**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №13. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА СРЕД.**

**Цель:** Изучение поляризационных явлений при прохождении светом границы раздела двух сред и при отражении от нее

**1. Теоретическое введение**

**Поляризация** – общее свойство любых поперечных векторных волн. Поперечная волна характеризуется векторными величинами, которые, изменяясь во времени и пространстве, располагаются в плоскости, ортогональной направлению распространения волны. К поперечным волнам, как известно, относятся: электромагнитное излучение (свет, радиоволны), колебания струны, волны на поверхности жидкости и т.д. Состояние поляризации описывает пространственно-временное поведение векторных характеристик поперечной волны.

Типичным примером поперечной электромагнитной волны является волна, бегущая вдоль шнура, закрепленного одним концом на стене *W* (см. рис.1).

*Q W*

*А В*

Рис. 1. Линейно поляризованная волна, бегущая вдоль шнура,

закрепленного на стене *W*

Эта волна в каждый момент времени и в каждой точке шнура характеризуется смещением от положения равновесия (линия *АВ* ), которое задается радиусом вектором, фиксирующим каждую точку шнура относительно линии *АВ* . Радиус-вектор в каждой точке шнура располагается в плоскости, ортогональной направлению распространения волны (например, в плоскости *Q* ). В рассмотренном примере проекция радиуса-вектора на плоскость *Q* представляет собой вертикальную линию, т.е. ориентация данной проекции – детерминирована и постоянна, что соответствует так называемой линейной поляризации

Если в некоторой области пространства распространяется **электромагнитная волна**, то в каждой точке этой области (в данный момент времени) можно указать величину и направление трех векторов: вектора напряженности электрического поля , вектора напряженности магнитного поля **H** и вектора скорости волны , направленного в сторону ее распространения. Векторы **E**, **H** и  в любой точке пространства и в любой момент времени взаимно перпендикулярны и образуют правую тройку: если смотреть вдоль вектора  , то поворот от вектора **E** к вектору **H** на будет осуществляться по часовой стрелке (см. рис. 2).

**H**





Рис. 2

Таким образом, векторы  и  электромагнитной волны всегда лежат в плоскостях, перпендикулярных направлению ее распространения, т. е. электромагнитные волны являются поперечными. Для описания состояния поляризации электромагнитной волны в изотропной среде достаточно рассмотреть пространственно-временное поведение одного вектора  обычно выбирается вектор **E**.

Для описания состояния поляризации волны введем правую декартову систему координат *XYZ*: ось *Z* совместим с направлением распространения волны (вектором волновой нормали ), а оси *X* и *Y* расположим в перпендикулярной плоскости, совпадающей с волновым фронтом (рис. 3).



Рис. 3. Декартов поляризационный базис

В процессе распространения излучения ориентация векторов электромагнитного поля изменяется. В случае **естественных** источников (огонь, лампы, солнце) эти пространственно-временные изменения, как правило, носят случайный, непредсказуемый характер. Такое излучение называется **неполяризованным**. Если пространственные эволюции векторных характеристик во времени оказываются закономерными, предсказуемыми, то такое излучение называется **полностью поляризованным**. Если излучение представляет собой смесь указанных компонент, то оно называется **частично поляризованным**.

**Неполяризованный (естественный)** свет представляет собой совокупность волн со всеми возможными ориентациями вектора **E***i*, которая статистически симметрична относительно направления распространения. Любая ориентация **E***i* равновероятна (рис.4), а модуль каждого из векторов **E***i* соответствует усредненному значению амплитуд излучения множества элементарных независимых излучателей (атомов, молекул) с данной ориентацией колебаний за время много большее периода колебаний. Для естественного света модули всех векторов **E***i* равны, а соответствующие волны некогерентны (суперпозиция любой пары волн с векторами **E***i* и **E***j* не дает интерференционной картины). Сумма проекций векторов **E***i* на оси *X* и *Y*, очевидно, дает две ортогональные **некогерентные** компоненты *Ex*  и *Ey* , которые в естественном свете **равны**. Наличие разницы величин или какая-либо корреляция (когерентность) *Ex*и *Ey* означает **частичную поляризацию** света.



Рис. 4. Графическое представление **естественного света**: **E***i* – усредненное значение амплитуды волн с определенной ориентацией колебаний. Компоненты *Ex*  и *Ey* равны и некогерентны независимо

от выбора координатного базиса *XY*

Итак, излучение естественных источников света, как правило, таково, что любые ориентации векторных характеристик равновероятны. Поэтому **естественное** излучение является синонимом слова **полностью неполяризованное**.

**Полная** **поляризация** света предполагает полную детерминированность в ориентации вектора **E** в каждой точке пространства, где существует электромагнитная волна. Это не означает, что ориентация вектора фиксирована, напротив, это может быть периодическая функция времени. Однако не любая детерминированная функция времени **E**(*t*) соответствует **полной** поляризации света. **Период** данной функции должен совпадать с периодом электромагнитных колебаний *T*=2/

За период колебаний конец вектора **Е** полностью поляризованного оптического излучения в поперечной плоскости *Q* , перпендикулярной направлению распространения волны в данной точке, описывает замкнутую кривую. Оказывается, данная фигура в общем случае имеет вид эллипса, а в частных случаях вырождается в круг или прямую линию. В зависимости от вида данной фигуры (линия, круг или эллипс), различают **линейную**, **круговую** и **эллиптическую** поляризацию (рис. 5).



Рис. 5. Графическое представление поляризованного света: 1 - линейная поляризация, 2 – круговая поляризация, 3 - эллиптическая поляризация

В общем случае излучение можно представить суперпозицией полностью поляризованной и неполяризованной частей излучения с различной интенсивностью. Доля полностью поляризованной компоненты излучения и закон, по которому изменяется во времени положение векторных характеристик поляризованной компоненты, определяют **состояние поляризации.** Поляризованное излучение можно получить из естественного с помощью различных **поляризационных устройств**.

Рассмотрим изменение состояния поляризации света на границе раздела двух прозрачных диэлектрических сред (рис. 6).

  

    







Рис. 6. Ход луча при преломлении на границе двух диэлектриков. Угол падения равен углу отражения.

При падении излучения из среды 1 на границу раздела часть излучения отражается, а часть проходит в среду 2. В случае наклонного падения направление потока энергии не совпадает с направлением падающего излучения: луч света преломляется. Введем следующие характеристики обеих сред и границы раздела:  и  – абсолютные показатели преломления сред 1 и 2;  – угол падения;  – угол преломления;  – относительный показатель преломления,  – коэффициент анаморфизма.

Состояние поляризации падающего, отраженного и прошедшего излучения будем определять в декартовых базисах, ориентация осей которых привязана к **плоскости падения** (плоскости, образованной нормалью к границе раздела и падающим лучом – плоскость рис. 6). Компонентам вектора **Е** излучения, параллельным плоскости падения, т.е. совпадающими с осями , принято присваивать индекс «», а компонентам вектора **Е** излучения**,** перпендикулярным плоскости падения, – индекс «». В общем случае компоненты падающего излучения частично когерентны, а в естественном свете равны и полностью некогерентны.

Ортогональные –компонента и *s*–компонента вектора **E** падающего излучения имеют экстремально различные коэффициенты отражения и пропускания. Известные **формулы Френеля** связывают комплексные амплитуды падающего (), отраженного () и преломленного света:

,

,

, (1)

,

Здесь введены следующие обозначения: – амплитудный коэффициент отражения для ортогональных компонент,  – амплитудный коэффициент пропускания. Данные коэффициенты зависят от угла падения и относительного показателя преломления.

Состояние поляризации отраженного и прошедшего излучения определяется состоянием поляризации падающего излучения и отношением амплитудных коэффициентов отражения и пропускания:

, (2)

.

Рассмотрим вначале более простой случай, когда излучение переходит из менее плотной в более плотную среду (, , ). Как следует из (1), амплитудный **коэффициент отражения** всегда больше для *s*–компоненты, вектор **Е** которой ориентирован перпендикулярно плоскости падения. Это значит, что если в падающем излучении вектор **Е** колеблется в плоскости, составляющей угол  с плоскостью падения (линейная поляризация с азимутом ), то в отраженном излучении этот угол увеличивается и составляет величину :

. (3)

Если падающее излучение **неполяризовано** (*p*–компонента и *s*–компонента равны и некогерентны), то отраженное излучение за счет неравенства коэффициентов отражения будет частично поляризовано: преимущественные колебания вектора **Е** будут происходить в направлении, перпендикулярном плоскости падения. **Степень поляризации** отраженного излучения определяется соотношением

. (4)

Энергетика отраженного излучения определяется энергетическими коэффициентами отражения – :

. (5)

где ,  находятся из (1). На рис. 7 представлены зависимости **энергетических коэффициентов отражения** от угла падения.



Рис. 7. Показатель преломления 

Огромное значение для практики имеет то обстоятельство, что при определенном угле  (, ), называемом **углом Брюстера**, *p*–компонента отраженного излучения равна нулю.

Как следует из (1), сдвиг фаз между -компонентой и -компонентой составляет 0 или 1800 в зависимости от угла падения, при этом следует учитывать ориентацию осей координатных базисов на рис. 6. На рис. 8. показана ориентация вектора **Е**  в падающем и отраженном излучении. Если угол падения меньше угла Брюстера, *p* -компонента не изменяет знак (зато ось  разворачивается), а *s*-компонента изменяет знак (ось  не разворачивается). В результате, вектор **Е** осуществляет поворот почти на 1800 относительно наблюдателя, который смотрит на зеркало навстречу **отраженному** лучу. При нормальном падении () происходит зеркальный поворот вектора **Е** , т.е. фаза отраженного вектора изменяется на 1800, что называют «потерей полуволны».

  



 

 

падающий свет отраженный свет

Рис. 8. Отражение света от диэлектрика (стеклянной пластинки).

Угол падения меньше угла Брюстера. Ось  совпадает с направлением падающего луча, а ось   отраженного луча.

При углах падения, больших, чем угол Брюстера, ситуация изменяется (рис. 9). Как следует из анализа (1), в этом случае изменяют знак обе компоненты вектора **Е** в выбранной системе координат.

  



 





падающий свет отраженный свет

Рис. 9. Отражение света от диэлектрика.

Угол падения больше угла Брюстера.

Теперь обратимся к излучению, которое прошло в **более плотную среду**. Из формул Френеля (1) следует, что для преломленного света амплитудный коэффициент пропускания границы раздела двух диэлектриков всегда больше для - компоненты, вектор **Е** которой ориентирован в плоскости падения. Это означает, что если падающее излучение линейно поляризовано с азимутом  относительно плоскости падения, то в прошедшем излучении этот угол уменьшается (вектор **Е** как бы прижимается к плоскости падения), а именно:

. (6)

Если же падающее излучение неполяризовано (-компонента и -компонента равны и некогерентны), то преломленный свет будет частично поляризован. В этом случае преимущественная ориентация вектора **Е** соответствует плоскости падения.

Важно отметить, что энергетические **коэффициенты пропускания** на границе раздела двух сред нельзя определить так просто, как коэффициенты отражения (5). При переходе излучения из одной среды в другую следует учитывать зависимость плотности потока энергии (интенсивности) от оптической плотности среды (показателя преломления) и сечения преломленного пучка света. С учетом сказанного коэффициенты пропускания плоской границы раздела определяются следующим образом:

, (7)

где ,  задаются формулами (1).

Выражением закона сохранения являются соотношения, связывающее энергетические коэффициенты отражения  и пропускания :

, . (8)

Заметим, что отношение коэффициентов пропускания не зависит от сечения преломленного пучка и рассчитывается по формуле:

. (9)

В ряде поляризационных устройств используются плоскопараллельные пластинки, оптическая плотность которых отличается от оптической плотности окружающей среды. Схема прохождения лучом такой пластины дана на рис. 10. Пусть  – относительный показатель преломления материала пластины,  – коэффициент анаморфизма. Используя соотношения (1) и применяя их последовательно к входной и выходной граням пластины, находим амплитудные коэффициенты пропускания для плоскопараллельной пластинки

,

. (10)

Рис. 10. Плоскопараллельная пластина

Энергетические коэффициенты пропускания пластины в данном случае находятся просто, так как среды 1 и 3 одинаковы:

, . (11)

Видно, что при нормальном падении (,  пластина **изотропна**:

. (12)

При любых углах падения, кроме равного нулю, пропускание *p*-компоненты всегда превышает пропускание *s*-компоненты. Таким образом, пластина представляет собой так называемый **частичный поляризатор**, собственные оси которого ориентированы параллельно (более прозрачная) и перпендикулярно (менее прозрачная) плоскости падения. С увеличением угла падения так называемое **качество** *Q* такого поляризатора монотонно растет, достигая при **скользящем падении** величины

. (13)

Если угол падения света на пластину равен **углу Брюстера ()**, то пропускание *p*-компоненты в идеале полное, поэтому такое расположение в основном и используется на практике (для повышения качества такого поляризатора возможно небольшое увеличение угла падения). Энергетические коэффициенты пропускания при брюстеровском падении излучения на пластину (в этом случае принято такую пластину называть «брюстеровской пластинкой») таковы:

, . (14)

Если падающее излучение имеет линейную поляризация с азимутом , то после прохождения пластины угол между плоскостью колебаний вектора **Е** и плоскостью падения уменьшается:

. (15)

Если падающее излучение **неполяризованное**, то прошедшее излучение оказывается частично поляризованным, при этом степень поляризации *P*, численно равная **качеству** поляризатора *Q*, определяется соотношением:

. (16)

Одним из распространенных поляризационных устройств, используемых в качестве поляризатора, является так называемая **оптическая стопа (стопа Столетова)**. Стопа представляет собой набор диэлектрических плоскопараллельных пластин, расположенных так, что нормали к рабочим плоскостям составляют с осью проходящего светового пучка приблизительно **угол Брюстера**. Рабочие грани пластины тщательно обработаны. При увеличении числа границ раздела **качество** *Q* такого частичного поляризатора увеличивается. В оптической стопе используется *m* пластин (рис.11).

*m* пластин

*m*

### Рис.11. Оптическая стопа

При их брюстеровском расположении:

, (17)

где ,  определяются из (14).

**Описание установки**

Установку соберите на оптической скамье (рис. 12).

1 2 3 4

Рис. 12.

На одном конце скамьи поместите лазер 1. В качестве поляризатора используйте поляроид 2, заключенный в оправу с лимбом (цена деления шкалы 10 ) для отсчета угла поворота поляроида вокруг горизонтальной оси. Стопа пластин 3 укреплены на горизонтальном столике, который может поворачиваться вокруг оси.

Для измерения интенсивности света, прошедшего через стопу, используйте фотоэлемент 4, который независимо от столика может поворачиваться вокруг вертикальной оси. Углы поворота (стопы) и фотоэлемента отсчитываются с помощью лимба столика с ценой деления шкалы 1o . Используемый в процессе измерения фотоэлемент подключите к микроамперметру.

**Контрольные вопросы**

1. Что такое естественный свет?
2. Что такое поляризованный свет?
3. Какие Вы знаете методы поляризации?
4. Что такое поляризатор, анализатор?
5. Что такое плоскость поляризации света?
6. Почему отраженный свет становится линейно поляризованным при падении света на диэлектрическую пластину под углом Брюстера?
7. Какая составляющая вектора **E** будет находиться в отраженном луче, при падении света под углом Брюстера?
8. Если свет, поляризованный в плоскости падения луча, падает на диэлектрик под углом Брюстера, то что произойдет с отраженным лучом?
9. Сформулируйте и объясните закон Малюса.
10. Что такое степень поляризации света?