

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.8.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУННЕЛЬНОГО ЭФФЕКТА НА СВЧ

Цель работы: Ознакомление с основными закономерностями туннельного эффекта на СВЧ-модели.

Приборы и принадлежности: генератор СВЧ-колебаний, рупорные антенны, призмы из полистирола, СВЧ-детектор, измерительный прибор (микроамперметр).

ВВЕДЕНИЕ

Туннельный эффект, то есть прохождение частицы под барьером, запрещенное классической механикой, наблюдается в следующих физических явлениях:

- туннелирование электронов при контакте двух металлов, приводящее к появлению контактной разности потенциалов;
- холодная эмиссия электронов из металлов, помещенных в сильное электрическое поле;
- альфа-распад радиоактивных ядер (объясняется подбарьерным прохождением альфа-частиц, входящих в состав ядра, через барьер, обусловленный кулоновским полем);

Кроме того, туннельный эффект лежит в основе действия туннельного диода, играет важную роль в эффекте Джозефсона, ответственен за “квантовое испарение” черных дыр.

Квантово-механический расчет показывает, что при энергетической высоте барьера U , превышающей энергию E частицы, существует конечная вероятность прохождения частицы через такой барьер. Эта вероятность (прозрачность барьера D) для свободного электрона и прямоугольного барьера шириной d равна:

$$D = 16 \frac{E}{U} \left[1 - \frac{E}{U} \right] \cdot \exp \left[-\frac{2d}{h} \sqrt{2m_e(U-E)} \right]$$

Рассмотрим явление, во многом сходное с квантово-механическим туннельным эффектом. Если электромагнитная волна падает на границу раздела двух сред (рис. 4.8.1.) с коэффициентом преломления n_1 и n_2 ($n_1 > n_2$) под углом ϕ таким, что

$$\sin \phi \geq \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1}, \quad (1)$$

то она не проходит во вторую среду и наблюдается явление полного внутреннего отражения.

Теоретически это явление было рассмотрено русским физиком Эйхенвальдом.

Он пришел к выводу, что интенсивность I волны, прошедшей в среду 2 изменяется с расстоянием x в этой среде по закону:

$$I = I_0 \exp \left(-\frac{2\pi x}{\lambda_1} \sqrt{\sin^2 \phi - n_{2,1}^2} \right), \quad (2)$$

где I_0 – интенсивность на границе раздела сред 1 и 2; ϕ – угол падения;

$n_{2,1} = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}$ – относительный коэффициент преломления двух сред; λ_1 – длина волны в среде 1, из которой волна падает на границу раздела.

Согласно теории Эйхенвальда, при полном внутреннем отражении поле заходит во вторую среду, так как оно на границе не прерывается. Поэтому *отражение электромагнитной волны происходит в некотором слое*. В свое время наличие такого слоя было продемонстрировано в оптике Вудом, Мандельштамом и Зелени, проводившими опыты по наблюдению волны, прошедшей через тонкий слой вещества в

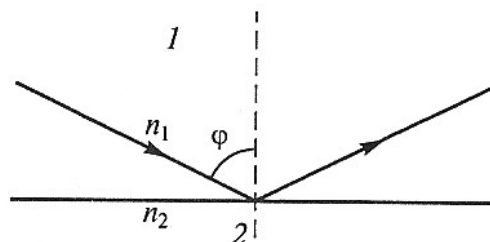


Рис. 4.8.1

условиях полного внутреннего отражения.

Измерить изменение амплитуды (или интенсивности) волны за границей раздела при полном внутреннем отражении на волнах оптического диапазона практически невозможно, но на волнах сантиметрового диапазона (в области сверхвысоких частот) эти измерения проводятся сравнительно легко. Впервые такие опыты на длине волны 15 см были поставлены индийским физиком Бозе. Подобная методика используется и в настоящей работе.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.

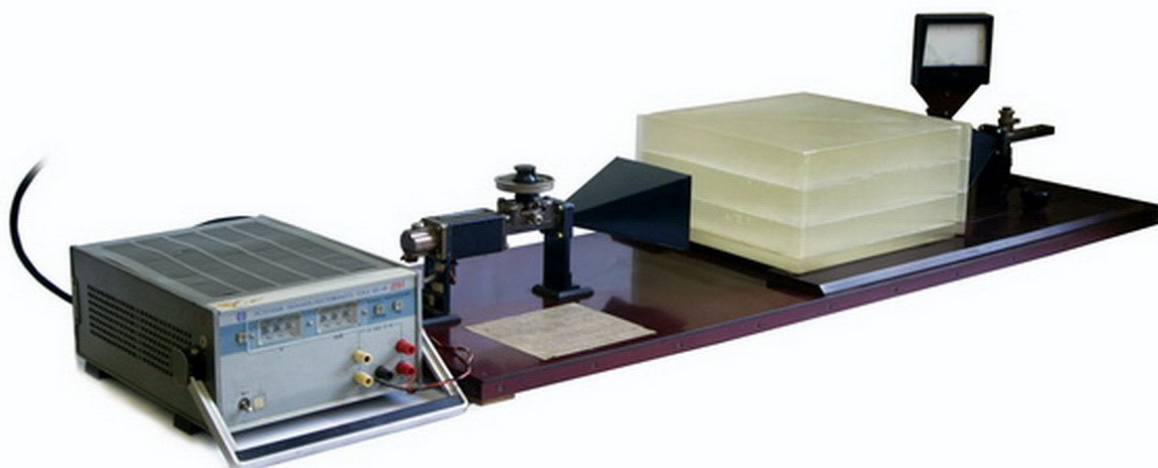


Фото 1

Схема измерительной установки представлена на рис.4.8.2, общий вид установки – на фото 1. Ее основными частями являются генератор СВЧ-колебаний Г ($\lambda = 3$ см), блок питания БП (источник питания постоянного тока Б5-49), вентиль В, предотвращающий попадание отраженных волн обратно в генератор, аттенуатор А для регулировки мощности выходящего СВЧ-излучения, рупорные антенны Р, с помощью которых излучение выводится из волновода и подается на детектор Д, регистрирующий излучение. (На фото 2 вы видите блок: генератор Г, вентиль В, аттенуатор А и рупор Р). Регистрация ведется с помощью стрелочного микроамперметра мкА. В условиях опыта можно считать, что ток в цепи пропорционален мощности СВЧ-излучения, падающего на детектор. Между передающим и приемным рупором на столике помещаются две трехгранные призмы Π_1 и Π_2 (фото 3) из полистирола, которые можно раздвигать с помощью специального винта. Толщина воздушного зазора x между призмами измеряется по шкале, нанесенной на столике.

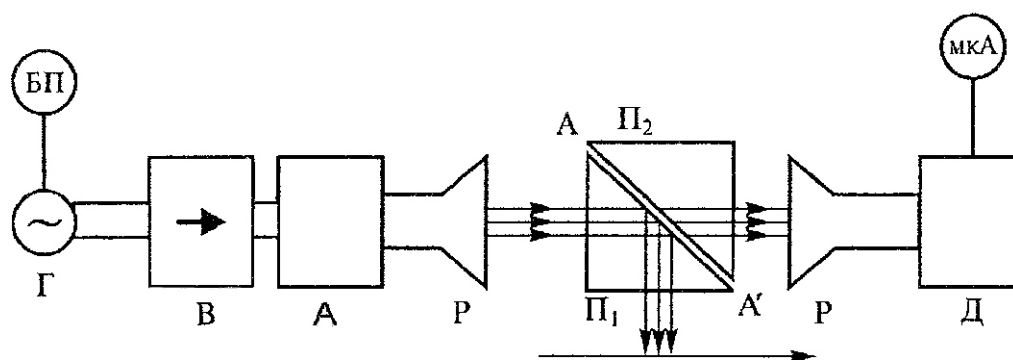


Рис. 4.8.2

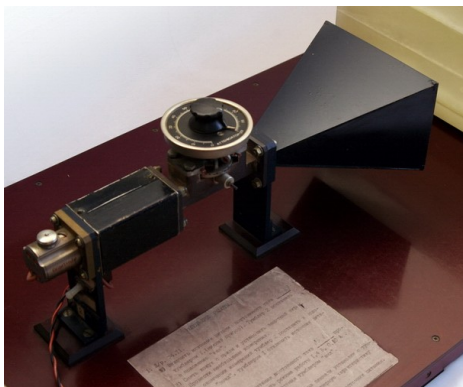


Фото 2

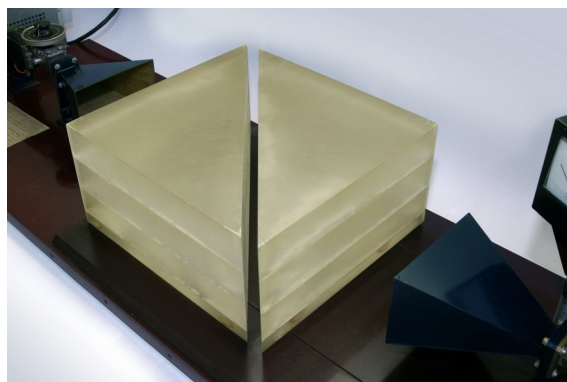


Фото 3

Материал призмы представляет собой первую среду с коэффициентом ε_1 . Слой воздуха является второй средой с коэффициентом ε_2 . Излучение падает на грань первой призмы под углом $\varphi = 45^\circ$, большим критического, поэтому на этой грани должно происходить полное внутреннее отражение. Если вторую призму отодвинуть на значительное расстояние от первой, то падающая волна будет полностью отражаться от грани первой призмы. Если призмы сдвинуты так плотно, что практически они представляют собой сплошной куб, то интенсивность прошедшей волны должна быть примерно равной интенсивности падающей волны. При раздвигании призм, пока толщина воздушного слоя между ними невелика, значительная часть волны все же проходит через границу раздела и может быть зарегистрирована детектором.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Задание 1. Измерение интенсивности прошедшей волны в зависимости от толщины воздушной прослойки.

1. Снимите защитный кожух с призм и установите перед призмами со стороны экспериментатора защитный металлический экран.
2. Включите сначала источник питания постоянного тока Б5-49 (тумблер 1), а затем питание генератора (тумблер 2).
3. При плотно сомкнутых призмах, поворачивая ручку аттенюатора (фото 4), добейтесь значения тока $I_0 = 100$ мкА.
4. Меняя с помощью винта толщину воздушного слоя x между призмами, снимите зависимость $I = f(x)$ интенсивности прошедшей волны от толщины слоя с шагом 0,1 мм, 0,2 мм и 1 мм на интервалах соответственно 0 – 1 мм, 1 – 3 мм и 3 – 10 мм.
5. По окончании измерений выключите оба тумблера и закройте призмы защитным кожухом.
6. Постройте график зависимости $I = f(x)$ в удобном для анализа результатов масштабе. Объясните полученную зависимость.



Задание 2. Расчет диэлектрической проницаемости материала призм.

1. Пользуясь формулой Эйхенвальда и приняв длину волны в полистироле равной $\lambda_1 = \frac{\lambda_2}{\sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_2}}$, получите выражение для расчета диэлектрической проницаемости полистирола ε_1 . Длина волны в воздухе $\lambda_2 = 3$ см, диэлектрическая проницаемость воздуха $\varepsilon_2 = 1$.

2. Пользуясь графиком $I = f(x)$ и полученным выражением, вычислите величину диэлектрической проницаемости полистирола.
3. Сравните экспериментальное значение ε_1 с табличным ($\varepsilon_{\text{полистирола}} = 2,56$).

ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ.

1. В чем заключается туннельный эффект?
2. Назовите явления, для объяснения которых нужно привлекать туннельный эффект.
3. Обоснуйте аналогию между туннельным эффектом и явлением полного внутреннего отражения электромагнитных волн на границе раздела.
4. Может ли микрочастица отразиться от энергетического барьера, высота которого меньше энергии частицы?