



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

Кафедра теоретических основ радиотехники

А. А. Данилин

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению лабораторной работы по дисциплине
“Измерения на СВЧ”
(электронный вариант)

Исследование электрически управляемых СВЧ аттенюаторов на р-і-п диодах

Санкт-Петербург

2025 г.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫХ СВЧ АТТЕНЮАТОРОВ НА Р-І-Н ДИОДАХ

В лабораторной работе студенты знакомятся с устройством и принципом действия электрически управляемых микрополосковых СВЧ аттенюаторов (коммутаторов) с полупроводниковыми диодами. Исследуются частотные свойства и регулировочные характеристики аттенюаторов, изучаются методы измерения их параметров с помощью векторного анализатора цепей СВЧ.

1.1. Полупроводниковые управляющие СВЧ диоды

Для управления СВЧ сигналами наиболее часто используются коммутационные PIN-диоды. Они представляют собой полупроводниковый элемент, который содержит две сильно легированных «*p+*» и «*n+*» слоя, разделенных высокоомной областью «*i*» (база диода) собственного (нелегированного, *intrinsic*) полупроводника. Торцевые слои диода металлизируют и используют в качестве выводов. Переходы «*p-i*» и «*n-i*» при приложении нулевого или обратного напряжения заперты. Диод в этом случае обладает большим активным сопротивлением, определяемым собственной проводимостью полупроводникового материала. Схема замещения запертого диода представляет собой конденсатор с параллельным сопротивлением потерь (рис.1.1).

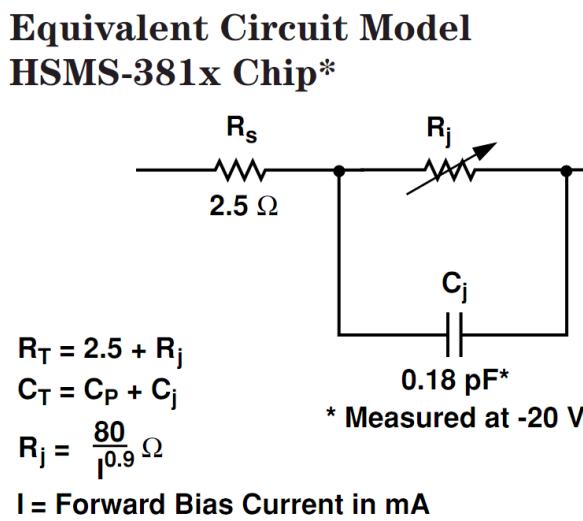


Рис. 1.1. Эквивалентная схема PIN-диода

Емкость диода практически не зависит от СВЧ сигнала. При подаче на диод положительного напряжения смещения переходы отпираются, база диода заполняется свободными носителями, ее сопротивление уменьшается.

Величина активного сопротивления диода зависит от тока смещения и меняется в пределах от десятков кОм до единиц Ом. Таким образом, в прямом направлении PIN-диод представляет собой переменный резистор с электрическим управлением. Это свойство используют при создании электрически управляемых коммутаторов и аттенюаторов.

Используемый в лабораторном макете сдвоенный PIN-диод HSMP-3814 имеет последовательное сопротивление в открытом состоянии не более 3 Ом, емкость закрытого диода не более 0,4 пФ, минимальное сопротивление закрытого диода не хуже 1500 Ом (см.рис.1.1).

Зависимость активного сопротивления диода от тока смещения представлена на рис.1.2.

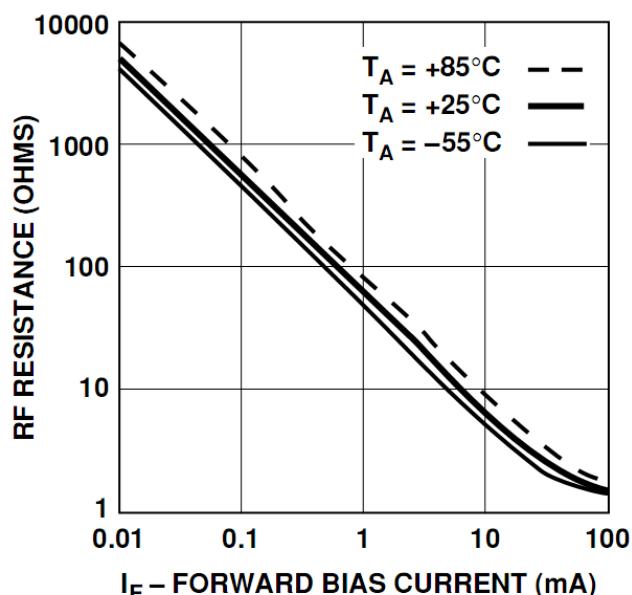


Рис. 1.2. Зависимость сопротивления одного диода сборки HSMP-3814 от тока смещения

В лабораторной работе исследуется двухканальный PIN — аттенюатор (коммутатор) с этим диодом. Аттенюатор выполнен на диэлектрической подложке ПТФЕ. Ширина полоска линии 4 мм, что обеспечивает волновое сопротивление 50 Ом. Бескорпусной сдвоенный PIN-диод включен в разрыв полоска. Принципиальная схема аттенюатора представлена на рис.1.3.

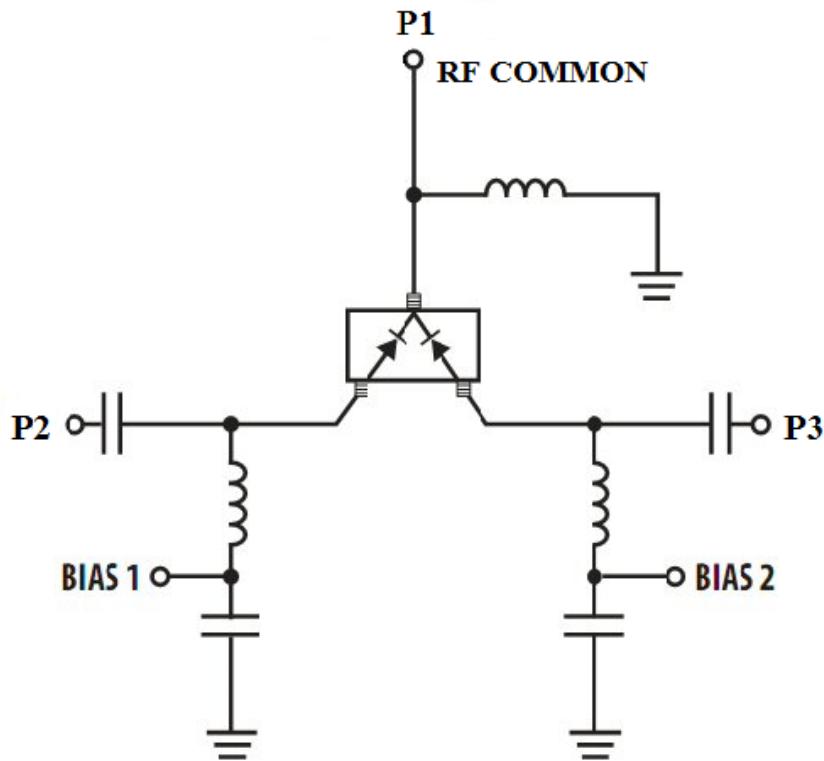


Рис. 1.3. Принципиальная схема аттенюатора

Аттенюатор построен по принципу переключателя на два положения (SPDT Switch — Single Pole — Double Thru). Подбирая токи смещения диодов, можно менять их сопротивления так, чтобы разделить мощность входного сигнала в нужной пропорции. Для подачи на диоды тока смещения используются две дроссельные четвертьвольновые линии, обеспечивающие разделение цепей смещения и СВЧ-сигнала, и два бескорпусных конденсатора, включенных в разрывы линий у входных разъемов. Для замыкания тока смещения на подложку использован ФНЧ, выполненный на отрезке короткозамкнутой линии с блокирующим конденсатором. Ток смещения ограничен постоянными резисторами 1 кОм (на схеме не показаны).

Схемотехническая модель аттенюатора в среде Microwave Office представлена на рис.1.4.

Значение параметров PIN-диода задано моделью PINDD из библиотеки MWO. Ток управления первым диодом задается источником тока DC_I с линейным регулированием тока, ток второго диода равен нулю (диод заперт).

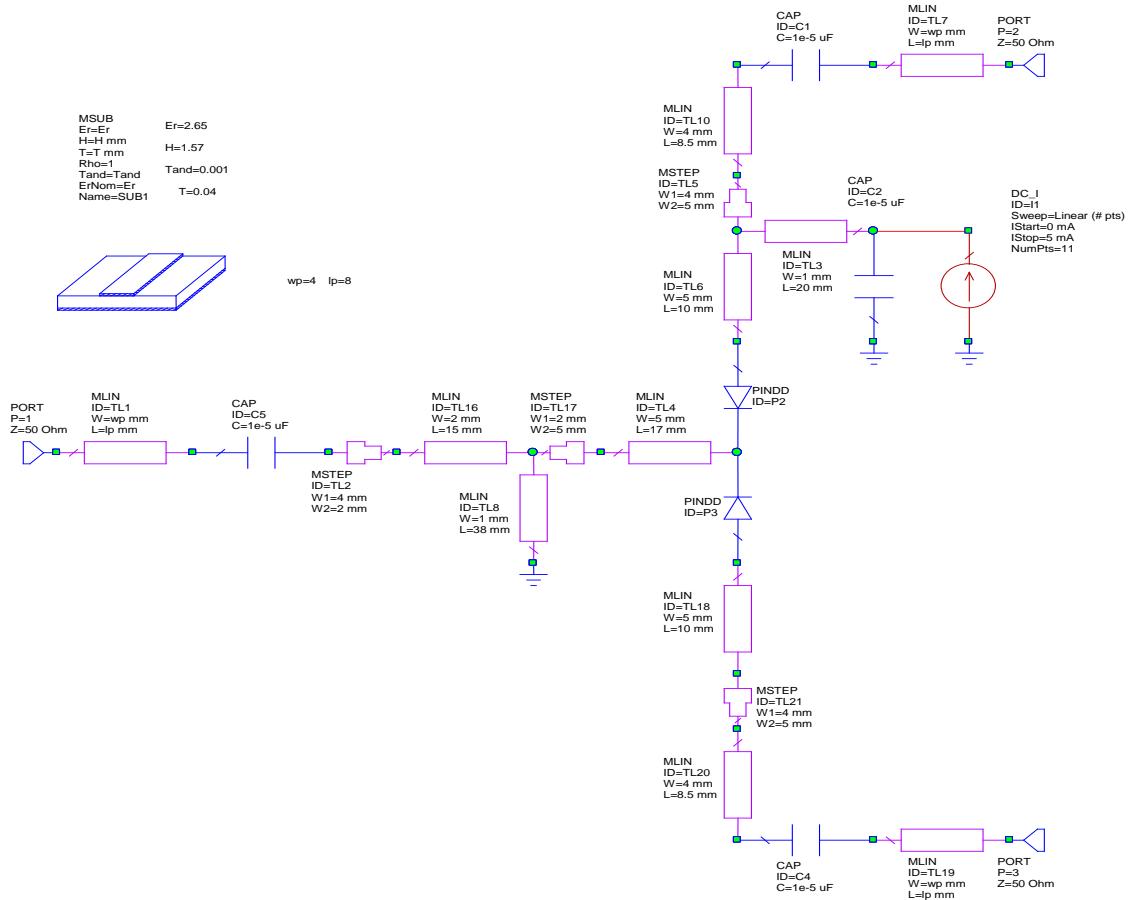


Рис. 1.4. Модель аттенюатора в среде MWO.

1.2. Задание и указания к выполнению работы

В лабораторной работе выполняется исследование частотных характеристик коэффициента передачи (ослабления) и коэффициента отражения (КСВН) аттенюатора СВЧ на полупроводниковых диодах. Для измерения используется автоматический векторный анализатор цепей СВЧ E5062A.

1.2.1. Подготовка установки к работе

1. Включите прибор. Установите рабочий диапазон качания частоты 500-3000 МГц. Для этого надо:

- Нажать **Display => Frequency**;
- Ввести клавишами **Start**, **Stop** и цифровыми клавишами начальную и конечную частоту диапазона (**Start** = 500 MHz, **Stop** = 3 GHz).

2. Подключите соединительные кабели и откалибруйте прибор.

Калибровка по коэффициенту отражения S_{11} .

Для ее выполнения надо:

- в правом меню выбрать подменю **Calibrate**;
 - произведите SOLT калибровку. Для этого выберите подпункт меню «**Enhanced Response**». В этом режиме нужно поочередно подключить 3 вида нагрузок, после чего осуществить соединение «на проход»;
 - подключить к активному порту 1 эталонную нагрузку холостого хода (XX). Можно использовать открытый конец кабеля;
 - произвести калибровку нажатием кнопки «**Open**»;
 - подключить короткозамыкающую нагрузку (КЗ) к разъему кабеля активного порта 1;
 - произвести калибровку нажатием кнопки «**Short**»;
 - подключить согласованную нагрузку к разъему кабеля активного порта 1;
 - произвести калибровку нажатием кнопки «**Load**»;
 - соединить разъемы кабелей, подключенных к портам 1 и 2 с помощью перемычки (коаксиального перехода типа F-F).
 - произвести калибровку по коэффициенту передачи S_{21} нажатием кнопки «**Thru**»;
 - Нажать **Done** для завершения SOLT калибровки.
3. После калибровки в окне **S21** должна получиться равномерная АЧХ коэффициента передачи с уровнем 0 дБ.

4. Отсоедините перемычку и уберите её и другие тестовые нагрузки в коробку.

5. Выберите режим вывода частотных характеристик: один активный канал измерений («Allocate Channel x1»), два графика частотных характеристик. Для выбора количества отображаемых графиков необходимо:

- нажать **Display => Number of Traces**;
- нажать требуемую цифровую клавишу 2.

Для вывода графиков отдельно в двух окнах:

- нажать **Display => Нажать Allocate Trace**;
- выбрать способ отображения графиков в двух горизонтальных окнах.



Рис. 1.5. Варианты расположения окон графиков

6. В первом окне надо вывести модуль коэффициента передачи в логарифмическом масштабе (**Meas => S21, Format => Log Mag**), во втором - КСВН (**Meas => S11, Format => SWR**).

7. После калибровки в окне **S21** должна получиться равномерная АЧХ коэффициента передачи с уровнем 0 дБ.

Прибор готов к проведению измерений.

1.2.2. Измерение частотных характеристик аттенюатора

1. Убедитесь, что блок питания GPS-2303 выключен. Подключите к прибору аттенюатор согласно схеме на рис. 1.6, используя согласованную нагрузку, блок питания GPS-2303 и соединительные провода. Чёрный провод питания соответствует минусовой (–) клемме блока питания, красный – плюсовой (+). Со стороны устройства провода питания заканчиваются SMB разъёмами. Не подключайте их до момента получения нужного напряжения на выходе блока питания.

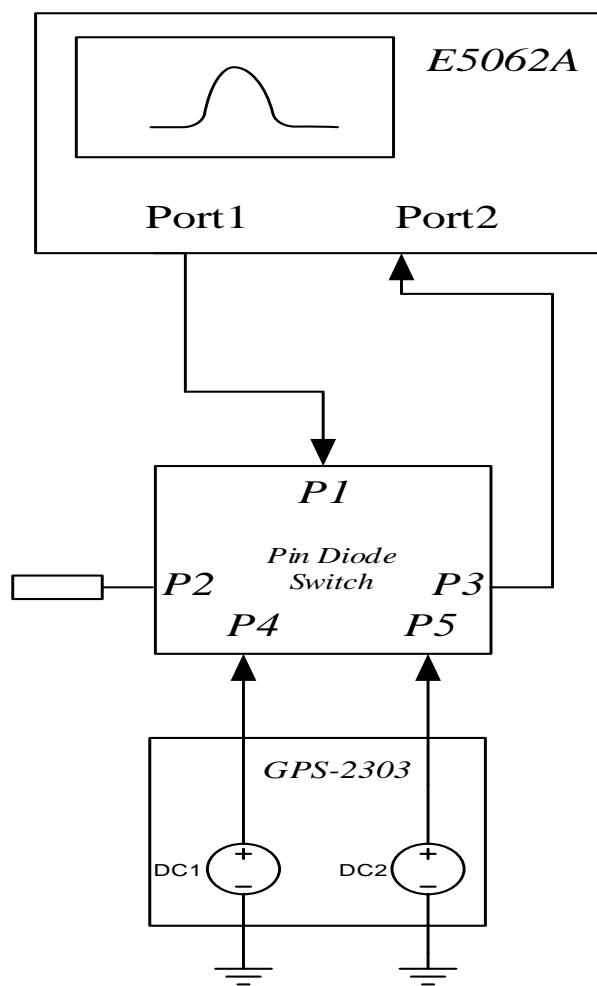


Рис. 1.6. Структурная схема лабораторной установки в режиме измерения КСВН и коэффициента передачи между 1 и 3 портами

2. Включите блок питания GPS-2303 («**Power ON**»). Нажмите кнопку включения выходного напряжения «**OUTPUT ON**». Установите в канале Р4 (DC1) нулевое напряжение, в Р5 (DC2) – максимальное (**15В**).

Не превышайте напряжения 15В на выходе БП ни при каких обстоятельствах!

Обе кнопки управления режимом блока питания должны быть отжаты (режим INDEP.). В аттенюаторе установлены ограничительные резисторы 1 кОм, поэтому ток через диоды (в мА) численно совпадает с подаваемым постоянным напряжением смещения (в Вольтах). Подключите SMB разъемы питания ко входам питания исследуемого устройства.

3. Подключите пассивный порт анализатора к порту Р3 аттенюатора. Неиспользуемый порт всегда должен быть нагружен на согласованную нагрузку. В данном случае это Р2. Обратите внимание, что в данном случае измеряется коэффициент пропускания между 1 и 3 портами шестиполосника, соответственно измеряемый параметр матрицы рассеяния следует называть S_{31} , однако для анализатора цепей он будет по-прежнему отображаться как S_{21} .

4. Для правильного отображения масштаба графиков по уровню используйте автоматический подбор масштаба (**Scale => Autoscale All**).

Для сохранения результатов измерения в виде образов экрана (скриншотов) в графическом файле формата .bmp (256 color). Имя файла и его расположение выбирают в стандартном диалоговом окне сохранения. Ввод имени производят с помощью внешней или экранной клавиатуры. Последнюю вызывают находящейся в окне диалога кнопкой «**Input from the front panel**».

Для создания скриншота экрана:



- Выберите удобный вид изображения – с белым фоном (**Display=> Invert Color => On**);
- Для записи образа нажмите **System => Dump Screen Image**. В окне диалога надо указать расположение и имя файла и нажать **Save**.

Для сохранения численных данных надо:

- Выбрать требуемый канал и график;
- Нажать клавишу **Save/Recall**;
- Нажать «**Save Trace Data**» и в диалоговом окне ввести имя файла данных и место его расположения.

При сохранении численных данных прибор запоминает данные только с одного, активного, графика. Если используется несколько графиков, то необходимо при помощи кнопки **Trace Next** переключаться между графиками и сохранять каждый в отдельный файл.

5. Измерьте частотные характеристики канала Р3 аттенюатора ($|S_{31}|$, дБм и КСВН) в режиме минимального ослабления (ток $P_5=15$ мА) и максимального ослабления (ток $P_5=0$ мА). Сохраните образ экрана и численные данные характеристик в файле типа .CSV (текстовый файл с разделителем – запятой) в обоих режимах ослабления. 

6. С помощью маркера (**Marker 1 => On**) измерьте коэффициент передачи и КСВН на фиксированной частоте 1,5 ГГц.

7. Изменяя ток через диод в пределах $P_5=0-10$ мА, измерьте зависимости $|S_{31}|$ (регулировочную характеристику) и КСВН от тока смещения на той же частоте. Результаты занесите в таблицу 1.1.

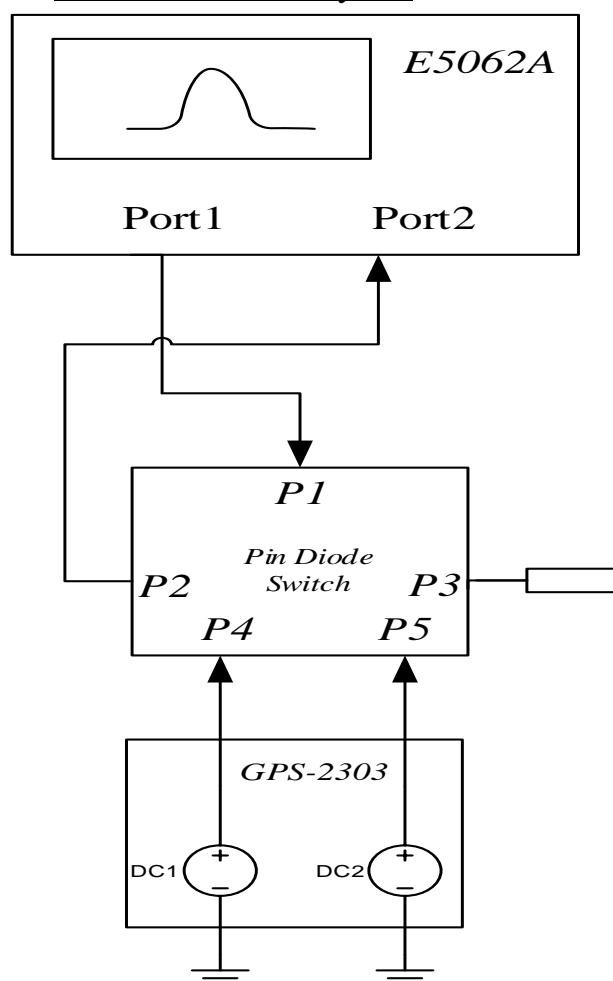


Рис. 1.7. Структурная схема лабораторной установки в режиме измерения КСВН и коэффициента передачи между 1 и 2 портами

8. Подключите вход анализатора цепей к порту Р2 аттенюатора согласно схеме на рис. 1.7. Повторите пп. 5-7 для данного порта, изменяя ток Р4, сохраняя ток Р5=0. При этом будет производиться измерение параметра S_{21} .

I _{пит} , мА	S ₃₁ , дБм	S ₂₁ , дБм	KCBН (порт 3)	KCBН (порт 2)
0				
0,5				
1				
1,5				
2				
...				
8,5				
9				
9,5				
10				

1.2.3. Измерение характеристик СВЧ аттенюатора в режиме деления мощности

- Установите в блоке питания параллельный режим управления каналами **PARALLEL** (обе кнопки нажаты) и соберите схему измерения |S₃₁|, рис. 1.6.
- Поместите маркер на частотную точку 1,5 ГГц.
- Меняя ток в обоих диодах одновременно, добейтесь на этой частоте минимального KCBН на входе аттенюатора. В этом режиме мы получаем согласованный делитель мощности пополам. Запишите величину тока.
- Зафиксируйте модуль коэффициента передачи |S₃₁| между 1 и 3 портами и KCBН на входе аттенюатора на этой частоте. Сделайте снимок экрана и сохраните численные данные |S₃₁| и KCBН.
- Снимите зависимость |S₃₁|(I) и зависимость KCBН(I) в нескольких характерных точках то току и запишите эти данные.
- Подключите вход анализатора цепей ко 2 порту СВЧ аттенюатора и повторите измерения модуля коэффициента передачи между 1 и 2 портами и KCBН аттенюатора согласно схеме на рис. 1.7.

1.2.4. Импорт .csv файлов с данными в Microsoft Excel

Формат запомненной информации в CSV файле по строкам такой: номер активного канала, номер активного графика, строка заголовка (шапка данных), строки данных – (частота, данные).

Пример заголовка и первой строки данных:

```

"# Channel 1"
"# Trace 2"
Frequency, Formatted Data, Formatted Data
+5.00000000000E+008, +1.17654827384E+001, +0.00000000000E+000

```

Файлы, сохранённые в ходе выполнения работы необходимо открыть в редакторе электронным таблиц Excel, или аналогичном для построения графиков и обработки данных. Для этого в Excel:

1. Установите курсор таблицы на вторую строку.
2. Используйте команду импорта текстовых данных Excel.

Для версии 2019 **Данные => Получить данные => Устаревшие мастера => Из текста (прежних версий)**.

Для версии 2016 **Данные => Из текста => Импортировать данные**.

Для других версий **Данные => Получение внешних данных => из текста**, либо **Данные => Импорт внешних данных => Импортировать данные**. Импортируйте файл S₁₁. Режим импорта – с разделителем, импорт с 4 строки, разделитель – запятая, формат данных всех столбцов - текстовый, разделитель целой и дробной части (в разделе **Подробнее**) – точка («.»). Нажмите кнопку **Готово**.

3. Установите курсор на 4 столбец 2 строки. Аналогично импортируйте данные коэффициента S₂₁. Первый столбец (частоту) при этом не импортируйте (**Формат данных столбца => пропустить столбец**);
4. Произведите обработку численных данных.

1.2.5. Моделирование СВЧ аттенюатора в Microwave Office

Используя модель аттенюатора в среде Microwave Office (файл «**Switch_PIN.emp**»), рассчитайте его характеристики при нулевом смещении одного диода и вариации тока смещения другого. Для этого:

1. Выберите частотный диапазон расчета в области равномерности измеренной в п.1.2.2 АЧХ аттенюатора (примерно 0.5 ...2.5 ГГц).
2. Рассчитайте частотные зависимости |S₂₁|, |S₁₁| и КСВН (VSWR) в этом диапазоне при вариации тока смещение диода в пределах 0...5 мА (достаточно 11 значений).
3. Выберите удобные масштабы по осям ординат и сохраните графики в файлах с расширением jpg.
4. Постройте регулировочную характеристику аттенюатора |S₂₁|(I) и зависимость КСВН(I) от тока управления на частоте 1.5 ГГц.

5. Сравните их с измеренными, нанеся на графики экспериментальные значения коэффициента передачи и КСВН.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- протокол измерений;
- структурную схему лабораторной установки;
- таблицы численных данных измерений;
- графики частотных зависимостей коэффициентов передачи $|S_{21}|$, $|S_{31}|$ и КСВН аттенюатора, построенные по численным данным;
- графики регулировочной зависимости $|S_{21}|$, $|S_{31}|$ и КСВН от тока управления;
- схема расчетной модели аттенюатора;
- расчётные частотные зависимости $|S_{21}|$, $|S_{11}|$ и КСВН (VSWR);
- расчётная регулировочная характеристика аттенюатора $|S_{21}|(I)$ и зависимость КСВН(I) от тока управления на частоте 1.5 ГГц.

Контрольные вопросы

1. Для каких целей используют устройства с PIN-диодами в измерительном тракте СВЧ приборов?
2. Поясните эквивалентную схему PIN диода? Почему емкость диода слабо зависит от напряжения смещения?
3. Как зависит сопротивление PIN диода на СВЧ от тока смещения?
4. Как выполнена схема СВЧ аттенюатора (коммутатора), исследуемого в лабораторной работе?
5. Чем отличается работа исследуемого устройства с PIN диодами в режиме аттенюатора и в режиме коммутатора?
6. Чем определяются потери и развязка входов в СВЧ коммутаторах на PIN-диодах?
7. Как реализовать согласованный делитель мощности на PIN диодах с электрическим управлением?
8. Зачем в СВЧ аттенюаторе используют микрополосковые дроссели и конденсаторы?
9. Поясните, как в схеме коммутатора проходят СВЧ сигналы и постоянные токи управления устройством?
10. Поясните модель СВЧ аттенюатора, реализованную в среде Microwave Office.

Литература

1. Данилин А.А. Измерения в радиоэлектронике сверхвысоких частот: Учеб. пособие для вузов.- СПб: Лань, 2025.-348с.
2. Данилин А.А. Измерения в технике СВЧ: Учеб.пособие для вузов.- М.: Радиотехника, 2008.-184с.
3. Хелзайн Дж. Пассивные и активные цепи СВЧ.
4. Сazonov D.M., Gridin A.N., Mishustin B.A. Устройства СВЧ. – M.: Высшая школа, 1981 -295с.
5. Микроэлектронные устройства СВЧ. Под ред. Г.И. Веселова , 1988- 280с.
6. Lavrenko Ю.Е., Grachev C.B. Устройства СВЧ: конспект лекций. Спб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. -92с

Оглавление

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫХ СВЧ АТТЕНЮАТОРОВ НА P-I-N ДИОДАХ	2
1.1. Полупроводниковые управляемые СВЧ диоды	2
1.2. Задание и указания к выполнению работы	6
1.2.1. Подготовка установки к работе	6
1.2.2. Измерение частотных характеристик аттенюатора	8
1.2.3. Измерение характеристик СВЧ аттенюатора в режиме деления мощности	11
1.2.4. Импорт .csv файлов с данными в Microsoft Excel	11
1.2.5. Моделирование СВЧ аттенюатора в Microwave Office	12
Литература	15