

Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

И.Н. Алиев, Ю.Ю. Инфимовский,  
А.В. Скрипкин

# Изучение свойств электромагнитных волн микроволнового диапазона

*Методические указания к выполнению  
лабораторной работы по курсу общей физики*

Под редакцией А.Г. Андреева

Москва  
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
2013

УДК 53.01

ББК 22.3

A50

Рецензент *В.Я. Колочкин*

**Алиев И. Н.**

A50 Изучение свойств электромагнитных волн микроволнового диапазона : метод. указания к выполнению лабораторной работы по курсу общей физики / И. Н. Алиев, Ю. Ю. Инфимовский, А. В. Скрипкин ; под ред. А. Г. Андреева. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. — 30, [2] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-3720-7

Кратко изложена теория электромагнитного излучения. Рассмотрена методика выполнения экспериментов, приведен алгоритм обработки полученных результатов.

Для студентов 2-го курса всех факультетов МГТУ им. Н.Э. Баумана и студентов 3-го курса факультета «Фундаментальные науки» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Рекомендовано Учебно-методической комиссией Научно-учебного комплекса «Фундаментальные науки» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

УДК 53.01

ББК 22.3

*Учебное издание*

**Алиев** Исмаил Наврузович

**Инфимовский** Юрий Юрьевич

**Скрипкин** Алексей Владимирович

**Изучение свойств электромагнитных волн  
микроволнового диапазона**

Редактор *О.М. Королева*

Корректор *С.А. Виноградова*

Компьютерная верстка *В.И. Товстоног*

Подписано в печать 08.07.2013. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 1,86. Тираж 150 экз. Изд. № 6.

Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

ISBN 978-5-7038-3720-7

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013

## ВВЕДЕНИЕ

Микроволновой части спектра как одной из разновидностей излучения присущи все свойства электромагнитных волн. В связи с относительно большой длиной волны СВЧ-излучения исследование его свойств является часто более простым и наглядным по сравнению с изучением аналогичных свойств электромагнитных волн (например, видимого света).

**Цель работы** — изучение свойств электромагнитного излучения микроволнового диапазона, экспериментальное определение длины волны излучения генератора СВЧ-волн, изучение стоячих электромагнитных волн, затухания волн при прохождении через диэлектрическую среду, исследование характеристик поляризованной при отражении электромагнитной волны, изучение туннельного эффекта СВЧ-излучения, проходящего через воздушный промежуток, и явления полного внутреннего отражения.

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Микроволновое (или сверхвысокочастотное — СВЧ) электромагнитное излучение занимает диапазон частот от 1 до 300 ГГц, что соответствует сантиметровой и миллиметровой длинам волн. Указанный диапазон является условным и определяется во многих случаях характером источников таких волн. Как видно на рис. 1, микроволны располагаются между короткими радиоволнами и инфракрасным излучением.

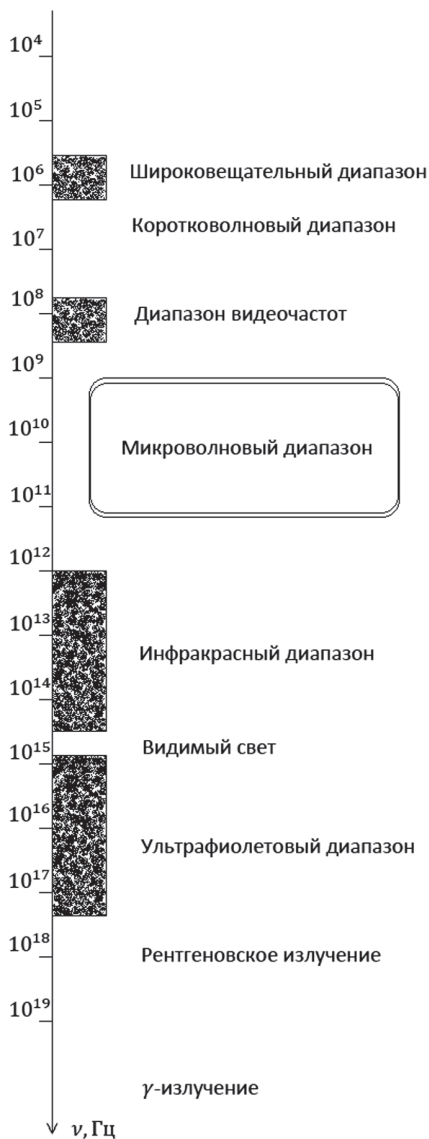
Возможность существования электромагнитных волн следует из уравнений Максвелла. Электромагнитные волны являются поперечными и представляют собой взаимно перпендикулярные колебания напряженностей электрического и магнитного полей, характеризующихся векторами  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ , перпендикулярными в свою очередь волновому вектору  $\vec{k}$ , совпадающему с направлением распространения волны.

Важным случаем электромагнитного излучения является распространение плоской электромагнитной волны в однородной и изотропной диэлектрической среде, в которой значения векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  зависят только от координаты на оси  $Ox$ , совпадающей с направлением вектора  $\vec{k}$ . Волновой фронт указанной волны представляет собой плоскость, причем векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  изменяются по гармоническому закону:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - kz + \varphi_0); \quad (1)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 \cos(\omega t - kz + \varphi_0), \quad (2)$$

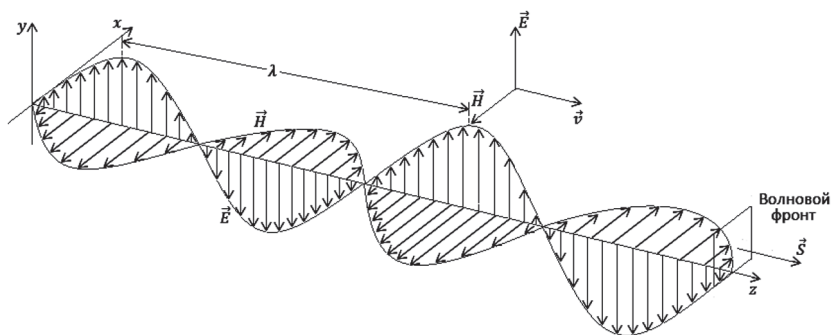
где  $\vec{E}_0$  и  $\vec{H}_0$  — амплитудные значения напряженностей электрического и магнитного полей соответственно;  $\omega$  — циклическая



**Рис. 1.** Частотный спектр электромагнитных волн

частота излучения;  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число;  $\lambda$  — длина электромагнитной волны;  $\varphi_0$  — начальная фаза (определяемая значением электрического и магнитного полей в какой-либо точке в некоторый момент времени, например в точке  $x = 0$  в момент времени  $t = 0$ ).

На рис. 2 изображена схема распространения плоской монохроматической электромагнитной волны. Отметим, что все векторы  $\vec{E}$  (как и векторы  $\vec{H}$ ) лежат в одной плоскости. Такая волна называется плоскополяризованной. Кроме того, изображенная на рис. 2 электромагнитная волна является монохроматической, т. е. строго гармонической (синусоидальной) волной с постоянными во времени частотой, амплитудой и начальной фазой.



**Рис. 2.** Схема распространения плоской монохроматической электромагнитной волны

Скорость  $v$  распространения фронта электромагнитной волны в среде, т. е. фазовая скорость, определяется равенством

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon \mu_0 \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{n}, \quad (3)$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость света в вакууме;  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  Ф/м — электрическая постоянная;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная;  $\epsilon$  и  $\mu$  — диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, которые в общем случае есть функции от частоты;  $n$  — ее показатель преломления.

Можно показать, что между модулями векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  в плоской волне в каждый момент времени имеется связь в виде

$$E\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon} = H\sqrt{\mu_0\mu}. \quad (4)$$

Распространение электромагнитной волны сопровождается переносом энергии. Он характеризуется вектором Пойнтинга  $\vec{S}$  (вектором плотности потока электромагнитного излучения), направление которого совпадает с направлением распространения волны. Вектор  $\vec{S}$  вычисляется по формуле

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}. \quad (5)$$

Модуль вектора Пойнтинга  $S = |\vec{S}|$  равен количеству энергии  $\Delta W$ , переносимому электромагнитной волной в единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны (см. рис. 2):

$$S = \frac{\Delta W}{\Delta t \Delta S_{\perp}}. \quad (6)$$

Легко понять, что величина модуля вектора Пойнтинга в некоторой точке распространения плоской монохроматической электромагнитной волны быстро изменяется с течением времени пропорционально  $\cos^2 \omega t$ . Поэтому в качестве еще одного параметра, характеризующего перенос энергии электромагнитной волной, удобно использовать интенсивность излучения  $I$ , значение которой равно среднему значению  $\langle S \rangle$  модуля вектора Пойнтинга  $\vec{S}$ . Очевидно, что среднее значение  $\langle S \rangle$  за некоторый относительно длительный промежуток времени, в котором укладывается много периодов колебания  $T$  электромагнитной волны, равно среднему значению за один период. Таким образом,

$$I = \langle S \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T |\vec{S}| dt. \quad (7)$$

Поскольку интеграл от квадрата косинуса за один период равен  $1/2$ , то из выражений (1), (2), (4), (5) и (7) для интенсивности плоской монохроматической электромагнитной волны можно

найти

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\mu_0 \mu}} E_0^2 = \frac{c \varepsilon_0}{2} E_0^2 \frac{n}{\mu}. \quad (8)$$

Интенсивность рассматриваемого электромагнитного излучения, в котором амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей не изменяются с течением времени, оказывается пропорциональной квадрату амплитуды напряженности электрического поля:  $I \sim E_0^2$ .



## 2. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН. СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ

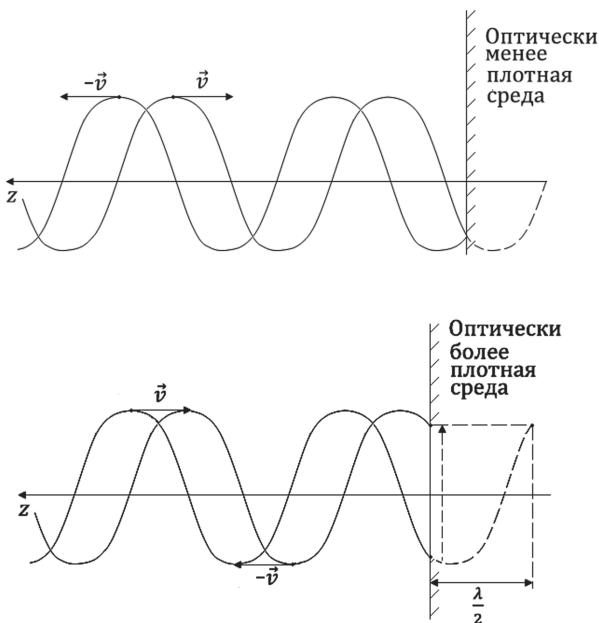
Явление интерференции электромагнитных волн наблюдается при наложении двух (или большего числа) волн и выражается в увеличении интенсивности результирующего излучения в одних местах пространства и одновременного его ослабления — в других.

Необходимым условием наблюдения устойчивой картины интерференции является когерентность электромагнитных волн, т. е. равенство их частот и постоянство разности фаз в точке наблюдения. В случае быстрого и хаотичного изменения разности фаз (или частот) интенсивность суммарного излучения в пространстве будет меняться настолько быстро, что это изменение невозможно будет зафиксировать ни визуально, ни с помощью приборов.

Одним из наиболее простых случаев интерференции является образование стоячей электромагнитной волны при наложении двух волн одинаковой частоты и амплитуды, распространяющихся вдоль одной оси навстречу друг другу.

Пусть плоская электромагнитная волна, испущенная источником, отражается от границы раздела сред и начинает распространяться в обратном направлении. Оказывается, что при отражении электромагнитной волны частота излучения не изменяется. Кроме того, при отражении от оптически менее плотной среды (с меньшим показателем преломления) фаза колебаний не изменяется, в обратном случае — скачком изменяется на противоположную, т. е. на  $\pi$  (рис. 3), что эквивалентно изменению длины пути на  $\lambda/2$ .

Отраженная волна распространяется навстречу падающей волне, в результате чего происходит их наложение. В этом случае при почти полном отражении волны амплитуды падающей и отражен-



**Рис. 3.** Схема отражения плоской электромагнитной волны от различных сред

ной волн одинаковы и равны  $E_0$ . Согласно схеме, изображенной на рис. 3, уравнение для напряженности электрического поля падающей электромагнитной волны имеет вид

$$E_1 = E_0 \cos(\omega t + kz + \varphi_0),$$

а аналогичное уравнение для отраженной волны выглядит так:

$$E_2 = E_0 \cos(\omega t - k(z + \lambda/2) + \varphi_0)$$

(учтена потеря полуволны). Результирующую напряженность определяют суммой напряженностей (принцип суперпозиции):

$$E = E_1 + E_2 = 2E_0 \cos\left(kz + \frac{k\lambda}{4}\right) \cos\left(\omega t - \frac{k\lambda}{4} + \varphi_0\right). \quad (9)$$

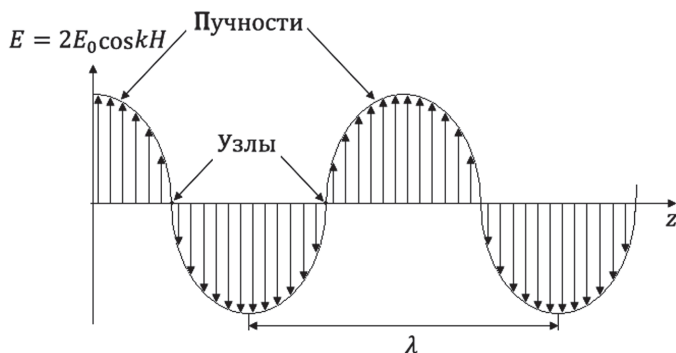
Уравнение (9) является уравнением стоячей электромагнитной волны при отражении от среды с большей оптической плотностью.

Из этого уравнения ясно, что в каждой точке колебания напряженности электрического поля (и, следовательно, напряженности магнитного поля) совершаются по гармоническому закону (см. второй множитель в уравнении (9)), причем амплитуда колебаний также изменяется по закону косинуса вдоль оси распространения волн (первый множитель) (рис. 4). Точки, в которых достигается максимум амплитуды (они называются пучностями), определяют по условию

$$kz_n^{\max} + \frac{k\lambda}{4} = n\pi, \quad n = 1, 2, \dots$$

или

$$z_n^{\max} = (2n - 1) \frac{\lambda}{4}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (10)$$



**Рис. 4.** Схема стоячей электромагнитной волны

Минимум амплитуды стоячей волны (узел) будет достигаться в точках (узлах стоячей волны):

$$z_n^{\min} = 2n \frac{\lambda}{4}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (11)$$

Расстояние  $\Delta z$  между соседними пучностями или узлами стоячей волны (длина стоячей волны  $\lambda_{\text{ст}}$ ), как следует из выражений (10) и (11), равно половине длины исходной электромагнитной волны:

$$\Delta z = \lambda_{\text{ст}} = \frac{\lambda}{2}. \quad (12)$$

Стоячая электромагнитная волна энергию не переносит. Действительно, энергия, переносимая падающей волной в одном направлении, равна энергии, переносимой отраженной волной в другом направлении. В стоячей волне происходит перераспределение средней объемной плотности энергии электромагнитного поля в пространстве, связанное с интерференцией волн.

### 3. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ПРИ ПОЛНОМ ВНУТРЕННЕМ ОТРАЖЕНИИ

Из поперечности электромагнитных волн следует строгое взаимно перпендикулярное положение векторов напряженности электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей волны в плоскости, которая движется вдоль направления распространения волны и при этом сама располагается перпендикулярно этому направлению. Если колебания вектора напряженности  $\vec{E}$  происходят только в одной плоскости, проходящей через направления распространения волны, то электромагнитная волна называется плоско-поляризованной или линейно-поляризованной. Примером такой поляризации является рассмотренная выше плоская монохроматическая волна (см. рис. 2), а также сферическая монохроматическая волна, фронтом которой является поверхность сферы, а амплитуда обратно пропорциональна расстоянию до источника, роль которого играет колеблющийся диполь, находящийся в центре сферы.

Помимо плоской, возможны и другие виды поляризации электромагнитных волн. Например, упорядоченность ориентации векторов поля волны может заключаться в том, что вектор  $\vec{E}$  поворачивается вокруг направления распространения волны и его конец описывает в пространстве эллиптическую винтовую линию. Такая электромагнитная волна называется эллиптически поляризованной. Если конец вектора  $\vec{E}$  описывает окружность, то волна оказывается поляризованной по кругу. Отметим, что линейная и круговая поляризации являются частными случаями эллиптической поляризации (в первом случае одна из полуосей эллипса равна нулю, а во втором — обе полуоси оказываются равными).

Описание любого вида поляризации можно провести, если рас-

смагивать электромагнитную волну как сумму двух взаимно перпендикулярных плоских монохроматических волн, колебания вектора  $\vec{E}$  которых совершаются вдоль осей  $x$  и  $y$  и имеют разность фаз, равную  $\delta$ :

$$E_x = E_{01} \cos \omega t; \quad E_y = E_{02} \cos(\omega t + \delta). \quad (13)$$

В уравнениях (13) для простоты рассматривается положение  $z = 0$  на оси распространения волны.

При сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний (например, с помощью метода векторных диаграмм), задаваемых уравнениями (13), получим

$$\frac{E_x^2}{E_{01}^2} + \frac{E_y^2}{E_{02}^2} - 2 \frac{E_x E_y}{E_{01} E_{02}} \cos \delta = \sin^2 \delta. \quad (14)$$

В зависимости от того, какие значения принимает разность фаз  $\delta$  двух накладываемых друг на друга колебаний, выделяют три частных случая.

*Случай 1.* Если разность фаз  $\delta = k\pi$  ( $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ), то из выражения (14) получим

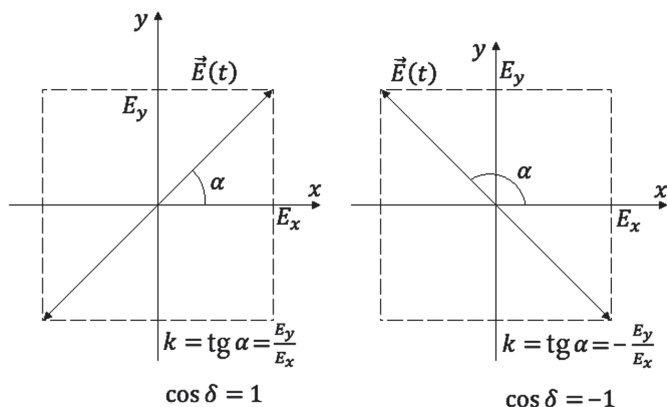
$$\left( \frac{E_x}{E_{01}} \pm \frac{E_y}{E_{02}} \right)^2 = 0. \quad (15)$$

В этом случае напряженность  $E_x$  пропорциональна напряженности  $E_y$ , т. е. конец результирующего вектора  $\vec{E}$  совершает колебания по прямой с положительным (рис. 5, *a*) или отрицательным (рис. 5, *б*) угловым коэффициентом, равным  $\pm E_{02}/E_{01}$ .

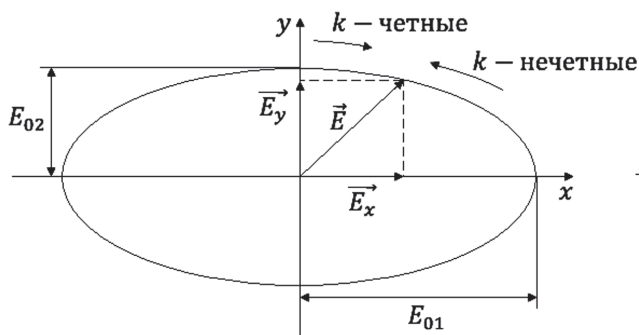
*Случай 2.* Если разность фаз  $\delta = \pi/2 + k\pi$  ( $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ), то соотношение (14) упрощается:

$$\frac{E_x^2}{E_{01}^2} + \frac{E_y^2}{E_{02}^2} = 1. \quad (16)$$

Уравнение (16) является уравнением эллипса с центром в начале координат и полуосями  $E_{01}$  и  $E_{02}$ , которые направлены вдоль осей координат (рис. 6). Отметим, что если смотреть на вектор  $\vec{E}$  навстречу распространению электромагнитной волны (против оси  $z$ ), то при четном  $k$  он будет вращаться по ходу часовой стрелки, а при нечетном  $k$  — против хода часовой стрелки. В этом



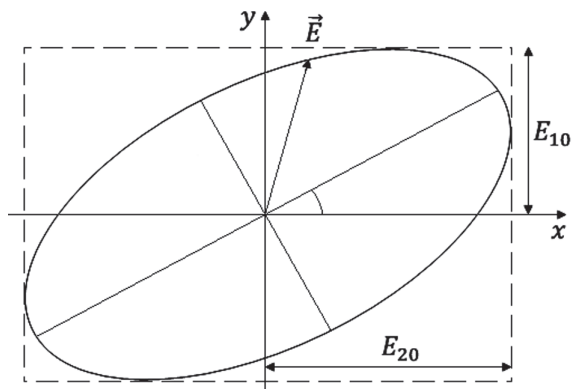
**Рис. 5.** Схема смещения взаимно перпендикулярных колебаний вектора  $\vec{E}$  со сдвигом фаз  $\delta = k\pi$



**Рис. 6.** Схема смещения взаимно перпендикулярных колебаний вектора  $\vec{E}$  со сдвигом фаз  $\delta = \frac{\pi}{2} + k\pi$

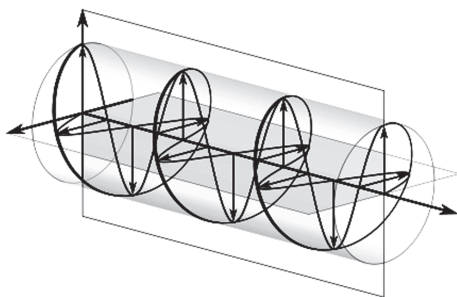
случае говорят соответственно о правой или левой эллиптически-поляризованной волне.

*Случай 3.* Во всех остальных ситуациях, т. е. при  $0 < |\cos \delta| < 1$ , уравнение (14) будет уравнением эллипса, полуоси которого повернуты на некоторый угол по отношению к координатным осям (рис. 7). Наглядно эллиптически поляризованную электромагнитную волну в фиксированный момент времени можно представить следующим образом. Если на поверхности прямого эллиптического цилиндра изобразить винтовую линию, то в каждой точке оси



**Рис. 7.** Схема смещения взаимно перпендикулярных колебаний вектора  $\vec{E}$  со сдвигом фаз  $\delta = \frac{\pi}{2}k\pi$

распространения волны  $z$  начало вектора  $\vec{E}$  будет находиться на оси цилиндра, а конец — на винтовой линии (рис. 8). Вектор  $\vec{E}$  в каждой точке перпендикулярен оси цилиндра.



**Рис. 8.** Схема смещения вектора  $\vec{E}$  по прямому эллиптическому цилиндру

Если на границу раздела двух диэлектриков падает неполяризованное электромагнитное излучение, то происходит его частичное отражение и преломление, при этом отраженное излучение и преломленное излучение будут частично поляризованы (рис. 9). Если отраженное (или преломленное) излучение пропустить через анализатор, отсеивающий колебания напряженности электрического поля только в одной плоскости, то степень поляризации можно

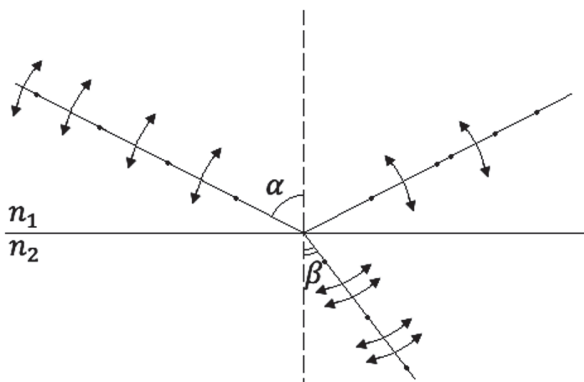


оценить по формуле

$$p = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (17)$$

где  $I_{\min}$  и  $I_{\max}$  — минимальная и максимальная интенсивности излучения, прошедшего через анализатор при его вращении.

Очевидно, если электромагнитная волна линейно поляризована, то  $p = 1$ . В этом случае имеется положение анализатора, при котором электромагнитное излучение полностью проходит ( $I_{\max} = I_0$ ), и положение анализатора (при его повороте на  $90^\circ$ ), при котором оно полностью задерживается ( $I_{\min} = 0$ ).



**Рис. 9.** Иллюстрация явления ионной поляризации на границе раздела двух сред

В отраженном электромагнитном излучении преобладают колебания вектора  $\vec{E}$ , перпендикулярные плоскости падения, в преломленном — колебания, лежащие в этой плоскости (см. рис. 9). При некотором угле падения, называемом углом Брюстера  $\theta_B$ , отраженная волна оказывается полностью поляризованной (преломленная волна остается по-прежнему частично поляризованной, хотя для нее параметр  $p$  достигает максимального значения). Угол Брюстера может быть определен с помощью соотношения

$$\operatorname{tg} \theta_B = \frac{n_2}{n_1} = n, \quad (18)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  — показатели преломления первой и второй среды, а  $n = n_2/n_1$  — относительный показатель преломления.

При некоторых углах падения  $\alpha$ , для которых выполняется неравенство  $\sin \alpha > n_2/n_1$ , происходит полное внутреннее отражение электромагнитного излучения. Из общего решения уравнений Максвелла для этого случая можно найти, что даже если первоначальная падающая волна была линейно поляризована, отраженная волна станет эллиптически поляризована (или поляризована по кругу). Таким образом, при полном внутреннем отражении изменяется характер поляризации волны — из линейной она превращается в эллиптическую.

Это явление обусловлено следующим фактом. Напряженность электрического поля в падающей плоской волне  $E_0$  можно представить в виде суммы двух компонент — компоненты  $E_{01}$ , перпендикулярной плоскости падения, и компоненты  $E_{02}$ , лежащей в ней. Очевидно, что эти компоненты оказываются синфазными. При полном отражении они испытывают скачок фазы  $\Delta\varphi_1$  и  $\Delta\varphi_2$ , причем в общем случае скачок оказывается разным для каждой из компонент. Таким образом, отраженная волна будет представлять собой сумму двух перпендикулярных компонент, имеющих разность фаз  $\delta = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2$ , что соответствует рассмотренному выше случаю (см. формулу (13)). Значение приобретаемой при полном отражении разности фаз  $\delta$  можно определить с помощью формулы

$$\operatorname{tg} \frac{\delta}{2} = \frac{\cos \alpha \sqrt{\sin^2 \alpha - n^2}}{\sin^2 \alpha}. \quad (19)$$

Как было показано выше, при сложении двух таких волн с  $\delta = 0$  отраженная волна оставалась бы линейно-поляризованной, что реализуется в предельном случае скользящего падения ( $\alpha = \pi/2$ ) или при полном внутреннем отражении падения под критическим углом, для которого  $\sin \alpha = n_2/n_1$ .

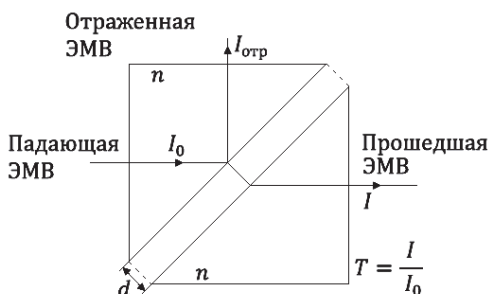
Отношение квадратов амплитуд напряженностей в отраженной волне, соответствующих малой и большой полуоси эллипса, т. е.  $E_{\min}^2/E_{\max}^2$ , зависит от угла  $\varphi$  между плоскостью колебаний вектора  $\vec{E}_0$  падающей волны и плоскостью падения:

$$\frac{E_{\min}^2}{E_{\max}^2} = \frac{\cos^2 \varphi (n^2 \sin^2 \varphi - 1)}{n^2 \sin^4 \varphi} = \frac{I_{\min}}{I_{\max}}. \quad (20)$$

#### 4. ВОЛНОВОЙ ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ

При полном внутреннем отражении электромагнитного излучения возможно возникновение еще одного явления, называемого волновым туннельным эффектом. Суть его заключается в том, что электромагнитная волна проникает внутрь отражающей среды, несмотря на то, что с точки зрения геометрической оптики это невозможно. Характерная глубина проникновения электромагнитного излучения имеет порядок длины волны электромагнитного излучения. Появление указанного эффекта может быть получено строго при рассмотрении полной системы уравнений Максвелла на границе раздела двух сред.

Если среду, в которой происходит распространение электромагнитного излучения, разбить на небольшие промежутки, так чтобы на одной из границ раздела имело место полное внутреннее отражение (рис. 10), то вследствие наличия туннельного эффекта электромагнитное излучение частично пройдет через этот промежуток



**Рис. 10.** Схема волнового туннельного эффекта (ЭМВ — электромагнитная волна)

и будет распространяться в среде, хотя и с малой интенсивностью. В этом случае эффект полного внутреннего отражения не наблюдается.

Коэффициентом прохождения  $T$  электромагнитной волны называют отношение интенсивностей прошедшей волны и падающей. В первом приближении можно считать, что

$$T = \exp \left( -\frac{2d}{\sigma} \right), \quad (21)$$

где  $d$  — ширина промежутка, а параметр  $\sigma$  отражает характерную глубину проникновения волны:

$$\sigma = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{n^2 \sin^2 \varphi - 1}}. \quad (22)$$

Здесь  $\varphi$  — угол между плоскостью колебаний вектора  $\vec{E}_0$  падающей волны и плоскостью падения.

## 5. ПОГЛОЩЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ. ЗАКОН БУГЕРА

Если электромагнитная волна интенсивностью  $I$  падает нормально на тонкий слой диэлектрика толщиной  $dx$ , то на выходе из него ослабленная волна будет иметь интенсивность  $I + dI$  ( $dI < 0$ ). Очевидно, что величина  $dI$  пропорциональна толщине слоя и первоначальной интенсивности, т. е.

$$dI = -\alpha I dx,$$

где  $\alpha$  — некоторый положительный коэффициент, характеризующий поглощательные свойства вещества.

Коэффициент  $\alpha$  в общем случае зависит от длины волны падающего излучения. Интегрируя уравнение

$$dI = -\alpha I dx$$

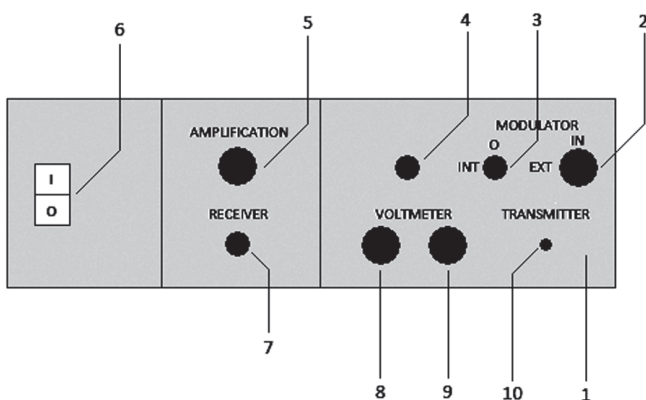
при условии, что первоначально (в отсутствие поглощающего материала) волна имела интенсивность  $I_0$ , т. е.  $I = I_0$ , если  $x = 0$ , получаем

$$I = I_0 e^{-\alpha x}. \quad (23)$$

Интенсивность электромагнитного излучения экспоненциально уменьшается при распространении его в материале из диэлектрика (закон Бугера).

## 6. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка состоит из генератора СВЧ-излучения (органы управления которым изображены на рис. 11), излучающей и приемной антенн со вспомогательными устройствами (рис. 12).



**Рис. 11.** Органы управления генератора СВЧ-излучения:

1 — основное устройство; 2 — регулятор уровня модуляции; 3 — переключатель способа модуляции; 4 — включение/отключение динамика; 5 — настройка интенсивности излучения; 6 — включатель прибора; 7 — разъем для кабеля антенн; 8, 9 — подключение вольтметра; 10 — подключение излучателя

Амплитудное значение напряженности электрического поля в излучаемой электромагнитной волне можно считать пропорциональным напряжению на приемнике, фиксируемому вольтметром:

$$E_0 = k_1 U, \quad (24)$$

где  $k_1$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от конструктивных особенностей приемника излучения.

Согласно равенству (8) интенсивность микроволнового излучения пропорциональна квадрату напряжения:

$$I = k_2 U^2, \quad (25)$$

где  $k_2$  — параметр пропорциональности.

## **7. СВЕДЕНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ**

Микроволновое электромагнитное излучение большой мощности неблагоприятно воздействует на живой организм. И хотя используемый в работе излучатель СВЧ-волн имеет крайне низкую интенсивность, сравнимую с интенсивностью фона, не рекомендуется направлять рупор излучателя непосредственно на человека.

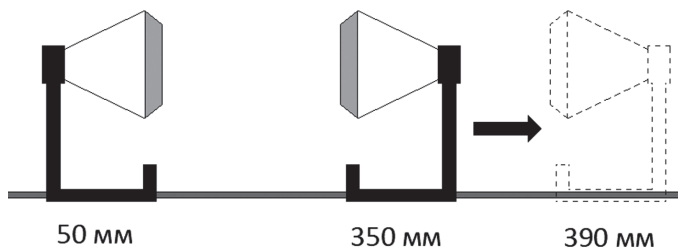
Кроме того, следует принять к сведению, что устройства мобильной и беспроводной связи, использующие микроволновый диапазон волн и работающие в активном режиме, могут внести помехи в результаты измерения. Включенный излучатель СВЧ-волн может, в свою очередь, нарушить работу мобильной и беспроводной связи.



## 8. ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

### Опыт 1. Исследование стоячих электромагнитных волн

1. Установить излучающую и приемную антенны на длинной направляющей так, чтобы положение излучателя соответствовало координате 50 мм, а положение приемника — 350 мм (рис. 12). Указанные положения отсчитываются по задней поверхности основания антенн. Рупоры антенн следует повернуть в такое положение, чтобы большие стороны рупоров были параллельны, а регулятор интенсивности излучения установить в среднее положение.



**Рис. 12.** Схема эксперимента по наблюдению стоячей электромагнитной волны

2. Переместить приемную антенну по направлению от излучателя. Выполнить измерения напряжения через каждые 2 мм вплоть до положения приемника излучения, равного 390 мм (см. рис. 12). Результаты записать в табл. 1.

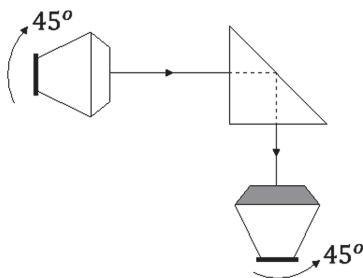
$z_{\text{изл}}, \text{ мм}$	$z, \text{ мм}$	$U, \text{ В}$	$\Delta z, \text{ мм}$	$\lambda, \text{ см}$	$\nu = c/\lambda, \text{ Гц}$
50	350				
	352				
	....				
	390				

3. Определить положения приемника излучения  $z_1$  и  $z_2$ , которым соответствуют соседние минимумы напряжения (узлы стоячей волны), а также разность этих положений  $\Delta z = z_2 - z_1$ .

4. Используя формулу (12), вычислить длину волны  $\lambda$  испускаемого антенной микроволнового электромагнитного излучения. Найти частоту  $\nu$  излучения, считая, что показатель преломления воздуха можно принять за единицу.

## Опыт 2. Поляризация электромагнитных волн при отражении

1. Установить излучающую и принимающую антенны так, чтобы угол между осями с соответствующими рупорами составлял  $90^\circ$  (рис. 13). Повернуть рупоры источника и приемника на угол  $\alpha = 45^\circ$  к горизонтальной плоскости. В этом случае проекция амплитуды падающей волны одинакова как относительно горизонтальной оси, так и относительно вертикальной оси. На платформу поместить призму согласно разметке так, чтобы угол падения волны составил  $\varphi = 45^\circ$ .



**Рис. 13.** Схема эксперимента по поляризации электромагнитных волн

2. Поворачивая рупор принимающей антенны вокруг оси пространства получаемого эллиптически поляризованного излучения, определить минимальное и максимальное напряжения на вольтметре. Полученные значения записать в табл. 2.

Таблица 2

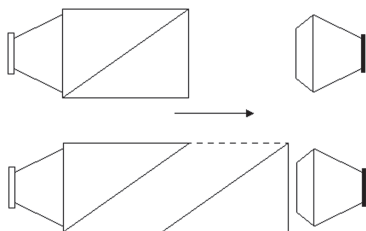
$\varphi$	$U_{\min}, \text{В}$	$U_{\max}, \text{В}$	$\left(\frac{E_{\min}}{E_{\max}}\right)^2 = \left(\frac{U_{\min}}{U_{\max}}\right)^2$	$n$
$\pi/4$				

3. Определить с помощью формулы (20) показатель преломления среды (парафина), для которого при данных условиях опыта имеет место выражение

$$n = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{E_{\min}}{E_{\max}}\right)^2}}. \quad (26)$$

### Опыт 3. Волновой туннельный эффект

1. Установить вплотную друг к другу две парафиновые призмы на платформе в соответствии с разметкой. В этом случае расстояние между призмами (воздушный промежуток) равно нулю. Расположить источник и приемник электромагнитного излучения на одной оси, при этом выходное отверстие рупора излучающей антенны должно быть вплотную прижато к одной из призм (в дальнейшем неподвижной). Большие стороны обоих рупоров должны быть параллельны и горизонтальны (рис. 14).



**Рис. 14.** Схема эксперимента по наблюдению волнового туннельного эффекта

2. Определить значение напряжения  $U_0$  на приемной антенне и записать его в табл. 3. Переместить подвижную призму параллельно самой себе вдоль оптической оси так, чтобы расстояние между призмами оказалось равным 0,5 см (по линейке на платформе). Такое перемещение вдоль оси необходимо для того, чтобы расстояние  $d$ , проходимое электромагнитной волной в толще парафина, было неизменным. Несмотря на то, что волна падает на границу первой призмы из воздуха под углом, превышающим угол полного отражения, вольтметр зафиксирует напряжение на антенне приемника (волновой туннельный эффект).

3. Повторить опыт для расстояния между призмами  $d = 1; 1,5; 2$  см.

Таблица 3

$\varphi$	$d$ , см	$U$ , В	$T = \frac{U^2}{U_0^2}$	$\ln T$
$\pi/2$	0,0		1,0	0,0
	0,5			
	...			
	2,0			

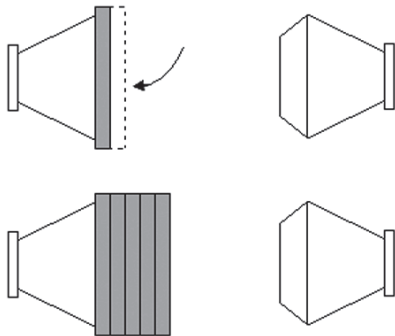
4. Построить график зависимости логарифма коэффициента прохождения  $\ln T = \ln \frac{U^2}{U_0^2}$  от расстояния между призмами, проводя наилучшую прямую через экспериментальные точки. В соответствии с формулой (21) тангенс угла наклона полученной прямой равен  $-\frac{2}{\sigma}$ . Определить по построенному графику параметр  $\sigma$ , а затем, используя формулу (22), показатель преломления  $n$  парафина (угол  $\varphi = 90^\circ$ ).

5. Сравнить значения показателя преломления  $n$  парафина, полученные в опытах 2 и 3.

#### Опыт 4. Поглощение электромагнитных волн

1. Установить излучающую и принимающую антенны так же, как в опыте 3, причем расстояние между ними должно быть ми-

нимальным. На платформу поместить поглощающую пластину из диэлектрика (дерева) толщиной  $d_1$  так, чтобы она вплотную прижималась к выходному отверстию рупора излучающей антенны. Снять показания вольтметра (напряжение  $U_1$ ), соответствующие наличию одной пластины (рис. 15).



**Рис. 15.** Схема эксперимента по поглощению электромагнитных волн

2. Повторить опыт (см. п. 1) для большего количества аналогичных пластин, располагая их вплотную друг к другу. Данные записать в табл. 4.

Таблица 4

$N$	$d = d_1 N$ , мм	$U_N$ , В	$I_1/I_N = U_1^2/U_N^2$	$\ln(I_1/I_N)$
1			1,0	0,0
...				
5				

3. Построить график зависимости  $\ln(I_1/I_N)$  от суммарной толщины поглощающего слоя, проведя через экспериментальные точки наилучшую прямую. Из графика найти показатель затухания  $\alpha$  для исследуемой электромагнитной волны, который будет равен тангенсу угла наклона полученной прямой.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какую электромагнитную волну называют монохроматической? Плоской?

2. Какой диапазон волн занимает микроволновое излучение? Укажите источники таких волн, области применения СВЧ-излучения.

3. Какая связь существует между мгновенными значениями напряженностей электрического и магнитного полей в плоской электромагнитной волне?

4. Как найти вектор Пойнтинга для электромагнитной волны? Каков его физический смысл?

5. Что такое интенсивность электромагнитной волны? Как определить интенсивность плоской монохроматической волны?

6. Дайте определение интерференции и дифракции электромагнитных волн.

7. Как образуется стоячая электромагнитная волна? Что такое узел и пучность стоячей волны?

8. Что такое поляризация электромагнитной волны? Какие виды поляризации существуют?

9. Как можно получить плоскополяризованную волну? Эллиптически поляризованную?

10. В чем заключается волновой туннельный эффект? Каков физический механизм его происхождения?

11. Получите формулу (23) для закона Бугера.

12. Укажите основные факторы влияния на экспериментальную установку, приводящие к флуктуациям напряжения на приемной антенне.

## ЛИТЕРАТУРА

*Иродов И.Е.* Волновые процессы. Основные законы. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.

*Литвинов О.С., Горелик В.С.* Электромагнитные волны и оптика. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.

*Савельев И.В.* Курс общей физики. Т. 2. Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика. М.: Лань, 2007.

*Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т. 3. Электричество. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
1. Общие сведения теории электромагнитных волн.....	4
2. Интерференция электромагнитных волн. Стоячие волны.....	9
3. Поляризация электромагнитных волн. Поляризация при полном внутреннем отражении .....	13
4. Волновой туннельный эффект.....	19
5. Поглощение электромагнитной волны. Закон Бугера.....	21
6. Описание экспериментальной установки .....	22
7. Сведения по технике безопасности .....	24
8. Выполнение лабораторной работы .....	25
Контрольные вопросы.....	30
Литература .....	31