

Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины
Севастопольский национальный технический университет



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
лабораторный практикум
по дисциплине
«Электронные и квантовые приборы СВЧ»
для студентов дневной и заочной формы обучения
по направлению 6.050901 — Радиотехника.

Севастополь
2013 г.

Методические указания «Лабораторный практикум по дисциплине «Электронные и квантовые приборы СВЧ» для студентов дневной и заочной форм обучения по направлению 6.050901 — Радиотехника / Сост. А.В. Лукьянчиков — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013. — 40 с.

Целью данной работы является оказание помощи студентам в выполнении лабораторных работ по дисциплине «Электронные приборы и квантовые приборы СВЧ». Излагается методика выполнения лабораторных работ, требования к содержанию и оформлению отчетов.

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры радиотехники и телекоммуникаций (протокол № _ от __ _____ 2013 г.)

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний.

Рецензент: канд. техн. наук, доцент Зиборов С.Р.

Ответственный за выпуск: заведующий кафедрой радиотехники и телекоммуникаций, доктор техн. наук, профессор Гимпилевич Ю.Б.,

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Лабораторная работа № 1 Исследование отражательного клистрона.....	6
2. Лабораторная работа № 2 Исследование лампы бегущей волны	10
3. Лабораторная работа № 3 Исследование лампы обратной волны.....	15
4. Лабораторная работа № 1 Исследование многорезонаторного магнетрона непрерывного действия	19
5. Лабораторная работа № 5 Исследование диода ганна и генератора на его основе	23
Библиографический список	36
Приложение А Образец титульного листа	37

ВВЕДЕНИЕ

Правила выполнения лабораторных работ

Каждая лабораторная работа выполняется в течение двухчасового занятия бригадой из 2...3 студентов.

Перед выполнением лабораторной работы студенты обязаны:

- представить и защитить отчет по предыдущей лабораторной работе;
- изучить описание предстоящей лабораторной работы;
- изучить методику проведения необходимых измерений и расчетов;
- ознакомиться с правилами включения и эксплуатации измерительных приборов, входящих в состав лабораторной установки;
- ответить на контрольные вопросы, которые приведены в конце описания каждой лабораторной работы.

Студенты, не выполнившие вышеуказанные требования, к работе не допускаются.

В начале работы бригада студентов должна собрать лабораторную установку.

Питание измерительных приборов и лабораторного макета включается **только после проверки преподавателем** правильности сборки лабораторной установки.

При выполнении очередного опыта рекомендуется сначала произвести этот опыт без каких-либо записей, что позволяет убедиться в работоспособности лабораторной установки и выявить общий характер исследуемой зависимости. При этом следует приблизительно отметить линейные и нелинейные участки зависимости, что позволит правильно выбрать интервал между отсчетами независимой переменной величины (частоты, напряжения и т. п.), пределы ее изменения, а также число отсчетов, достаточных для выявления особенностей исследуемой зависимости. Затем данный опыт повторяется с фиксацией результатов эксперимента, которые заносятся в соответствующие таблицы протокола лабораторной работы. После завершения работы преподаватель просматривает и подписывает протокол выполненной работы, на основании которого студенты оформляют отчеты.

При выполнении моделирования на персональном компьютере необходимо создать с помощью программы **OpenOffice Word** электронный протокол лабораторной работы, который по окончании лабораторной работы следует показать преподавателю, а затем скопировать на личный носитель информации (дискету, флэш-память и т. п.).

Защита отчета по выполненной лабораторной работе производится каждым студентом индивидуально на очередном лабораторном занятии. В процессе защиты проверяются: правильность оформления отчета, знание студентами методики проведения экспериментов, умение пояснять полученные зависимости и обосновывать выводы по работе.

Правила оформления отчета по лабораторной работе

Отчет по работе оформляется в соответствии с требованиями, приведенными в [6] и должен содержать:

- титульный лист;
- постановку задачи исследования (цель);
- пространственно-временную диаграмму работы исследуемого прибора;
- конструкцию прибора;
- теоретические сведения в объеме необходимом для ответа на контрольные вопросы;
- структурную схему лабораторной установки;
- результаты экспериментов и расчетов;
- выводы.

Образец оформления титульного листа приведен в Приложении А.

При постановке задач исследования необходимо указать цель лабораторной работы и задание, которое необходимо выполнить в процессе работы.

Вид структурной схемы лабораторной установки, приводимой в отчете, конкретизирован в методических указаниях к каждой лабораторной работе.

Результаты экспериментов и расчетов должны быть представлены в виде таблиц и расчетных формул. При описании результатов экспериментов необходимо указать условия каждого эксперимен-

та, озаглавить таблицы с экспериментальными данными, пояснить расчетные формулы.

По полученным экспериментальным данным и результатам расчетов необходимо построить графики исследуемых зависимостей и сопроводить их соответствующими подрисуночными подписями.

Выводы должны носить конкретный характер и соответствовать полученным результатам. Не следует подменять выводы перечислением выполненных измерений и наблюдений. Необходимо пояснить особенности исследованных зависимостей, оценить соответствие расчетных и экспериментальных данных, а в случае их расхождения привести предположения о возможных причинах, вызвавших такое расхождение.

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО КЛИСТРОНА

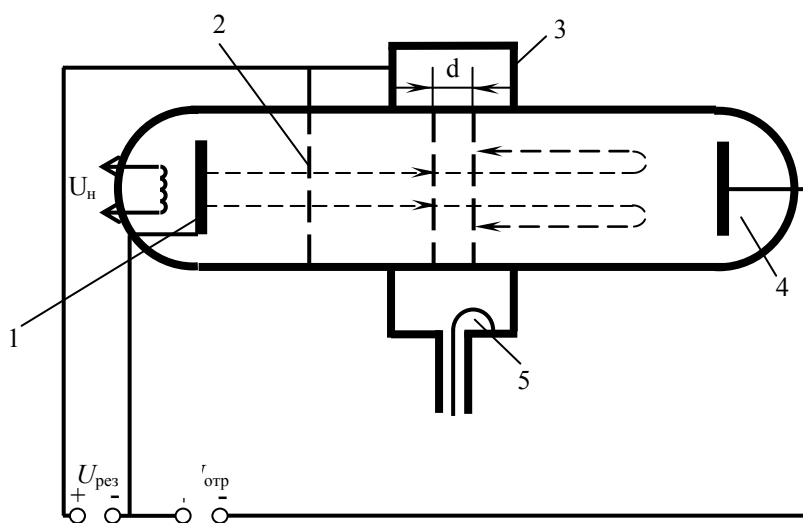
1.1 Цель работы

Изучение физических процессов генерации СВЧ колебаний отражательным клистроном, и экспериментальные исследования его параметров и характеристик.

1.2 Краткие теоретические сведения

Отражательный клистрон представляет собой электровакуумный прибор, используемый для генерирования электромагнитных колебаний в диапазоне от сантиметровых до субмиллиметровых длин волн.

На рис. 1.1 показано устройство отражательного клистрона.



1 — катод; 2 — ускоряющий электрод; 3 — резонатор;
4 — отражатель; 5 — петля связи.

Рис. 1.1 — Конструкция отражательного клистрона

Принцип действия отражательного клистрона основан на кратковременном взаимодействии электронов с высокочастотным электрическим полем. В качестве колебательной системы в отражательном клистроне используется резонатор, выполняющий функцию модулятора электронов по скорости и отбора СВЧ энергии от модулированного по плотности электронного потока.

Работу отражательного клистрона можно пояснить следующим образом. Электроны, ускоренные напряжением $U_{рез}$, попадают в пространство между сетками резонатора 3, где модулируются по скорости колебаниями высокочастотного электрического поля. Пролетев резонатор, электроны попадают в пространство между второй сеткой резонатора и отражателем 4. Последний, имея отрицательный потенциал, тормозит и возвращает электроны обратно в резонатор. При торможении и возврате электроны формируются в сгустки (процесс модуляции по плотности электронного потока).

Для того, чтобы клистрон мог генерировать незатухающие СВЧ колебания, сгустки электронов при обратном движении должны проходить резонатор, когда в нем имеется тормозящее электрическое поле. Этому режиму соответствует оптимальное время пролета $t_{опт}$ электронов в пространстве группирования и оптимальный угол пролета

$$\theta_{опт} = \omega t_{опт} = \frac{3}{4}\pi + 2n\pi,$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$

Каждому значению n соответствует определенная зона генерации клистрона. Изменение угла пролета приводит к уменьшению времени эффективного взаимодействия возвращающихся электронов с СВЧ полем резонатора и, как следствие, к снижению амплитуды колебаний и, наконец, к срыву гене-

рации.

Практически в отражательном клистроне угол пролета меняется путем регулирования напряжения на отражателе $U_{отр}$. Изменяя $U_{отр}$ в пределах одной зоны генерации клистрона, можно менять частоту его колебаний, т. е. осуществлять электронную перестройку частоты, рис. 1.2. Настройка, клистрона на заданную частоту, помимо изменения напряжения на отражателе, может производиться путем изменения объема и параметров резонатора (механическая перестройка частоты).

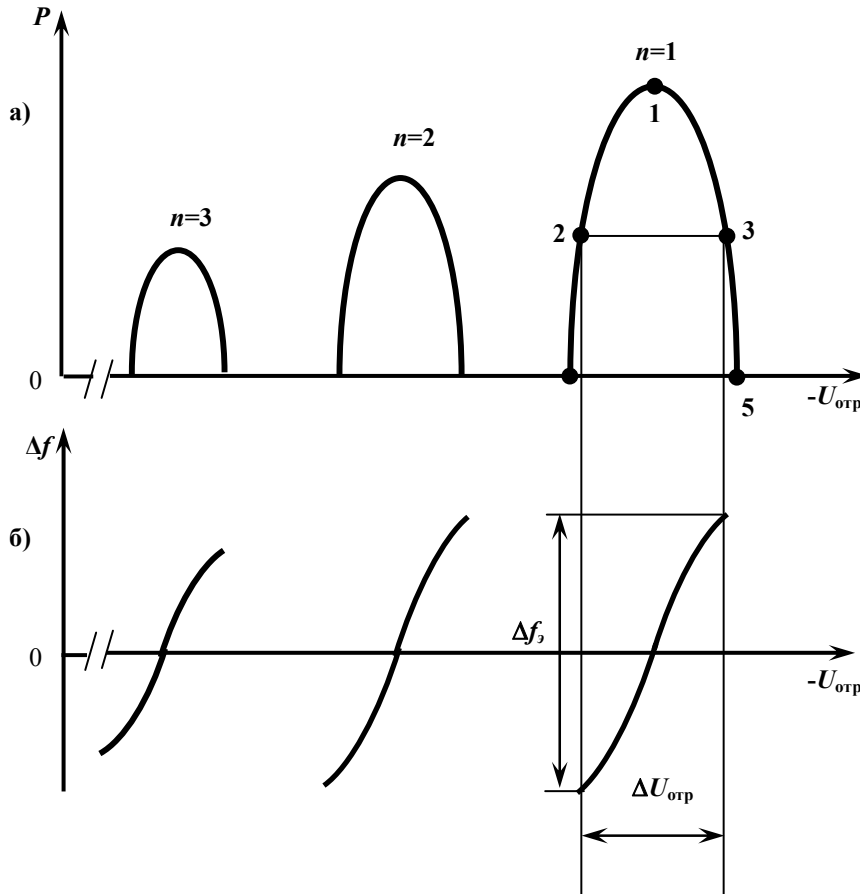


Рис 1.2 — Зависимость выходной мощности и частоты генерации клистрона от напряжения на отражателе

К числу основных характеристик отражательных клистронов относятся: частотная характеристика (зависимость выходной мощности от механической и электронной перестройки частоты); нагрузочная характеристика (зависимость частоты и мощности от модуля и фазы коэффициента отражения нагрузки); зависимость частоты от режимов питания и температуры, крутизны и ее нелинейности от напряжения на отражателе при электронной перестройке частоты генератора; спектр флуктуации амплитуды и частоты. На основе этих характеристик определяются следующие основные параметры клистрона: рабочий диапазон частот Δf ; выходная мощность $P_{вых}$ и ее перепад $\Delta P_{вых}$; диапазон Δf_s и крутизна электронной перестройки частоты $S_3 = df/dU_{отр}$. Вследствие низкого КПД (2 — 5 %) отражательные клистроны нашли применение в качестве гетеродинов в приемниках и в измерительной радиоаппаратуре.

1.3. Описание лабораторной установки

При выполнении лабораторной работы используется установка, структурная схема которой изображена на рис.1.3.

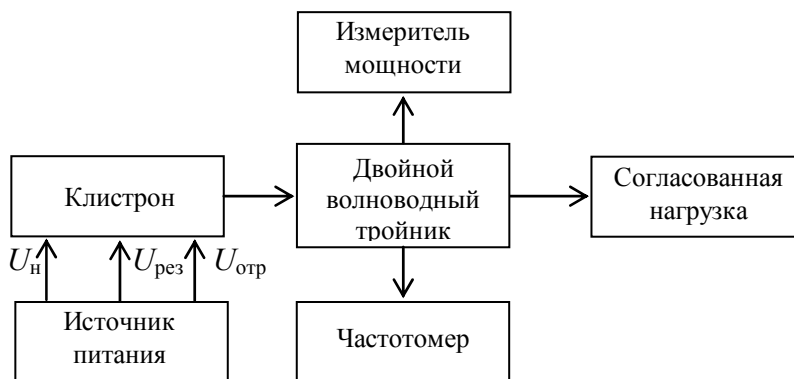


Рис. 1.3 — Структурная схема установки

Лабораторная установка состоит из лабораторного макета, в котором установлен отражательный клистрон, источника питания, измерителя мощности М-3, волномера, согласованной нагрузки и двойного волноводного тройника. Высокочастотный сигнал, генерируемый отражательным клистроном, подается на двойной волноводный тройник, где делится между измерительными приборами. Часть СВЧ энергии ответвляется в измеритель мощности, часть ответвляется в частотомер(волномер), остаток энергии попадает в согласованную нагрузку где преобразуется в тепло.

Перед выполнением работы необходимо внимательно ознакомиться с устройством лабораторной установки и в случае необходимости задать вопросы преподавателю.

1.4. Порядок выполнения работы

Внимание! При выполнении работы следует соблюдать осторожность, так как выводы резонатора и отражателя клистрона находятся под высоким напряжением относительно заземленных частей лабораторной установки.

1.4.1. Произведите включение приборов лабораторной установки в следующей последовательности:

- установите ручки регулировки напряжений источника питания в крайнее левое положение;
- установите тумблер «Сеть» лабораторного источника питания в нижнее положение;
- подключите источник питания к сети с помощью шнура питания;
- установите тумблер источника питания «Сеть» в верхнее положение;
- включите измеритель мощности М-3 и подготовьте его к работе согласно инструкции по эксплуатации;
- прогрейте приборы в течение (10...15) мин;
- вращая: ручку «240 — 320 В» источника питания, установите напряжение резонатора +300 В. В процессе проведения исследований поддерживайте данное напряжение постоянным.

1.4.2. Снимите зависимость выходной мощности от напряжения отражателя.

1.4.2.1. Установите напряжение на отражателе равным 150 В.

1.4.2.2. Медленно уменьшая напряжение на отражателе, добейтесь по показаниям индикатора прибора М-3 максимальной мощности на выходе клистрона (это соответствует точке 1 на рис. 1.2). При этом показания измерителя мощности необходимо умножить на два, так как выходная мощность клистрона делится пополам между измерителем мощности М-3 и встроенным частотомером.

1.4.2.3. С помощью встроенного в источник питания вольтметра измерьте величину напряжения на отражателе, а затем с помощью прибора М-3 измерьте величину выходной мощности, данные зафиксируйте в отчете.

1.4.2.4. Изменяя напряжение на отражателе повторите пункт 1.4.2.3. для точек 2, 3, 4, 5 согласно рисунка 1.2 (причем точки 2,3 соответствуют половине максимальной мощности полученной в пункте 1.4.2.2, а точке 4,5 соответствуют 10% от максимальной мощности)

1.4.2.5. Повторите вышеуказанные измерения для второй и третьей зоны генерации. Данные занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 — Экспериментальные данные для построения зависимости выходной мощности и частоты от напряжения на отражателе

Номер зоны n	Параметр	Мощность, $P/P_{\max(\text{зоны})}$				
		0,1	0,5	1	0,5	0,1
1	$U_{\text{отр}}, \text{В}$					
	$P, \text{мВт}$					
	$f, \text{ГГц}$					
2	$U_{\text{отр}}, \text{В}$					
	$P, \text{мВт}$					
	$f, \text{ГГц}$					
3	$U_{\text{отр}}, \text{В}$					
	$P, \text{мВт}$					
	$f, \text{ГГц}$					

1.4.3. Определите процентное соотношение между максимальными значениями мощности для всех зон генерации, принимая максимальную мощность первой зоны 100%.

1.4.4. Для первых трех зон генерации снимите зависимость генерируемой частоты от напряжения на отражателе. Обязательно измерьте частоту для каждой зоны при максимальной мощности и по уровню 0,5 от максимальной мощности. Данные занести в таблицу 1.1.

1.4.5. Определите диапазон электронной перестройки частоты ограниченный половинной мощностью.

1.4.6. Определите крутизну перестройки частоты клистрона.

1.4.7. После проведения измерений выключить приборы.

1.5. Содержание отчета

Требования к содержанию отчета изложены во введении. Кроме того в отчете необходимо представить графики зависимостей $P_{\text{вых}} = \varphi(U_{\text{отр}})$; $f = \psi(U_{\text{отр}})$ для трех зон генераций. Также необходимо сравнить результаты, полученные в пунктах 1.4.3, 1.4.5, 1.4.6 с известными теоретическими значениями и в случае существенного расхождения сделать заключения об причинах этого расхождения. В конце отчета необходимо сделать выводы по результатам исследований.

1.6. Контрольные вопросы

1.6.1. Какие функции выполняет в отражательном клистроне резонатор?

1.6.2. Изобразите пространственно-временные диаграммы работы отражательного клистрона?

1.6.3. Как сказывается на режиме работы клистрона изменение времени пролета электронов в пространстве группирования?

1.6.4. Поясните изменение выходной мощности клистрона при изменении напряжения на отражателе в пределах зоны генерации и при переходе от одной зоны к другой.

1.6.5. Под каким потенциалом (относительно катода) находятся резонатор и отражатель?

1.6.7. На рисунке 1.1. укажите пространство, где происходит модуляция по скорости электронного потока и где по плотности.

1.6.8. Объясните, как связано напряжение на отражателе с номером зоны генерации.

1.6.9. Какими свойствами должны обладать сетки резонатора по отношению к электронному потоку и электрическому полю и почему?

1.6.10. Поясните как осуществляется отвод энергии СВЧ поля из отражательного клистрона.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

2.1 Цель работы

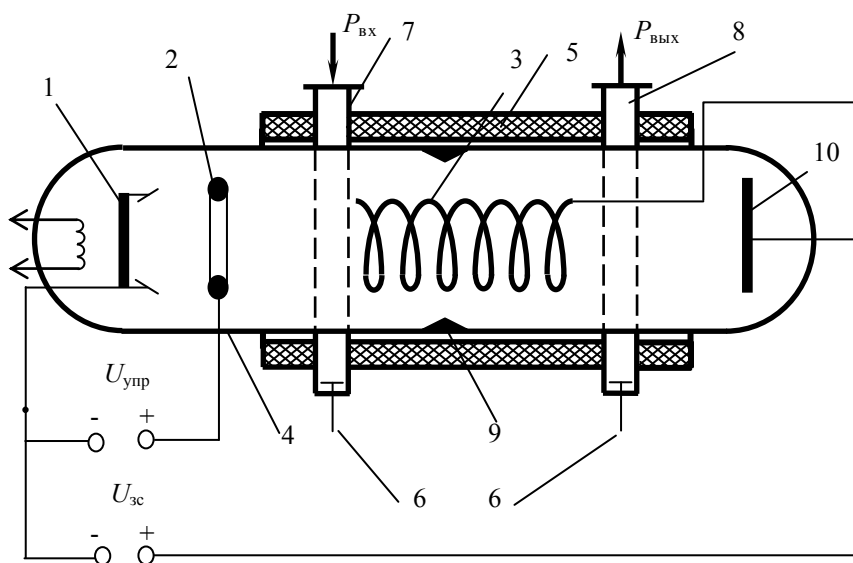
Изучение физических процессов усиления СВЧ колебаний лампой бегущей волны (ЛБВ) типа О, экспериментальное исследование её параметров и характеристик.

2.2 Теоретические сведения

Лампой бегущей волны типа О называют электронный прибор СВЧ диапазона, принцип действия которого основан на взаимодействии потока электронов с полем бегущей электромагнитной волны, распространяющейся вдоль замедляющей системы. В результате торможения электронов этим полем происходит группирование электронов в сгустки и преобразование их кинетической энергии в энергию СВЧ поля.

Конструкция ЛБВ представлена на рис.2.1. Электронная пушка, образованная катодом 1, управляющим электродом 2 и анодом 10, обеспечивает начальную фокусировку, необходимую скорость движения электронного пучка. Регулировка тока электронного пучка осуществляется с помощью управляющего напряжения $U_{упр}$. В качестве колебательной системы ЛБВ используется спираль 3, которая вместе с кожухом 4 образует спиральную замедляющую линию. Для фокусировки электронного пучка при его движении внутри спирали используется магнитное поле, создаваемое соленоидом 5.

Подстройка и согласование входного 7 и выходного 8 волноводов с замедляющей системой осуществляется подстроечными элементами 6. С целью предотвращения самовозбуждения на систему крепления спирали (керамические или кварцевые стержни) наносится слой поглотителя 9. Поглотитель располагают на достаточном удалении от входа и выхода, чтобы обеспечить хорошее группирование электронов и максимальную передачу энергии пучка СВЧ колебаниям и за счет этого получить большой коэффициент усиления.



- 1 — катод; 2 — управляющий электрод; 3 — спиральная замедляющая система; 4 — кожух; 5 — соленоид;
6 — подстроечные элементы; 7 — входной волновод;
8 — выходной волновод; 9 — поглотитель; 10 — анод

Рис. 2.1 — Конструкция ЛБВО

Поток электронов проходит внутри спирали, взаимодействует с СВЧ полем замедляющей системы и затем попадает на коллектор, который имеет форму стакана или конуса.

На вход ЛБВ поступает высокочастотный сигнал. Электроны,двигающиеся вдоль замедляющей системы, взаимодействуют с продольной составляющей напряжённости электрического поля. Элек-

тронный поток модулируется по скорости, и вместо равномерного распределения плотности пространственного заряда в пучке вдоль замедляющей системы образуются участки с повышенной и пониженной плотностями пространственного заряда. Процесс группировки зависит от соотношения скорости электронов V_e и скорости электромагнитной волны V_ϕ . Необходимо, чтобы сгустки электронов были сосредоточены в тормозящем поле, тогда амплитуда волны по мере распространения вдоль замедляющей системы будет возрастать. Эффективная передача энергии бегущей волны происходит при выполнении условия близкого к синхронизму $V_e \approx V_\phi$.

Разность скоростей $|V_e - V_\phi|$ не должна превышать 10 — 15% их значения. В противном случае сгусток электронов быстро опережает волну и поочередно взаимодействует с тормозящими и ускоряющими полуволнами поля, в среднем не получая и не отдавая энергии. Кроме того, так как скорость электронов в процессе взаимодействия с полем будет уменьшаться, то по мере движения вдоль замедляющей системы сгустки электронов будут смещаться относительно бегущей волны. Поэтому необходимо обеспечить такое различие скоростей, при котором за время движения сгустка электронов вдоль замедляющей системы, он не вышел из области тормозящего поля. Усиленный высокочастотный сигнал с выхода ЛБВ передаётся в нагрузку.

В СВЧ устройствах ЛБВ находит широкое применение в качестве входных, промежуточных и выходных широкополосных усилителей в системах многоканальной радиорелейной связи, в космической связи и т. п.

Основными характеристиками усилителей на ЛБВ являются: амплитудная, амплитудно-частотная, фазовая и шумовая.

Амплитудная характеристика ЛБВ показана на рис. 2.2. Начальный участок характеристики является линейным, при увеличении входной мощности наблюдается ограничение выходной мощности — режим насыщения. Затем выходная мощность уменьшается. Коэффициент усиления ЛБВ имеет наибольшую величину на линейном участке характеристики. Однако наибольшее значение КПД имеет место в области максимума амплитудной характеристики. Поэтому при работе ЛБВ в качестве входного усилителя, когда важен высокий коэффициент усиления, который в среднем составляет 15 — 35 дБ, а в маломощных лампах доходит до 60 дБ), используют линейный участок амплитудной характеристики. ЛБВ, работающие в качестве мощных выходных усилителей передатчиков, когда важны энергетические показатели, используют в режиме максимального КПД, который в среднем достигает значений до 25 — 30%.

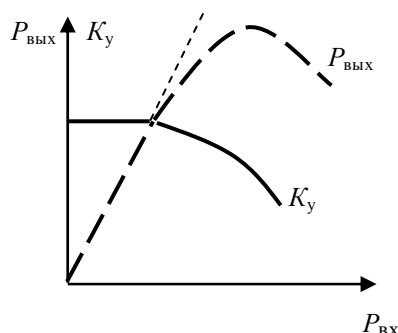


Рис. 2.2 — Амплитудная характеристика ЛБВ типа О

Зависимость выходной мощности (или коэффициента усиления) ЛБВ от частоты при фиксированной величине входной мощности называется частотной характеристикой (рис. 2.3). Наиболее ценным свойством ЛБВ является ее широкополосность. Для получения широкой полосы пропускания усилителя на ЛБВ требуется замедляющая система со слабой зависимостью фазовой скорости от частоты.

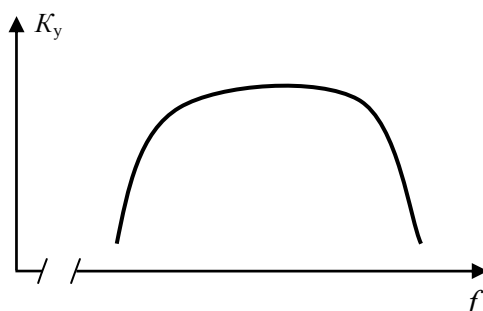


Рис. 2.3 — Амплитудно-частотная характеристика ЛБВО

Основное применение в ЛБВ нашли спиральные замедляющие системы. Ограничение полосы практически связано с трудностью обеспечения хорошего согласования входа и выхода ЛБВ в широкой полосе частот.

Фазовые характеристики ЛБВ определяются разностью фаз между колебаниями на ее входе и выходе в зависимости от различных факторов: частоты усиливаемых колебаний, изменения ускоряющего напряжения, тока пучка и т. д. Поэтому знание фазовых характеристик необходимо для оценки искажений широкополосных сигналов, усиливаемых ЛБВ.

Важной особенностью ЛБВ является возможность получения довольно низкого уровня шумов. ЛБВ, как и любой усилитель характеризуется коэффициентом шума, который показывает во сколько раз отношение мощностей сигнала и шума на выходе усилителя меньше такого же отношения на его входе.

При комнатной температуре маломощные ЛБВ имеют коэффициент шума 4 — 13 дБ. При охлаждении ЛБВ до температуры жидкого азота может коэффициент шума уменьшается до 1 — 2 дБ.

2.3 Описание лабораторной установки

При выполнении лабораторной работы используется установка, структурная схема которой изображена на рис.2.4.

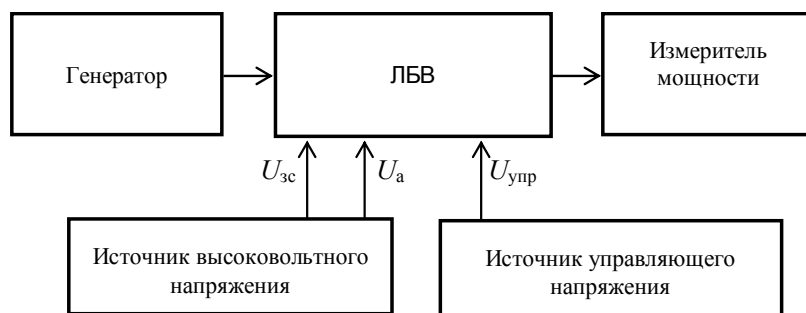


Рис. 2.4. — Структурная схема лабораторной установки

На вход ЛБВ подаётся высокочастотный сигнал генератора Г4-83. Напряжение питания 1000 В поступает на ЛБВ от высоковольтного источника. От источника управляющего напряжения на ЛБВ подается управляющее напряжение, которое регулируется в процессе выполнения работы. Выходная мощность ЛБВ измеряется с помощью измерителя мощности 45-И.

2.4 Порядок выполнения работы

Внимание! При выполнении работы следует соблюдать осторожность, так как выводы ЛБВ находятся под высоким напряжением относительно заземленных частей лабораторной установки.

2.4.1. Произведите включение приборов лабораторной установки в следующей последовательности:

- установите тумблер « U резонатор» высоковольтного источника в нижнее положение;

- установите ручку регулировки напряжения источника управляющего напряжения в крайнее левое положение;
- установите тумблер «СЕТЬ» высоковольтного источника в верхнее положение;
- установите тумблер «СЕТЬ» источника управляющего напряжения в верхнее положение;
- установите тумблеры «СЕТЬ» генератора Г4-83 и измерителя мощности 45-И в верхнее положение;
- установите частоту сигнала генератора Г4-83 равной 7,6 ГГц, затухание — 25,9 дБ;
- прогрейте приборы в течение 5 минут;
- установите тумблер «U резонанс.» высоковольтного источника в верхнее положение.

2.4.2. Подготовьте приборы к работе.

Для этого с помощью ручки регулировки управляющего напряжения добейтесь максимальных показаний по шкале измерителя мощности 45-И ($U_{упр} = (10 \dots 15) \text{ В}$). Настройте измеритель мощности 45-И с помощью верхней и правой ручек "НАСТРОЙКА" (нижняя ручка остаётся застопоренной). При дальнейших измерениях регулировку настройки проводить при каждом измерении частоты входного сигнала ЛБВ. Установите рукоятку множителя в положение «0» (полное затухание сигнала). Установите ноль с помощью ручек грубой и плавной регулировки. При выполнении работы рекомендуется проводить установку нуля перед каждым измерением.

2.4.3. Снимите амплитудную характеристику ЛБВ.

Для этого изменяя мощность входного сигнала ЛБВ необходимо фиксировать выходную мощность ЛБВ. Фиксированные значения входной мощности приведены в таблице 2.1. При измерении выходной мощности ЛБВ следует учитывать, что на входе измерителя мощности 45-И включен аттенюатор с затуханием 10 дБ, поэтому результат измерений необходимо увеличивать в 10 раз.

Результаты измерений занесите в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 — Экспериментальные данные к построению амплитудной характеристики ЛБВ

Затухание аттенюатора Г4 - 83, дБ	-25,9	-30,9	-35,9	-40,9	-45,9	-50,9	-55,9	-60,9	-65,9
$P_{вх}$, мВт	1	$316 \cdot 10^{-3}$	10^{-1}	$316 \cdot 10^{-4}$	10^{-2}	$316 \cdot 10^{-5}$	10^{-3}	$316 \cdot 10^{-6}$	10^{-4}
$P_{вых}$, мВт									
K_v									
K_{v_2} , дБ									

2.4.4. Снимите амплитудно-частотную характеристику ЛБВ.

Для этого необходимо изменяя частоту сигнала и поддерживая уровень сигнала на входе ЛБВ постоянным — 10 мкВт, измерить выходную мощность. Значения затухания аттенюатора Г4-83, соответствующее уровню 10 мкВт на различных частотах, указаны в таблице 2.2.

Таблица 2.2 — Значения затухания аттенюатора Г4-83 в зависимости от частоты генерации

f, ГГц	7,4	7,45	7,5	7,55	7,6	7,65	7,7	7,75	7,8	7,9	7,95	8,0
Затухание, дБ	-47,5	-47,3	-45,5	-46,7	-45,9	-46,4	-44,9	-42,6	-44,6	-45,5	-46,4	-46,4

Результаты измерений занесите в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 — Экспериментальные данные к построению амплитудно-частотной характеристики ЛБВ

f , ГГц	7,4	7,45	7,5	7,55	7,6	7,65	7,7	7,75	7,8	7,9
$P_{\text{вых}}$										
K_y										
K_y , дБ										

2.5. Содержание отчёта

Требования к содержанию отчета изложены во введении. Кроме того в отчете необходимо представить графики зависимостей: $P_{\text{вых}} = F_1(f)$, $K_y = F_2(f)$, $P_{\text{вых}} = F_3(f)$, $K_y = F_4(f)$. Сравнить полученные зависимости с известными теоретическими и сделать выводы по результатам исследований.

2.6. Контрольные вопросы.

- 2.6.1. Какие приборы относятся к типу О?
- 2.6.2. Сформулируйте и объясните условие фазового синхронизма в ЛБВ?
- 2.6.3. Объясните принцип работы и устройство ЛБВ типа О?
- 2.6.4. Какие параметры и характеристики определяются в данной лабораторной работе? Какие ещё характеристики важны для описания работы прибора?
- 2.6.5. Объясните ход амплитудной характеристики.
- 2.6.6. Объясните ход амплитудно-частотной характеристики.
- 2.6.7. Какие замедляющие системы применяют в ЛБВ типа О?
- 2.6.8. Объясните особенности применения ЛБВ типа О.
- 2.6.9. Поясните назначение поглотителя в ЛБВ типа О.
- 2.6.10. Изобразите на рисунке 2.1 направление вектора фазовой скорости рабочей пространственной гармоники и вектора групповой скорости СВЧ волны, обоснуйте ответ.

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАМПЫ ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ

3.1 Цель работы

Изучить физические процессы генерации СВЧ колебаний лампой обратной волны (ЛОВ) типа О. Экспериментально исследовать ее параметры и характеристики.

3.2 Теоретическая часть

Принцип действия лампы обратной волны аналогичен принципу работы лампы бегущей волны. Разница состоит в том, что в ЛОВ используется взаимодействие электронного пучка с обратной пространственной гармоникой СВЧ поля. При этом направление скорости движения V_e электронов совпадает с направлением фазовой скорости V_ϕ пространственной гармоники, а групповая скорость имеет обратное направление, что создает эффект обратной связи.

На рис. 3.1 приведена конструкция ЛОВ типа О.

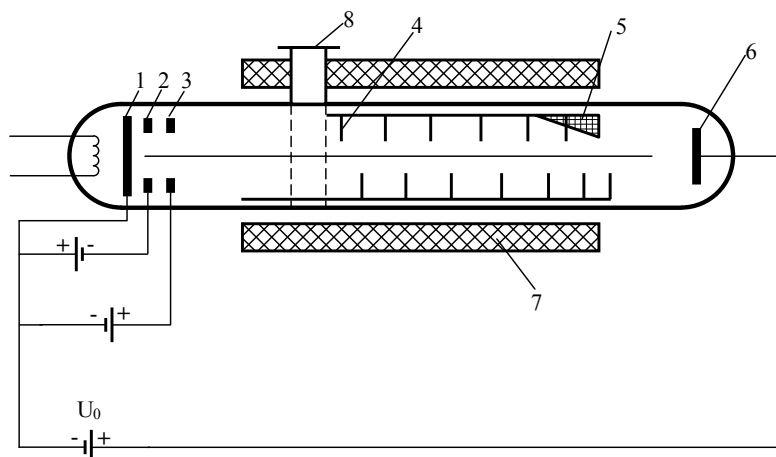


Рис. 3.1 — Конструкция лампы обратной волны типа О

Электронная пушка, состоящая из катода 1, фокусирующего электрода 2 и анода 3, создает равномерный поток быстро летящих электронов. Замедляющая система (ЗС) 4 предназначена для уменьшения фазовой скорости электромагнитной волны, что необходимо для эффективного взаимодействия электрического поля волны с электронным потоком. Конструктивно ЗС представляет собой отрезок высокочастотной линии с периодической структурой, например, "гребенка", "встречные штыри" и т. п. (рис. 3.2).

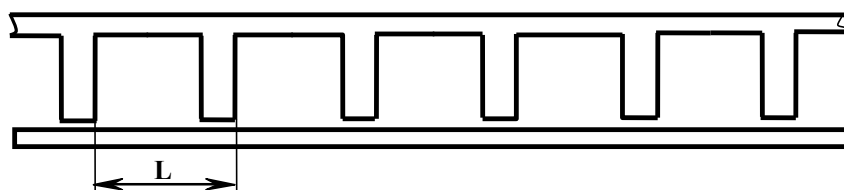


Рис. 3.2 — Конструкция замедляющей системы типа «гребенка»

Со стороны коллектора 6 ЗС нагружена на согласованную нагрузку 5, обеспечивающую минимальное отражение волны от конца замедляющей системы, что предотвращает возбуждение ЛОВ на прямой волне.

Поперечная фокусировка луча осуществляется продольным магнитным полем, создаваемым магнитом 7. В настоящее время для ЛОВ применяются трубчатые постоянные магниты. Такие ЛОВ выпускаются в виде пакетированной конструкции, в которой объединены корпус ЛОВ, постоянный магнит и юстировочное приспособление.

Особенностью ЛОВ является возможность электронной перестройки частоты в широком частотном диапазоне путем изменения напряжения замедляющей системы.

В настоящее время ЛОВ широко применяются в СВЧ генераторах качающейся частоты, в качестве гетеродинов, радиолокационных приемников, а также как генераторы помех.

3.3. Описание лабораторной установки

При выполнении лабораторной работы используется установка, структурная схема которой приведена на рис.3.3.

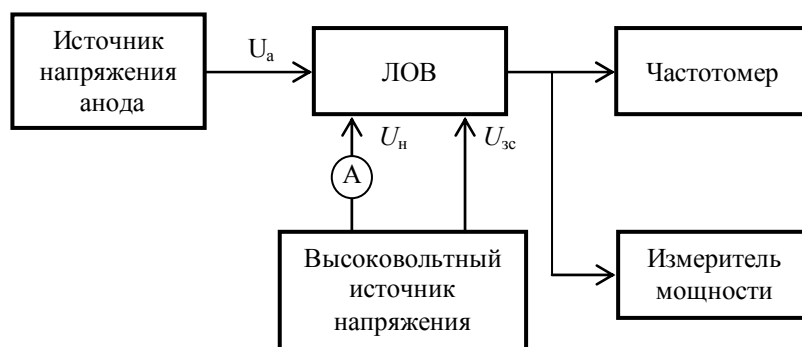


Рис. 3.3 — Структурная схема лабораторной установки

На ЛОВ типа О подаётся анодное напряжение с высоковольтного источника напряжения ВС-27, напряжение на замедляющую систему подается с источника УИП-1. Высокочастотный выход ЛОВО последовательно подключается к частотомеру или измерителю мощности. Регулировка напряжения на замедляющей системе осуществляется в процессе выполнения работы. Выходная мощность ЛОВО измеряется прибором 45-И.

3.4. Экспериментальная часть

Внимание! При выполнении работы следует соблюдать осторожность, так как выводы ЛОВ находятся под высоким напряжением относительно заземленных частей лабораторной установки.

3.4.1. Изучите устройство лабораторной установки, структурная схема которой приведена на рис. 3.3.

3.4.2. Произведите включение и настройку приборов лабораторной установки в следующей последовательности:

- установите тумблеры включения сети источников питания в положение выключено (нижнее положение) и подключите их к сети с помощью шнура питания;
- установите тумблеры «Выход» источников питания УИП-1 и ВС-27 в нижнее положение;
- включите тумблеры «Сеть» источников питания УИП-1 и ВС-27;
- проконтролируйте по прибору макета «Ток накала» наличие тока;
- в соответствии с инструкцией по эксплуатации включите измеритель мощности;
- прогрейте вышеуказанные приборы в течение (5...10) минут;
- с помощью высокочастотного кабеля подключите ЛОВ к частотомеру;
- установите ручками «Регулировка напряжения — выхода» напряжение на замедляющийся системе ЛОВ в пределах 800 — 1000 В;
- установите тумблер «Выход» источника питания ВС-27 в верхнее положение;
- установите ручкой «20 — 600» источника УИП-1 напряжение анода $U_a = 70$ В;
- поставьте тумблер «Выход» УИП-1 в верхнее положение;
- проконтролируйте по прибору ВС-27 наличие тока пучка.

3.4.3. Снимите характеристику электронной перестройки частоты ЛОВ $f = F(U_{зс})$ (при постоянном потенциале на аноде). Измерение частоты производите, изменяя напряжение на замедляющей системе от 800 до 1000 В через 20 В. Результаты измерений занесите в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 — Экспериментальные данные для построения характеристики электронной перестройки частоты $f=F(U_{зс})$ для ЛОВ

$U_a=70B$		$U_a=120B$	
$U_{зс}, B$	$f, МГц$	$U_{зс}, B$	$f, МГц$

3.4.4. Установите напряжение на аноде 120 В и выполните действие в соответствии с п.3.4.3.

3.4.5. Снимите характеристику электронного смещения частоты $f=\psi(I_o)$. Ток пучка I_o регулируйте изменением потенциала на аноде в пределах от 70 В до 120 В через 10 В. Результаты измерений занесите в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 — Экспериментальные данные для построения характеристики электронного смещения частоты $f=\psi(I_o)$ для ЛОВ

$U_{зс}=800 B$			$U_{зс}=1000B$		
U_a, B	I_o, mA	$f, МГц$	U_a, B	I_o, mA	$f, МГц$

3.4.6. Снимите зависимость выходной мощности ЛОВ от напряжения замедляющей системы, предварительно выполнив следующие действия:

- установите тумблер «Выход» источника питания УИП–1 в нижнее положение;
- с помощью высокочастотного кабеля подключите ЛОВ к измерителю мощности;
- в соответствии с инструкцией по эксплуатации подготовьте измеритель мощности к работе в режиме «прямой отсчет»;
- установите переключатель «Множитель» прибора 45-И в положение 100. В этом случае показания стрелочного прибора измерителя увеличиваются в 100 раз.

Произведите измерение выходной мощности ЛОВ, изменяя напряжение на ее замедляющей системе от 800 до 1000 В через 20 В. Результаты измерений занесите в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 — Экспериментальные данные для построения зависимости выходной мощности ЛОВ от напряжения замедляющей системы

$U_a=80B$	
$U_{зс}, B$	$P_{вых}, мВт$

3.4.7. **Внимание! Выключение приборов производите в следующей последовательности:**

- установите тумблер «Выход» источника питания УИП-1 в нижнее положение;
- установите тумблер «Выход» источников питания ВС-27 в нижнее положение;
- выключите тумблеры «Сеть» источников питания УИП-1 и ВС-27;
- выключите измеритель мощности.

3.5. Содержание отчета

Требования к содержанию отчета изложены во введении. Кроме того в отчете необходимо представить графики зависимостей: $f=F(U_{зс})$, $f=\psi(I_o)$, $P_{вых}=F(U_{зс})$. Сравнить полученные зависимости с известными теоретическими и сделать выводы по результатам исследований.

3.6 Контрольные вопросы

- 3.6.1. Объясните принципы работы и устройство ЛОВ.
- 3.6.2. Объясните зависимость выходной мощности и частоты от напряжения на замедляющей системе.
- 3.6.3. Какова геометрическая структура замедляющих систем, применяемых в ЛОВ?
- 3.6.4. Где применяются ЛОВ?

3.6.5. Каким образом осуществляется фокусировка электронного пучка?

3.6.6. Как надо изменить конструкцию ЛОВ (см. рис. 3.1), чтобы превратить ее в усилительный прибор?

3.6.7. Изобразите пространственно-временные диаграммы работы ЛОВ.

3.6.8. Изобразите на рисунке 3.1 направление вектора фазовой скорости рабочей пространственной гармоники и вектора групповой скорости СВЧ волны, обоснуйте ответ.

3.6.9. Для чего необходим поглотитель (см. рис. 3.1) в конце пространства взаимодействия?

3.6.10. Как происходит формирование электронных сгустков в ЛОВ?

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОРЕЗОНАТОРНОГО МАГНЕТРОНА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

4.1. Цель работы

Изучение физических процессов генерирования СВЧ колебаний многорезонаторным магнетроном, экспериментальные исследования его параметров и характеристик.

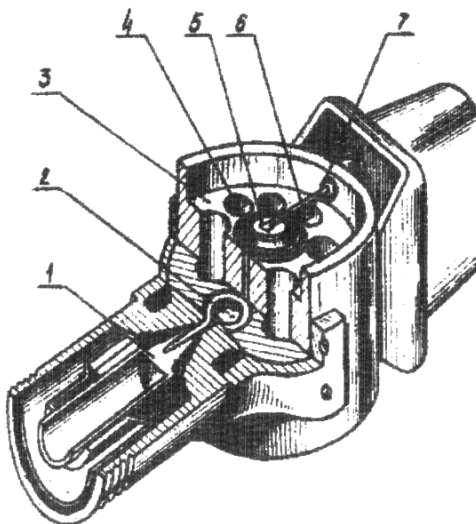
4.2. Теоретические сведения

Магнетрон является электровакуумным прибором, предназначенным для генерирования СВЧ колебаний. Магнетрон генерирует колебания большой мощности в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн. Магнетрон имеет высокий КПД.

Магнетроны используют в мощных передающих устройствах, радиолокационных станциях, а также в установках высокочастотного нагрева.

Устройство многорезонаторного магнетрона показано на рис. 4.1. Колебательная система (анодный блок магнетрона) образована серией полых резонаторов, расположенных по окружности. Для связи магнетрона с внешней нагрузкой в одном из резонаторов установлена петля связи. Число резонаторов в анодном блоке выбирается четным от 6 до 40.

Резонаторы могут быть типа "щель-отверстие" или секторные. С помощью прямоугольных пазов резонаторы сообщаются с внутренней цилиндрической полостью, которая называется пространством взаимодействия. В центре этой полости расположен цилиндрический катод. Катод магнетрона должен обеспечивать плотность электронной эмиссии от 3 до 100 А/см². Отличительной особенностью работы катода магнетрона является наличие интенсивной бомбардировки катода электронами ("неправильные электроны"), возвращающимися из пространства взаимодействия. Чтобы не нарушить температурный режим работы катода и не уменьшить его срок службы, после начала генерации СВЧ колебаний напряжение накала снижают.



1 — вывод энергии магнетрона; 2 — петля связи; 3 — анодный блок магнетрона; 4 — связки; 5 — катод; 6 — вывод накала катода; 7 — резонансная ячейка типа «щель-отверстие»

Рис. 4.1 — Устройство магнетрона.

Для создания магнитного поля в области взаимодействия используются постоянные магниты, а в мощных магнетронах и электромагниты. Величина магнитной индукции магнитов магнетрона составляет 0,1 — 0,5 Т. Для улучшения охлаждения магнетрона применяют радиаторы, а в мощных магнетронах принудительное воздушное или водяное охлаждение. Конструктивной особенностью колебательной системы магнетрона является наличие связок, представляющих собой проволочные или ленточные проводники, расположенные над торцами анодного блока и соединенные в определенной последовательности с его сегментами. При генерировании колебаний π -вида каждая связка присоединя-

ется к анодному блоку через один сегмент. Связки необходимы для частотного разделения видов колебаний в магнетроне.

Магнетроны выпускаются как для работы на фиксированной частоте, так и обладающие небольшой механической перестройкой по частоте. Перестройка частоты осуществляется погружением металлических плунжеров в цилиндрическую часть резонаторов.

Основные технические характеристики некоторых типов магнетронов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 — Основные технические характеристики некоторых типов магнетронов

Тип магнетрона	Диапазон частот, ГГц	Выходная мощность, кВт	Анодное напр., кВ	Анодный ток, А	КПД %
Магнетрон непрерывного действия	2,425 -2,475	2,5	4,5	0,75	70
Магнетрон импульсного действия	2,750-2,860	4500	76	135	45
Магнетрон импульсного действия	9,850-10,000	225	22	25	40

При работе в магнетроне происходит автоматическое группирование электронов в результате их взаимодействия с радиальной составляющей переменного электрического поля резонаторов. При этом образуются области скопления электронов, движущиеся вокруг катода. Данные скопления по форме напоминают спицы. Предположим, что «спицы» находятся под резонатором, где электрическое поле достигло своего максимума и его тангенциальная составляющая является тормозящей. Тогда в процессе взаимодействия с переменным полем резонаторов электроны, образующие «спицы», будут отдавать часть своей потенциальной энергии полю резонаторов, поддерживая в них колебания. При дальнейшем движении электронный поток будет пополнять энергией колебательную систему, в том случае, если «спицы» будут достигать соседних резонаторов, когда поле этих резонаторов будет тормозящим. Такое взаимодействие электронов с полем будет иметь место, если «спицы» проходят расстояние между соседними резонаторами за время, равное половине периода высокочастотных колебаний.

4.3. Описание лабораторной установки

Структурная схема лабораторной установки показана на рис 4.2.

В правой части лабораторного стола на вертикальной панели расположены реостат и амперметр, предназначенные для регулировки напряжения накала и контроля тока накала соответственно.

В качестве несущей конструкции лабораторной установки используется корпус прибора 31—ИМ. Высокочастотный сигнал от магнетрона по волноводному тракту поступает на направленный ответвитель, два плеча которого нагружены на согласованную нагрузку. Сигнал, ослабленный направленным ответвителем (переходное ослабление ответвителя 30 дБ), поступает на устройства волноводного тракта, расположенные в корпусе прибора 31—ИМ. Атенюаторы 1 и 2 позволяют устанавливать уровень сигнала, необходимый для проведения исследований. Рабочая частота магнетрона измеряется с помощью резонансного частотомера.

С одного выхода делителя мощности, расположенного вне прибора 31—ИМ, часть мощности поступает на согласованную нагрузку, а с другого — на детекторную головку.

Ток детекторной головки контролируется индикатором, расположенным на лицевой панели прибора 31—ИМ. Значение тока детектора позволяет оценить мощность магнетрона.

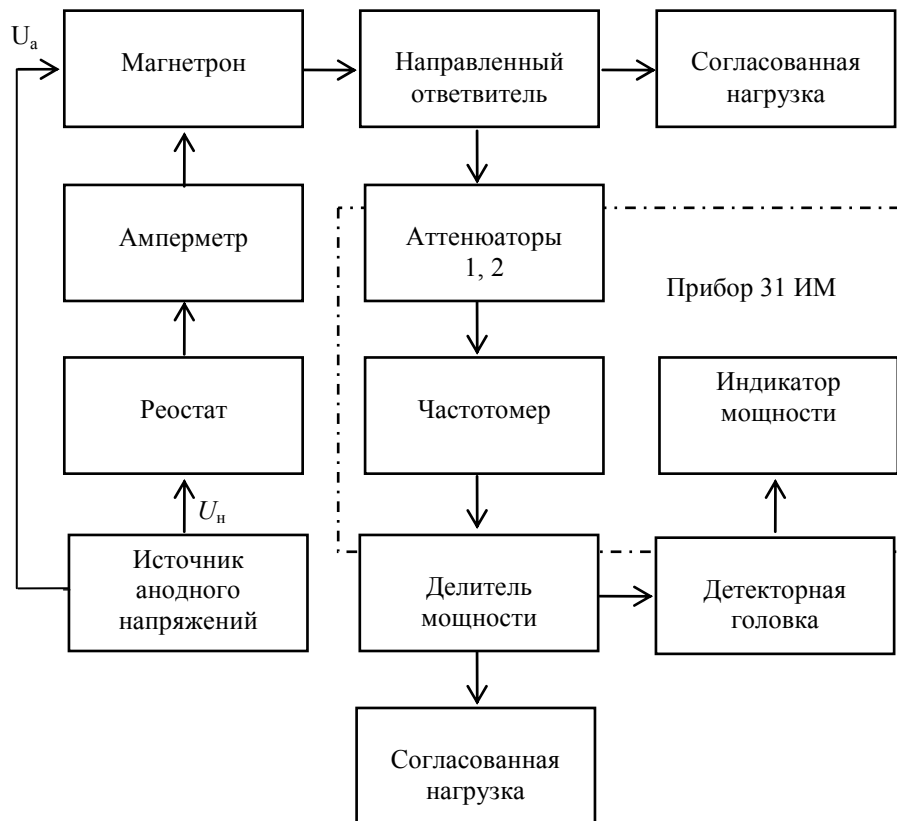


Рис 4.2 — Структурная схема лабораторной установки

4.4. Экспериментальная часть

Внимание! При выполнении работы следует соблюдать осторожность, так как выводы катода и накала находятся под высоким напряжением относительно заземленных частей лабораторной установки.

4.4.1. Изучите устройство лабораторной установки, структурная схема которой приведена на рис.4.2.

4.4.2. Произведите включение и настройку приборов лабораторной установки в следующей последовательности:

- установите тумблер источника питания УИП-1 в нижнее положение и подключите его к сети с помощью шнура питания;
- установите ручку источника питания «20—600 В» в крайнее левое положение, переключатель в положение «600» и тумблер «Выход» в нижнее положение;
- установите ручку лабораторной установки «Установка напряжения накала» в крайнее левое положение;
- подключите вентилятор охлаждения магнетрона к сети с помощью шнура питания;
- установите ручку «Установка напряжения накала» в крайнее правое положение;
- проконтролируйте наличие тока накала магнетрона по прибору «Ток накала»;
- прогрейте магнетрон в течение 5–10 мин;
- установите тумблер "Выход" в верхнее положение;
- зафиксируйте возникновение колебаний по индикатору прибора 31ИМ, повышая анодное напряжение вращением ручки «20—600 В»;
- медленно вращая ручку "Установка напряжения накала" вправо, уменьшите ток накала примерно на 15%;
- установите ручкой «Частота» прибора 31–ИМ на шкале частотомера значение равное 0.

4.4.3. Снимите зависимость выходной мощности $P_{\text{вых}}$ и анодного тока I_a магнетрона от анодного напряжения U_a , изменяя последнее от 500 до 600В с шагом 10 В. Для этого установите напряжение на аноде магнетрона равное 600В. Перемещая поршень короткозамыкателя детекторной головки, добей-

тесь максимального отклонения стрелки индикатора прибора 31-ИМ. Вращая ручки аттенюаторов прибора, установите стрелку индикатора на максимальное значение шкалы. Изменяя анодное напряжение, снимите вышеуказанную зависимость. Результаты измерений занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 — Экспериментальные данные к построению зависимости выходной мощности $P_{\text{вых}}$ и анодного тока I_a магнетрона от анодного напряжения U_a

U_a , В	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600
$P_{\text{вых}}$											
I_a											

4.4.4. Снимите зависимость частоты генерируемых колебаний от величины анодного тока I_a магнетрона, изменяя его от величины получаемой при $U_a=500$ В и до величины получаемой при $U_a=600$ В с шагом 20 мА. Анодный ток изменяется при изменении анодного напряжения, ручкой на лицевой панели источника питания.

Перед измерением убедитесь в наличии колебаний по индикатору прибора 31-ИМ. Вращая ручку частотомера, наблюдайте за показаниями индикатора. Начиная с некоторого момента, они должны уменьшаться, достигать минимума и затем возрастать. Поворачивая ручку в обе стороны, добейтесь точно минимального показания индикатора и считайте показания частотомера.

Переведите показания шкалы частотомера в значения частоты и занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 — Экспериментальные данные к построению зависимости частоты генерируемых колебаний от величины анодного тока I_a магнетрона

I_a , мА											
$f_{\text{вых}}$											

4.4.5. После окончания исследований тумблер "Выход" источника питания поставьте в нижнее положение, выключите тумблер "Сеть" и вентилятор.

4.5. Содержание отчета

Требования к содержанию отчета изложены во введении. Кроме того в отчете необходимо представить результаты экспериментальных исследований, сведенные в таблицы и представленные в виде графиков. Сравнить полученные зависимости с известными теоретическими и сделать выводы по результатам исследований.

4.6. Контрольные вопросы

4.6.1. Поясните устройство магнетрона.

4.6.2. Сформулируйте условия баланса фаз, при котором наблюдается возбуждение колебаний в магнетроне.

4.6.3. Охарактеризуйте особенности движения "правильных" и "неправильных" электронов в магнетроне.

4.6.4. Как определить сдвиг фаз колебаний в соседних резонансных ячейках магнетрона для произвольного вида колебаний?

4.6.5. Что представляет собой колебательная система магнетрона и как определяются ее резонансные частоты?

4.6.6. Поясните принцип автофазировки и образования электронных "спиц" в магнетроне.

4.6.7. Поясните назначение связей в магнетроне.

4.6.8. Что представляет собой электронное смещение частоты в магнетроне?

4.6.9. Назовите основные характеристики магнетрона.

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИОДА ГАННА И ГЕНЕРАТОРА НА ЕГО ОСНОВЕ

5.1. Цель работы:

Изучить устройство и принцип действия диода Ганна и генератора на его основе, а также экспериментальное исследование основных характеристик диода Ганна и генератора на его основе, сопоставление полученных экспериментальных результатов с теоретическими.

5.2. Теоретические сведения.

Физические основы работы диода Ганна.

Диод Ганна относится к группе полупроводниковых СВЧ-приборов, в которых генерация и усиление электрических колебаний вызваны неустойчивостью объемного заряда в полупроводниковом материале в сильном электрическом поле. Они не содержат ни р-п-переходов, ни каких-либо других границ раздела, кроме омических контактов, в которых используются только объемные свойства полупроводника.

Условием усиления и генерации электрических колебаний в диоде является наличие отрицательного дифференциального сопротивления (ДОС) в образце. Так как плотность тока в объемном полупроводнике пропорциональна и концентрации носителей тока, и их дрейфовой скорости, уменьшение плотности тока с ростом напряженности электрического поля может быть вызвано уменьшением любой из этих величин. Рассмотрим механизм возникновения ДОС за счет уменьшения дрейфовой скорости носителей заряда на примере арсенида галлия (GaAs) n-типа, имеющего сложную структуру энергетической зоны.

На рис. 5.1,а показана связь энергии электронов в валентной зоне и зоне проводимости GaAs с волновым числом k . Зависимость энергии ε от k в зоне проводимости имеет два минимума (долины). Энергетический зазор между двумя долинами равен $\Delta\varepsilon = 0,36$ эВ.

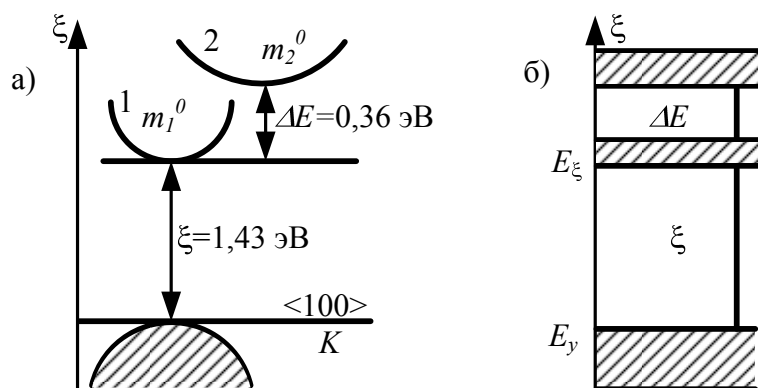


Рис. 5.1 — Связь энергии электронов в валентной зоне, и зоне проводимости GaAs с волновым числом k

Наличие двух долин можно рассматривать как появление в зоне проводимости двух подзон, отличающихся подвижностью и эффективной массой электронов (рис. 5.1,б). Обозначим эффективную плотность состояний в нижнем минимуме через N_1 , эффективную массу электронов в этом минимуме m_1^* и подвижность μ_1 . Соответствующие величины для верхнего минимума обозначим через N_2, m_2^*, μ_2 .

Концентрация электронов в нижнем и верхнем минимумах равна n_1 и n_2 соответственно, а полная концентрация носителей тока в образце $n_0 = n_1 + n_2$. Проводимость σ в стационарном состоянии записывается:

$$\sigma = q(\mu_1 n_1 + \mu_2 n_2), \quad (5.1)$$

где q — заряд электрона.

Известно, что энергия и эффективная масса электронов в верхней долине больше, чем в нижней;

$m_2 = 1,2 m$, а $m_1 = 0,068 m$, где m — масса свободного электрона. Подвижность «тяжелых» носителей в верхней долине μ_2 много меньше подвижности «легких» носителей в нижней долине μ_1 : $\mu_1 = 5000 \frac{\text{Ом}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$, $\mu_2 = 100 \frac{\text{Ом}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$. Вероятность перехода электрона из долины 1 в долину 2 при заданной температуре T определяется величиной

$$\exp\left(-\frac{\Delta\varepsilon}{kT}\right)$$

Поэтому соотношение концентраций электронов в долинах

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{N_2}{N_1} \exp\left(-\frac{\Delta\varepsilon}{kT}\right) \quad (5.2)$$

где $\Delta\varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$; N_1, N_2 — эффективная плотность состояния в нижней и верхней подзонах соответственно.

При комнатной температуре $\frac{N_2}{N_1} \approx 70$, следовательно, $\frac{n_2}{n_1} \approx 7 \cdot 10^{-8}$. Таким образом, при отсутствии внешних воздействий и комнатной температуре проводимость

$$\sigma = q\mu_1 n_1 \quad (5.3)$$

Однако соотношение n_1 и n_2 резко изменится, если в полупроводнике создано сильное электрическое поле, увеличивающее среднюю кинетическую энергию электронов. Рост энергии электронов увеличивает их вероятность переходов из долины 1 в долину 2. При напряженности поля выше некоторой пороговой $E > E_n$ основная часть электронов переходит из нижней долины в верхнюю, и проводимость полупроводника будет

$$\sigma = q\mu_2 n_2 \quad (5.4)$$

Так как переход электронов из нижней долины в верхнюю сопровождается уменьшением подвижности и дрейфовой скорости, то такой переход приводит к возникновению ДОС. Зависимость дрейфовой скорости от напряженности поля показана на рис. 5.2, Пунктирные прямые OA и OB соответствуют формулам

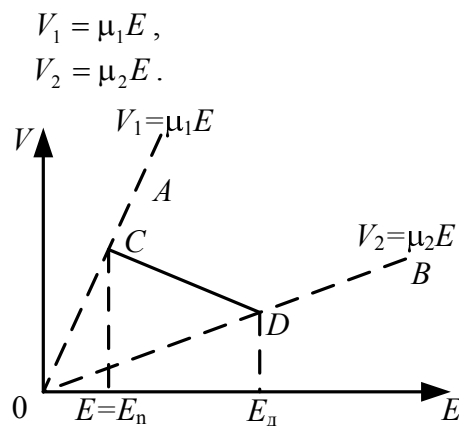


Рис. 5.2 — . Зависимость дрейфовой скорости от напряженности поля

При слабых полях $V = f(E)$ совпадает с прямой OA , так как все электроны находятся в нижней долине. При $E = E_n$ начинается переход электронов в верхнюю долину. Такому состоянию соответствует участок CD . На этом участке можно говорить о некоторой средней скорости электронов обеих

$$\bar{V} = \frac{\mu_1 n_1 + \mu_2 n_2}{n_1 + n_2} \quad (5.5)$$

Величина плотности тока при этом $j = qn_0 \bar{V}$. После перехода всех электронов в верхнюю долину зависимость $V = f(E)$ должна представляться участком DB прямой OB .

Таким образом, переходному участку CD соответствует отрицательная дифференциальная подвижность μ_D :

$$\mu_D = \frac{dV}{dE} \quad (5.6)$$

На основе рассмотренного можно сделать следующие выводы. Для того чтобы механизм перехода электронов приводил к возникновению ДОС, должны выполняться следующие требования:

— температура решетки должна быть достаточно низкой, чтобы в отсутствие приложенного извне электрического поля большая часть электронов находилась в нижнем минимуме зоны проводимости;

— в нижнем минимуме зоны проводимости электроны должны иметь высокую подвижность, малую эффективную массу и малую плотность состояний, в то время как в верхнем минимуме электроны должны иметь низкую подвижность, большую эффективную массу и высокую плотность состояний;

— энергетический зазор между долинами должен быть меньше, чем ширина запрещенной зоны полупроводника, чтобы лавинный пробой не наступал до перехода электронов в верхнюю долину. Исследования показывают, что переход электронов из нижней долины в верхнюю происходит не по всему образцу, а лишь в узкой области образца, где имеется неоднородность концентрации примеси или флуктуации электрического поля. Предположим, что на небольшом участке имеется меньшая концентрация донорной примеси, чем в остальной части образца, т. е. имеется участок с повышенным сопротивлением. Увеличение локального сопротивления приведет к росту падения напряжения на нем и, как следствие, росту напряженности поля E в пределах этого участка по сравнению с остальным образцом. Если на рассматриваемом участке $E > E_n$, а вне его $E < E_n$, то на этом участке начнется переход электронов из нижней долины в верхнюю, сопровождающийся снижением дрейфовой скорости. Оказавшиеся в верхней долине электроны начинают отставать от неперешедших, так что в левой части локального участка наблюдается избыток электронов (отрицательный объемный заряд), а в правой недостаток, т. е. положительный объемный заряд донорных ионов. Образующийся при этом двойной электрический слой объемного заряда называется электрическим доменом. Графики, иллюстрирующие механизм образования электрического домена показаны на рис. 4.3. Образование домена означает увеличение напряженности поля на участке, занимаемым доменом. При постоянном внешнем напряжении на образце

$U_0 = \text{const}$ это должно приводить к уменьшению падения напряжения поля на остальной части образца. Рост заряда и напряженности поля в домене будет происходить до тех пор, пока скорость электронов в домене V_q не станет равной скорости электронов вне его. Равенство скоростей доменов V_q и внешних электронов $V_{вн}$ определяет связь напряженностей поля; в домене E_q и $E_{вн}$ после окончания формирования домена

$$\mu_1 E_{вн} = \mu_2 E_D. \quad (5.7)$$

До начала формирования домена скорость электронов была максимальной $V_{1\max}$, поэтому и плотность тока максимальна

$$j_{\max} = qn_1 V_{1\max} = qn_0 V_{1\max}. \quad (5.8)$$

После завершения его формирования скорость электронов в образце уменьшается до скорости домена, поэтому плотность тока в цепи также уменьшается до величины

$$j_{\min} = qn_2 V_D = qn_0 V_D. \quad (5.9)$$

Этот ток остается неизменным до тех пор, пока домен не достигнет конца образца. При этом электроны из домена уходят во внешнюю цепь, домен начинает рассасываться, напряженность поля на

нем падает, а напряженность поля в остальной части образца возрастает. Это приводит к росту плотности тока согласно (8). Таким образом, в образце движется только один домен, место возникновения которого определяется неоднородностью. Во внешней цепи появляются периодические колебания тока, с периодом примерно равным времени пролета домена в образце. Это явление, впервые экспериментально обнаруженное Дж. Ганном, получило название эффекта Ганна. Прибор, работающий на рассмотренном принципе, получил название диода Ганна,

Условие существования неустойчивости объемного заряда в диоде Ганна, Вольт-амперная характеристика диода.

Домен в диоде Ганна успевает сформироваться, если время пролета его через образец T_0 значительно больше максимального времени максвелловской релаксации τ_{gm} :

$$T_0 > \tau_{gm} \quad (5.10)$$

или

$$\frac{L}{V_D} > \frac{\varepsilon}{qn_0|\mu_D|} \quad (5.11)$$

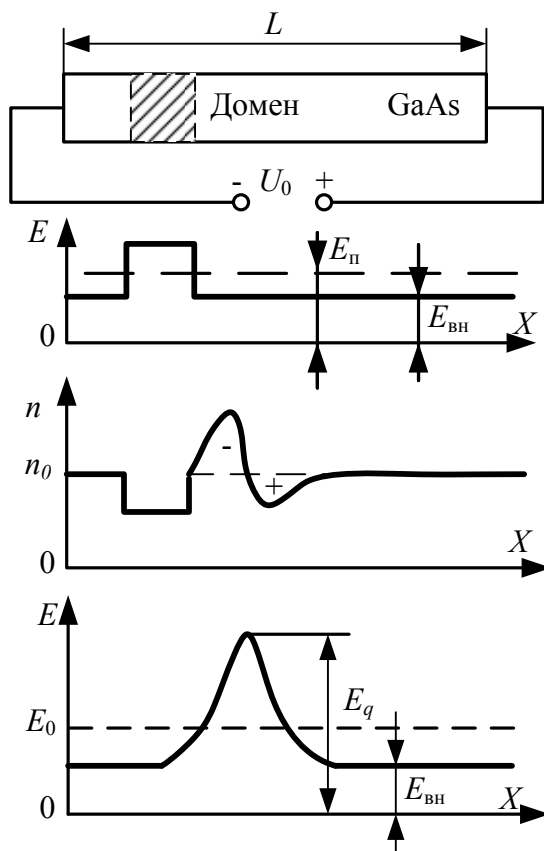


Рис. 5.3 — Принцип работы диода Ганна

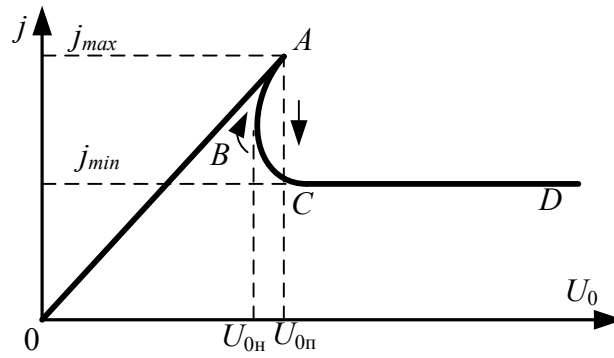


Рис. 5.4 — Зависимость плотности тока от напряжения

где L — длина образца;

ϵ — диэлектрическая проницаемость;

n_0 — равновесная концентрация электронов;

$|\mu_D|$ — абсолютное значение дифференциальной подвижности.

Обычно это условие записывается в виде

$$n_0 L > \frac{\epsilon V_D}{q |\mu_D|} = (n_0 L_1) \quad (5.12)$$

Неравенство (5.12) показывает, что необходимым условием образования домена является достаточная концентрация электронов n_0 при заданной длине образца. Если $n_0 L < (n_0 L_1)$ то домен не возникает при любой величине приложенного поля. Условием существования домена является выполнение неравенства

$$n_0 L \geq (n_0 L_1) = 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \quad (5.13)$$

Это неравенство можно считать условием пролетного режима, когда частота следования импульсов во внешней цепи определяется временем пролета домена через образец. В этом случае частота генерируемых колебаний определяется из очевидного соотношения

$$f = \frac{1}{T_0} = \frac{V_D}{L} = f_{\text{пр}} \quad (5.14)$$

и называется полетной частотой. Итак, в образцах при $n_0 L < 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ нет движущихся доменов, но в них могут быть нарастающие волны объемного заряда, которые используются для получения усилительного режима.

Доменные режимы характеризуются наличием полностью сформировавшихся доменов,двигающихся через образец. При этом условии падение напряжения на домене

$$U_D = \int_0^{L_D} (E - E_{\text{вн}}) dx, \quad (5.15)$$

где L_D — протяженность домена.

В явной форме записи после интегрирования (15) можно получить

$$U_D = \frac{\epsilon}{2qn_0} (E - E_{\text{вн}})^2. \quad (5.16)$$

Пока нет домена ($U_D = 0$), напряженность поля в образце $E = E_{\text{н}}$. С появлением домена U_D растет, а поле вне домена падает. Ток через образец пропорционален полю вне домена, поэтому зависимость U_D от $E_{\text{н}}$ является вольт-амперной характеристикой (ВАХ) прибора. Практически более важной характеристикой является зависимость тока от напряжения на образце. ВАХ прибора при $U_0 < U_{0п}$, где $U_{0п}$ — пороговое напряжение на образце должно совпадать с зависимостью, показанной на рис. 5.2 при $E < E_{\text{н}}$. После возникновения домена $U_0 > U_{0п}$ из-за уменьшения поля вне его практически все напряжение приложено к домену (участок CD на рис. 5.3). При этом ток скачком переходит

от $j_{\max}$ к $j_{\min}$. При дальнейшем увеличении U_0 ток практически остается неизменным, соответствующим $j_{\min}$ (рис 5.4). Уменьшение U_0 до $U_{0п}$ должно соответствовать кривой DC . При $U_{0п}$ домен не исчезает, а существует далее до напряжения исчезновения $U_{0н}$. Перед исчезновением домена скорости электронов и напряженность поля вне домена соответствуют точке D . При этом $j \approx j_{\max}$. Появление гистерезиса на ВАХ объясняется тем, что при снижении напряжения на образце происходит постепенное уменьшение напряженности поля в домене и его длины.

Режимы работы диода Ганна. Влияние внешней цепи на работу диода.

В общем случае внешняя цепь, к которой подключается диод Ганна, состоит из источника постоянного напряжения (тока) и некоторой колебательной системы (резонатора). Наличие в цепи диода колебательной системы создает условия к возбуждению колебаний на ее собственной резонансной частоте. Если такие колебания в системе возникают, то, кроме постоянной разности потенциалов, к диоду будет приложено еще и высокочастотное напряжение. Его амплитуда будет зависеть от добротности колебательной системы и места включения диода. Тогда в положительные полупериоды к диоду прикладывается сумма постоянного и переменного напряжений, а в отрицательные - их разность. В зависимости от частоты и амплитуды переменного напряжения возможны различные режимы работа диода.

Критерием влияния внешней цепи может служить соотношение между временем пролета домена $T_0 = \frac{L}{V_D}$ и периодом колебаний $T = \frac{1}{f}$; $\frac{T_0}{T} = \frac{L f}{V_D}$.

Однако режим работы диода зависит не только от внешних, но и от внутренних факторов. Поэтому для разграничения возможных режимов работы диода Ганна, учитывая внутренние и внешние условия, определяющие образование и разрушение доменов, в качестве критериев используют произведения $n_0 L$ и $f L$. Если эти величины откладывать на плоскости вдоль осей прямоугольной системы координат (рис. 5.5), то каждому из возможных режимов на указанной плоскости будет соответствовать некоторая область.

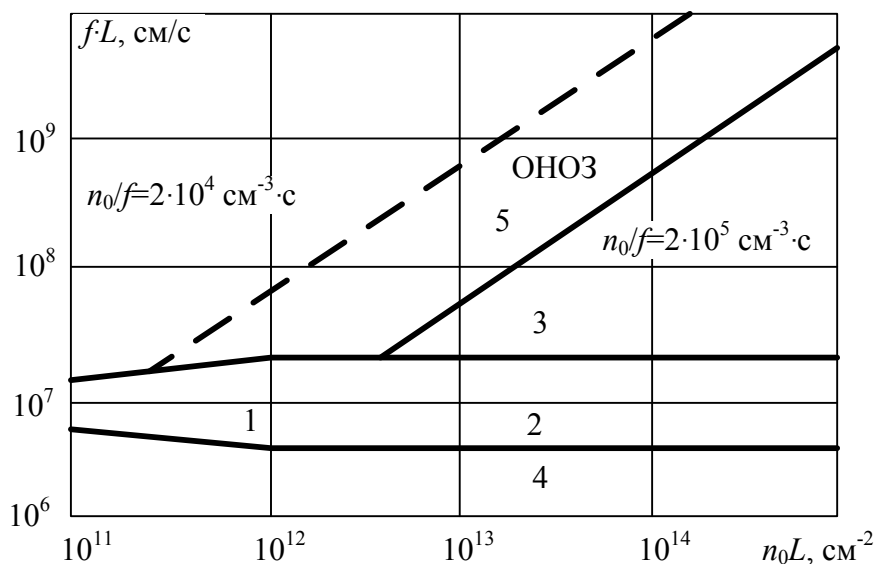


Рис. 5.5 — Режимы работы диода Ганна: 1 — бездоменный режим устойчивого усиления; 2 — пролетный режим; 3 — режим с разрушением домена; 4 — режим с задержкой домена; 5 — режим ограниченного накопления объемного заряда

Всего таких режимов и соответствующих им областей различают пять. Рассмотрим каждый из них в отдельности.

Бездоменный режим устойчивого усиления.

Этому режиму на рис. 5.5 соответствует область 1. Низколегированные или короткие образцы (у

которых произведение $n_0 L < 10^{12} \text{ см}^{-2}$) характеризуются стабильным распределением поля и положительным дифференциальным сопротивлением на постоянном токе.

В динамическом случае, когда к диоду приложено не только постоянное смещение, но и некоторое малое переменное напряжение с частотой близкой к пролетной ($fL \approx 10^7 \text{ см/с}$), закон изменения поля внутри образца перестает быть стационарным, и в нем возникает ДОС. Мгновенная картина поля уже не представляет собой, как при постоянном напряжении, монотонную зависимость, а становится похожей на волну нарастающей амплитуды. На рис. 5.6 показана картина распределения электрического поля в образце, смещенном в область с ДОС.

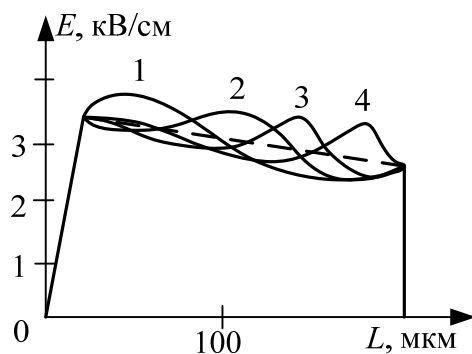


Рис. 5.6 — Картина распределения электрического поля

Здесь пунктирная кривая соответствует стационарному распределению поля. Сплошные кривые представляют собой четыре последовательных распределения поля, взятых с интервалом в $1/4$ периода, при наличии высокочастотного сигнала малой амплитуды.

Рассматриваемый режим был открыт Тимом в 1965 году и иногда называется режимом с движущимся пространственным зарядом. Указанные свойства реализуются в GaAs при $n_0 L < 10^{12}$, $fL \approx 10^7$ и позволяют применять его при создании устойчивых усилителей, поскольку именно в этом режиме усиление принципиально не может сопровождаться генерацией, обусловленной периодическим рождением и исчезновением доменов.

Доменные режимы работы.

Для доменных режимов работы диода Ганна характерно выполнение неравенства $n_0 L > 10^{12}$. Всего таких режимов различают три. Им соответствуют области 2, 3 и 4 на рис. 4.5. Их общей чертой является существование в образце в течение определенной части периода колебаний сформировавшегося домена.

а) *Пролетный режим.* Название режима обусловлено тем, что частота колебаний определяется главным образом временем пролета полностью сформировавшегося домена от катода до анода (область 2 на рис. 5.5). Механизм образования и движения домена в образце аналогичен рассмотренному ранее. Для повышения эффективности работы генератора в пролетном режиме желательно иметь синусоидальную форму тока в цепи диода. Приблизиться к такой форме тока можно, либо уменьшив длину образца (что уменьшит период колебаний), либо увеличив ширину домена за счет снижения n_0 . В общем случае более синусоидальная форма тока получается при уменьшении произведения $n_0 L$. КПД в пролетном режиме максимален, когда произведение $n_0 L$ лежит в пределах от одной до нескольких единиц на 10^{12} см^{-2} , то есть домен занимает примерно половину длины образца. КПД для этого режима не превышает 10%. Существование пролетного режима возможно лишь в узкой полосе частот и при перестройке внешнего колебательного контура он плавно переходит в другие режимы.

б) *Режим с разрушением (подавлением) домена.* Рассматриваемому режиму на рис. 4.5 соответствует область 3, лежащая выше ординаты $fL \approx 10^7 \text{ см/с}$. Частота генерируемых колебаний в таком режиме может превышать пролетную в несколько раз. Работа генератора Ганна в этом случае возможна лишь тогда, когда амплитуда колебаний достаточно велика, чтобы снижение поля в отрицательный

полупериод приводило к рассасыванию домена, то есть напряжение на образце становилось ниже порогового U_n . В этом случае домен разрушается, не достигая анода.

Наибольшая частота, при которой может быть реализован этот режим, определяется как временем формирования домена, так и временем его разрушения. Время формирования должно быть на порядок меньше, чем период колебаний. Так как скорость накопления пространственного заряда определяется характерным временем $\tau_D = \frac{\varepsilon}{qn_0|\mu_D|}$, то для GaAs из условия $\tau_D < 1/10f$ верхняя частотная

граница определяется $n_0/f \geq 10^5 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}$.

На рис. 5.5 это условие представлено пунктирной прямой, ограничивавшей сверху область 3. Учет времени разрушения домена дает минимальное критическое отношение $n_0/f = 10^4 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}$. КПД генератора, работающего в режиме с разрушением домена, может достигать 13%.

в) *Режим с задержкой домена.* Этому режиму на рис. 5 соответствует область 4, ориентировочно лежащая ниже ординаты $fL \approx 7...8 \cdot 10^6 \text{ см/с}$. Суммарное напряжение на диоде должно быть меньше порогового, когда домен исчезает на аноде. Зарождение нового домена задерживается до тех пор, пока напряжение не возрастет и не превысит порогового значения.

Если зарождение нового домена задерживается на время, равное времени пролета домена через образец, то колебания тока будут иметь почти симметричную прямоугольную форму. Резонансная частота колебательного контура в этом случае должна быть равна половине пролетной частоты. Теоретическое значение КПД генератора в режиме с задержкой домена достигает 27%.

Режим ограниченного накопления объемного заряда (ОНОЗ).

В режиме ОНОЗ на диод подается определенное напряжение смещения и переменное напряжение достаточно высокой частоты и большой амплитуды. В случае генератора переменное напряжение создается автоматически его высокочастотной колебательной системой. При этом скорость изменения поля в образце обеспечивается достаточно большой; чтобы область значений отрицательной дифференциальной подвижности μ_D на ВАХ пробегалась за малое время и домен не успевал

полностью сформироваться. В этом случае электрическое поле в образце остается в любой момент времени практически однородным. Напряжение на диоде просто равно EL . а ток $qn_0SV(E)$. Таким образом, ВАХ в режиме ОНОЗ должна иметь тот же вид, что и зависимость средней скорости дрейфа от напряженности поля. Сам диод в цепи переменного тока будет при этом играть роль нелинейной проводимости пропорциональной скорости $V(E)$ для данного двухдоменного полупроводника. Режим ОНОЗ реализуется соответствующим подбором напряжения, а также частоты и амплитуды переменного напряжения,

На рис. 5.7 представлена кусочно-линейная аппроксимация зависимости средней дрейфовой скорости от напряженности электрического поля $V(E)$ для GaAs.

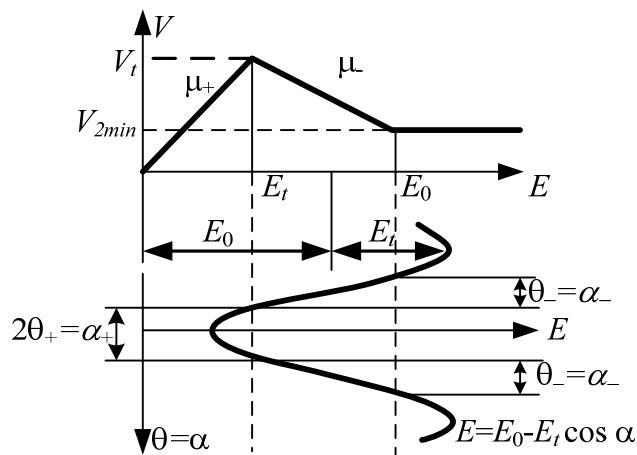


Рис. 5.7 — Кусочно-линейная аппроксимация зависимости средней дрейфовой скорости от напряженности электрического поля $V(E)$ для GaAs

На рисунке 5.7 введены следующие условные обозначения:

V_t , E_t — дрейфовая скорость и соответствующая ей пороговая напряженность поля, определяемые по аппроксимирующей зависимости $V(E)$; μ_+ , μ_- — положительная и отрицательная подвижности соответственно; $V_{2\min}$ — минимальная дрейфовая скорость вне домена; θ_- , θ_+ — фазовые углы, определяемые долями периода колебаний t_- и t_+ в течение которых дифференциальная подвижность μ_D сохраняется соответственно отрицательной или положительной. Значение остальных величин ясно из рисунка 5.7.

Нарастание и рассасывание объемного заряда описывается экспоненциальной функцией, показатель степени которой в зависимости от знака μ_D называют коэффициентом нарастания $G_{\text{нар}}$, или коэффициентом рассасывания $G_{\text{рас}}$ объемного заряда

$$G_{\text{нар/рас}} = \int \frac{qn_0|\mu_D|}{\varepsilon} dt. \quad (5.17)$$

Интегрируя в пределах t_- t_+ , а также переходя к фазовым углам, получим

$$G_{\text{нар}} = \frac{qn_0|\mu_-|\theta_-}{\varepsilon\omega}, \quad (5.18)$$

$$G_{\text{рас}} = \frac{qn_0|\mu_+|\theta_+}{\varepsilon\omega}. \quad (5.19)$$

Если максимально допустимый коэффициент нарастания, при котором еще не может возникнуть домен, принять равным $G_{\text{нmax}}$, то из условия $G_{\text{нmax}} \geq G_{\text{нар}}$ будем иметь

$$\frac{n_0}{f} \leq \frac{2\pi\varepsilon}{q|\mu_-|} \frac{G_{\text{нmax}}}{2\theta_-}. \quad (5.20)$$

Полученное неравенство ограничивает область режима ОН03 со стороны низких частот. Для исключения возможного накопления заряда за несколько периодов и образования за счет этого домена необходимо, чтобы рассасывание превышало нарастание или равнялось ему.

$$G_{\text{рас}} - G_{\text{нар}} = \delta \geq 0. \quad (5.21)$$

Если минимально допустимый коэффициент рассасывания принять равным $G_{\text{рmin}}$, то из условия $G_{\text{рmin}} \geq G_{\text{рас}}$ с учетом (4.19) получим:

$$\frac{n_0}{f} > \frac{2\pi\varepsilon}{q|\mu_+|} \frac{G_{\text{рmin}}}{2\theta_+}. \quad (5.22)$$

Неравенства можно использовать для нахождения возможных значений фазовых углов θ_- и θ_+ если заданы величины $\frac{n_0}{f}$, $G_{\text{рmin}}$, $G_{\text{нmax}}$, E_t , E_0 , и кусочно-линейная аппроксимация $V(E)$. Значение $\frac{n_0}{f}$, соответствующие режиму ОНОЗ лежат в пределах

$$2 \cdot 10^4 < \frac{n_0}{f} < 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3} \text{ с}, \quad (5.23)$$

Максимальный КПД в этом режиме может быть 18...23%.

Устройство диода Ганна и генератора на его основе. Серийный диод Ганна состоит из герметически запаянного металлокерамического патрона с расположенным внутри него кристаллом арсенида галлия GaAs. Его типичное устройство схематически показано на рис.8. На этом рисунке 1 и 2 соответственно катодный и анодный выводы диода, 3 — керамическая трубка, 4 — кристалл GaAs, 5 — токоподводящие катодные проволоочки. Анодный стержень 2 выполняет роль теплоотвода. кристалл GaAs являющийся активным элементом диода, обычно изготавливается методом газотранспортной

эпитаксии в виде полупроводниковой структуры типа Π^+ . При этом анодный омический контакт осуществляется с высоколегированным слоем Π^+ с помощью металлического контакта — припоя, в свою очередь припаянного к массивному теплопроводящему стержню.

Катодный контакт выполняется с помощью тонких проволочек диаметром 20...30 мкм, припаянных непосредственно к рабочему низколегированному слою припоя, обеспечивающему омический контакт.

В работе исследуется диод Ганна типа АА-705И. Его типовые параметры и параметры кристалла GaAs:

1. Омическое сопротивление диода при $U = 0,5 \text{ В}$, 3...20 Ом;
2. Рабочее напряжение питания, 9,0 В;
3. Рабочий ток, 970 мА;
4. Диапазон частот генерируемых колебаний 8,0...9,5 ГГц;
5. Непрерывная СВЧ мощность, 0,25 Вт;
6. Длина образца L , $(1,0...1,2) \cdot 10^{-5} \text{ м}$;
7. Площадь катодного контакта A , $1,13 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$
8. Концентрация n_0 , $1,0...1,4 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$
9. Подвижность в слабом поле 0,5...0,6 м/(В·с)
10. Диэлектрическая проницаемость ϵ 12,5



Рис. 5.8 — Конструкция диода Ганна

5.3. Описание лабораторной установки

Структурная схема лабораторной установки показана на рис. 5.9. В ее состав входит макет 1 и измерительная линия 2.

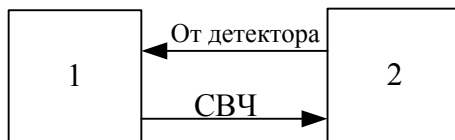


Рис. 5.9 — Структурная схема лабораторной установки

Макет выполнен в виде металлического ящика, в котором размещен регулируемый источник постоянного напряжения, резонатор с диодом Ганна и индикатор измерительной линии. На рисунке 5.10 изображена верхняя панель лабораторного стенда.

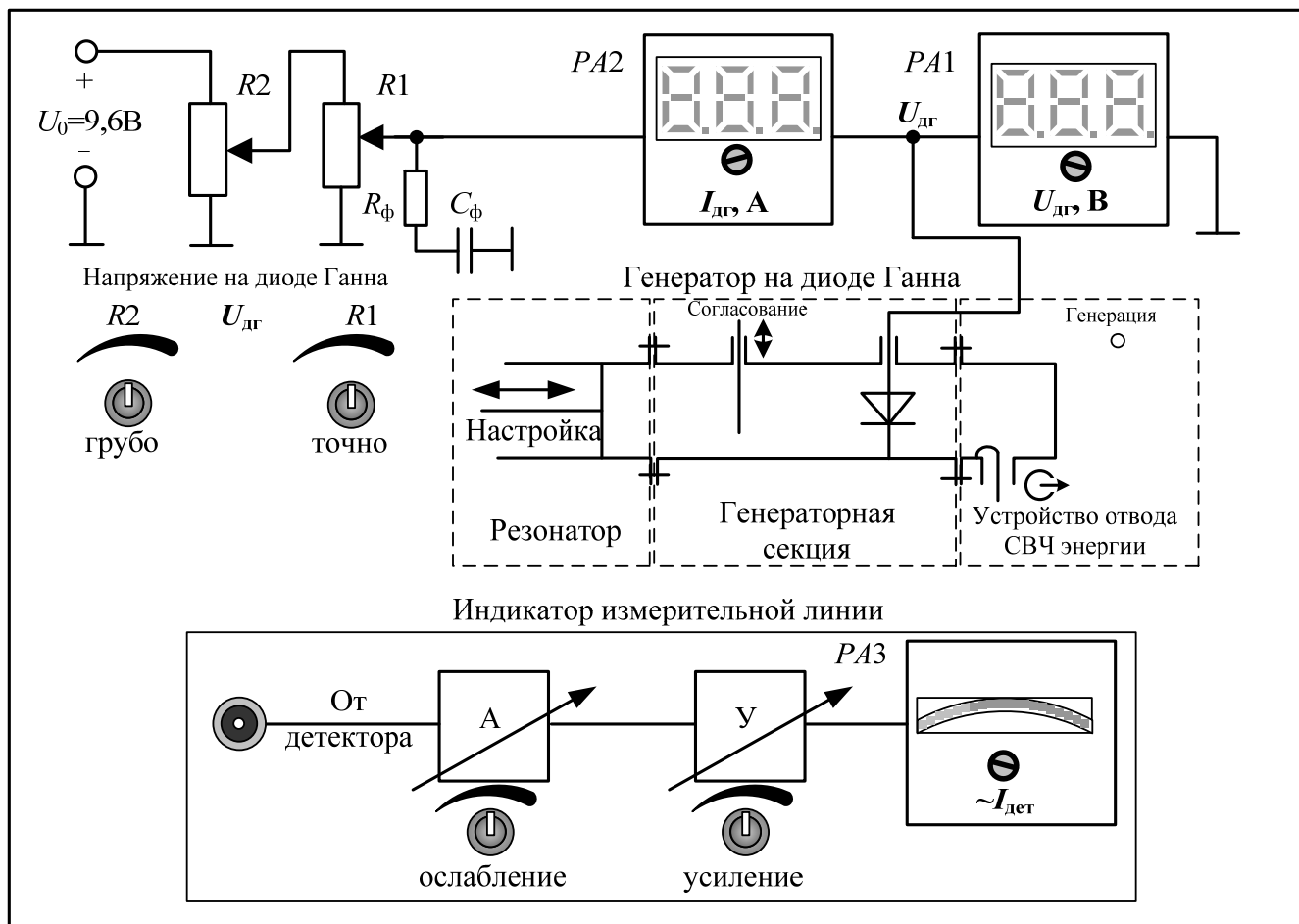


Рис. 5.10 — Верхняя панель лабораторного макета

Ручками «грубо» и «точно» регулируется напряжение на диоде Ганна. На индикаторе $PA1$ отображается напряжение на диоде Ганна, на индикаторе $PA2$ отображается ток проходящий через него. Лампочка «генерация», информирует наличие генерации, причем чем чаще она мигает тем выше мощность генерации. В лабораторном макете также реализован индикатор измерительной линии. С целью повышения динамического диапазона измерений в индикатор введен регулируемый усилитель и аттенюатор, регулировка осуществляется ручками «усиление» и «ослабление» соответственно. Сигнал постоянного тока от детектора измерительной линии подается на разъем «от детектора». Уровень сигнала наблюдается по индикатору $PA2$.

Принципиальная схема макета показана на рис. 5.11.

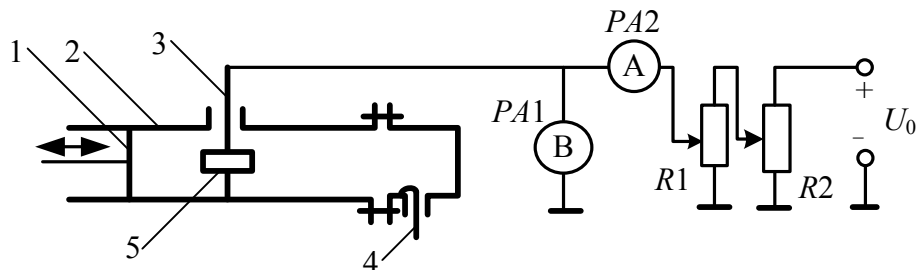


Рис. 5.11 — Принципиальная схема макета: 1 — подвижный поршень, 2 — резонатор, 3 — разъем, 4 — петля связи, 5 — диод

Диод 5 помещен между широкими стенками резонатора 2. Напряжение смещения подводится к диоду с помощью разъема 3. Перестройка резонатора осуществляется с помощью подвижного поршня 1 (который размещен на передней панели прибора с надписью «настройка»), закорачивающего волновод на одном из концов, другой конец используется для вывода СВЧ энергии с помощью петли

связи 4 к измерительной линии. Величина приложенного к диоду постоянного напряжения регулируется с помощью потенциометров R1 («точно») и R2 («грубо»). Напряжение на диоде и протекающий через него ток измеряются с помощью вольтметра и миллиамперметра РА1 и РА2 соответственно. Элементы регулировки и измерения указанных величин расположены на верхней панели макета. С помощью измерительной линии осуществляется измерение частоты генерируемых колебаний.

5.4. Порядок выполнения работы

5.4.1. Ознакомиться с описанием лабораторной установки. Установить ручки с надписью «точно» и «грубо» в крайнее левое положение (против часовой стрелки). Тумблер «Вкл» на задней стенке лабораторного макета перевести в выключенное состояние (вниз).

5.4.2. Подключить макет к сети с помощью вилки. Поставить тумблер «Вкл» в верхнее положение. После этого макет готов к работе.

5.4.3. Снять прямые вольт-амперные характеристики (ВАХ) диода Ганна для двух крайних положений ручки «настройка» находящейся на передней панели лабораторного макета (первое положение — 0 мм, второе положение — 10 мм).

Увеличивая напряжение на диоде от 0 до 9,5 В с помощью ручек «точно» и «грубо», для каждого фиксированного значения напряжения производить отсчет по шкале миллиамперметра величины протекающего через диод тока. Полученные данные заносить в табл. 5.1.

Таблица 5.1 — Экспериментальные данные для построения ВАХ диода Ганна

«Настройка»	$U_{дг}, В$	0	1,0	2,0	2,4	2,6	2,8	3,0	3,5	4,0	7,4	8,0	8,4	8,8	9,2	9,5
0 мм	$I_{дг}, А$															
10 мм	$I_{дг}, А$															

По данным таблицы построить графики зависимостей $I_1 = f(U)$, $I_2 = f(U)$.

Указание: Подъем напряжения на диоде производить плавно, не допуская резких скачков.

5.4.4. Исследовать возможность механической перестройки генератора на диоде Ганна, для этого необходимо измерить частоту генерируемых колебаний для двух крайних положений ручки «настройка» (см. п. 5.4.3) при фиксированном напряжении на диоде $U = 9,0 В$. Измерение частоты колебаний производится с помощью измерительной линии, которая подключается с помощью кабеля к макету. При наличии генерации загорится несколько светодиодов индикатора РА3. Если горит только третий и девятый светодиод это значит что измеряемый сигнал вышел из диапазона индикации и необходимо уменьшить усиление или увеличить ослабление. Ручкой «Ослабление», расположенной на верхней панели, установить индикатор на середину шкалы, Затем вращением ручки измерительной линии, расположенного впереди, добиться резонанса. Настройка в резонанс регистрируется по резкому спаду показаний индикатора РА3. Записать показания отсчетного устройства (в мм), соответствующие первому минимуму, Продолжая вращать ручку микровинта, добиться второго минимума, а показания отсчетного устройства записать. Разность полученных значений равна половине длины волны генерируемых колебания (в мм) в волноводе. Чтобы получить длину волны в свободном пространстве необходимо воспользоваться формулой

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{1/\lambda_{в}^2 + 1/\lambda_{кр}^2}},$$

где $\lambda_{в}$ — измеренная длина волны,

$\lambda_{кр}$ — критическая длинна волны H_{10} для волновода сечением 23×10 мм.

Вычислить частоту, и определить по результатам выполнения пункта диапазон механической перестройки по частоте, результаты занести в таблицу 5.2.

5.4.5. Измерить частоту колебаний при изменении напряжения на диоде от 8 В до 9,6 В через каждые 0,4 В. при выполнении настоящего пункта положение ручки «настройка» фиксировано — 7,00

мм. Измерение частоты колебаний производится как в п. 5.4.4. результаты занести в таблицу 5.3.

Таблица 5.2 — Экспериментальные данные для определения диапазона механической перестройки частоты генератора на диоде Ганна

«Настройка», мм	0	10
$X_{\min 1}$, мм		
$X_{\min 2}$, мм		
f , ГГц		

Таблица 5.3 — Экспериментальные данные для определения диапазона электронной перестройки частоты генератора на диоде Ганна

U_d , В	8	8,4	8,8	9,2	9,6
$X_{\min 1}$, мм					
$X_{\min 2}$, мм					
f , ГГц					

5.4.6. По результатам измерений п. 5.4.5. определить диапазон электронной перестройки частоты и построить график.

5.4.7. Произвести сопоставление результатов исследования, полученных экспериментально, с выводами теории. Сформулировать выводы по выполненной работе.

5.4.8. Оформить отчет по работе в соответствии с общими требованиями кафедры радиотехник [6].

5.5. Содержание отчета

Требования к содержанию отчета изложены во введении. Кроме того в отчете необходимо представить результаты экспериментальных исследований, сведенные в таблицы и представленные в виде графиков. Сравнить полученные зависимости с известными теоретическими и сделать выводы по результатам исследований.

5.6. Контрольные вопросы

- 5.6.1. Опишите суть эффекта Ганна.
- 5.6.2. Поясните принцип формирования доменов в полупроводнике.
- 5.6.3. Какое количество доменов может одновременно существовать в полупроводнике, почему?
- 5.6.4. Опишите различные режимы работы диода Ганна.
- 5.6.5. Изобразите и объясните энергетическую диаграмму диода Ганна.
- 5.6.6. Изобразите структуру с схему включения диода Ганна.
- 5.6.7. Какая энергия преобразуется в энергию СВЧ поля в диоде Ганна?
- 5.6.8. Каково сопротивление домена в диоде Ганна, почему?
- 5.6.9. От чего зависит частота СВЧ колебаний в генераторе на диоде Ганна?
- 5.6.10. Для чего необходим резонатор в генераторе на диоде Ганна?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Афонін І.Л. Електронні прилади НВЧ и квантові прилади: Навчальний посібник / І.Л. Афонін, А.О. Бичков, В.В. Саламатін — Севастополь: Військ.-мор. ордена Червоної зірки ін-ту ім. П. С. Нахімова, 2002. — 244 с.
2. Белов Касаткин Л.В. Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн/ Л.В. Касаткин, В.Е. Чайка; В.П. Тараненко, С.П. Ракитина — Севастополь: Вебер, 2006. — 320 с.
3. Андрушко Л.М. Электронные и квантовые приборы СВЧ: Учебник/ Л.М. Андрушко, Н.Д. Федоров — М.: Радио и связь, 1981. — 208 с.
4. Голубева Н.С. Основы радиоэлектроники сверхвысоких частот/ Н.С. Голубева, В.Н. Митрохин — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. — 488 с.
5. Філінюк М.А. Інформаційні пристрої на основі потенційно-нестійких багато електродних напівпровідникових структур Шотткі / М.А. Філінюк, О.М. Куземко, Л.Б. Ліщинська — Вінниця : Вид-во Вінниц. нац. техн. ун-ту, 2009. — 274 с.
6. Слезкин В.Г. Методические указания по оформлению текстовых работ для студентов дневной и заочной форм обучения направления 0907 — «Радиотехника» / В.Г. Слезкин. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. — 15 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
ОБРАЗЕЦ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА

Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины
Севастопольский национальный технический университет

Кафедра радиотехники и телекоммуникаций

ОТЧЕТ
по лабораторной работе

(название лабораторной работы)
по дисциплине «Электронные и квантовые приборы СВЧ»

Выполнил студент гр. _____

_____ (Ф.И.О.)

Отметка о защите _____

Преподаватель _____
(Ф.И.О.)

Севастополь

20__

