

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра общей физики

Л.Н. Смирных, А.А. Тютин

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ
"МИКРОВОЛНОВЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР"

Методическое пособие

Новосибирск
2012

Смирных Л.Н., Тютин А.А. Лабораторные работы по теме "Микроволновый интерферометр", методическое пособие. Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2010. 11 с.

Представлены две новые установки с микроволновым интерферометром для практикума "Физическая оптика" раздел "СВЧ-оптика". Одна установка – для новой лабораторной работы №9. "Микроволновый интерферометр: определение диэлектрической проницаемости среды". Вторая – работа №10. "Микроволновый интерферометр с плазмой безэлектродного разряда" – предназначена для выполнения как лабораторной, так и курсовых работ. Работы соответствуют программе обучения студентов физиков второго курса НГУ.

Написаны описания 1) работа №9. "Микроволновый интерферометр: определение диэлектрической проницаемости среды". 2) работа №10 "Исследование параметров плазменного разряда с помощью микроволнового интерферометра". В работе №10 приведено теоретическое введение, дающее общее представление о плазме и основы измерения концентрации заряженных частиц в плазме методом отсечки.

Рецензент куратор практикума СВЧ С.А. Кузнецов

Работы подготовлены в рамках реализации Программы развития НИУ-НГУ на 2009–2018 г. г.

© Новосибирский государственный университет, 2010

Лабораторная работа № 9

Микроволновый интерферометр: определение диэлектрической проницаемости среды

Цель работы – изучение СВЧ интерферометра и измерение диэлектрической проницаемости оргстекла в диапазоне СВЧ волн.

Оборудование: установка "Микроволновый интерферометр" с блоками питания (фото 1), осциллограф типа Tektronix TDS2024; набор пластин оргстекла.



Установка " Микроволновый интерферометр"

1. Введение: Интерференция волн

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

Пусть есть две монохроматические волны с напряженностями поля E_1 и E_2 . Уравнения Максвелла позволяют записать *суперпозицию* (сложение) этих полей в пространстве:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2. \quad (1)$$

Заметим: уравнение (1) – это векторное уравнение. Поскольку энергия поля пропорциональна квадрату амплитуды, то возведем напряженность результирующего поля \mathbf{E} в квадрат:

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

Реальные (материальные) измерители энергии достаточно инерционны, т. е. всегда реагируют не на *мгновенные* значения полей, а усредняют их по конечному времени. Поэтому реально в измерениях мы имеем дело не с равенством (2), а с равенством (2'):

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

где угловыми скобками обозначено усреднение соответствующих величин.

Обратим внимание на то, что в равенстве (2') последний член – это, во-первых, *скалярное произведение векторов*, во-вторых, произведение двух в общем случае *случайных* величин. 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*:

$$\langle \mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 \rangle \neq 0. \quad (3)$$

Поэтому исследуя условия неравенства нулю интерференционного члена, можно понять какие условия должны быть наложены на исходные поля \mathbf{E}_1 и \mathbf{E}_2 , чтобы их интерференция стала возможной.

1. Во-первых, уравнения (2) и (2') означают, что при интерференции благодаря наличию члена (3) *нарушается локальная аддитивность энергии*: общая энергия в каждой точке пространства, пропорциональная $\langle E^2 \rangle$, в зависимости от знака интерференционного члена может быть как *больше*, так и *меньше* суммы энергии составляющих полей, действующих в данной точке порознь.

Поскольку величины, пропорциональные $\langle E_1^2 \rangle$ и $\langle E_2^2 \rangle$ – это интенсивности (энергия) полей \mathbf{E}_1 и \mathbf{E}_2 , а энергия – это величина сугубо положительная и, следовательно, аддитивная, то неаддитивность уравнений (2) и (2') требует объяснения. На самом деле она означает, что на любые физические тела (среды) в каждой точке исходно действует не энергия, а именно напряженность каждого поля \mathbf{E}_1 и \mathbf{E}_2 , (точнее, электрическая сила $e\mathbf{E}$). А это – величины векторные, поэтому в каждой точке они суммируются векторно и могут быть как больше, так и меньше суммы действия полей по отдельности. Поэтому если в каждой точке действуют несколько полей, то энергия общего поля есть квадрат векторной суммы напряженностей этих полей, а не сумма их энергий.

2. Легко показать, что при усреднении интерференционный член $\langle \mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 \rangle = 0$ (зануляется) для следующих случаев:

а) монохроматических волн *различных* частот,

б) монохроматических волн одинаковой частоты, но с *взаимно перпендикулярной* (скрещенной) *поляризацией*.

Иначе говоря, условия а) и б) – это условия *отсутствия* интерференции волн.

3. Основное условие интерференции – *когерентность* полей. Что это означает? 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 . Для явлений интерференции наиболее интересен случай, когда частота остается неизменной (по крайней мере, в течение времени измерения), а амплитуда и фаза складывающихся колебаний изменяются. Такие колебания запишем в виде

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

Складывая два подобных колебания, получим:

$$E(t) = E_1(t) + E_2(t) = E_0(t) \cos[\omega t - \varphi_0(t)],$$

где

$$E_0(t) = \{E_{10}^2(t) + E_{20}^2(t) + 2E_{10}(t) \cdot E_{20}(t) \cos[(\varphi_1(t) - \varphi_2(t))]\}^{1/2} \quad (4)$$

Из (4) видно, что величина интерференционного члена зависит от *разности фаз колебаний в данной точке пространства*. Если фазы колебаний ведут себя таким образом, что за время измерения t косинус их разности много раз меняет знак, то интерференционный член равен нулю даже при постоянстве амплитуд колебаний. Действительно

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

и интегральный член стремится к нулю при $t \rightarrow \infty$.

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

$$\varphi_1(t) - \varphi_2(t) = \text{const}. \quad (5)$$

4. Условие (5) является *необходимым, но не достаточным* условием. Чтобы для гармонических колебаний оно стало достаточным, нужно 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, но в виде нестационарной ("плывущей") картины или в виде "биения" интерференционной картины (если время наблюдения интерференции достаточно велико).

2. Иногда разделяют понятия временной и пространственной когерентности. Временная когерентность предусматривает стабильность частоты колебаний (монокromaticность самих 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 для удаленных интерферирующих источников, в частности, для радиоастрономии. Даже при временной когерентности (неизменности частоты и фазы колебаний самих источников) на пути одного из источников может оказаться среда с изменяющимися в пространстве и времени оптическими характеристиками. Это приведет к пространственной некогерентности излучения в точке наблюдения.

3. Заметим, интерференция может происходить и в случае сложных негармонических колебаний, если разность их фаз (а, следовательно, разность фаз их спектральных составляющих) сохраняет постоянную величину!

5. Таким образом, можно дать следующее общее определение интерференции:

интерференция – это перераспределение энергии волн в пространстве, наблюдающееся в случае соблюдения следующих условий для складывающихся полей:

- равенства частот ($\omega_1 = \omega_2$),
- неперпендикулярности поляризаций (\mathbf{E}_1 не перпендикулярно \mathbf{E}_2) и
- когерентности (постоянства сдвига фаз) интерферирующих волн ($\varphi_1(t) - \varphi_2(t) = \text{const}$).

2. Описание установки

2.1. Микроволновый интерферометр

На рис. 1. изображена схема простейшего двулучевого СВЧ интерферометра. Сигнал СВЧ генератора через разветвитель 1 поступает в два плеча интерферометра – *опорное* (плечо 1) и *измерительное* (плечо 2). На входе каждого плеча помещены ферритовые вентили ФВ. Ферритовый вентиль – это однонаправленное устройство, пропускающее прямую волну и подавляющую волну, идущую в обратном направлении, что способствует стабильной работе генератора СВЧ (на его работу не влияют отраженные волны).

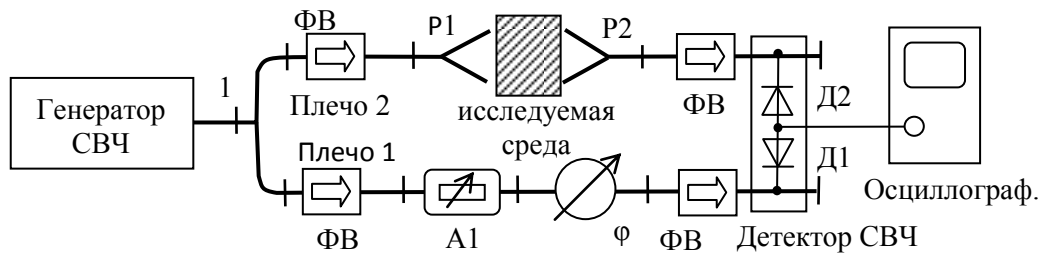


Рис. 1. Интерферометр СВЧ

ФВ – ферритовый вентиль, А – аттенюатор, Ф – фазовращатель,
Р1, Р2 – рупорные антенны, Д1, Д2 – детекторная секция.

В опорное плечо 1 интерферометра включены аттенюатор А1, позволяющий регулировать *величину* проходящего сигнала, и фазовращатель φ , позволяющий регулировать *фазу* проходящего сигнала. Далее сигнал плеча 1 еще через один ферритовый вентиль поступает в секцию СВЧ детектора (диоды Д1, Д2). (Принцип действия СВЧ детектора будет пояснен ниже)

В измерительное плечо 2 после ферритового вентиля включена система из двух рупорных антенн Р1 и Р2, в пространство между которыми помещается исследуемая среда. Среда в общем случае имеет комплексный показатель преломления, т.е. способна изменять как величину, так и фазу проходящего сигнала. В частности такой средой является плазма газового разряда (см. лабораторную работу № 10). В данной работе в качестве исследуемой среды используется набор пластин из оргстекла.

Вторая пара ферритовых вентилях, включенных в каждом плече перед диодной секцией, избавляют интерферометр от "сквозной" перекачки энергии поля из одного плеча в другое.

Сигналы обоих плеч векторно суммируются (интерферируют) в секции СВЧ детектора. На выходе детектора образуется постоянное напряжение, величина которого пропорциональна интенсивности интерференционного сигнала в точке расположения СВЧ диодов детектора.

Внимание. В нашем интерферометре применено **встречное** включение диодов Д1 и Д2 СВЧ детектора. Это означает, что при настройке интерферометра таким образом, чтобы сигналы обоих плеч были одинаковы по величине и фазе, суммарный сигнал детектора СВЧ, наблюдаемый на осциллографе, **будет равен нулю**. Если сигналы плеч не равны по величине и/или фазе, то наблюдаемый на осциллографе сигнал будет положительным или отрицательным

относительно нулевой линии осциллографа в зависимости от конкретного соотношения сигналов плеч.

2.2. Компоненты интерферометра.

1). В качестве **СВЧ генератора** в установке используется генератор на диоде Ганна. Описание принципа действия генератора на диоде Ганна можно найти в методическом пособии [1]. Выходной СВЧ сигнал генератора может быть модулирован низкочастотным сигналом прямоугольной формы (частота около 10 кГц). Модулированный сигнал обычно используется при настройке интерферометра; модуляция включается тумблером «Мод» установки. В этом случае на выходе СВЧ детектора вместо постоянного напряжения наблюдается прямоугольный сигнал, амплитуда которого пропорциональна интенсивности СВЧ поля в точке расположения диода.

2). **Ферритовый вентиль** [1] – устройство, обладающее односторонней проводимостью для СВЧ поля. Вентили позволяют избавиться от отраженных волн в плечах интерферометра.

3). **Аттенюатор** [1] ослабляет амплитуду проходящего сигнала без изменения его фазы.

4). **Фазовращатель**, наоборот, изменяет фазу проходящего сигнала φ , не меняя его амплитуды.

5). **СВЧ детектор**. В простейшем случае детектор СВЧ поля представляет собой полупроводниковый диод, способный работать в СВЧ диапазоне волн [1]. Детектор вместе с волноводной секцией, в которую он помещен, образует детекторную головку. Простейшее устройство детекторной головки представляет собой отрезок волновода, замкнутый с одной стороны заглушкой, на расстоянии $\lambda/4$ от которой расположен СВЧ диод. Таким образом, диод оказывается в максимуме электрической напряженности поля в головке.

В данном случае детекторная секция представляет собой смеситель двух волн, поступающих по плечам интерферометра. Диоды данного смесителя включены таким образом, что сигналы плеч вычитаются: при равенстве амплитуд и фаз приходящих сигналов суммарный сигнал СВЧ детектора равен нулю.

Таким образом, если в отсутствии исследуемой среды между рупорами P1 и P2 с помощью регулируемого аттенюатора A1 и фазовращателя φ (рис. 1) настроить интерферометр так, чтобы суммарный сигнал детекторной головки был равен нулю, то любой сдвиг фазы или изменение интенсивности волны в измерительном плече 2 интерферометра, возникающие в среде, помещенной далее между рупорами P1 и P2 приведет к появлению сигнала в детекторной головке, пропорционального разностному члену интерференции.

6). **Открытый резонатор**. Измерительное плечо содержит открытое пространство между двумя круглыми рупорами, в которое помещается исследуемая среда. Обычно плазменный резонатор, помещаемый между рупорными антеннами, представляет собой канал круглого сечения (например, стеклянную колбу с газом, в котором зажигается разряд). Поэтому рупорные антенны P1 и P2 также имеют круглое сечение с плавным переходом в прямоугольное сечение волновода. Плавный переход осуществляется таким образом, чтобы сохра-

нить в антенне и в пространстве между антеннами тот же тип волны, что и в прямоугольном волноводе, то есть сохранить ту же поляризацию СВЧ поля.

В данной работе (Л.р. №9) в качестве исследуемой среды в промежутке между рупорами размещается набор пластин одинаковой толщины из оргстекла; в работе №10 – стеклянная колба, в которой находится плазма, образованная путем безэлектродного разряда в колбе.

3. Измерение диэлектрической проницаемости пластины переменной толщины из оргстекла

3.1. Метод измерения

Исследуемая среда – набор пластинок из оргстекла одинаковой толщины δ – помещается в пространство между рупорами в измерительном плече интерферометра. Оптическая длина пути L в среде с показателем преломления $n = \sqrt{\varepsilon}$ равна $L = nl$, где l – геометрическая длина пути. Таким образом, среда с относительным показателем преломления $n > 1$ увеличивает оптическую длину пути по сравнению с геометрической. За счет этого происходит дополнительное *смещение фазы* в измерительном плече интерферометра. По величине смещения фазы можно определить n , а, следовательно, и ε .

Метод определения ε заключается в следующем. Пусть в пространстве между рупорами на длине l укладывается m длин волн (рис. 2, а пунктирная кривая). Если в это пространство поместить диэлектрик с показателем преломления $n > 1$, то фазовая скорость становится меньше c : $u = c/n$, что эквивалентно увеличению оптической длины пути до величины $L = nl$. В результате в плече 2 интерферометра "набегает" лишняя фаза.

Пусть длина l подобрана такой, что на этом расстоянии набег фазы равен π , что в длинах волн составляет половину длины волны $\lambda/2$, где λ – длина волны излучения в свободном пространстве (рис. 2, а сплошная кривая).

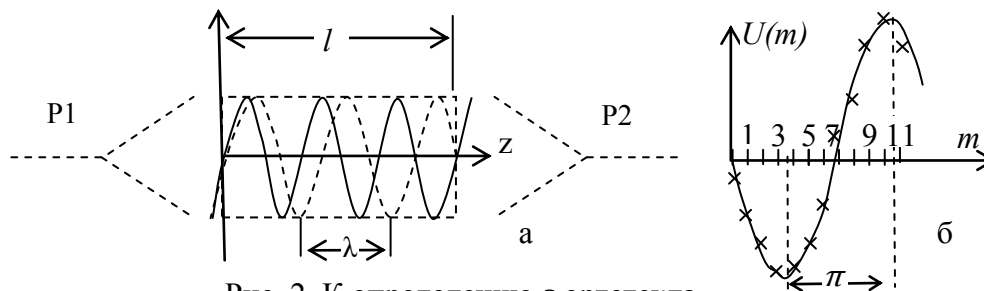


Рис. 2. К определению ε оргстекла

В этом случае получаем простые расчетные соотношения для определения ε :

$$(L - l) = \lambda/2 = (n - 1)l, \text{ и } \varepsilon = n^2 = (\lambda/2l + 1)^2. \quad (6)$$

3.2. Учет влияния отражения волны от границы раздела сред

При выводе формулы (6) не учтено отражение СВЧ сигнала от передней поверхностей пластинки. Отраженный сигнал будет интерферировать с падающим сигналом рупора P1, и учесть это влияние теоретически довольно сложно. Однако его легко устранить следующим образом. Описанную выше настройку интерферометра на нулевой сигнал детекторной головки (на выравнивание сигналов плеч 1 и 2 интерферометра) можно производить не при пустом пространстве между рупорами, а в присутствии одной пластинки исследуемого диэлектрика, "прижатой" к рупору 1. В этом случае интерферометр будет настроен на нулевой сигнал уже с учетом отраженного сигнала от пластинки. Если сейчас к этой пластинке вплотную приставлять другие, то они уже не будут образовывать дополнительного отражения от передней грани пластины, а будут только сдвигать фазу проходящего сигнала в соответствии с толщиной добавочных

пластин.

Более подробная теория прохождения СВЧ сигнала через пластинки различной толщины изложена в приложении.

4. Задания.

1. Подключите выход СВЧ-детектора к входу СН1 осциллографа. Включите установку и осциллограф.

Внимание: в процессе всей работы в измерительном плече интерферометра должна быть помещена одна пластинка из оргстекла, "прижатая" к выходу рупора 1. Это вызвано необходимостью устранить влияние на расчетный результат отраженного от передней грани пластинок сигнала.

2. **Настройка сигнала измерительного плеча.** Введите аттенуатор в опорном плече 1 интерферометра на полный оборот. Этим мы исключим прохождение СВЧ сигнала по опорному плечу. Осциллограф в этом случае зафиксирует сигнал только измерительного плеча интерферометра. (Измерения удобнее производить при включенной модуляции СВЧ сигнала прямоугольным импульсом – тумблер "Мод." генератора включен. В этом случае интенсивность сигнала можно измерять по амплитуде прямоугольного импульса, снимаемого с детекторной головки).

3. **Настройка сигнала опорного плеча** Введите в *измерительное* плечо специальную металлическую пластинку, полностью преграждающую путь для СВЧ-волны по измерительному плечу. Выведите аттенуатор *опорного* плеча таким образом, чтобы на осциллографе был зафиксирован сигнал, равный предыдущему по модулю и противоположный по знаку.

Это будет означать, что мы настроили опорное плечо таким образом, что по нему проходит сигнал, равный сигналу в измерительном плече (конечно, без металлической пластинки).

4. Удалите металлическую пластинку из измерительного плеча. В этом случае сигналы в обоих плечах должны быть одинаковы и осциллограф должен показывать нулевой сигнал. (Напомним: диоды СВЧ-детектора включены встречно и при равенстве сигналов в плечах результирующий сигнал детектора равен нулю). На самом деле может оказаться, что суммарный сигнал детектора не равен нулю, поскольку в интерферометре существуют некоторые дополнительные влияния, например, отражения от металлической пластинки при выполнении предыдущего задания. Поэтому некоторый "ненулевой" сигнал СВЧ-детектора нужно дополнительно скомпенсировать небольшим вращением ручки *фазовращателя*.

5. Добавляем последовательно 1, 2, ... 11 пластинок оргстекла вплотную к первой, каждый раз фиксируя сигнал осциллографа: U_1, U_2, \dots, U_{11} .

6. Строим зависимость $U_m = f(m)$ (рис. 2, б), где m – номер добавляемых пластинок. По полученному графику определяем количество пластинок, обеспечивающих сдвиг фазы на π , и рассчитываем ε оргстекла.

Примечания. 1. Количество пластинок (12 шт.) достаточно для того, чтобы обеспечить сдвиг фазы в измерительном плече интерферометра более чем на π , т.е. удлинить оптический путь более чем на $\lambda/2$. Однако, наибольшая точность определения ε получается в том случае, когда мы можем максимально точно определить расстояние между максимумом и минимумом кривой $U_m = f(m)$. Это зависит от положения начальной точки данной кривой, полученной при-

бавлением первой пластинки В свою очередь, начальную точку можно установить подстройкой фазовращателя (см. пункт 4 Задания).

Литература

1. Л.Н. Смирных. Методическое пособие по СВЧ оптике. Часть 1. НГУ, 2011 г.
2. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. Учеб. Пособие для ун-тов. – М.: Высш. шк. 1978. – 383 с.
3. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ. –М.: Высш. шк., 1990 – 335 с
4. Подгорный И.М. Лекции по диагностике плазмы. – М.: Атомиздат, 1968. 220 с.
5. М. Хилд, С. Уортон. Микроволновая диагностика плазмы. /Пер. с англ. под ред. И.С. Шпигеля. – М.: Атомиздат, 1968. – 392 с.
6. Диагностика плазмы. Под ред.Р. Хаддлстоуна и С. Леонарда. Пер. с англ. – М.: Мир, 1967. – 516 с.
7. Диагностика плазмы. Сборник статей. Под ред.акад. Б.П. Константинова. – М.: Госатомиздат, 1963. – 302 с.
8. Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны. Пер. с англ. – М.: ИЛ, 1960. – 438 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ: прохождение СВЧ сигнала через диэлектрическую пластинку

1. Амплитудные соотношения при падении волны на границу раздела сред. Рассмотрим случай нормального падения волны на границу раздела двух сред, характеризующихся параметрами $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2$, $\mu_1 = \mu_2 = 1$, (где $\mu_1 = \mu_2$ – магнитные проницаемости сред). Фазовые скорости волны в средах будут соответственно равны $u_1 = c/\sqrt{\varepsilon_1} = c/n_1$ и $u_2 = c/\sqrt{\varepsilon_2} = c/n_2$. Условимся векторы \mathbf{E} и \mathbf{H} для падающей волны писать без индексов, для отраженной – с индексами 1 ($\mathbf{E}_1\mathbf{H}_1$) и для прошедшей – с индексами 2 ($\mathbf{E}_2\mathbf{H}_2$).

Тогда с учетом того, что векторы $\mathbf{E}_i, \mathbf{H}_i, \mathbf{k}_i$ (где \mathbf{k} – волновой вектор, соответствующий направлению распространения волны) составляют правовинтовую тройку, для случая нормального падения на границу раздела будем иметь:

$$\begin{aligned} E_{00} + E_{10} &= E_{20}, & H_{00} &= E_{00}/n_1, & H_{20} &= E_{20}/n_2, \\ H_{00} - H_{10} &= H_{20}, & H_{10} &= E_{10}/n_1, \end{aligned}$$

или

$$E_{10} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} E_{00}, \quad E_{20} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} E_{00}, \quad (7)$$

Для границы раздела воздух-диэлектрик амплитуды отраженной и прошедшей волны будут соответственно равны:

$$E_{10} = \frac{1-n}{1+n} E_{00}, \quad E_{20} = \frac{2}{1+n} E_{00}, \quad (8)$$

Сделаем оценку для границы раздела воздух-оргстекло. Для различных марок оргстекла можно принять $\varepsilon \approx 3 \dots 4$, коэффициент преломления $n \approx 1.73 \dots 2.0$ и амплитуды отраженной и прошедшей волн при нормальном падении составят: $E_{10} = -(0.27 \dots 0.33)E_{00}$, $E_{20} = (0.73 \dots 0.67)E_{00}$. В дальнейших оценочных расчетах принимаем для оргстекла $E_{10} = -0.3E_{00}$, $E_{20} = 0.7E_{00}$.

Внимание: 1) Знак минус для отраженной волны означает, что при $n_2 > n_1$ (переход из воздуха в оргстекло) отраженная волна оказывается в противофазе (теряет полуволну $\lambda/2$).

2) При $n_1 > n_2$ (переход из оргстекла в воздух) отраженная волна синфазна с падающей.

3) Проходящая волна сохраняет фазу (синфазна) во всех случаях.

4) Если среды имеют "омические" потери, то показатели преломления становятся комплексными и изменение фазы на границе раздела перестает быть кратным π . Для оргстекла омическими потерями можно пренебречь.

2. Энергетические соотношения. Для энергетических характеристик волны вводят понятия коэффициентов отражения R и пропускания T :

$$R = \frac{\left\langle \frac{c}{4\pi} E_1 H_1 \right\rangle}{\left\langle \frac{c}{4\pi} E H \right\rangle}, \quad T = \frac{\left\langle \frac{c}{4\pi} E_2 H_2 \right\rangle}{\left\langle \frac{c}{4\pi} E H \right\rangle},$$

Используя ранее введенные значения для $E_{1,2}$, $H_{1,2}$, имеем:

$$R = \left(\frac{E_{10}}{E_{00}} \right)^2 = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2, \quad T = \frac{n_2}{n_1} \left(\frac{E_{20}}{E_{00}} \right)^2 = \frac{4n_2 n_1}{(n_1 + n_2)^2}, \quad R + T = 1, \quad (9)$$

Для рассмотренного выше случая перехода воздух-оргстекло имеем: $R = 0.07 \dots 0.11 \approx 0.09$ и $T = 0.93 \dots 0.89 \approx 0.91$.

Таким образом, волна, проходящая из воздуха в оргстекло, за счет отражения теряет по амплитуде $\approx 30\%$ и по энергии $\approx 10\%$.

3. Прохождение излучения через пластинку. В случае конечной толщины второй среды волна, отраженная от второй границы (на выходе из пластинки в воздух), может оказаться в фазе или противофазе с отражением от первой границы. В зависимости от этого суммарное отражение от двух границ может оказаться как больше, так и меньше, чем от одной (эффект "просветления").

1). **Отражение от пластинки с $n_{пл} > n_0$,** где $n_{пл}$, n_0 – показатели преломления пластинки и воздуха соответственно. Пусть толщина пластинки l , а ее оптическая толщина L составляет $\lambda/4$:

$$L = n_{пл} l = \lambda/4.$$

Тогда волна, отраженная от *передней* грани пластинки, будет в *противофазе* с падающей (поскольку $n_2 > n_1$). Отражение от *задней* поверхности пластинки *синфазное* с падающей на нее волной (поскольку здесь $n_2 < n_3 = n_1$).

Рассмотрим суммарную отраженную волну на передней грани пластинки при однократном отражении от границ. Хотя волна, отраженная от задней поверхности пластинки, синфазна с падающей, но она дважды прошла пластинку в $\lambda/4$, а, следовательно, общий сдвиг ее фазы по отношению к падающей составляет π .

Таким образом, волны, отраженные от передней и задней поверхности пластинки, в случае пластинки толщиной в $\lambda/4$ синфазны. То есть *суммарное ослабление прошедшей через пластинку волны увеличивается*.

2). Пусть оптическая толщина пластинки $L = n_{пл} l = \lambda/2$. В этом случае отраженная от задней поверхности волна возвращается в той же фазе, что и падающая на нее и, соответственно, в противофазе с отраженной от передней поверхности пластинки. Поэтому волны, отраженные от передней и задней поверхности пластинки взаимно гасят друг друга. То есть суммарная отраженная волна будет меньше, чем от одиночной границы раздела сред. Следовательно, энергия (и амплитуда) проходящей через пластинку волны возрастет. Реализуется эффект "просветления" оптики.

На самом деле на пластинке в воздухе эффекта "просветления" в чистом виде не происходит, т.е. отраженная волна не "зануляется" даже в модельном чисто теоретическом расчете. Причина в том, что теоретически полное "просветление" наступает лишь в том случае, если за пластинкой находится среда с коэффициентом $n_3 \neq n_1$, а точнее $n_3 > n_1$. В этом случае при $n_3 = \sqrt{n_2}$ происходит *полная* компенсация волн отраженных от передней и задней граней пластинки (полный теоретический эффект просветления).

Для пластинки в воздухе $n_3 = n_1 = 1$, и мы приходим к тривиальному результату полного "просветления" (отсутствия отраженной волны) лишь в случае, когда коэффициент преломления пластинки равен $n_3 = \sqrt{n_2} = 1$, т.е. коэффициенту преломления воздуха. Иначе говоря, полное "просветление" реализуется тогда, когда пластинки просто нет и волна проходит данное пространство без всякого отражения. Поэтому при реальном "просветлении" оптики на переднюю грань стекла наносят четвертьволновый слой из вещества с другим показателем преломления, чем стекло.

Аналогичный эффект "просветления", т.е. отсутствия отражения от границы перехода сред, реализуется и для звуковых волн. Однако там условием отсутствия отражения будет равенство акустических сопротивлений сред: $\rho_1 C_1 = \rho_2 C_2$, где ρ и C – плотность и скорость звука среды 1 и 2 соответственно.

Лабораторная работа № 10

Исследование параметров плазменного разряда с помощью микроволнового интерферометра

Цель работы – Исследование параметров плазменного разряда с помощью микроволнового интерферометра.

Оборудование: установка "Микроволновый интерферометр"; осциллограф типа Tektronix TDS2024; ВЧ генератор плазменного разряда; блоки питания.

1. Введение

Интерферометрические методы измерения обладают высокой чувствительностью и точностью. Микроволновые интерферометры, работающие в диапазоне СВЧ волн, успешно применяются для измерения комплексной диэлектрической проницаемости различных сред, в том числе низкотемпературной плазмы, новых полупроводниковых и диэлектрических материалов и пр. В данной работе микроволновый интерферометр применен для исследования характеристик безэлектродного плазменного разряда (плазмы), созданного ВЧ генератором. Для измерения применен так называемый "метод отсечки".

1.1. Прохождение СВЧ волн через низкотемпературную плазму

1. *Плазма* – четвертое состояние вещества наряду с твердым, жидким и газообразным. В отличие от привычных нам земных условий в космическом масштабе вещество Вселенной находится в основном в плазменном состоянии.

Представление о всех четырех состояниях вещества можно составить опираясь на представление о роли температуры. С ростом температуры твердое вещество переходит в жидкое, а затем – в газообразное. При дальнейшем повышении температуры молекулярное состояние газа переходит в атомарное, а еще больший рост температуры (энергии хаотического соударения атомов) приводит к ионизации атомов с образованием плазмы из электронов и ионов. Поскольку энергия ионизации атомов порядка 10 эв, а 1 эв соответствует температуре 11600 К, то температура плазмы, образуемой *термическим нагревом*, составляет примерно 10^5 К.

Однако плазма может быть получена не только термическим нагревом, но также за счет ионизации излучением (фотоионизация), бомбардировкой газа заряженными частицами, ионизацией в ВЧ (высокочастотном) поле.

Мы будем иметь дело с *низкотемпературной* плазмой, полученной ВЧ ионизацией газа, т.е. с плазмой при $T \sim 10^5$ К и тепловой энергией электронов ~ 10 эв. Введем основные понятия, используемые для характеристики процессов, происходящих в плазме.

2. *Дебаевский радиус экранирования*. Часто плазму в общем случае определяют как ионизованный газ, но в более узком смысле слова между этими состояниями среды имеется существенное отличие. Различие между плазмой и обычным ионизованным газом производят с помощью понятия о *дебаевском радиусе экранирования*. Что это такое?

Поскольку ионизованный газ (и плазма) в целом нейтральны, то каждая частица данного знака заряда оказывается окруженной слоем из частиц противоположного знака заряда, сформированным таким образом, что система частица плюс слой не дает дальнедействующего электрического поля. Это происходит потому, что электрическое поле такой системы спадает экспоненциально по радиусу за пределами облака:

$$E(r) = \frac{e}{r} \exp\left(-\frac{r}{\lambda_D}\right), \quad (1)$$

где λ_D – дебаевский радиус экранирования.

Заряженными частицами в плазме обычно являются электроны и положительные ионы, тогда как в ионизованном газе (особенно в смеси, включающей газы с высоким сродством к электрону и при температуре значительно меньше, чем температура ионизации газа) они чаще всего представлены положительными и отрицательными ионами. Отличие ионов от электронов (как носителей электрического тока) определяется значительным отличием их подвижности. Если температура ионов и электронов одинакова, то одинакова энергия их теплового движения:

$$\frac{M\langle v_i \rangle^2}{2} = \frac{m\langle v_e \rangle^2}{2} \approx kT,$$

где M и m – масса иона и электрона соответственно $\langle v_i \rangle$ и $\langle v_e \rangle$ – их средняя тепловая скорость, k – постоянная Больцмана, T – температура.

Из последнего равенства следует, что $\langle v_e \rangle / \langle v_i \rangle \approx \sqrt{M/m}$. Если, например, положительными ионами являются молекулярные ионы азота N_2 с массовым числом $2 \cdot 14 = 28$, то $\sqrt{M/m} = \sqrt{1836 \cdot 28/1} \approx 230$, т.е. средняя тепловая скорость электрона в 230 раз больше, чем иона.

Примечание. В нашей установке положительными ионами являются ионы ртути, поэтому отношение $\langle v_e \rangle / \langle v_i \rangle$ для такой плазмы еще выше (определите его величину самостоятельно).

Если в такую среду поместить небольшую проводящую сферу, то начальный поток тепловых электронов на него будет примерно в 230 раз больше, чем ионов. Поскольку заряженные частицы при столкновении с проводящей поверхностью отдадут ей свой заряд, то сфера начнет быстро заряжаться отрицательно, и этот процесс продолжится до тех пор, пока поле отрицательного заряда сферы не уравнивает величину тепловых потоков на нее ионов и электронов. При этом вокруг сферы образуется слой с преобладанием положительно заряженных ионов над электронами и сфера вместе с этим слоем будет квазинейтральным объектом. Толщина слоя и есть толщина *дебаевского радиуса экранирования*.

Понятие дебаевского радиуса экранирования позволяет более точно определить, что такое плазма и обычный ионизованный газ. Плазма – это такое состояние ионизованной среды, в которой дебаевский радиус экранирования много меньше объема, занятого плазмой.

В простейшем случае электрон-ионной плазмы дебаевский радиус экранирования равен [4]

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{kT}{4\pi e^2 n}} = 7,5 \cdot 10^2 \sqrt{\frac{T(\text{эВ})}{n(\text{см}^{-3})}} \quad (2)$$

где n – концентрация заряженных частиц в среде. При выводе формулы (2.П) предполагается, что длина свободного пробега для ионов и электронов в газе больше дебаевского радиуса.

Таким образом, дебаевский радиус экранирования определяется концентрацией заряженных частиц и их температурой: чем больше концентрация, тем меньше дебаевский радиус. Например, в плазме безэлектродного разряда, исследуемого в нашей установке, концентрация электронов в процессе горения плазмы достигает величины $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и выше (зависит от интенсивности работы ВЧ генератора) и для нее дебаевский радиус экранирования составляет $\lambda_D \sim 10^{-4} \text{ см}$. Длина пробега при давлении 10...100 мл. рт. ст. примерно на три порядка больше, т.е. плазму горящего разряда можно считать бесстолкновительной

3. Квазинейтральность плазмы. Поскольку "выравнивающие" электрические силы, действующие на ионы и электроны, весьма велики, то обычно плазма находится в квазинейтральном состоянии. Это означает, что объемное распределение плотности ионов и электронов таково, что электрическое поле внутри плазмы на размерах, превышающих размер дебаевского слоя, в среднем равно нулю, а концентрации ионов и электронов равны $n_e = n_i$.

4. Степень ионизации – это отношение числа ионов к полному числу атомов $\alpha = n_e/n_0$. Чем выше температура, или интенсивней ВЧ поле разряда, тем больше степень ионизации.

5 Плазменная частота. Если в части плазмы создать каким-либо образом объемный заряд, то из-за дальнего действия электрических сил взаимодействие происходит не только между соседними заряженными частицами плазмы (ионами и электронами), но распространяется на большие расстояния. Поэтому плазму можно рассматривать как *упругую среду*, в которой легко возбуждаются различные коллективные колебания, волны и шумы. Наиболее характерны для плазмы *ленгмюровские волны* – продольные колебания пространственного заряда с плазменной (ленгмюровской) частотой

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_0 m}} \quad (3)$$

где n [см^{-3}] и m [г] – концентрация и масса электронов, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная.

Подставив константы, получаем значение плазменной частоты

$$\omega_p = 5,638 \cdot 10^4 \sqrt{n} \text{ или } f_p = 8973 \sqrt{n} \text{ Гц} \quad (3')$$

где n в см^{-3} .

6. Диэлектрическая проницаемость плазмы. В общем случае при отсутствии магнитного поля относительная диэлектрическая проницаемость плазмы зависит от концентрации электронов и частоты их столкновений и имеет комплексный характер

$$\varepsilon = 1 - \frac{e^2 n_e}{\varepsilon_0 m_e \omega^2} \cdot \frac{1}{1 - i \frac{\nu_{cm}}{\omega_p}}, \quad (4)$$

где ν_{cm} – частота столкновений электронов. Она определяется концентрацией и температурой заряженных частиц:

$$\nu_{cm} = \frac{2 \cdot 10^{-5} n_i Z}{T_e^{3/2}},$$

где T_e – в эВ.

Но если частота СВЧ излучения ω значительно превышает частоту столкновений (что справедливо для нашей плазмы), то соударениями можно пренебречь, и формула (4) с учетом выражения (3) для ω_p перейдет в формулу

$$\varepsilon = 1 - \frac{e^2 n_e}{\varepsilon_0 m_e \omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} = 1 - \frac{n}{n_{кр}}. \quad (4')$$

7. Критическая частота и критическая плотность плазмы. Из формулы (4') видно, что при $\omega = \omega_p$ диэлектрическая проницаемость и, соответственно, коэффициент преломления плазмы обращаются в нуль. При дальнейшем увеличении концентрации электронов коэффициент преломления плазмы $N = \sqrt{\varepsilon}$ становится мнимым. Это означает, что СВЧ поле перестает проникать в плазму (точнее, проникает в нее только на расстояние дебаевского радиуса экранирования).

Концентрация электронов, начиная с которой СВЧ волна полностью отражается плазмой, т.е. выполняется условие $\omega = \omega_p$, называется **критической частотой** $\omega_{кр}$, а соответствующая ей концентрация электронов – **критической концентрацией** $n_{кр}$. Используя выражение (3) для плазменной частоты f_p и учитывая соотношение $f = c/\lambda$, получим критическое значение концентрации плазмы:

$$n_{кр} = \left(\frac{c}{\lambda \cdot 8973} \right)^2 \approx 1,1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}, \quad (5)$$

где $\lambda = 3,2$ см – длина волны СВЧ излучения в нашей установке.

8. Прохождение СВЧ излучения через плазменный промежуток. Итак, СВЧ излучение проходит через плазму лишь в том случае, когда его частота больше плазменной: $\omega_{свч} > \omega_p$. В этом случае плазма представляет для него среду с диэлектрической проницаемостью ε , определяемой формулой (4'), зависящей от концентрации электронов в плазме. Чем выше концентрация электронов, тем больше ε и тем больше коэффициент преломления плазмы, т.е. скорость распространения СВЧ излучения в плазме $u = c/\sqrt{\varepsilon} = cN$. Из формулы (4) и соотношения $\omega_{свч} > \omega_p$ следует, что фазовая скорость распространения СВЧ излучения в плазме выше скорости света $u = cN$.

Если геометрический размер разрядного промежутка равен l , а коэффици-

ент преломления плазмы $N = \sqrt{\varepsilon}$, то оптический путь разрядного промежутка будет равен $L = Nl$ и разность хода, приобретаемая лучом, проходящим по плазме, составит

$$\Delta l = L - l = L = (N - 1)l.$$

Соответствующий набег фазы излучения, прошедшего через плазменный промежуток в одном из плеч интерферометра, может быть определен из соотношения $\Delta l/\lambda = \varphi/2\pi$

$$\varphi = 2\pi \Delta l/\lambda. \quad (6)$$

2. Экспериментальная установка

Внешний вид установки "Микроволновый интерферометр с плазменным разрядом" приведен на фото 1 и 2 (плазма ВЧ разряда), а принципиальная схема интерферометра на рис. 1.



Фото 1. Общий вид установки

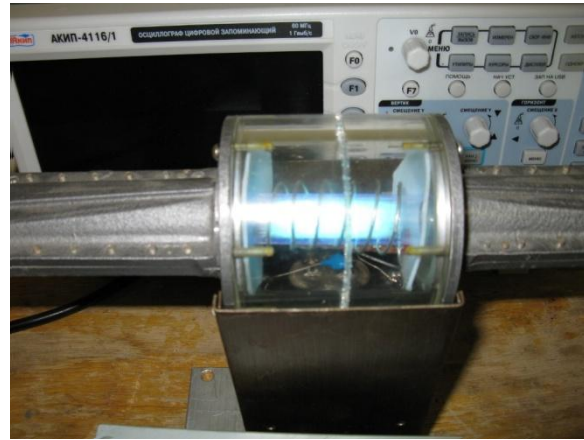


Фото 2. Колба с ВЧ-разрядом (плазмой)

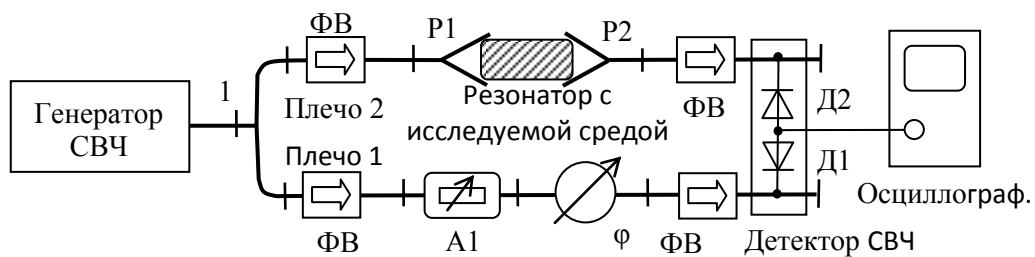


Рис. 1. Микроволновый интерферометр

ФВ – ферритовый вентиль, А – аттенюатор, Ф – фазовращатель,

Описание устройства и принципа действия микроволнового интерферометра приведено в лабораторной работе №9. Интерферометр данной работы отличается лишь тем, что в раскрытые рупоры его измерительного плеча размещена стеклянная колба с парами ртути. Кроме того, в установку входит генератор ВЧ колебаний (рабочая частота $f \approx 40$ МГц), служащий для создания в колбе плазмы безэлектродного разряда.

2.1. Создание низкотемпературной плазмы в резонаторе.

Пусть имеется цилиндрическая стеклянная колба с газом (например, воздухом) при давлении – $10^{-4} \dots 10^{-5}$ мм ртутного столба, помещенная в катушку ВЧ генератора (рис. 2). В колбе имеется маленький шарик ртути, который при нагревании в ВЧ поле генератора испаряется, повышая давление газа (паров ртути) в колбе примерно до 1 мм. рт. ст. (133 Па в СИ).

При включении ВЧ генератора в колбе возникает ВЧ-разряд, давление паров ртути повышается и образуется низкотемпературная плазма с концентрацией ионов и электронов $n_e \approx n_i \leq n_0$, где n_e – концентрация электронов, n_i – концентрация ионов, n_0 – концентрация паров ртути.

Оценим примерную концентрацию электронов в колбе. При давлении 1 мм ртутного столба концентрация молекул газа равна примерно $n_0 = 10^{16}$ см⁻³, а

концентрация зарядов примерно на порядок меньше (принимая степень ионизации $\alpha \approx 0.1$). Таким образом, в ВЧ разряде $n_e \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (зависит от интенсивности генератора ВЧ-разряда).

В соответствии с формулой (3') для такой концентрации плазменная частота $f_p \approx 100 \text{ ГГц}$, т.е. больше, чем частота нашего 3-х сантиметрового СВЧ генератора: $f_p > f_{\text{СВЧ}} \approx 9,375 \text{ ГГц}$). Иными словами, концентрация электронов в плазме выше критической и СВЧ излучение не проходит через плазменный резонатор. Плазма в измерительном плече 2 интерферометра (рис. 2) будет действовать как "проводящая пластина", отражающая СВЧ волну.

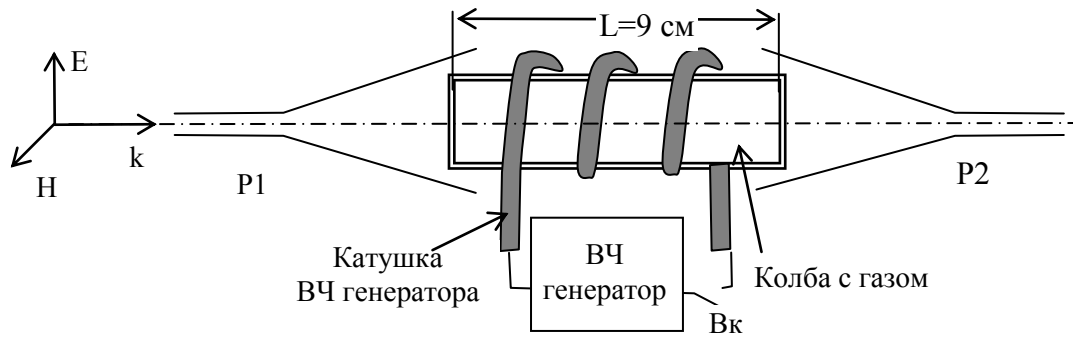


Рис. 2. Плазменный резонатор в СВЧ поле

После отключения ВЧ генератора (ключ Вк на рис. 1) концентрация заряженных частиц в плазме начнет уменьшаться примерно по экспоненциальному закону за счет рекомбинации зарядов. Как только она станет меньше критической $n_{кр} \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (см. формулу 5), плазменная частота станет меньше частоты СВЧ генератора и его излучение начнет проходить по плечу 2, интерферируя с лучом плеча 1. Поскольку диэлектрическая проницаемость плазмы ϵ зависит от концентрации электронов, то от нее будет зависеть и набег фазы волны после прохождения длины разрядного промежутка (6). За время полной релаксации плазмы (за время полной рекомбинации ионов и электронов) в колбе после выключения ВЧ генератора интерференционный сигнал может совершить несколько колебаний, т.е. .

3. Настройка интерферометра

1. Подключаем выход СВЧ-детектора интерферометра к входу СН1 осциллографа (чувствительность канала ≈ 500 мВ/дел), а к входу СН2 – сигнал синхроимпульса генератора ВЧ (чувствительность канала ≈ 10 В/дел).

2. Не включая генератор ВЧ, вводим полностью аттенюатор в опорном плече интерферометра. В этом случае сигнал в СВЧ-детектор будет проходить только по измерительному плечу. Вращением фазовращателя добиваемся максимального сигнала на осциллографе (сигнал отрицательный по знаку).

3. Уменьшаем затухание, вводимое аттенюатором в опорном плече (вращаем его против часовой стрелки), добиваясь того, чтобы по опорному плечу интерферометра проходил сигнал СВЧ колебаний равный сигналу, проходящему по измерительному плечу. В этом случае суммарный сигнал на входе СН1 осциллографа будет равен нулю. (Напоминаем: диоды СВЧ-детектора включены встречно и поэтому при равенстве сигналов в обоих плечах интерферометра сигнал детектора равен нулю – смотри описание интерферометра в работе 12.1).

4). Выключаем модулятор СВЧ сигнала: на экране осциллографа должна остаться только нулевая линия луча.

Измерение характеристик плазменного разряда.

1. Включаем ВЧ генератор: в колбе зажигается яркий плазменный разряд. Генератор ВЧ выходит на свой оптимальный режим работы в течение примерно 3...4 минут. Концентрация плазмы при этом становится выше критической и СВЧ сигнал через измерительное плечо перестает проходить. На входе СН1 осциллографа при этом появляется постоянный положительный сигнал, соответствующий прохождению луча только по опорному плечу интерферометра.

2. Переводим осциллограф в режим однократной записи сигнала с запуском по входу СН2 и режимом работы по постоянному току (режим DC канала).

3. Выключаем ВЧ генератор. Его синхроимпульс при этом запускает развертку осциллографа (режим развертки 1 мс/дел) и на экране фиксируется кар-

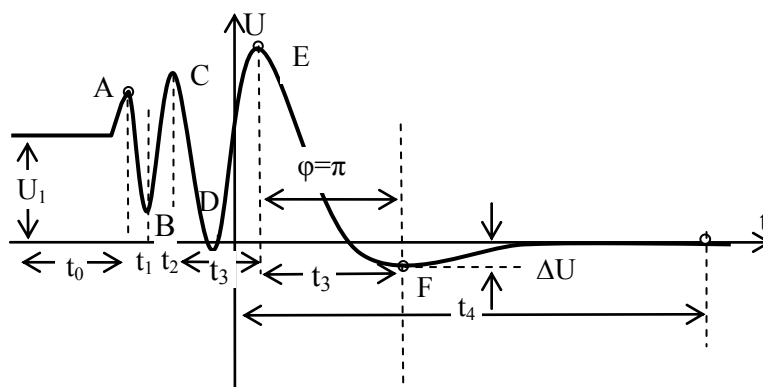


Рис. 3. Сигнал интерферометра

тина уменьшения концентрации плазмы разряда, примерный вид которой показан на рис. 3. Записываем полученные данные в файл осциллографа.

4. Повторяем предыдущие пункты а)... в) измерения несколько (4...6) раз для получения усредненных параметров плазменного разряда.

Анализ полученных данных. Проанализируем поведение плазмы в разряд-

ном промежутке, зафиксированное на осциллограмме рис. 3.

Примечание. Реальная интерферограмма определяется режимом работы генератора ВЧ разряда и может отличаться от приведенной на рис. 3.

В начальный период времени t_0 после выключения ВЧ генератора сигнал интерферометра U_1 соответствует запертому состоянию измерительного канала, поскольку концентрация плазмы в разряде остается пока выше критической. Поэтому на экране мы видим прямую линию, смещенную от нулевой на величину U_1 , соответствующую сигналу в опорном плече интерферометра. В точке А концентрация плазмы падает до уровня критической и СВЧ излучение начинает проходить через измерительный канал интерферируя с сигналом опорного плеча интерферометра. Однако амплитуда сигнала, проходящего в измерительном плече, меньше амплитуды в опорном из-за поглощения сигнала в плазме. Сигнал достигает максимума (точка А), когда сигналы по обоим плечам интерферометра приходят в фазе. Но если концентрация заряженных частиц в плазме достаточно велика, хотя уже ниже критической, то набег фазы на длине плазменного промежутка кратен $2\pi n$, где n – число полных набегов фаз на длине плазменного промежутка. С дальнейшим уменьшением концентрации диэлектрическая проницаемость плазмы уменьшается (4'), и уменьшается величина поглощения СВЧ сигнала в плазме. Это приводит к уменьшению кратности набегу фазы и к росту амплитуды сигнала. В плазме, сигнал которой отображен на рис. 3, начальная концентрация такова, что $n = 2$.

По условиям калибровки интерферометра сигнал достигает максимума (напряжение $\approx 2U_1$) в том случае, когда сигналы опорного и измерительного плеча находятся в противофазе. Когда они в противофазе и амплитуды их равны, сигнал на осциллографе должен быть равен нулю. Однако из-за сложности раздельной калибровки интерферометра по амплитуде и фазе сигнала, обычно точно скомпенсировать сигналы не удастся. Поэтому сигнал на рис. 3 в точках минимума уходит несколько ниже нуля.

Однако нас интересует не сама амплитуда проходящего сигнала, а изменение разницы фаз между сигналом измерительного и опорного плеча. Плазма в пренебрежении соударениями имеет показатель преломления N (6, 7):

$$N = \sqrt{\varepsilon} = \sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f_{СВЧ}^2}} = \sqrt{1 - \frac{n(t)}{n_{кр}}}$$

Здесь $n_{кр} = 1,1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ – критическая концентрация плазмы в момент времени t_1 , начиная с которой излучение будет проходить через нее, $n(t)$ – уменьшающаяся концентрация электронов плазмы, начиная с момента времени t_1 . В момент времени t_1 плазменная частота равна частоте СВЧ сигнала $f_p = f_{СВЧ}$, а далее плазменная частота становится меньше частоты СВЧ сигнала в соответствии с уменьшением концентрации (3).

Таким образом, показатель преломления плазмы N изменяется от 0 (на самом деле примерно от 0,1 из-за соударений) до 1 по мере уменьшения концентрации электронов. Соответственно этому меняется во времени и разность фаз между сигналом в измерительном и опорном плече интерферометра.

По времени изменения фазы сигнала на π , зная геометрическую длину плаз-

менного промежутка, можно судить о концентрации электронов в плазме. Измеряя эту концентрацию на каждом полупериоде сигнала, можно определить общий характер затухания (закона уменьшения концентрации) в плазме после выключения ВЧ разряда.

4. Примеры заданий для курсовых работ

1. Точная амплитудная настройка интерферометра и получение характеристики плазменного разряда. (Точная настройка производится по кривым плазменного разряда типа показанных на рис. 3, в которых минимум сигнала не выходит за нулевую линию, т.е. интерферометр откалиброван не только по фазе, но и по амплитуде).

2. Измерение зависимости концентрации плазмы от времени после выключения ВЧ разряда.

3. Влияние столкновений на диэлектрическую проницаемость плазмы. (По увеличению амплитуды проходящих сигналов (рис. 3) с использованием формулы (4) для диэлектрической проницаемости можно определить изменение частоты соударений в плазме)

Литература

9. Смирных Л.Н.. Методическое пособие по СВЧ оптике. Часть 1. НГУ, 2011 г.
10. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. Учеб. Пособие для ун-тов. – М.: Высш. шк. 1978. – 383 с.
11. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ. –М.: Высш. шк., 1990 – 335 с
12. Подгорный И.М. Лекции по диагностике плазмы. – М.: Атомиздат, 1968. 220 с.
13. Хилд М., С. Уортон. Микроволновая диагностика плазмы. /Пер. с англ. под ред. И.С. Шпигеля. – М.: Атомиздат, 1968. – 392 с.
14. Диагностика плазмы. Под ред.Р. Хаддлстоуна и С. Леонарда. Пер. с англ. – М.: Мир, 1967. – 516 с.
15. Диагностика плазмы. Сборник статей. Под ред.акад. Б.П. Константинова. – М.: Госатомиздат, 1963. – 302 с.
16. Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны. Пер. с англ. – М.: ИЛ, 1960. – 438 с.