

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение
высшего образования**

**«ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И ИНФОРМАТИКИ»**

Кафедра радиоэлектронных систем

Солдатов А.А.

**ИССЛЕДОВАНИЕ
МИКРОПОЛОСКОВЫХ
ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ И
АТТЕНЮАТОРОВ НА p-i-n-ДИОДАХ**

Методические указания
к лабораторным работам

Самара
2017

Цели и задачи дисциплины «Приборы СВЧ и ОД»

Основными целями освоения дисциплины являются:

- формирование у студента системы необходимых знаний о физических принципах работы оптоэлектронных и СВЧ приборов;
- формирование у студента системы необходимых знаний об оптоэлектронных и СВЧ приборах для последующего изучения специальных дисциплин и решения производственных и исследовательских задач;
- овладение основами расчётов оптоэлектронных и СВЧ приборов, получение общих знаний по их применению.

Основными обобщенными задачами преподавания дисциплины являются:

- изучение основных физических законов и явлений, лежащих в основе работы оптоэлектронных и СВЧ приборов;
- изучение основных характеристик оптоэлектронных и СВЧ приборов;
- приобретение студентами практических навыков работы с оптоэлектронными и СВЧ приборами, а также аппаратурой для исследования характеристик и измерения параметров этих приборов.

СОДЕРЖАНИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ УКАЗАНИЙ

Раздел №1. Исследование микрополосковых переключателей и аттенюаторов на $p-i-n$ диодах

Раздел №2. Проектирование переключателей и аттенюаторов на $p-i-n$ диодах

Лабораторная работа №1

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ И АТТЕНУАТОРОВ НА p-i-n-ДИОДАХ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- 1 - изучить основные принципы работы переключателей на p-i-n-диодах;
- 2 - изучить основные принципы работы аттенуаторов на p-i-n-диодах;
- 3 - изучить метода расчета и конструирования переключателей на p-i-n-диодах;
- 4 - провести экспериментальные исследования частотных зависимостей основных параметров переключателей на p-i-n-диодах;
- 5 - исследовать зависимости основных параметров переключателей от управляющего напряжения.

2. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

При подготовке к лабораторному занятию необходимо:

- изучить задание на работу, цель работы;
- изучить работу СВЧ-генератора и селективного усилителя (см.[4]);
- изучить методику измерения параметров переключателя;
- получив у преподавателя номер варианта, рассчитать и сконструировать двухканальный переключатель (см.п.5 настоящей разработки);
- получить у преподавателя допуск к проведению экспериментальных исследований.

При подготовке к лабораторной работе необходимо изучить соответствующие разделы лекций, материалы, изложенные в [1-8] и ответить на контрольные вопросы.

3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Рассказать о принципах работы p-i-n - диодов.
2. Нарисовать эквивалентную схему и рассказать о работе переключателя с последовательным включением диодов.
3. Какова принципиальная схема и принцип работы переключателя с параллельным включением диодов?

4. Какими факторами обуславливается тот или иной выбор схемы включения диодов?
5. Дать определение основных параметров р-і-п-диодов.
6. Как зависит распределение мощности в переключателе от активной проводимости диода G ?
7. Рассказать о принципе работы аттенюатора на р-і-п-диодах.
8. Каковы частотные характеристики р-і-п – диодов?
9. Для чего нужна компенсация реактивностей переключателей на р-і-п-диодах? Рассказать о методах компенсации реактивностей.
10. Нарисовать схему экспериментальной установки и рассказать о порядке исследования аттенюатора на р-і-п - диодах.
11. Привести классификацию схем диодных переключателей.
12. Перечислить основные параметры переключателя.
13. Нарисовать схему экспериментальной установки и рассказать о порядке исследования переключателя на р-і-п - диодах.

4. РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

Получив у преподавателя номер варианта (см.табл.1) и пользуясь формулами, приведенными в прилож.1, и литературой [1-7], рассчитать и сконструировать двухканальный переключатель на р-і-п-диодах:

1. Исходя из исходных данных выбрать схему включения диодов.
2. Рассчитать потери пропускания L_n , запираия L_3 и выбрать необходимое число диодов.
3. Рассчитать и оценить КСВ переключателя $K_{Ст}$.
4. Рассчитать рассеиваемую диодами мощность.
5. Нарисовать эквивалентную электрическую схему рассчитанного переключателя.
6. Нарисовать топологию рассчитанного переключателя.

Волновое сопротивление питающей микрополосковой линии (МПЛ) $Z_0 = 50 \text{ Ом}$; ее размеры: относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 9,6$; высота подложки $h = 1 \text{ мм}$.

При расчетах каждая бригада должна пользоваться данными табл.1.

Таблица 1

№ варианта	1	2	3	4
Рабочая полоса частот $f_0 \pm \Delta f$, ГГц	(2 ± 0.5)	(2.6 ± 2)	(4 ± 0.6)	(3 ± 2.5)
Ослабление открытого канала	≤ 1.2	≤ 2	≤ 1.1	≤ 2.2

L_n , дБ				
Ослабление закрытого канала L_3 , дБ	≥ 25	≥ 21	≥ 24	≥ 19
КСВ по входу $K_{СТ}$	≤ 1.6	≤ 1.5	≤ 1.55	≤ 1.7
Падающая непрерывная мощность P , Вт	2	2	2	2
Время переключения T , мкс	≤ 50	≤ 50	≤ 50	≤ 50
Диапазон изменения температур $^{\circ}\text{C}$	-60...+125	-60...+125	-60...+125	-60...+125

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И ПОРЯДОК ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ

Расчетная часть, изучение теоретических вопросов и инструкций по эксплуатации приборов выполняется во время домашней подготовки к работе.

Электрическая схема диодного переключателя изображена на рис.1.1.

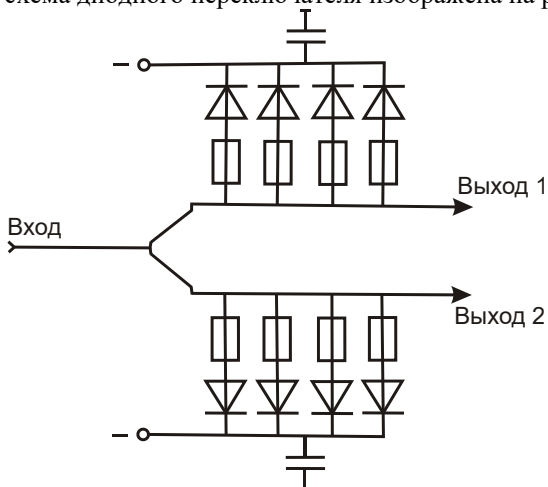


Рис.1. 1. Электрическая схема переключателя
Схема измерительной установки показана на рис.1.2.

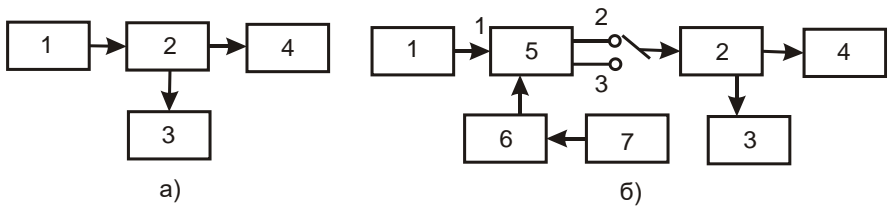


Рис.1.2. Структурные схемы экспериментальной установки для исследования переключателя:

а)- схема калибровки измерительного тракта; б)- схема измерения характеристик переключателя

Цифрами на рис1.2 показаны:

- 1- генератор СВЧ;
- 2- измерительная линия;
- 3- измерительный усилитель;
- 4- согласованная нагрузка;
- 5-исследуемый переключатель;
- 6- двухпозиционный переключатель;
- 7- блок питания.

Двухпозиционный переключатель 6 служит для переключения подачи напряжения питания на $p-i-n$ - диоды в один из выходных каналов переключателя 5. На вход 1 подается сигнал СВЧ. К выходам 2 и 3 попеременно подключается измерительный тракт. Питание от источника питания 7 подается на клеммы корпуса диодного переключателя. Причем подается "-" на диод (n - слой), а "+" - на корпус (p - слой).

Исследования характеристик переключателя проводятся в следующем порядке:

- 1.1. Настроить измерительный тракт на заданную частоту f_0 . Собрать лабораторную установку согласно рис.2а.
- 1.2. Выставить на генераторе заданную частоту.
- 1.3. Настроить измерительную линию на частоту f_0 . Для этого перемещением короткозамкнутого плунжера индикаторной головки необходимо добиться максимального отклонения стрелки индикатора усилителя.
- 1.4. По децибелной шкале индикатора усилителя отсчитывается показание ослабления L .
2. Провести исследование переключателя на $p-i-n$ -диодах в режиме переключения:

- 2.1. Собрать установку согласно схемы рис.2б и выставить на генераторе частоту 3.2 ГГц.
- 2.2. Установить переключатель 6 в положение 1. Выставить на источнике питания 7 напряжение 0.8 В и, не изменяя положение органов управления генератора и линии, измерить затухание I в каждом выходе переключателя. Переключив переключатель 6 в положение 2 повторно провести измерения затухания L на выходах переключателя. Результаты занести в табл.2.
- 2.3. Измерения по п.2.2 повторить при напряжениях питания 0.5 и 1 В. Результаты измерений занести в табл.2.

Таблица 2

	Двухпозиционный переключатель в положен.1					Двухпозиционный переключатель в положен.2					
	1-й канал			2-й канал		1-й канал			2-й канал		
U , в											
L , дБ											

3. Исследовать частотные характеристики параметров переключателя на p-i-n - диодах:

3.1. Установив двухпозиционный переключатель в положение 2, подключить измерительный тракт к выходу 1 микрополоскового переключателя и выставить на генераторе частоту $f = 2.8$ ГГц. Подав напряжение $U = 1$ В, измерить с помощью индикатора усилителя параметр L_{II} .

3.2. Изменяя частоту генератора (через 0.2 ГГц), произвести измерения параметра L_{II} . Результаты измерений занести в табл.3.

3.3. Переключив двухпозиционный переключатель в положение 1, произвести измерения параметра I в заданном частотном диапазоне (см. п.п.3.1,3.2). Результаты измерений занести в табл.3.

Таблица 3

f , ГГц	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8
L_{II} , дБ						
L_3 , дБ						

3.4. Рассчитать параметры L_{II} , L_3 в заданном частотном диапазоне:

$$L_{II} = 1 + Q_{II}^2 \eta^2 \quad \text{и} \quad L_3 = 1 + (Q_3^2 \eta^2)^{-1},$$

где

$$\eta = f / f_{рез}, Q_{II} = 1.4, Q_3 = 0.6,$$

f - рабочая частота, $f_{рез} = 10$ ГГц.

3.5. Построить и сравнить экспериментальные и расчетные частотные зависимости $L_{II} = L_{II}(f)$ и $L_3 = L_3(f)$.

4. Исследовать микрополосковый переключатель в режиме аттенюатора:

4.1. Установив двухпозиционный переключатель в положение 1, подключить измерительный тракт к выходу 1 переключателя и выставить на генераторе частоту $f = 3$ ГГц.

4.2. Изменяя величину напряжения питания U от 0 до 1 В (через 0.1 В), измерить потери L . Результаты измерений занести в табл.4.

4.3. Построить график зависимости потерь L от напряжения U . Определить по графику величину напряжения запираения U_3 , при котором происходит переключение каналов переключателя.

Таблица 4

$U, В$	0	0.1	0.2	...	1
$L, дБ$					

7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

- наименование работы;
- цель работы;
- результаты расчета;
- эквивалентная электрическая схема и топология рассчитанного переключателя;
- функциональные схемы измерений;
- результаты измерений (в виде таблиц и графиков);
- выводы.

Лабораторная работа №2

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ И АТТЕНЮАТОРОВ НА p-i-n-ДИОДАХ

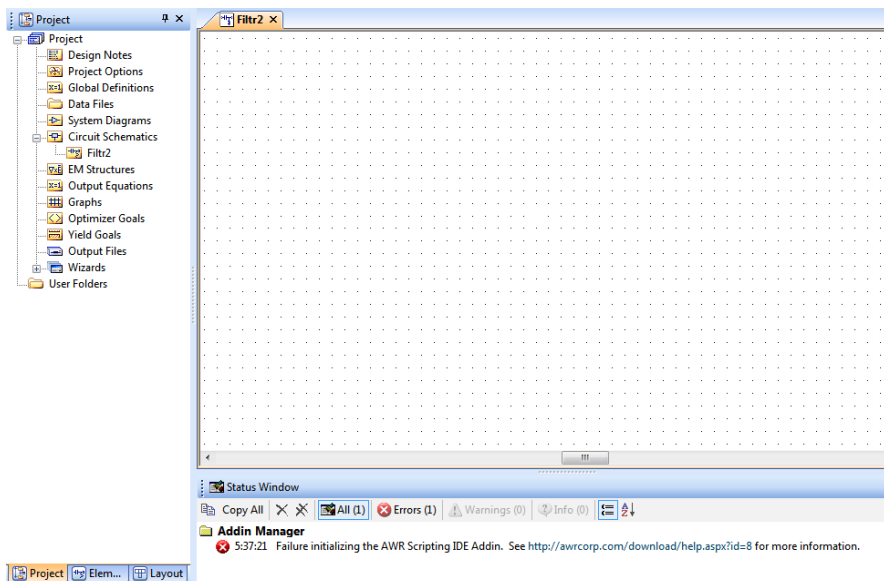
Данная лабораторная работа выполняется на компьютере в среде **Microwave Office**.

Шаг 1: Создайте новый Проект

Из основного меню **File** (Файл), выберите **New Project** (Новый Проект). Из основного меню **File** (Файл), выберите **Save Project As** (Сохранить как). Введите в имя проекта **Perekl** и нажатие **Save** (Сохранить).

Шаг 2: Создайте новую схему

Из основного меню **Project** (Проект) выберите **New Schematic** (Новая схема). В появившейся форме можно ввести новое название схемы, печатая поверх **Untitled 1**. Введите название **Perekl** (Переключатели) для этой схемы. Далее нажмите **OK**



Шаг 3: Выберите глобальные единицы для работы

Войдите в **Project Options** и выставьте те единицы измерения, как показано на рис.2.2. Обратите внимание на то, что длина (**Length Type**) выставлена в **mm**.

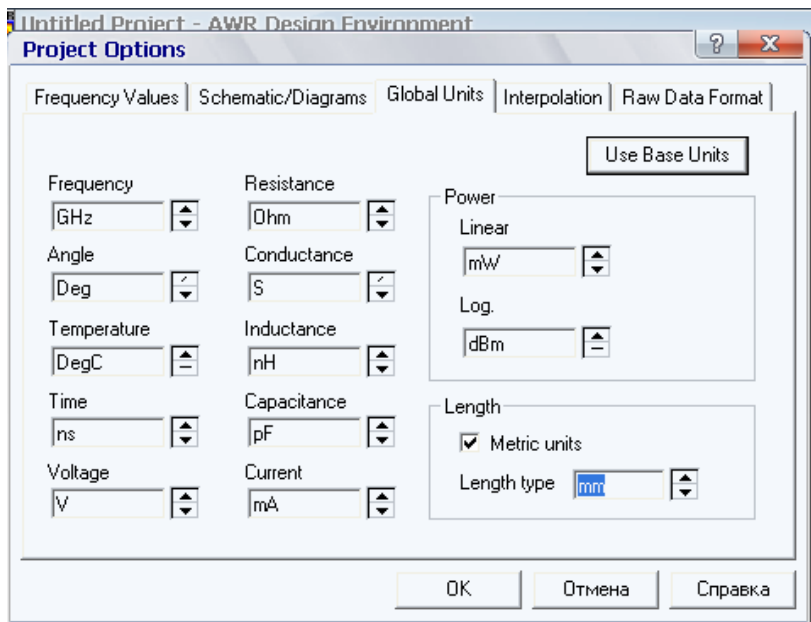


Рис. 2.2

Шаг 4: Задайте частотный диапазон

Войдите в **Project Options** и выберите **Frequency Values**. Выставьте частотный диапазон, как показано на рис.2.3.

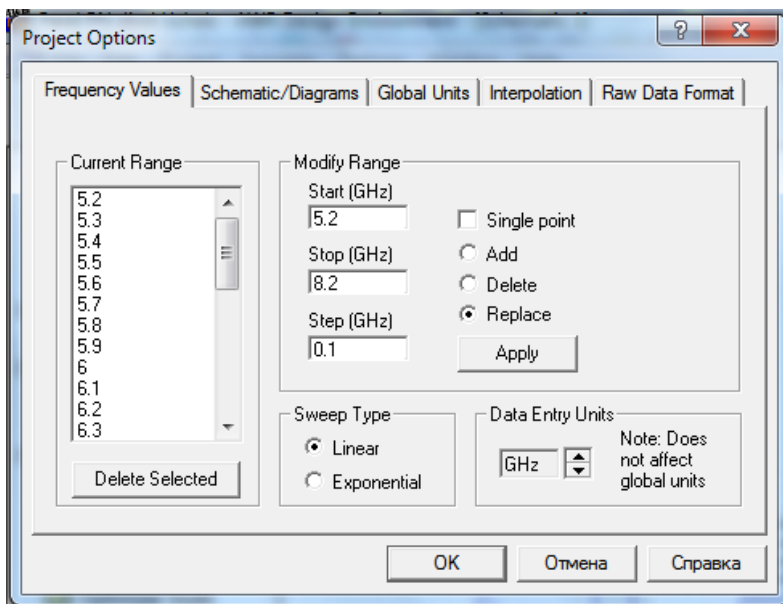


Рис. 2.3

Шаг 5: Постройте микрополосковую структуру для переключателя

Выберите из списка в верхнем окне **Microstrip** (Полосковые линии). Далее в открывшемся списке выберите **Lines** (Линии). Внизу откроется окно с различными типами полосковых линий, среди которых выберите **MLIN** и выведите на схему, как показано на рис. 2.4. Выставьте размеры линии указанные на рис.2.4 (W- ширина линии, L – длина линии).

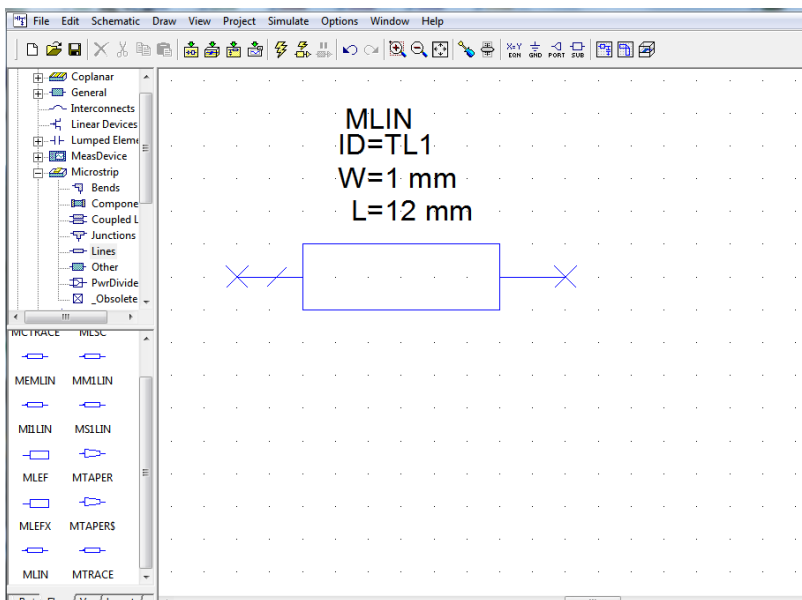
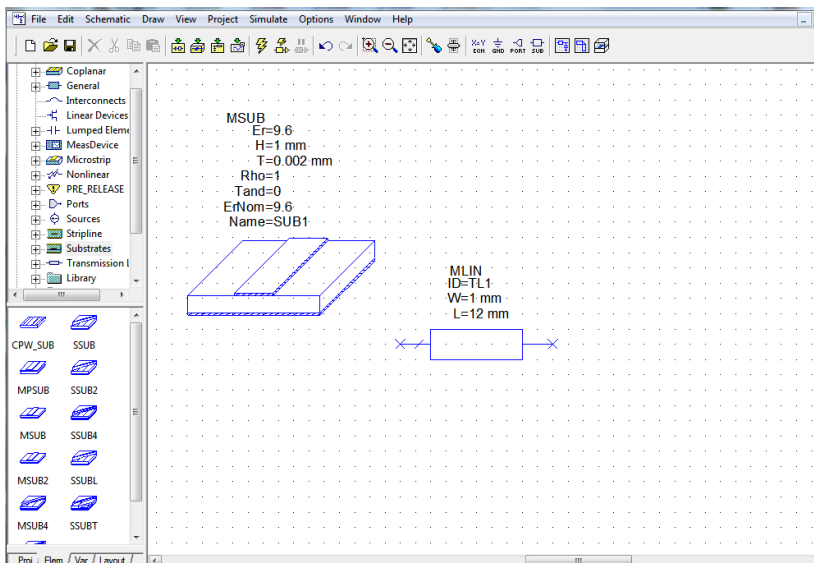


Рис.2.4

Выделите из списка в верхнем окне **Substrates** (Подложки), для чего необходимо на **Substrates** нажать мышью. В появившемся внизу окне выбрать **MSUB**. Выставьте значения диэлектрической проницаемости и толщины подложки, как показано на рис. 2.5 (Er- диэлектрическая проницаемость H – толщина подложки).



Рису.2.5

Выделите полосковую линию двойным щелчком мышки на ней .
 Поставьте галочку напротив MSUB и в появившемся окне наберите название подложки SUB1, как показано на рис.2.6.

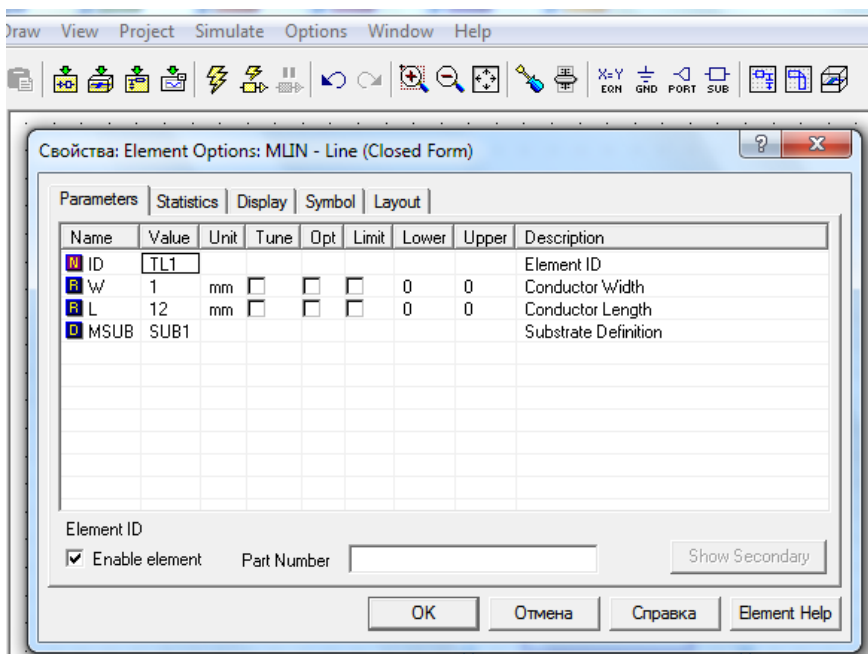


Рис. 2.6

Шаг 6: Выбор диодов

Выберите в верхнем окне **Nonlinear** и из списка элементов **Diode**. В появившемся нижнем окне выберите PINDD и выведите его на схему.

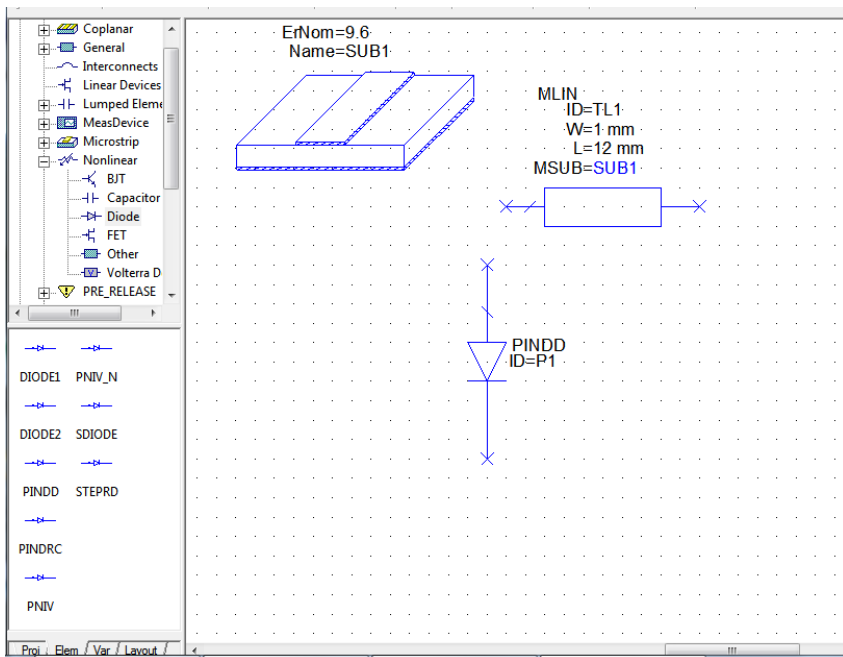


Рис. 2.7

Шаг 7: Создание схемы двухканального переключателя с параллельным включением p-i-n диодов

Пользуясь знаниями, полученными в предыдущих лабораторных работах и командами копирования, соберите рабочую схему двухканального переключателя с параллельным включением p-i-n диодов.

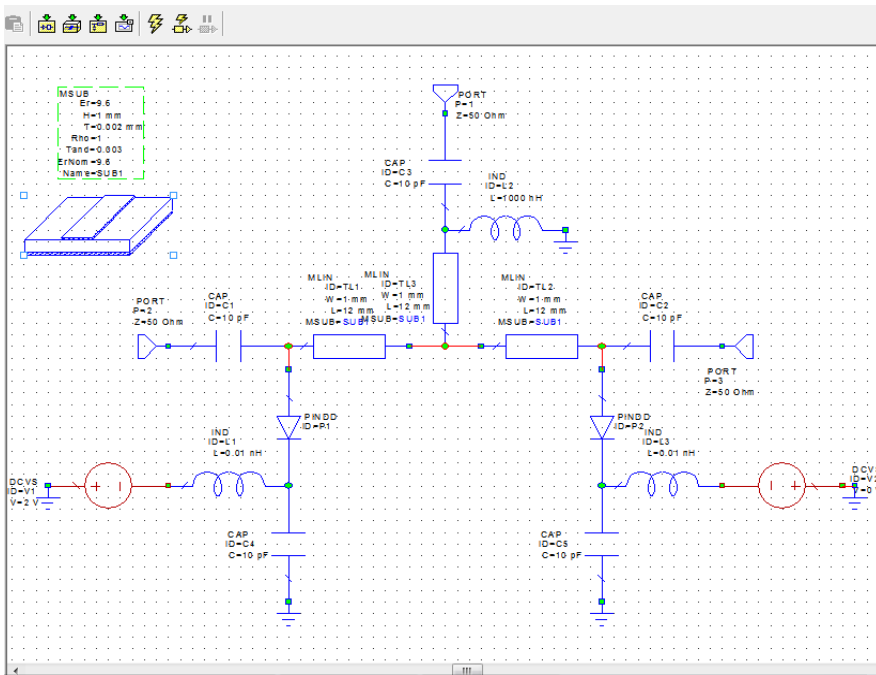


Рис. 2.8

Шаг 8: Построение графиков в режиме переключателя

1. Выставьте на источниках напряжения величину $V = 0$ v (открытый режим). Добавьте график (как описано в предыдущих работах) и выведите S_{11} , S_{21} , S_{31} в Дб. Зарисуйте полученные результаты.
2. Выставьте на источниках напряжения величину $V = 2$ v (закрытый режим). Добавьте график (как описано в предыдущих работах) и выведите S_{11} , S_{21} , S_{31} в Дб. Зарисуйте полученные результаты.
3. Выставьте на источниках напряжения величину $V = 0$ v (открытый режим) со стороны порта 2 и $V = 2$ v со стороны порта 3 (закрытый режим). Добавьте график (как описано в предыдущих работах) и выведите S_{11} , S_{21} , S_{31} в Дб (режим работы переключателя). Зарисуйте полученные результаты.

Шаг 8: Построение графиков в режиме аттенюатора

Выставьте напряжение на обоих источниках равное 0, как в пункте 1 предыдущего шага. Выведите на график параметр S21. Задавая значения напряжения на левом источнике последовательно равным 0.2, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3, 1.5, 2 В, измерьте потери в Дб на частоте 7.2 ГГц. Постройте график зависимости потерь (Дб) от напряжения (В).

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

- наименование работы;
- цель работы;
- спроектированная схема переключателя;
- график зависимости потерь от частоты в открытом канале;
- график зависимости потерь от частоты в закрытом канале;
- график зависимости потерь от напряжения в режиме аттенюатора
- выводы.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И ФОРМУЛЫ РАСЧЕТА ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ НА p-i-n-ДИОДАХ.

Основой любого p-i-n-диода является трехслойная полупроводниковая кремниевая структура. Высокоомная внутренняя i-область имеет обычно толщину от единиц до сотен микрометров, концентрация носителей заряда в ней составляет примерно 10^{13} см^{-3} . Если источник внешнего постоянного напряжения подключен положительным полюсом к слою p⁺, а отрицательным - к n-слою, то в i-слое увеличивается концентрация электронов и дырок из-за инжекции дырок из p- области и аккумуляции электронов из n-области. При этом концентрация носителей составляет примерно 10^{17} см^{-3} . Через структуру протекает постоянный ток I_0 прямого направления. При обратном смещении количество носителей в i-слое падает примерно еще на порядок относительно начального значения (10^{13} см^{-3}) и диод закрыт.

На рис.П1.1 приведены эквивалентные схемы p-i-n-диодов. В табл.П1 приведены параметры для некоторых типов диодов.

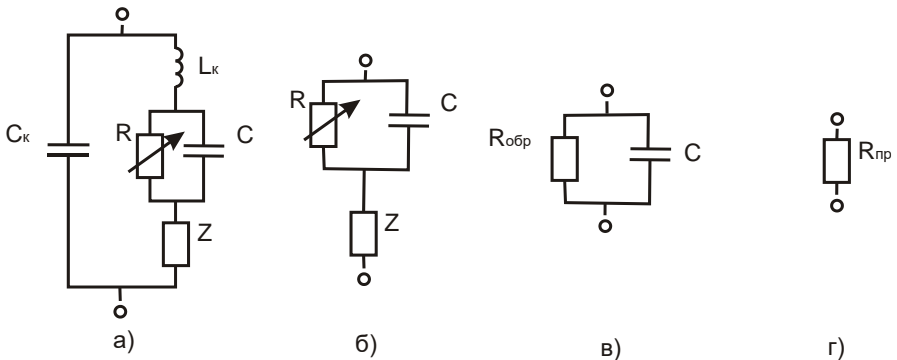


Рис.П1.1. Эквивалентные схемы p-i-n-диодов:

а - корпусная конструкция; б - бескорпусная конструкция; в - диод заперт; г - диод открыт.

Величины L_k , C_k - определяются конструкцией корпуса диода; C , R - характеризуют p-i-n-структуру.

Наиболее широко p-i-n-диоды применяются в переключателях, где по сравнению с другими диодами p-i-n-диоды имеют следующее преимущество

- возможность управления большими мощностями СВЧ при относительно маломощной схеме управления.

Таблица П1

Тип диода	C, пФ	f _{кР} ГГц	Накопительный заряд Q _{нк} нКл	R _{пР} , Ом	P _{max} , Вт	P _{umax} Вт
2A543A-5	0.12-0.19	300	0.5...0.3	1.5	0.5...0.1 (t°C=-60...+125)	500...100
2A543A-6	0.12-0.19	300	0.5...0.3 (I _{пР} = 5 мА)	1.5	0.5...0.1	500...100 (t°C= -60...+125)
2A546A-5	0.12-0.2	300	30...300 (-60...+125°C)	1.5	2.5...0.9	3000
2A547A-3 2A547B-3	0.06-0.12 0.1-0.2	-	0.03...0.2 (I _{пР} = 3 мА)	3 R _{обР} = 20 кОм	0.2...0.07	0.4...0.27-
2A516A-5	0.18	-	-	6.5 R _{обР} = 3 кОм	I	1000
2A517A-2	0.15-0.3	-	-	5 R _{обР} = 8 кОм	0.5	1000

В регулирующих устройствах диоды могут быть включены в линию передачи последовательно или параллельно (рис.П1.2). При подаче прямого смещения сопротивление диода мало. Если при этом диод включен параллельно (рис.4б), линия через него будет закрываться на землю. При этом происходит отражение мощности от диода. Только незначительная часть ее попадает на выход. Канал закрыт. Последовательно включенный диод (рис.П1.2 а) в открытом состоянии является небольшим препятствием для распространяющейся волны. Канал открыт.

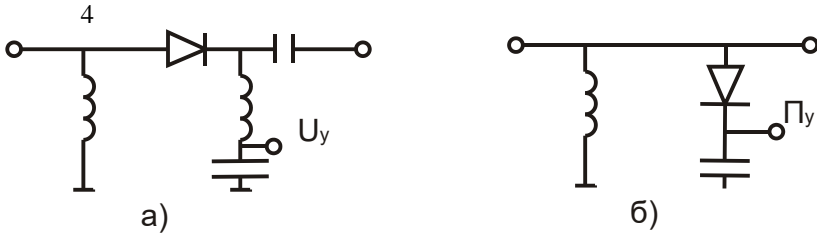


Рис.П1.2

МОЩНОСТЬ, РАССЕИВАЕМАЯ В ДИОДЕ.

При любом состоянии диода часть падающей мощности $P_{П\Delta Д}$ отражается от диода, часть рассеивается в диоде, а часть проходит в нагрузку. Если сопротивление диоде считать активным R , то нормированная мощность рассеяния равна:

$$p = P / P_{П\Delta Д} = 2S_{21}[1 + |\Gamma_H| S_{21}^2](1 - S_{21}) , \quad (\text{П1.1})$$

где S_{21} - элемент матрицы рассеяния, $S_{21} = 10^{-L/20}$;

$|\Gamma_H|$ - модуль коэффициента отражения от нагрузки;

I_f - ослабление, вносимое диодом:

- при параллельном включении диода

$$L_1 = 20 \lg(1 + Z_B / 2R) , \quad (\text{П1.2})$$

- при последовательном включении диода

$$L_1 = 20 \lg(1 + R / 2Z_B) , \quad (\text{П1.3})$$

Z_B - волновое сопротивление линии передачи, которое либо задается, либо рассчитывается по известной методике (см., напр., [6]).

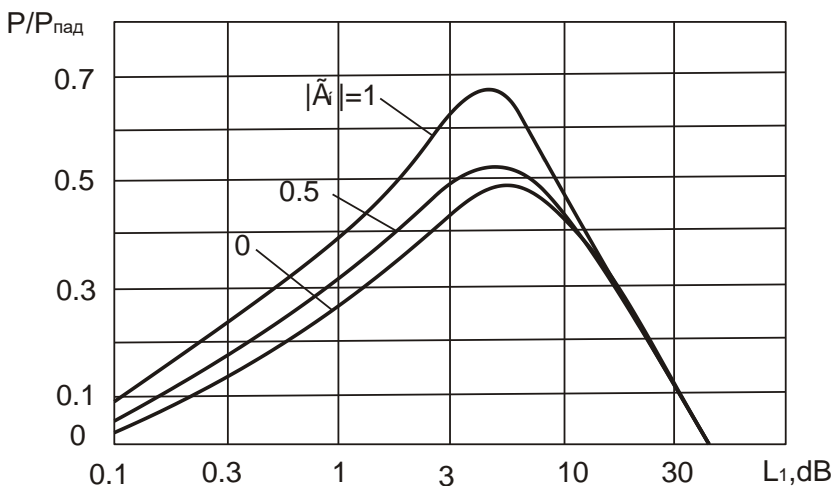


Рис.П1.3. График зависимости нормированной мощности рассеяния на диодах от ослабления при равных $|\Gamma_H|$

На рис.П1.3 приведен график зависимости нормированной мощности рассеяния от величины ослабления L_1 при различных величинах $|\Gamma_H|$. Из рисунка следует, что при $L_1 = 6$ дБ к $|\Gamma_H|=0$ в диоде рассеивается наибольшая мощность, равная половине падающей мощности.

Классификация схем диодных переключателей производится по следующим признакам:

1. По диапазону рабочих частот:
 - узкополосные (полоса частот меньше октавы);
 - широкополосные (больше октавы);
 - перестраиваемые.
 2. По количеству переключаемых каналов:
 - двухканальные;
 - трехканальные и т.д.
 3. По способу включения диодов в линию передачи:
 - с последовательным включением;
 - с параллельным включением;
 - с последовательно-параллельным включением.
 4. По виду схемы:
 - симметричная;
 - несимметричная.
- Б. По типу схемы:
- на основе связанных линий;
 - с использованием мостовых схем и т.д.

Основными параметрами переключателя являются: ослабление открытого канала (в режиме пропускания) L_{Π} , дБ; ослабление в режиме закрытого канала $L_{З}$, дБ; рабочая полоса частот $2\Delta f/f$ в пределах которой L_{Π} не более, а $L_{З}$ не менее заданного значения; время переключения τ , мкс; максимальная рассеиваемая СВЧ-мощность; допустимый коэффициент стоячей волны (КСВ) $K_{ст}$.

ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ ДИОДОВ.

Преимуществами схем с параллельными диодами являются независимость ослабления закрытого канала от частоты, возможность переключения больших мощностей и большая надежность, чем при последовательном включении. К недостаткам относятся - большие габариты и меньшая широкополосность.

На центральной частоте f_0 ослабление открытого канала определяется формулой:

$$L_{\Pi} = 20 \lg \left| 1 + \frac{Z_B Y_{ДЗ}}{2} \right|, \quad (\text{П1.4})$$

где $Y_{ДЗ}$ - проводимость запертого диода, равная

$$Y_{ДЗ} = 1 / R_{ОБР} + j\omega C$$

В нижней части СВЧ-диапазона:

$$Y_{ДЗ} \approx 1 / R_{ОБР}, \quad (\text{П1.5})$$

Модуль коэффициента отражения переключателя будет

$$|\Gamma| = \left| \frac{1}{1 + 2 / (Z_B Y_{ДЗ})} \right|, \quad (\text{П1.6})$$

Тогда коэффициент стоячей волны (КСВ)

$$K_{ст} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|},$$

а ослабление закрытого канала равно

$$L_{З1} = 20 \lg \left(1 + \frac{Z_B}{2R_{ПР}} \right), \quad (\text{П1.7})$$

Если с помощью одного диода не удается получить достаточно высокого ослабления закрытого канала, то следует увеличить количество

диодов в каждом канале. Для получения наибольшего ослабления L_3 диоды необходимо располагать на оптимальном расстоянии l , равном

$$l = \lambda_{BO} / 4 , \quad (\text{П1.8})$$

при этом

$$L_{3N} = NL_{31} + (N-1) / 6 , \quad (\text{П1.9})$$

где N - количество диодов,

L_{31} , - ослабление запертого канала с одним диодом.

Иногда с целью сокращения габаритов диоды располагаются как можно ближе друг к другу ($l \approx 0$). В этом случае

$$L_{3N} = 20 \lg \left(1 + \frac{NZ_B}{2R_{ПП}} \right) , \quad (\text{П1.10})$$

ослабление открытого канала

$$L_{ПН} = NL_{П1} = N 20 \lg \left| 1 + \frac{Z_B Y_{ДЗ}}{2} \right| . \quad (\text{П1.11})$$

Если $R_{обп} \leq 1 / \omega C$ или емкость диода скомпенсирована, то

$$L_{ПН} = 20 \lg \left| 1 + NZ_B / (2R_{обп}) \right| . \quad (\text{П1.12})$$

$$|\Gamma| \approx \left| \frac{Z_B NY_{ДЗ}}{2 + Z_B NY_{ДЗ}} \right| . \quad (\text{П1.13})$$

ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ ДИОДОВ.

Схемы с последовательным включением диодов обладают малыми габаритами и большей широкополосностью. Параметры с одним диодом равны

$$L_{П1} = 20 \lg \left(\frac{1 + R_{ПП}}{2R_{ОБП}} \right) . \quad (\text{П1.14})$$

$$L_{П1} = 20 \lg \left| 1 + \frac{1}{2Z_B Y_{ДЗ}} \right| + 6 , \quad (\text{П1.15})$$

где

$$Y_{ДЗ} = 1 / R_{ОБП} + j2\pi f_{\max} C .$$

Коэффициент отражения

$$\Gamma = R_{ПП} / (2Z_B + R_{ПП}) . \quad (\text{П1.16})$$

Если один диод не обеспечивает получения требуемого ослабления закрытого канала, то следует увеличить количество диодов в каждом канале. Оптимальное расстояние между диодами находится по формуле

$$l = \frac{\lambda_{ВО}}{2} \arctg \left(\frac{-4\pi f_0 C R_{ОБП} Z_B}{R_{ОБП} + 2Z_B} \right) + \frac{\lambda_{ВО}}{4} .$$

Ослабление закрытого канала с N диодами не центральной частоте f определяется по формуле

$$L_{3N} \approx NL_{31} + 6 .$$

Если $l \approx 0$, то

$$L_{3N} \approx 20 \lg \left| 1 + \frac{N}{2Z_B Y_{ДЗ}} \right| + 6 .$$

Ослабление открытого канала

$$L_{П1} \approx 20 \lg (1 + R_{ПП} / 2Z_B) ,$$

$$|\Gamma| = \frac{NR_{ПП}}{2Z_B + NR_{ПП}} .$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ НА p-i-n ДИОДАХ

ПРИМЕР 1

Рассчитать двухканальный переключатель на плате из поликора ($\epsilon = 9.6$), толщиной $h = 1$ мм; волновое сопротивление линии передачи $Z_B = 50$ Ом; рабочая полоса частот $(f_0 \pm \Delta f) = (3 \pm 0.6)$ ГГц; ослабление открытого канала $L_{\Pi} \leq 25$ дБ, закрытого канала $L_{\Pi} \geq 25$ дБ; КСВ по входу $K_{CT} \leq 1.5$, $\tau \leq 50$ мкс; $P_{РАД} = 2$ Вт; $t^0 = -60 \dots + 125^0$ С

1. Заданная полоса частот $2\Delta f / f_0 = 1.2 / 3 = 0.4 = 40\%$ т.е. коэффициент перекрытия $K_D = f_{\max} / f_{\min} = 1.5 < \text{октавы } (K_D < 2)$. При такой полосе частот нужно использовать схему с параллельным включением диодов.

2. Требованиям технического задания из табл.П1 удовлетворяет диод 2А516А. Его параметры: $R_{ГР} = 6.5$ Ом; $R_{ОБР} = 3$ кОм; $C = 0.18$ пФ; $P_{\max} = 1$ Вт; тогда

$$Y_{ДЗ} = 1 / R_{обp} + j\omega C = (0.33 + j4.07) \cdot 10^{-3} \text{ См} - \text{ на верхней частоте.}$$

3. По формулам (П1.4) и (П1.7) определим величины ослабления открытого и закрытого каналов: $L_{31} = 13.7$ дБ - менее заданного, следовательно, количество диодов необходимо увеличить.

4. Возьмем количество диодов в каждом канале $N = 2$. По формулам (П1.9) и (П1.10):

$$L_{32} \approx NL_{31} + (N - 1) \cdot 6 = 2 \cdot 13.7 + 6 = 33.4 \text{ дБ (при } l = \lambda_{BO} / 4 \text{);}$$

$$L_{32} \approx 18.78 \text{ дБ (при } l = 0 \text{).}$$

При $l = \lambda_{BO} / 4$ ослабление больше заданного. Выбираем по 2 диода в каждом канале на расстоянии $l = \lambda_{BO} / 4$. Тогда

$$L_{32} \approx 20 \lg \left| 1 + \frac{NZ_B Y_{ДЗ}}{2} \right| = 0.315 \text{ дБ.}$$

Ослабление открытого канала менее заданного (1 дБ).

5. Оценим КСВ переключателя. По формуле (П1.13)

$$|\Gamma| = \left| \frac{Z_B NY_{ДЗ}}{2 + Z_B NY_{ДЗ}} \right| = 0.2, \quad K_{СТ} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}.$$

6. Оценим мощность, рассеиваемую диодами. По формуле (П1.2) определим ослабление при запертом ($R = R_{ОБР}$) и при открытом диоде ($R = R_{ПР}$):

$$L_{П1} = 20 \lg(1 + Z_B / (2R_{ОБР})) = 0.072 \text{ дБ}$$

$$L_{31} = 20 \lg(1 + Z_B / (2R_{ПР})) = 13.7 \text{ дБ}$$

По графику на рис. П1.3 при $|\Gamma| = 0$ находим

$$p \approx 0.02 P_{ПД} = 0.02 \cdot 2 = 0.04 \text{ Вт при } L_1 = 0.072 \text{ дБ.}$$

$$p \approx 0.3 P_{ПД} = 0.3 \cdot 2 = 0.6 \text{ Вт при } L_1 = 13.7 \text{ дБ.}$$

При любом состоянии диода рассеиваемые мощности менее допустимой для диода $P_{\max} = 1$ Вт. Значит можно остановиться на схеме, с двумя параллельно включенными диодами.

ПРИМЕР 2

Рассчитать двухканальный переключатель на плате из поликора ($e = 9.6$), толщиной $h = 1$ мм; волновое сопротивление линии передачи $Z_B = 50$ Ом; рабочая полоса частот $f_{\min} = 0.4$ ГГц; $f_{\max} = 3.2$ ГГц; $L_{П} < 2$ дБ, $L_3 > 20$ дБ; $K_{СТ} \leq 1.5$; $\tau \leq 10$ мкс; $P_{пад} = 2$ Вт; $t^0 = -60 \dots +125^\circ \text{C}$

1. Заданная полоса частот находится в нижней части диапазона СВЧ. Коэффициент перекрытия диапазона велик: $K_D = 3.2/0.4 = 8$, т.е. переключатель должен быть широкополосным. Заданный коэффициент перекрытия можно обеспечить только с помощью последовательного включения диодов. Для данного технического задания хорошо подходит диод типа 2A517A (см. табл. П1). Его параметры следующие: $R_{ПР} = 5$ Ом; $R_{ОБР} = 8$

кОм; $C = 0.3$ пФ; $\tau = 0.5$ мкс; $P_{\max} = 0.2$ Вт.

$$Y_{ДЗ} = 1/R_{\text{обр}} + j\omega_{\text{MAX}}C = (0.125 + j6.03) \cdot 10^{-3} \text{ См.}$$

2. По формулам (П1.14) и (П1.15) определил величину ослабления открытого $L_{П1}$ и закрытого $L_{З1}$ каналов, если в каждый канал включено по одному последовательному диоду:

$$L_{П1} = 20\lg(1 + R_{ПР} / (2Z_B)) = 20\lg(1 + 5 / 100) = 0.424 \text{ дБ,}$$

$$L_{З1} = 20\lg(1 + 1 / (2Z_B Y_{ДЗ})) + 6 = 11.22 \text{ дБ.}$$

Ослабление $L_{З1}$ менее заданного, следовательно, количество диодов N необходимо увеличить.

3. Возьмем $N = 3$. Поскольку полоса частот велика, то расстояние между l диодами следует брать как можно меньше ($l = 0$). По формулам (П1.19) и (П1.20) определим ослабление открытого и закрытого каналов:

$$L_{ПЗ} = 20\lg(1 + NR_{ПР} / (2Z_B)) = 1.2 \text{ дБ,}$$

$$L_{ЗЗ} = 20.14 \text{ дБ.}$$

Оба ослабления удовлетворяют условиям технического задания. Поэтому следует выбрать схему с тремя последовательными диодами в каждом канале.

4. Оценим КСВ переключателя.

$$|\Gamma| = NR_{ПР} / (Z_B + NR_{ПР}) = 0.13,$$

$$K_{\text{св}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} = 1.3.$$

КСВ получилось менее заданного.

5. Рассчитаем мощность, рассеиваемую диодами. По формуле (П1.3) определим

$$L_{П1} = 0.424 \text{ дБ; } L_{З1} = 11.22 \text{ дБ.}$$

По графику на рис.П1.3 определим мощность, рассеиваемую в диоде при $|\Gamma| = 0$:

$$p = 0.1P_{\text{ПД}} = 0.1 \cdot 2 = 0.2 \text{ Вт при } L_1 = 0.424 \text{ дБ.}$$

$$p = 0.02P_{\text{ПД}} = 0.02 \cdot 2 = 0.04 \text{ Вт при } L_1 = 38.2 \text{ дБ.}$$

Получившаяся мощность при любом состоянии диода менее допустимого для диода $P_{\max} = 0.2$ Вт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вайсблат А.В. Коммутационные устройства СВЧ на полупроводниковых диодах [Текст]: учебник для вузов / А.В. Вайсблат - М.: Радио и связь, 1987, - 280 с. – (Учебник для вузов)
2. Рассанов Л.Г. и др. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи [Текст]: учебник для вузов /Л.Г. Рассанов - М.: Радио и связь, 1988, стр.137-142. – (Учебник для вузов)
3. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ [Текст]: учебник для радиотехн. спец. вузов / Д.М Сазонов - М.: Высшая школа, 1988, стр.157-162.- (Учебник для радиотехн. спец. вузов)
4. Неганов В.А. Методическая разработка "Исследование волноводах ферритовых СВЧ - устройств"[Текст]: учебник для вузов / В.А. Неганов - Самара, ПИИРС, 1992, 38 с. – (Методическая разработка)
5. Ключев Д.С., Осипов О.В. Приборы СВЧ и оптического диапазона [Текст]: конспект лекций / Д.С. Ключев, О.В. Осипов, - Самара: Типография ПГУТИ, 2014, - 210 с. – (Конспект лекций)
6. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств [Текст]: справочник / Под ред. В.И Вольмана.- М.: Радио и связь, 1982, -328 с. – (Справочник)
7. Пахомов В.В., Вечканова Р.А., Таллина Н.М. Устройства СВЧ на полупроводниковых диодах[Текст]: учебное пособие / В.В Пахомов и др.- КуАИ, Куйбышев, 1989, 324 с. – (Учебное пособие)
8. Приложения к настоящей методической разработке.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ И
АТТЕНЮАТОРОВ НА p-i-n- ДИОДАХ.....3

Лабораторная работа №2

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ И
АТТЕНЮАТОРОВ НА p-i-n- ДИОДАХ.....9

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И ФОРМУЛЫ РАС-
ЧЕТА ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ НА p-i-n – ДИОДАХ18

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ.....25

ЛИТЕРАТУРА.....28