

Министерство науки и высшего образования РФ
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет»
Инженерно-физический факультет высоких технологий
Кафедра радиоп физики и электроники

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
для самостоятельной работы по дисциплине
«СВЧ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОПАРАМЕТРОВ
СВЧ-МОДУЛЕЙ»
студентов бакалавриата по направлению 03.03.03 - Радиоп физика
Очная форма обучения

Семенов А. Л.

Ульяновск 2020

Методические указания для самостоятельной работы по дисциплине «СВЧ полупроводниковые приборы и методы автоматизированного контроля электропараметров СВЧ модулей» студентов бакалавриата по направлению 03.03.03 - Радиофизика. Очная форма обучения. Семенов А. Л. - Ульяновск: УлГУ, 2020.

Настоящие методические указания предназначены для студентов бакалавриата по направлению 03.03.03 - Радиофизика, изучающих дисциплину «СВЧ полупроводниковые приборы и методы автоматизированного контроля электропараметров СВЧ модулей». В работе приведены методические рекомендации по выполнению самостоятельной работы, задания для самостоятельного выполнения, список рекомендуемой литературы, программное обеспечение по дисциплине. Предназначены для студентов очной формы обучения при подготовке к лабораторным занятиям и к экзамену (зачету) по данной дисциплине. Рекомендованы к использованию Ученым советом инженерно-физического факультета высоких технологий УлГУ Протокол № от «_____» 2020 г.

1. Методические рекомендации по выполнению самостоятельной работы.

По данной дисциплине организуется и проводится внеаудиторная самостоятельная работа.

Самостоятельная работа студентов, предусмотренная учебным планом в объеме не менее 50-70% общего количества часов, должна соответствовать более глубокому усвоению изучаемого курса, формировать навыки исследовательской работы и ориентировать студентов на умение применять теоретические знания на практике.

Самостоятельная работа по данной дисциплине состоит из следующих модулей:

- подготовка к лабораторным занятиям;
- подготовка к зачету (экзамену).

При подготовке к лабораторным занятиям и контрольным мероприятиям рекомендуется руководствоваться учебниками и учебными пособиями, в том числе и информацией, полученной в Internet.

Студентам рекомендуется следующий порядок организации самостоятельной работы над темами и подготовки к практическим занятиям:

- ознакомиться с содержанием темы;
- прочитать материал лекций, при этом нужно составить себе общее представление об излагаемых вопросах;
- прочитать параграфы учебника, относящиеся к данной теме;
- перейти к тщательному изучению материала, усвоить теоретические положения и выводы, при этом нужно записывать основные положения темы (формулировки, определения, термины, воспроизводить отдельные схемы и чертежи из учебника и конспекта лекций).

Результаты самостоятельной работы контролируются преподавателем и учитываются при аттестации студента (зачет).

2. Задания для самостоятельного выполнения.

Тема 1. Классификация приборов СВЧ.

СВЧ диапазон. Особенности СВЧ волн. Классификация электронно-вакуумных и полупроводниковых приборов СВЧ.

Рекомендации по изучению темы:

Вопросы темы изложены в учебно-методическом пособии [2] на с.6-12.

Тема 2. СВЧ волноводы, резонаторы и замедляющие структуры.

Виды и методы описания СВЧ волноводов, резонаторов и замедляющих структур. Эквивалентные схемы СВЧ волноводов, резонаторов и замедляющих структур.

Рекомендации по изучению темы:

Вопросы темы изложены в учебно-методическом пособии [2] на с.36-67.

Тема 3. Электронно-вакуумные СВЧ приборы типа О.

Принцип динамического управления электронным потоком. Принцип работы, параметры и характеристики двухрезонаторного пролётного клистрона. Отражательный клистрон.

Принцип работы приборов типа О с кратковременным взаимодействием. Замедляющие системы. Особенности устройства и применения лампы бегущей волны типа О. Лампа обратной волны типа О.

Рекомендации по изучению темы:

Вопросы темы изложены в учебно-методическом пособии [2] на с.105-168.

Тема 4. Электронно-вакуумные СВЧ приборы типа М.

Движение электрона в скрещенных электрическом и магнитном полях. Взаимодействие электронов и СВЧ поля в приборах типа М. Уст-

ройство, принцип работы и особенности применения многорезонаторного магнетрона. Лампы бегущей и обратной волны типа М.

Рекомендации по изучению темы:

Вопросы темы изложены в учебно-методическом пособии [2] на с.169-210.

Тема 5. СВЧ диоды.

Полупроводниковые активные и пассивные приборы для техники СВЧ. Диоды для СВЧ диапазона. Диоды с накоплением заряда и рпн-диоды.

Лавинно-пролётный диод (ЛПД), пролётный режим его работы. Особенности устройства и применения ЛПД. Параметры и характеристики генераторов и усилителей на ЛПД.

Полупроводниковые СВЧ приборы с объёмной неустойчивостью. Диод Ганна, доменный режим его работы. Особенности устройства и применения СВЧ приборов на диодах Ганна.

Рекомендации по изучению темы:

Вопросы темы изложены в учебно-методическом пособии [2] на с.211-262.

Тема 6. СВЧ транзисторы.

Биполярные и полевые СВЧ транзисторы: их основные типы и характеристики (вольт-амперные, частотные). СВЧ транзисторы на гетероструктурах. Принципы конструирования генераторов и усилителей на СВЧ транзисторах.

Рекомендации по изучению темы:

Вопросы темы изложены в учебно-методическом пособии [2] на с.263-272.

3. Вопросы для текущего контроля при выполнении лабораторных работ

Лабораторные работы из учебно-методического пособия [9]:

Лабораторная работа №1. Распределение напряжения вдоль волновода

1. Что называют фазой волны и коэффициентом фазы? Что показывает коэффициентом фазы? Вычислите длину волны при $\beta=0.1\pi$.
2. Дайте определение амплитуды волны. Что называют длиной ослабления амплитуды волны и коэффициентом ослабления? Вычислите длину ослабления при $\alpha=0.01$.
3. Дайте определение коэффициента отражения. Как он зависит от сопротивления нагрузки и в каких пределах меняется?
4. Чему равна амплитуда отраженной волны A_2 в согласованном режиме, при холостом ходе и при коротком замыкании?
5. Изобразите схематично зависимости u_n (8) от n вблизи узла N .
6. Какое напряжение показывает вольтметр на рис.1, если в волноводе распространяется волна (1)?

Лабораторная работа №2. Зависимость входного сопротивления волновода от его относительной длины

1. Дайте определение входного сопротивления волновода и относительной длины волновода δ . Поясните формулу (11).
2. При каких значениях δ входное сопротивление волновода становится бесконечным? Нарисуйте схематично зависимости $|Z_{вх}(\delta)|$ (12).
3. Как связана частота с относительной длиной волновода? Почему?
4. Выведите формулы (10) из формулы (9).

5. Выведите формулу (9).

Лабораторная работа №3. Зависимость входного сопротивления волновода от сопротивления нагрузки

1. Дайте определение входного сопротивления волновода и относительной длины волновода δ .
2. Выведите формулы (14) и (15) из уравнения (9). Нарисуйте схематично графики зависимости $Z_{вх}(Z_{н})$.
3. Почему в работе частоту приложенного напряжения берут равной 0.368кГц и 0.735кГц?
4. Каким должно быть волновое сопротивление волновода, согласованно связывающего каскад с выходным сопротивлением Z_1 с каскадом с входным сопротивлением Z_2 ? Почему?

Лабораторная работа №4. Закон дисперсии волновода

1. Что называется законом дисперсии? Нарисуйте схематично график зависимости $f(\beta)$ (20).
2. Что называется первой зоной Бриллюэна? Чем отличаются волны с $\beta > 0$ и $\beta < 0$?
3. Опишите метод определения коэффициента фазы β . Нарисуйте схематично график зависимости u_{16}/u_{17} от β .
4. Выведите уравнения (16), (20), (22).

Лабораторная работа №5. Зависимость коэффициента ослабления волновода от частоты

1. Покажите, что зависимость (17) при $\beta = \pi - i\alpha$ описывает стоячую волну? Чему равна ее амплитуда?

2. Что называют коэффициентом ослабления? Какой у него физический смысл? Чем обусловлено ослабление волны напряжения при $f > f_0$?
3. Дайте определение полосы пропускания волновода.
4. Нарисуйте схематично график зависимости $\alpha(f)$. Выведите уравнение (24).
5. Объясните формулу (25).

Лабораторная работа №6. Зависимость времени задержки сигнала в волноводе от частоты

1. Дайте определение фазовой скорости. В каких единицах она измеряется и что показывает? Чему равна фазовая скорость при $f \ll f_0$, $f = f_0$ и $f = 2f_0$?
2. Дайте определение групповой скорости. Предложите метод ее измерения в волноводе.
3. Выведите формулу (28). Нарисуйте схематично график зависимости $\tau(f)$ (28).
4. Выведите формулу для групповой скорости в зависимости от частоты. Чему равна групповая скорость при $f \ll f_0$, $f = f_0$ и $f = 2f_0$?

Лабораторная работа №7. Коэффициент полезного действия волновода

1. Что называется коэффициентом полезного действия? В каких пределах он меняется?
2. Чему равен КПД в режиме холостого хода и при коротком замыкании?
3. Как влияет отраженная от нагрузки волна на КПД? При какой нагрузке КПД максимален? Чему он равен?
4. Выведите зависимости $\eta(Z_n)$ и $P(Z_n)$ для постоянного тока.

Лабораторная работа №8. Коэффициент бегущей волны

1. Что называется коэффициентом бегущей волны? Что он описывает и в каких пределах меняется?
2. Получите формулу (36). Постройте график зависимости КБВ от Z_n/Z .
3. Что называется коэффициентом стоячей волны? Постройте график зависимости КСВ от Z_n/Z .
4. Почему соседние экстремумы амплитуды колебаний напряжения находятся в узлах 10 и 17? Где находится минимум и где максимум?
5. В чем состоит метод векторных диаграмм?

Лабораторная работа №9. Резонансные частоты резонатора

1. Обоснуйте граничные условия (37).
2. Чему равно напряжение u_0 при резонансе?
3. Нарисуйте схематично распределение напряжения u_n вдоль волновода при колебаниях на 1-ой и 2-ой собственных частотах ($m=1$, $m=2$).
4. Сколько длин волн укладывается на длине волновода при колебаниях на m -ой собственной частоте?
5. Напишите граничные условия и ответьте на вопросы 2-4 в случае короткого замыкания выхода волновода.

Лабораторная работа №10. Форма резонансной кривой резонатора

1. Нарисуйте схематично график зависимости $u(f)$ (42).
2. На каких частотах из таб.10.2 ожидается максимум и минимум напряжения?

3. Выведите формулы (41), (42), (43).

Лабораторная работа №11. Коэффициент передачи волновода

1. Дайте определение коэффициента передачи по напряжению? Чему он равен в согласованном режиме, при коротком замыкании и в режиме холостого хода?
2. В переменных (Z_n, K) нарисуйте схематично область допустимых значений коэффициента передачи $K(Z_n, f)$.
3. В чем состоит метод векторных диаграмм?

4. Вопросы к экзамену

1. Классификация электронно-вакуумных и полупроводниковых приборов СВЧ.
2. Приборы типа О. Принцип динамического управления электронным потоком.
3. Принцип работы, параметры и характеристики двухрезонаторного пролётного клистрона.
4. Принцип работы, параметры и характеристики отражательного клистрона.
5. Принцип работы приборов типа О с кратковременным взаимодействием. Замедляющие системы.
6. Особенности устройства и применения лампы бегущей волны типа О.
7. Особенности устройства и применения лампы обратной волны типа О.
8. Движение электрона в скрещенных электрическом и магнитном полях.
9. Взаимодействие электронов и СВЧ поля в приборах типа М.
10. Устройство, принцип работы и особенности применения многорезонаторного магнетрона.

11. Диоды для СВЧ диапазона. Диоды с накоплением заряда и pin-диоды.
12. Лавинно-пролётный диод, пролётный режим его работы.
13. Диод Ганна, доменный режим его работы.
14. Биполярные и полевые СВЧ транзисторы, СВЧ транзисторы на гетероструктурах.
15. Принципы конструирования генераторов и усилителей на СВЧ транзисторах.
16. Микрополосковые, щелевые и копланарные линии.
17. СВЧ волноводы и резонаторы в микрополосковом исполнении.
18. Принципы конструирования СВЧ устройств в интегральном исполнении.

5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

а) Список рекомендуемой литературы

основная

1. Петрушанский, М. Г. Электронные приборы СВЧ [Электронный ресурс] : учебное пособие / М. Г. Петрушанский. — Электрон. текстовые данные. — Оренбург : Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2017. — 107 с. — 978-5-7410-1838-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/78927.html>
2. Соколова, Ж. М. Приборы и устройства СВЧ, КВЧ и ГВЧ диапазонов [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ж. М. Соколова. — Электрон. текстовые данные. — Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. — 283 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/13961.html>
3. Куш, Г. Г. Приборы и устройства оптического и СВЧ диапазонов [Электронный ресурс] : учебное пособие / Г. Г. Куш, Ж. М. Соколова, Л.

И. Шангина. — Электрон. текстовые данные. — Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. — 414 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/14020.html>

дополнительная

4. Антенны и устройства СВЧ: расчет и измерение характеристик : учеб. пособие для вузов / Ю. Е. Мительман, Р. Р. Абдуллин, С. Г. Сычугов, С. Н. Шабунин ; под общ. ред. Ю. Е. Мительмана. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 138 с. — (Серия : Университеты России). — ISBN 978-5-534-08002-5. — Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://www.biblio-online.ru/book/antenny-i-ustroystva-svch-raschet-i-izmerenie-harakteristik-438606>

5. Яковенко, В. А. Мощные широкополосные усилительно-преобразовательные тракты СВЧ на полупроводниковых приборах : монография / В. А. Яковенко. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2012. — 366 с. — ISBN 978-5-7782-1972-4. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/45115.html>

6. Приборы сверхвысоких частот и оптического диапазона в вопросах и ответах. Часть 2. Полупроводниковые приборы СВЧ : учебное пособие / составители Г. М. Аристархов, А. А. Елизаров, В. И. Николотов. — М. : Московский технический университет связи и информатики, 2012. — 48 с. — ISBN 2227-8397. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/63353.html>

7. **Электродинамика** и техника **СВЧ** : учебник по спец. "Электрон. приборы и устройства" / Григорьев Андрей Дмитриевич. - Москва : Высшая школа, 1990. - 335 с.

8. Измерение параметров элементов СВЧ трактов. Томск: ТГУ, 1983 (24 экз.).

учебно-методическая

9. **Семенов** А.Л. Электрический волновод : методические указания к лабораторным работам / А. Л. **Семенов**; УлГУ, ИФФВТ, Каф. радиофизики и электроники. - Ульяновск : УлГУ, 2020. - Загл. с экрана; Неопубликованный ресурс. - Электрон. текстовые дан. (1 файл : 491 КБ). - Текст : электронный.

10. **Электродинамика СВЧ** : лабораторный практикум / С. А. Афанасьев, А. П. Гераскин; ИФФВТ. - Ульяновск : УлГУ, 2007. - 72 с. – Режим доступа: <ftp://10.2.96.134/Text/afanasjev1.pdf>

11. **Введение в электродинамику СВЧ** : учеб. пособие / С. А. Афанасьев, Д. Г. Санников; УлГУ, ИФФВТ. - Ульяновск : УлГУ, 2012. - 60 с. – Режим доступа: <ftp://10.2.96.134/Text/afanasjev3.pdf>

б) Программное обеспечение:

- Операционная система Windows;
- Пакет офисных программ Microsoft Office.

в) Профессиональные базы данных, информационно-справочные системы:

1. Электронно-библиотечные системы:

1.1. **IPRbooks** [Электронный ресурс]: электронно-библиотечная система/ группа компаний Ай Пи Эр Медиа. - Электрон. дан. - Саратов, [2019]. - Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru>.

1.2. **ЮРАЙТ** [Электронный ресурс]: электронно-библиотечная система/ ООО Электронное издательство ЮРАЙТ. - Электрон. дан. – Москва, [2019]. - Режим доступа: <https://www.biblio-online.ru>.

1.3. **Консультант студента** [Электронный ресурс]: электронно-

библиотечная система/ ООО Политехресурс. - Электрон. дан.
– Москва, [2019]. - Режим доступа:
<http://www.studentlibrary.ru/pages/catalogue.html>.

1.4. **Лань** [Электронный ресурс]: электронно-библиотечная система/ ООО ЭБС Лань. - Электрон. дан. – С.-Петербург, [2019]. - Режим доступа: <https://e.lanbook.com>.

1.5. **Znanium.com** [Электронный ресурс]: электронно-библиотечная система/ ООО Знаниум. - Электрон. дан. – Москва, [2019]. - Режим доступа: <http://znanium.com>.

2. **КонсультантПлюс** [Электронный ресурс]: справочная правовая система/ Компания «Консультант Плюс». - Электрон. дан. - Москва: КонсультантПлюс, [2019].

3. **База данных периодических изданий** [Электронный ресурс]: электронные журналы/ ООО ИВИС. - Электрон. дан. - Москва, [2019]. - Режим доступа: <https://dlib.eastview.com/browse/udb/12>.

4. **Национальная электронная библиотека** [Электронный ресурс]: электронная библиотека. - Электрон. дан. – Москва, [2019]. - Режим доступа: <https://нэб.рф>.

5. **Электронная библиотека диссертаций РГБ** [Электронный ресурс]: электронная библиотека/ ФГБУ РГБ. - Электрон. дан. – Москва, [2019]. - Режим доступа: <https://dvs.rsl.ru>.

6. **Федеральные информационно-образовательные порталы:**

6.1. Информационная система [Единое окно доступа к образовательным ресурсам](http://window.edu.ru). Режим доступа: <http://window.edu.ru>.

6.2. Федеральный портал [Российское образование](http://www.edu.ru). Режим доступа: <http://www.edu.ru>.

7. **Образовательные ресурсы УлГУ:**

7.1. Электронная библиотека УлГУ. Режим доступа: <http://lib.ulsu.ru/MegaPro/Web>.

7.2. Образовательный портал УлГУ. Режим доступа:

<http://edu.ulsu.ru>.

8. Профессиональные информационные ресурсы:

8.1. Материалы о менеджменте качества. Режим доступа:
<http://quality.eur.ru>.

8.2. Издательство «Стандарты и качество». Режим доступа:
<http://www.stq.ru>.

8.3. Ассоциация Деминга. Режим доступа: <http://www.deming.ru>.

Центр «Приоритет». Режим доступа: <http://www.centerprioritet.ru>.