

Министерство образования и науки РФ

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧ и КР)

Утверждаю
Зав. каф. СВЧ и КР
_____ С.Н. Шарангович

Исследование отражения электромагнитных от границы раздела двух сред

РУКОВОДСТВО

к лабораторной работе по дисциплинам «Электродинамика и распространение радиоволн», «Электромагнитные поля и волны» для бакалавров направлений подготовки 210700.62 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 210400.62 «Радиотехника», специалистов направления подготовки 210601.65 «Радиоэлектронные системы и комплексы»

Разработчики:
доц. каф. СВЧ и КР
_____ Г.Г. Куш
проф. каф. СВЧ и КР
_____ А.Е. Мандель
Зав.лаб. ЭДиРРВ
_____ А.Н. Никифоров

ОГЛАВЛЕНИЕ

1	Введение.....	3
2	ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ.....	3
2.1	Поляризация электромагнитных волн.....	3
2.2	Отражение и преломление электромагнитных волн при наклонном падении.	6
3.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	12
3.1	Описание экспериментальной установки.	12
3.2	Расчетное задание.....	13
3.3	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ	14
4	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.	16
5	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	

1 Введение

Вопросы, связанные с отражением электромагнитных волн, играют важную роль в таких областях радиотехники, как радиосвязь и телевидение, радиолокация и экранирование. Отражение электромагнитных волн подчиняется тем же законам Снеллиуса, что и отражение световых волн (поскольку световые волны – это тоже электромагнитные, но очень высокой частоты). Необходимо иметь в виду, что законы Снеллиуса справедливы только для идеально гладких поверхностей. Отражение в этом случае называется зеркальным.

Целью работы является:

- исследование явлений отражения и преломления линейно поляризованного электромагнитного излучения при наклонном падении его на границу раздела двух сред;
- изучение видов поляризации электромагнитных волн.

2 ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

2.1 Поляризация электромагнитных волн

Волны, распространяющиеся в однородной изотропной среде без потерь, являются поперечными волнами, т.е. векторы \vec{E} и \vec{H} этих волн перпендикулярны направлению распространения и взаимно перпендикулярны. Векторы \vec{E} и \vec{H} изменяются в фазе. Поверхность, во всех точках которой векторы \vec{E} и \vec{H} имеют одну и ту же фазу, называется фазовой поверхностью.

В электромагнитной волне векторы электрического и магнитного полей в каждый момент времени определенным образом ориентированы в пространстве. Если векторы поля, изменяясь по абсолютной величине, не

изменяют своего направления в пространстве, то такие электромагнитные волны называют поляризованными линейно.

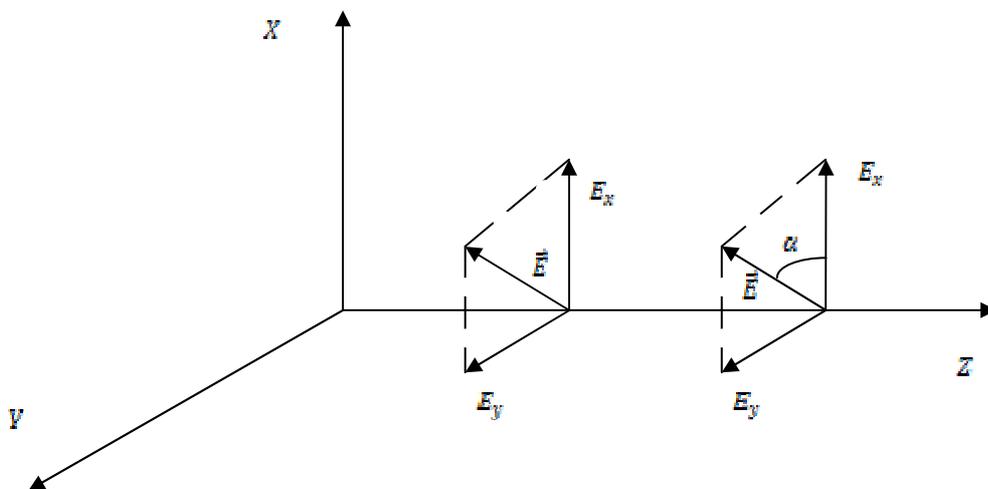


Рис.1. Распространение линейно поляризованной волны

Плоскость, проходящая через вектор \vec{E} и направление распространения волны, называется плоскостью поляризации. У линейно-поляризованной волны плоскость поляризации не меняет своей ориентации в пространстве (рис 1.).

Линейная поляризация не единственно возможная. Рассмотрим другие виды поляризации в режиме гармонических колебаний. Будем считать, что существуют одновременно две волны одной частоты. Векторы напряженности электрического поля у них взаимно перпендикулярны. Для определенности предположим, что плоскость поляризации первой волны – плоскость XOZ , второй – плоскость YOZ . Ось “z” направлена на читателя (рис.2). Рассмотрим случай сложения волн с линейной поляризацией, имеющих фазовый сдвиг δ , для чего запишем выражения для векторов электрического поля горизонтально и вертикально поляризованных волн, бегущих вдоль оси z.

$$E_x = E_{10} \cdot \sin(\omega t - kz) \quad (2.1)$$

$$E_y = E_{20} \cdot \sin(\omega t - kz + \delta) \quad (2.2)$$

Просуммируем (2.1) и (2.2), предварительно записав (2.2) в виде $E_y = E_{20} \cdot [\sin(\omega t - kz) \cos \delta + \cos(\omega t - kz) \sin \delta]$ и исключив из равенств $\sin(\omega t - kz)$ и $\cos(\omega t - kz)$. В результате получим:

$$\left(\frac{E_x}{E_{10}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{20}}\right)^2 = 2 \frac{E_x E_y}{E_{10} E_{20}} \cos \delta + \sin^2 \delta \quad (2.3)$$

Рассмотрим частные случаи, описываемые этим уравнением.

1. При $\delta = \pm \pi/2$ $\cos \delta = 0$, а $\sin \delta = \pm 1$ уравнение (2.3) примет вид

$$\left(\frac{E_x}{E_{10}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{20}}\right)^2 = 1. \quad (2.4)$$

Если $E_{10} \neq E_{20}$ - выражение является уравнением эллипса с центром в начале координат. Полуоси эллипса (рис. 2) равны E_{10} и E_{20} .

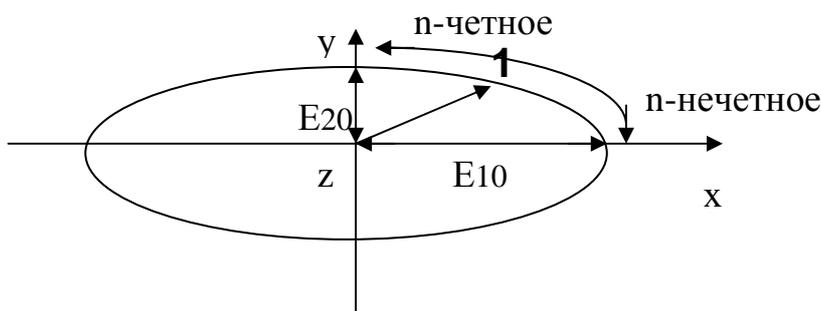


Рис.2. Общий случай эллиптической поляризации.

Так как $\cos \delta = 0$ при $\delta = \frac{\pi}{2} + n\pi$, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ то система уравнений

(2.1) и (2.2) при ($z = 0$) может быть записана в виде :

$$E_x = E_{10} \sin \omega t$$

$$E_y = E_{20} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + n\pi\right) = E_{20} (-1)^{n+1} \cos \omega t$$

Из этих равенств видно, что конец вектора \mathbf{E} вращается по часовой стрелке при нечётном n и против стрелки при чётном n , если наблюдение за вращением вектора \mathbf{E} ведётся против направления распространения

волны. Эллипс становится окружностью, если $E^{10} = E^{20}$. Волна, конец вектора \mathbf{E} которой с течением времени описывает окружность, является волной с круговой поляризацией.

2. При $\delta = 0, \pm \pi$ $\cos\delta = \pm 1$, а $\sin\delta = 0$ соотношение (2.3) превращается в равенство $E_x/E_{10} \pm E_y/E_{20} = 0$, которое при $\cos\delta = +1$ и $\cos\delta = -1$ представляет прямые $E_x/E_{10} - E_y/E_{20} = 0$, $E_x/E_{10} + E_y/E_{20} = 0$. В этом случае конец суммарного вектора \mathbf{E} движется по прямой. Получается линейно поляризованная волна (рис.3), являющаяся предельным случаем эллиптически поляризованной волны.

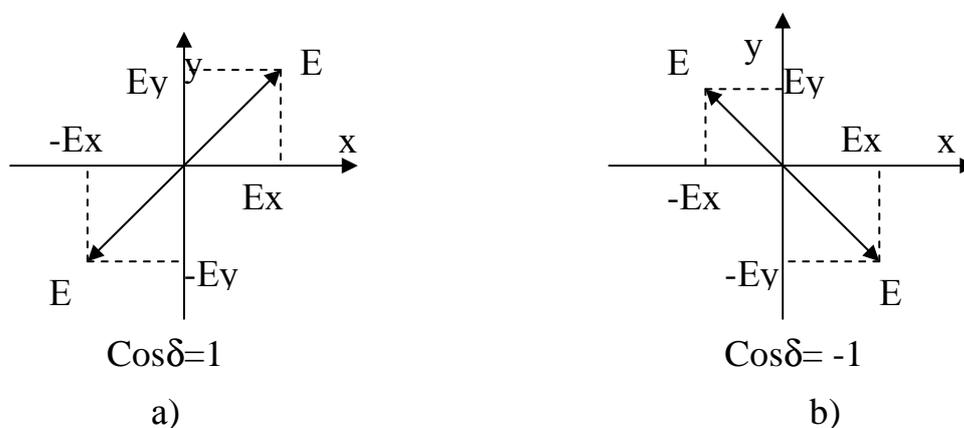


Рис 3. Вырожденный случай сложения двух линейно поляризованных волн.

На основании выше изложенного можно сделать следующий вывод: электромагнитная волна с любой поляризацией может быть представлена в виде суперпозиции двух линейно поляризованных волн, плоскости колебаний электрического вектора которых взаимно перпендикулярны. Волну с круговой поляризацией можно преобразовать в волну с линейной поляризацией, отфильтровав одну из линейно поляризованных волн.

2.2 Отражение и преломление электромагнитных волн при наклонном падении.

Изучая наклонное падение волны на плоскую границу, мы рассмотрим два качественно различных случая. В первом из них электрический вектор

падающей волны параллелен граничной плоскости (рис.4,а) и, следовательно, перпендикулярен плоскости падения P . Волна, как мы будем условно считать, поляризована при этом горизонтально. Во втором случае (рис.4, б) волна поляризована в плоскости падения, т.е., по определению, вертикально. Любую линейно поляризованную волну можно разложить на компоненты горизонтальной и вертикальной поляризации с тем, чтобы рассматривать их в отдельности.

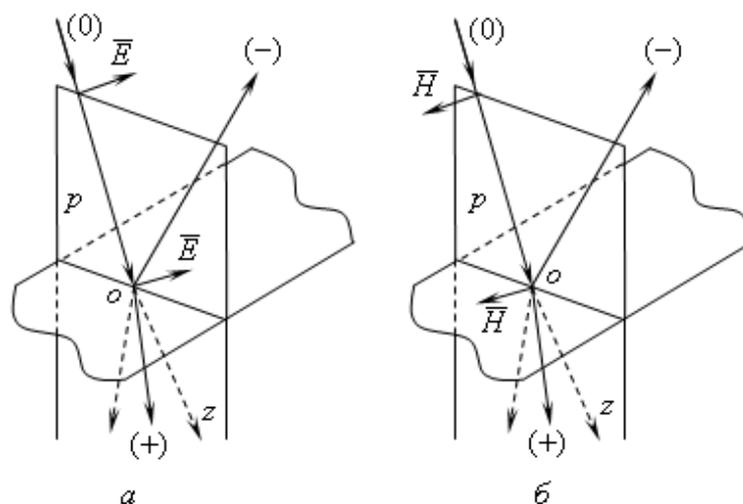


Рис.4. Наклонное падение плоской волны на границу раздела сред: а) горизонтальная поляризация волны; б) вертикальная поляризация волны

В качестве границы сред возьмем плоскость xOy (рис.5), так что постоянная распространения k :

$$\left. \begin{aligned} k &= k_1 \quad \text{при } z < 0, \\ k &= k_2 \quad \text{при } z > 0. \end{aligned} \right\}$$

Волна, распространяясь в первой среде в плоскости yOz , падает на границу под углом φ к нормали, совпадающей с отрицательной осью z .

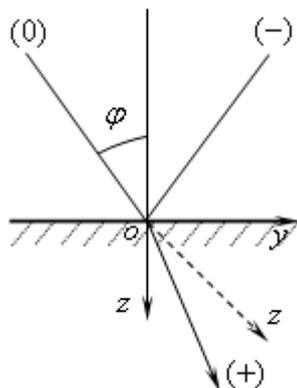


Рис.5. Выбор осей координат при наклонном падении волны

Рассмотрим падение вертикально поляризованной волны на границу раздела двух диэлектриков. Вектор E вертикально поляризованной волны лежит в плоскости падения - плоскости, проходящей через нормаль к границе раздела и направление движения волны.

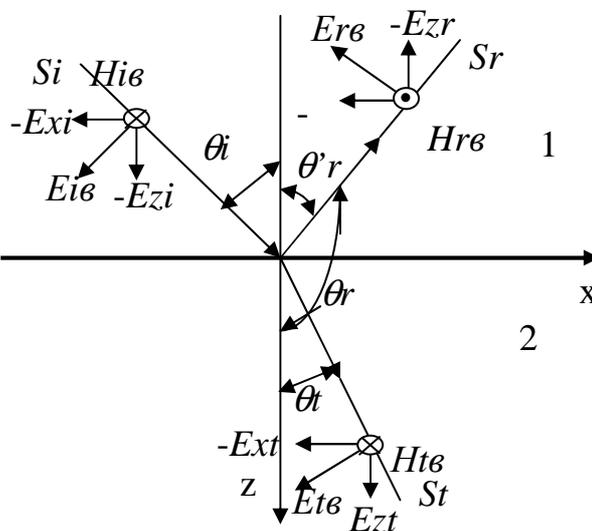


Рис 5. Падение вертикально поляризованных волн на границу раздела двух диэлектриков.

На рис. 5 представлены падающая, отраженная и преломлённая волны с вертикальной поляризацией и соответствующие им векторы: E_{ie} ,

$E_{r\theta}$ и $E_{t\theta}$, лежащие в плоскости падения и векторы $H_{i\theta}$, $H_{r\theta}$ и $H_{t\theta}$ ортогональные этой плоскости. Углы θ_i , θ_r и θ_t являются углами падения, отражения и преломления соответственно.

Выражения для коэффициентов отражения R и преломления T получают с использованием граничных условий: $E_{\tau 1} = E_{\tau 2}$ и $H_{\tau 1} = H_{\tau 2}$ при $z=0$. Для вертикально поляризованной волны выражения для коэффициентов отражения R_v и преломления T_v имеют вид:

$$R_{\theta} = \frac{E_{r\theta}}{E_{i\theta}} = \frac{Z_{w1} \cos \theta_i - Z_{w2} \cos \theta_t}{Z_{w1} \cos \theta_i + Z_{w2} \cos \theta_t} \quad (2.5)$$

$$T_{\theta} = \frac{E_{t\theta}}{E_{i\theta}} = \frac{2Z_{w2} \cos \theta_i}{Z_{w1} \cos \theta_i + Z_{w2} \cos \theta_t} \quad (2.6)$$

где $Z_{w1} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_1}}$ и $Z_{w2} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_2}}$ волновые сопротивления первой и второй сред;

ϵ_1, ϵ_2 - их относительные диэлектрические проницаемости.

Полученные формулы носят название формул Френеля. Используя законы Снеллиуса:

$$\theta_i = \theta_r, \quad \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1}} \quad (2.7)$$

выражения (2.7) легко преобразовать к более удобному для анализа виду.

Положив $n_1 = 1$, (т.к. первая среда - воздух), можно записать:

$$R_{\theta} = \frac{E_{r\theta}}{E_{i\theta}} = - \frac{(1 - \sin^2 \theta_i)^{1/2} - \frac{1}{n_2} \left(1 - \frac{\sin^2 \theta_i}{n_2^2}\right)^{1/2}}{(1 - \sin^2 \theta_i)^{1/2} + \frac{1}{n_2} \left(1 - \frac{\sin^2 \theta_i}{n_2^2}\right)^{1/2}} \quad (2.8)$$

$$T_{\theta} = \frac{E_{t\theta}}{E_{i\theta}} = \frac{2(1 - \sin^2 \theta_i)^{1/2}}{n_2(1 - \sin^2 \theta_i)^{1/2} + \left(1 - \frac{\sin^2 \theta_i}{n_2^2}\right)^{1/2}} \quad (2.9)$$

В формулах (2.7, 2.8, 2.9) n_1, n_2 – показатели преломления первой и второй сред.

На рис.6 представлены: падающая, отраженная и преломлённая волны с горизонтальной поляризацией.

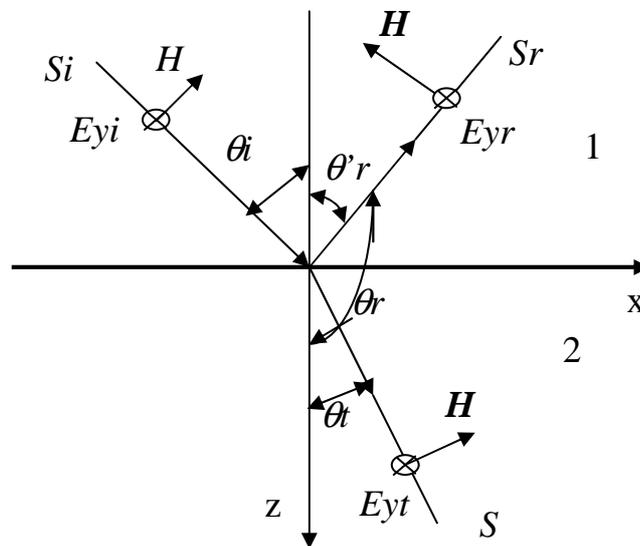


Рис.6. Преломление и отражение горизонтально поляризованной волны.

Исходя из граничных условий для горизонтальной поляризации: $1 + R_z = T_z$ и $1 - R_z = T_z (Z_{w1}/Z_{w2})(\cos \theta_t / \cos \theta_i)$, запишем выражения для волновых коэффициентов при горизонтальной поляризации: R_z и T_z .

$$R_z = \frac{E_{rz}}{E_{iz}} = \frac{Z_{w2} \cos \theta_i - Z_{w1} \cos \theta_t}{Z_{w2} \cos \theta_i + Z_{w1} \cos \theta_t} \quad (2.10)$$

$$T_z = \frac{E_{tz}}{E_{iz}} = \frac{2Z_{w2} \cos \theta_i}{Z_{w2} \cos \theta_i + Z_{w1} \cos \theta_t} \quad (2.11)$$

ИЛИ

$$R_z = \frac{E_{r2}}{E_{i2}} = \frac{(1 - \sin^2 \theta_i)^{1/2} - n_2 \left(1 - \frac{\sin^2 \theta_i}{n_2^2}\right)^{1/2}}{(1 - \sin^2 \theta_i)^{1/2} + n_2 \left(1 - \frac{\sin^2 \theta_i}{n_2^2}\right)^{1/2}} \quad (2.12)$$

$$T_z = \frac{E_{t2}}{E_{i2}} = \frac{2(1 - \sin^2 \theta_i)^{1/2}}{(1 - \sin^2 \theta_i)^{1/2} + n_2 \left(1 - \frac{\sin^2 \theta_i}{n_2^2}\right)^{1/2}} \quad (2.13)$$

Исследование формул Френеля и законов Снеллиуса позволяет установить наличие двух важнейших физических явлений: полного преломления и полного внутреннего отражения. Из (2.8) следует: если при вертикальной поляризации $1 - \sin^2 \theta_i = 1/n_2^2 - \sin^2 \theta_i/n_2^4$, то $R_v = 0$. Равенство имеет место при $\theta_i = \theta_0 = \arcsin n_2 / (n_2 - 1)$, или $\theta_0 = \arctg n_2$. Этот угол называют углом Брюстера.

При падении вертикально поляризованной электромагнитной волны под углом Брюстера $R_v = 0$ и отражённой волны не будет. Это явление, называют явлением полного преломления, а также полной поляризации. Из формулы (2.12) следует, что при горизонтальной поляризации явление полного преломления отсутствует.

При падении электромагнитных волн из оптически более плотной среды на границу менее плотной ($\epsilon_1 > \epsilon_2$), угол падения превышает $\theta_{кр} = \arcsin \frac{\sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1}}$. В этом случае, согласно формуле

$\sin \theta_{i.кр.} = \sin \theta_t \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}$ (второй закон Снеллиуса), $\sin \theta_t$ должен принимать

значения превышающие 1. Этого не может быть при вещественном значении угла θ_t . Но если положить $\theta_t = \psi + j\eta$, т.е. считать его

комплексным, то при $\psi = \frac{\pi}{2}(4n+1)$, где $n=0 \pm 1 \pm 2 \pm$ и т. д., $\sin \theta_t = \text{ch } \eta > 1$

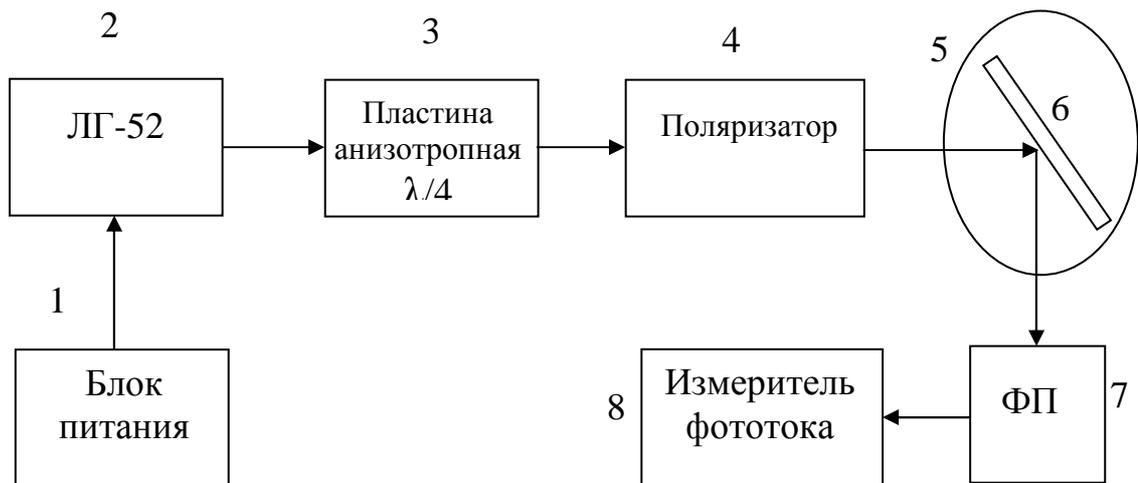
прт всех значениях $\eta \neq 0$. В этом случае коэффициенты

отражения $\left| \dot{R}_e \right| = \left| \dot{R}_z \right| = 1$ и падающая волна полностью отражается в первую среду. Это явление носит название «полное внутреннее отражение».

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1 Описание экспериментальной установки.

Экспериментальная установка для исследования коэффициентов отражения от границы раздела двух диэлектрических сред при горизонтальной и вертикальной поляризации световой волны представлена на рис. 7.



7. Экспериментальная установка для исследования коэффициентов отражения от границы раздела двух сред

Экспериментальная установка состоит из гелий-неонового лазера ЛГ-52 (2) с блоком питания (1), четвертьволновой пластины (3), поляроида (4), поворотного столика (5), отражающей пластины (6), фотоприёмника (7), измерителя фототока (8).

	n 22										
T_2	n 21										
	n 22										

По результатам расчёта построить графики и определить угол Брюстера для всех вариантов. Правильность расчётов проверить по граничным условиям: $I+R_2=T_2$ для горизонтальной поляризации и $I+R_v=T_v$ n_2 для вертикальной. В последнем случае необходимо учесть знак у коэффициента R_v .

3.3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

- 1) Включить лазер.
- 2) Настроить установку так, чтобы на отражающую пластину падало излучение лазера с горизонтальной поляризацией (как показано на рисунке 4.2). Установить поворотный столик таким образом, чтобы на измеритель фототока (ИФ) попадал отраженный луч. Изменяя угол падения снять зависимость отраженного тока $I_{г.отр.}$ от угла падения. Снять поворотный столик с отражающей пластиной, ИФ поставить против падающего луча. Измерить величину фототока падающего луча- $I_{г.пад.}$. Определить $I_{г.пр.}=I_{г.пад.}-I_{г.от.}$
- 3) Рассчитать $R_2= (I_{г.от.}/I_{г.пад.})^{\frac{1}{2}}$, $T_2= (I_{г.пр.}/I_{г.пад.})^{\frac{1}{2}}$ для всех значений θ ; Данные внести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2

$\theta, г.$	20	30	40	50	60	70	75
$I_{г.пр.}$							
$I_{г.от.}$							
T_2							
R_2							

- 4) По результатам таблицы построить графики T_2 и R_2 от угла падения. Произвести сравнение экспериментальных и теоретических кривых и сделать выводы.
- 5) Настроить установку так, чтобы излучение с горизонтальной поляризацией преобразовалось в излучение с вертикальной поляризацией и на отражающую пластину падало излучение лазера с вертикальной поляризацией. Для этого сначала на станину надо поставить поляроид и вращая его вокруг оси “у” добиться минимума показаний тока фотодиода, т.е. добиться возможно более полного поглощения поляроидом излучения с горизонтальной поляризацией. ИФ при этом должен иметь максимальную чувствительность.
- 6) Поместив на оптическую скамью анизотропную пластину и вращая её вокруг “у” добиться максимума показаний тока фотодиода. При этом на выходе пластины лазерное излучение имеет круговую или эллиптическую поляризацию, а на фотодиод, после поляроида, попадает излучение с вертикальной поляризацией.
- 7) Поставить отражающую пластину на поворотный столик и вращая её, пронаблюдать поведение отражённого луча на экране - при определённом угле падения, отражённый луч должен исчезать. Если этого не происходит, то нужно настройку (согласно пунктам 6 и 7) повторить. /
- 8) Снять зависимость тока отраженного луча с вертикальной поляризацией от угла падения. Данные занести в таблицу 4.3
- 9) Измерить $I_{в.пад.}$ поставив фотодиод против поляроида. Рассчитать зависимость $R_v = (I_{в.от.}/I_{в.пад.})^{\frac{1}{2}}$ и $T_v = (I_{в.пр.}/I_{в.пад.})^{\frac{1}{2}}$ от угла падения. Принять $I_{в.пр.} = I_{в.пад.} - I_{в.от.}$. Данные занести в таб.4.3

Таблица 4.3

$\square i.z.$	20	30	40	50	60	70	75
$Iв.пр.$							
$Iв.от.$							
$Tв.$							
$Rв.$							

10) Построить графики зависимости $Rв$ и $Tв$ от угла падения.

11) Определить угол Брюстера. Определить коэффициент преломления исследуемого образца n_2 и его диэлектрическую проницаемость ϵ_2 . Произвести сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей и сделать выводы.

4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Дайте определение понятию "поляризация электромагнитной волны"?
2. Какую поляризацию называют линейной, круговой, эллиптической?
3. Какую поляризацию будет иметь волна, образованная суперпозицией двух волн равной амплитуды, ортогональной линейной поляризацией с разностью фаз $\pi/2$?
4. Возможно ли полное внутреннее отражение? При каких условиях оно происходит?
5. Дайте определение углу Брюстера?
6. Какую поляризацию будет иметь отражённая и преломлённая волны при падении волны круговой поляризации на границу раздела двух сред под углом Брюстера?
7. Какие функции выполняет поляроид?
8. Как можно преобразовать линейно поляризованный свет в циркулярно поляризованный?

6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б.М. Петров Электродинамика и распространение радиоволн: Учебник для вузов. - М.: Горячая линия- Телеком, 2007.-558 с. (100)
2. Л.А.Боков, В.А. Замотринский, А.Е.Мандель Электродинамика и распространение радиоволн: Уч.пособие. –Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2013-410 с. (44)
3. Замотринский В.А., Падусова Е.В., Соколова Ж.М., Шангина Л.И. Электромагнитные поля и волны: Уч.пособие. –Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2006.-175с. (40)