

Работа № 6

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЧ ВОЛН

Цель работы: ознакомиться с явлением интерференции в области СВЧ диапазона электромагнитных волн.

Оборудование: генератор 3–х сантиметрового диапазона волн, волноводный "разветвитель" с рупорами, самопишущий потенциометр с закрепленным на каретке индикатором излучения, набор пластин из оргстекла, волноводные вставки и скрутки.

1. Введение

Интерференция – перераспределение энергии излучения в пространстве, возникающее в результате взаимодействия двух электромагнитных полей, для которых выполняются определенные условия. Рассмотрим кратко эти условия.

Уравнения Максвелла дают *суперпозицию* электромагнитных полей в пространстве: $\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$. Поскольку в практикуме мы измеряем не напряженности, а интенсивности полей, то возведем напряженность результирующего поля в квадрат:

$$E^2 = (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2)^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2\mathbf{E}_1\mathbf{E}_2. \quad (1)$$

Реальные измерители энергии достаточно инерционны, т. е. реагируют не на мгновенные значения полей, а усредняют их по конечному времени. Поэтому реально в измерениях мы имеем дело не с равенством (1), а с равенством (1'):

$$\langle E^2 \rangle = \langle (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2)^2 \rangle = \langle E_1^2 \rangle + \langle E_2^2 \rangle + 2\langle \mathbf{E}_1\mathbf{E}_2 \rangle. \quad (1')$$

Обратим внимание на то, что в равенстве (1') последний член – это *скалярное произведение векторов*. Поэтому в зависимости от свойств векторов \mathbf{E}_1 и \mathbf{E}_2 возможны два случая: $\langle \mathbf{E}_1\mathbf{E}_2 \rangle = 0$ и $\langle \mathbf{E}_1\mathbf{E}_2 \rangle \neq 0$.

Необходимым условием интерференции является неравенство нулю этого члена, называемого **интерференционным членом**:

$$\langle \mathbf{E}_1\mathbf{E}_2 \rangle \neq 0. \quad (2)$$

Именно благодаря этому члену нарушается аддитивность энергии: общая энергия $\langle E^2 \rangle$ может быть как *меньше*, так и *больше* суммы энергии $\langle E_1^2 \rangle + \langle E_2^2 \rangle$ полей в зависимости от знака интерференционного члена.

Примечания. 1). Выполняя усреднение по времени легко показать, что интерференционный член $\langle \mathbf{E}_1\mathbf{E}_2 \rangle = 0$ для случаев: а) монохроматических волн *различных* частот, б) монохроматических волн одинаковой частоты, но с *взаимно перпендикулярной* (скрещенной) *поляризацией*.

2). То, что суммарная энергия общего поля может оказаться больше суммы энергий интерферирующих полей конечно не означает нарушения закона сохранения энергии. Ибо речь идет об энергии суммарного поля в каких-то *фиксированных местах пространства*: в одних местах она будет больше суммы энергии исходных полей, в других – меньше, но так, что интегрирование энергии суммарного поля по всему пространству "восстанавливает" закон сохранения энергии. Именно поэтому мы говорим, что интерференция есть *перераспределение* энергии исходных полей в пространстве.

Основное условие интерференции – когерентность полей. Монохроматическая волна может быть записана в виде

$$E(t) = E_0 \cos(\omega t - \varphi)$$

В общем случае все три величины E_0 , ω и φ могут быть функциями времени t . Но вариации частоты ω можно представить как изменение фазы во времени $\varphi = \varphi(t)$. Тогда произвольное колебание можно записать в виде

$$E(t) = E_0(t) \cos[(\omega t - \varphi(t))]$$

Складывая два таких колебания, получим: $E(t) = E_1(t) + E_2(t) = E_0(t) \cos[(\omega t - \varphi_0(t))]$, где

$$E_0(t) = \{E_{10}^2(t) + E_{20}^2(t) + 2 E_{10}^2(t) E_{20}^2(t) \cos[(\varphi_1(t) - \varphi_2(t))]\}^{1/2}$$

Если фазы колебаний ведут себя таким образом, что за время измерения косинус их разности много раз меняет знак, то интерференционный член равен нулю даже при постоянстве амплитуд колебаний.

Действительно

$$\langle E^2 \rangle = \frac{1}{t'} \int_0^{t'} E^2 dt = \langle E_1^2 \rangle + \langle E_2^2 \rangle + 2 E_{10} E_{20} \frac{1}{t'} \int_0^{t'} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) dt,$$

и интеграл в интерференционном члене стремится к нулю.

Таким образом, для наличия устойчивой картины интерференции необходимо, чтобы за время измерения разность фаз была постоянна. Это и есть **условие когерентности** волн:

$$\varphi_1(t) - \varphi_2(t) = \text{const}. \quad (3)$$

Заметим, интерференция может происходить и в случае сложных *негармонических колебаний*, если разность их фаз сохраняет постоянную величину!

Условие (3) является **необходимым**, но **недостаточным** условием. Чтобы для гармонических колебаний оно стало достаточным, необходимо наложить два дополнительных условия: равенство частот $\omega_1 = \omega_2$ и неперпендикулярность векторов \mathbf{E}_1 и \mathbf{E}_2 .

Примечания. 1. Если частоты различаются незначительно, т.е. $\omega_1 - \omega_2 = \delta\omega$ и $|\delta\omega| \ll \omega_1, \omega_2$, то интерференция может все-таки наблюдаться в виде нестационарной ("плывущей") картина интерференции или в виде "биения" интерференционной картины.

2. Иногда вводят понятие временной и пространственной когерентности. *Временная* когерентность предусматривает стабильность частоты колебаний (монохроматичность источников). *Пространственная* когерентность "отвечает" за то, чтобы излучение, пришедшее в данную точку пространства от различных точек источника, мало отличалось по фазе. Такое разделение бывает полезным и для удаленных интерферирующих источников. Даже при временной когерентности (по частоте и фазе колебаний самих источников) на пути одного из источников может оказаться среда с изменяющимися в пространстве оптическими характеристиками. Это приведет к пространственной некогерентности излучения в точке наблюдения.

2. Описание установки

Установка для изучения интерференции представлена на рис. 1.

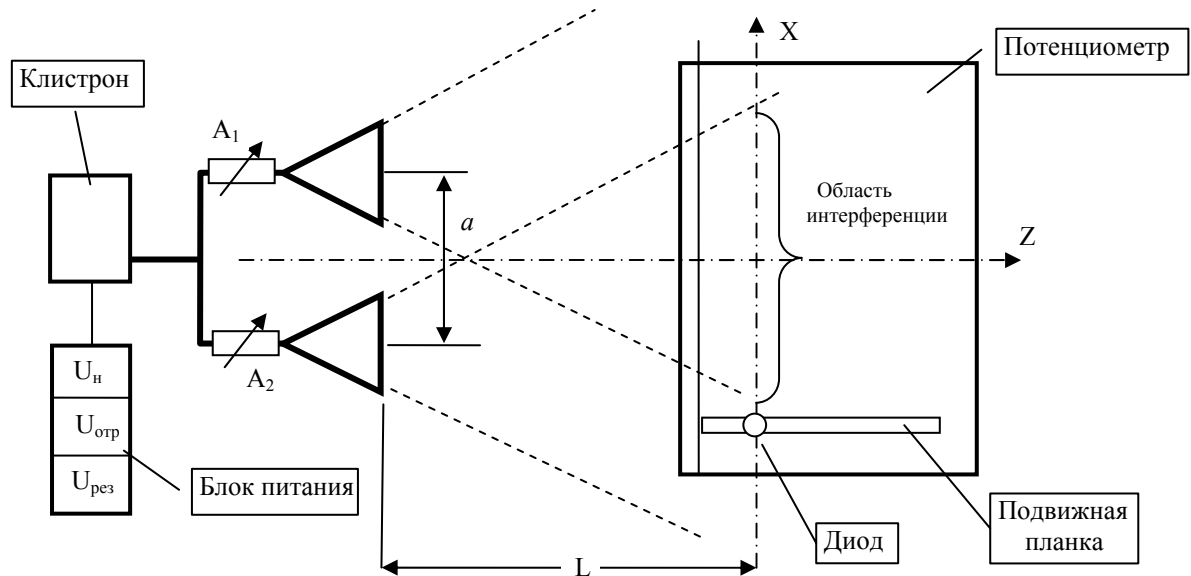


Рис. 1. Установка "Интерференция"

1. Включение установки. Вначале включите блок питания *накала* и дайте прогреться в течение ~ 1 мин. После этого включите питание отражателя и резонатора. Оптимальные напряжения всех трех источников уже выставлены, поэтому не сбивайте ручки управления напряжениями блоков питания!

2. Юстировка интерферометра. Для сканирования и регистрации интерференционной картины вдоль оси X используется самопишущий потенциометр, на подвижной планке которого закреплен приемник СВЧ излучения (диод). Установите потенциометр на таком расстоянии L от излучателей (рупоров), чтобы область интерференции покрывала значительную часть потенциометра (см. рис. 1).

3. Задания

Задание состоит в получении и обработке трех графиков.

1. График №1. Смысл первого эксперимента – проверка основных соотношений интерференции; понятие об оптическом и геометрическом пути. Поочередно закрывая каждый из аттенюаторов A_1 и A_2 , запишите распределение интенсивности излучения рупоров вдоль оси X. На том же листе запишите интерференционную картину при обоих открытых рупорах. При необходимости (при значительном отличии амплитуды интерференционных максимумов вдоль оси OX) измените расстояние L и вновь снимите интерференционную картину.

Не меняя параметров установки и сигнала поставьте перед одним из рупоров лист оргстекла известной толщины a и запишите еще одну интерференционную картину на том же графике. Повторите эту запись с двумя и тремя листами оргстекла той же толщины.

Задание по обработке графика №1. 1). Используя три первые диаграммы (с поочередно закрытыми и обоими открытыми аттенюаторами) проверьте основное соотношение для сложения интенсивностей поля при интерференции. 2). Сравнивая диаграммы, полученные с добавлением листов оргстекла, определите показатель преломления оргстекла и величину изменения оптического пути при их вставке.

4. График №2. Второй эксперимент – это пример использования интерферометра в качестве оптического измерительного прибора. Смените лист диаграммы и вновь запишите исходную интерференционную картину (без оргстекла). Не меняя взаимного положения интерферометра и потенциометра,

вставьте в одно из плеч интерферометра отрезок волновода известной длины l_0 и вновь запишите интерференционную картину.

Задание по обработке графика №2. Основное назначение интерферометра как оптического измерительного прибора заключается в определении оптических характеристик какой-либо среды. Для этого на пути одного из лучей интерферометра помещают кювету с исследуемой средой. Об оптических характеристиках исследуемой среды судят по изменению исходной интерференционной картины. В нашем случае исследуемой "средой" является отрезок волновода длины l . Поскольку фазовая скорость волны в волноводе и в свободном пространстве различна, то вставка отрезка волновода изменяет длину оптического пути. По сдвигу интерференционной картины относительно исходной и известной геометрии установки (параметрам l , L , a) определите фазовую скорость волны в волноводе.

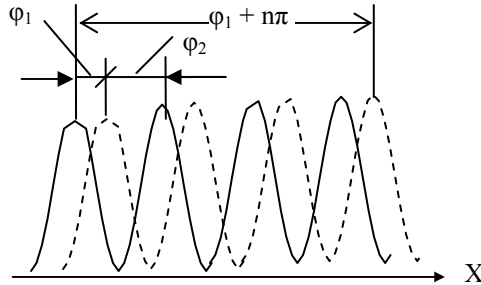


Рис. 2. К определению сдвига картины

Обратите внимание на то, что интерференционная картина может быть сдвинута не только на часть "периода" φ , но и на какое-то n -кратное число периодов плюс φ . Кроме того, возникает вопрос, какой сдвиг необходимо брать — φ_1 или φ_2 (рис. 2)? Поэтому одна из обычных трудностей при расшифровке интерферограмм — умение определить кратность сдвига интерференционной картины.

При решении этой задачи считайте известным основное соотношение для длины волны в волноводе

$$\lambda_g = \lambda_0 \left[1 - (\lambda_0/2a)^2 \right]^{1/2}$$

и длину волны в свободном пространстве $\lambda_0 = 3,2$ см.

4. График №3. Смысл данного упражнения — экспериментальная проверка возможности интерференции в полях со взаимно перпендикулярной плоскостью поляризации. Для изменения направления поляризации выходящего из рупора излучения применяются так называемые "скрутки". Оставляя волноводную вставку предыдущего упражнения в одном из плеч интерферометра вставьте в другое плеч волноводную скрутку такой же длины l . Мы получим равноплечий интерферометр, но плоскости поляризации излучения его рупоров будут взаимно перпендикулярны.

1). Если мы теперь попробуем снять интерференционную картину, то такой эксперимент ничего не даст, поскольку наш приемник излучения (симметричный вибратор с СВЧ диодом) не чувствителен к излучению с поляризацией, перпендикулярной его оси. Поэтому он будет принимать излучение только от одного рупора. Ситуацию можно исправить, повернув приемную антенну (диод) на 45° к направлениям поляризации обоих рупоров (рис. 3).

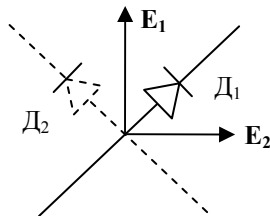


Рис. 3. Расположение диода и векторов поляризации полей

Внимание! СВЧ диоды легко "пробиваются" от статической наводки. Поэтому прежде чем поворачивать диод снимите статический заряд со своей руки, прикоснувшись ею к заземленной части установки.

2). Снимите три диаграммы: с поочередно закрытыми и с обоими открытыми аттенюаторами A1 и A2.

3). Поверните СВЧ диод на угол 90° к прежнему его положению (положение D_2 на рис. 2). Снимите новую (четвертую на этом графике) диаграмму.

Задание по обработке графика №3. Обратите внимание на следующий интересный факт. Математически любой вектор можно разложить на две компоненты (проекции) по заданным направлениям (в частности, взаимно перпендикулярным). С помощью СВЧ диода мы в данном случае уже не математически, а **физически** выделяем компоненты (проекции) векторных полей E_1 и E_2 на заданное направление, совпадающее с осью симметричного вибратора. Но при этом компоненты (проекции) полей E_1 и E_2 с взаимно перпендикулярной поляризацией **интерферируют!** А как ведут себя сами поля E_1 и E_2 ?

По результатам этого эксперимента можно доказать, что сами поля не интерферируют. Подумайте, как это сделать. И примите к сведению, что компоненты разложения векторов могут вести себя **качественно иначе**, нежели сами векторные величины!

Второй полезный факт, следующий из данного эксперимента, заключается в том, что когда мы говорим о том, что поля с взаимно перпендикулярной поляризацией не интерферируют, то имеется в виду, что эти поля распространяются в однородной и изотропной среде! Наш диодный измеритель поля делает среду не изотропной, поскольку **физически** выделяет в ней определенное направление, совпадающее с его продольной осью.