$). Результаты внести в табл. 4.1.

3. Выбранному максимальному значению I_{\max} соответствует такое угловое положение поляризатора α_0 , при котором плоскость пропускания поляризатора совпадает с плоскостью

колебаний вектора \vec{E} в линейно поляризованной составляющей частично поляризованного света $I_{ч.п.}$, излучаемого лазером. Значение угла α_0 записать в табл. 2.

4. Дальнейший порядок обработки результатов измерений определяется индивидуальными заданиями (см. стенд лаборатории).

5. Рассчитать для каждого значения α_k соответствующий ему угол φ_k . Угол φ_k – это угол между плоскостью колебаний вектора \vec{E} в линейно поляризованной составляющей частично поляризованного света, излучаемого лазером, и плоскостью пропускания поляризатора. Значение $\varphi_0 = 0$ будет соответствовать значению угла α_0 (значение α_0 , которое и есть реальный ноль шкалы поляризатора в данной работе, соответствует выбранному максимальному значению I_{\max}).

Далее, угол φ_k рассчитываем по формуле: $\varphi_k = \alpha_k - \alpha_0$. Результаты расчета занести в табл.4.3.

6. Рассчитать значения $\cos^2 \varphi$, результаты расчета также занести в табл.4.3.

7. Построить в спрямляющих координатах график зависимости интенсивности света, прошедшего через поляризатор I_k , от значения $\cos^2 \varphi_k$. Показать, что с учетом фонового значения интенсивности, получаем зависимость:

$$I_k = I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) \cdot \cos^2 \varphi_k$$

8. Построить график этой зависимости в **Excel** (с применением метода наименьших квадратов) и убедиться в том, что это – линейная зависимость вида: $y = kx + b$, где

y – значения I_k ; x – значения $\cos^2 \varphi_i$; коэффициент k – значение $(I_{\max} - I_{\min})$; постоянная b – значение I_{\min} .

9. Найти степень поляризации P лазерного излучения с учетом среднего фонового значения интенсивности $I_{фон ср.}$:

$$P = \frac{(I_{\max} - I_{фон.}) - (I_{\min} - I_{фон.})}{(I_{\max} - I_{фон.}) + (I_{\min} - I_{фон.})} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min} - 2I_{фон.}}$$

$$I_{k2} - I_{\text{фон.ср.}} = (I_{\text{max1}} - I_{\text{фон.ср.}}) \cdot \cos^2 \varphi_{k2}.$$

Библиографический список

а) основной

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики в 5 кн. Кн.4. Волны. Оптика. М.: АСТ, Астрель, 2006, с.188 –192.
2. *Иродов И.Е.* Волновые процессы. Основные законы. 5-е изд., испр. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010, с.189 – 193.
3. *Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г.* Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ. М.: МИСиС, «Учеба», 2007, 108 с.

б) дополнительный

4. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. М.: Физматлит, 2004, Т.3, с. 650 – 655.
5. *Ландсберг Г.С.* Оптика: учеб. пособие для студ. физических спец. вузов. – 99е изд., перераб. и доп. – М.: Физматлит, 2003, 848 с.

Контрольные вопросы

1. Что такое естественный свет?
2. Что называется плоскостью пропускания?
3. Что такое поляризованный свет?
4. Что такое линейно поляризованный свет?
5. Что такое частично поляризованный свет?
6. По какой формуле следует записать интенсивность света после прохождения поляризатора, если на поляризатор падал линейно поляризованный свет?

7. Как определить характер поляризации света, падающего на поляризатор?
8. По какой формуле определяется интенсивность частично поляризованного света $I_{ч.п.}$?
9. Чему равна степень поляризации частично поляризованного света?
10. Чему равна интенсивность линейно поляризованного света, прошедшего через поляризатор, если на поляризатор падал частично поляризованный свет.

