

Рисунок 6.12. Устройство гелий-неонового лазера.

1 — источник питания; 2 — излучатель; 3,4 — оптический резонатор (3 — сферическое зеркало, 4 — плоское выходное зеркало); 5 — активный элемент — двухэлектродная газоразрядная трубка; 6 — анод; 7 — катод; 8 — кварцевые пластины.

Колебательная система представляет собой оптический резонатор Фабри-Перо. Он образован двумя диэлектрическими многослойными зеркалами (сферическим 3 и плоским 4), обладающими весьма большими значениями коэффициента отражения (примерно 0.98). Вывод излучения осуществляется со стороны плоского зеркала 6. Зеркала закреплены в торцевых фланцах держателя оптики. Держатель оптики выполнен на основе уголка из алюминиевого сплава.

Активный элемент 5 представляет собой двухэлектродную газоразрядную трубку постоянного тока, наполненную смесью газов гелия и неона, находящейся при низком давлении. В отростках газоразрядной трубки расположены анод 6 и подогревной катод 7. Использование подогревного катода позволяет снизить напряжение поджига за счет увеличения начальной концентрации свободных электронов. Выходные окна 8 активного элемента 5 выполнены в виде кварцевых пластин, ориентированных так, что нормали к ним составляют с оптической осью резонатора угол Брюстера θ_B . Благодаря этому отраженное от окон излучение поляризовано нормально к плоскости падения, а излучение, поляризованное в плоскости падения, проходит через окна без потерь на отражение. Такое расположение окон эквивалентно их просветлению для одного вида поляризации, в результате чего генерируемое излучение имеет поляризацию, близкую к линейной.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО СВЯЗИ
Федеральное государственное образовательное бюджетное
учреждение высшего профессионального образования
«ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И ИНФОРМАТИКИ»

Кафедра основ конструирования и технологии РТС

О.В. Осипов

А.А. Солдатов

ПРИБОРЫ СВЧ И ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА

Методические указания
к лабораторным работам

Самара

2014

УДК 621.385.6(076)+ 621.396.67(076)

Рекомендовано к изданию методическим советом ПГУТИ,
протокол № от 2014

Рецензент:

проф., ПГУТИ, зав.каф. Э и А
д.ф.-м.н., доц. Ключев Д.,С.

Методические указания к лабораторным работам «Приборы СВЧ и оптического диапазона» содержит методику расчета и измерения основных параметров электровакуумных приборов СВЧ и ОД: отражательного клистрона; лампы бегущей волны (ЛБВ); лампы обратной волны (ЛОВ); гелий-неонового лазера разработаны в соответствии с ФГОС ВПО по направлению подготовки, 11.03.01 Инфокоммуникационные технологии и системы связи, 11.03.02 и предназначены для студентов 4 курса факультета ФТР для лабораторных занятий.

V — спонтанное излучение Ne (обычное свечение Ne); VI — диффузия при соударениях со стенками;

$$3s \Rightarrow 3p \rightarrow \lambda_1(ИКЛ); 3s \Rightarrow 2p \rightarrow \lambda_2(ВЛ); 2s \Rightarrow 2p \rightarrow \lambda_3(ИКЛ).$$

Для создания инверсии населенностей используется электрическая накачка — возбуждение тлеющего разряда в газообразной трубке. При разряде вследствие неупругих соударений со свободными электронами происходит возбуждение атомов гелия, которые могут переходить на метастабильные уровни ϵ_2 и ϵ_3 (стрелки I). Эти уровни близки к уровням $2s$ или $3s$ неона. Поэтому при неупругих соударениях возбужденных атомов гелия с невозбужденными атомами неона происходит передача избыточной энергии атомов гелия атомам неона (стрелки II). Атомы гелия переходят в основное состояние (стрелки III), а атомы неона — в возбужденные состояния $2s$ и $3s$ (стрелки IV). Так как время жизни атомов неона на уровнях $2s, 3s$ больше, чем на уровнях $2p, 3p$ (уровни $2s, 3s$ — метастабильные, а уровни $2p, 3p$ — короткоживущие), при определенном токе разряда возникает инверсия населенностей и вынужденное излучение в переходах: $3s \Rightarrow 3p$ — излучение в ИК диапазоне; $3s \Rightarrow 2p$ — излучение в диапазоне видимых лучей (ВЛ); $2s \Rightarrow 2p$ — излучение в ИК диапазоне.

Частицы с уровней $3p, 2p$ возвращаются на основной уровень ϵ_1 в два этапа. Сначала происходит спонтанный переход на метастабильный уровень $1s$, сопровождающийся обычным свечением неона (стрелка V). Затем частицы удаляются с уровня $1s$ из-за диффузии на стенки трубки, которым они отдают избыток своей энергии (стрелка VI).

Вследствие кратности состояний неона инверсию населенностей и генерацию можно получить на большом числе переходов с различными длинами волн. Выделение генерации на одном из переходов с определенной длиной волны излучения осуществляется за счет избирательных свойств колебательной системы.

Устройство гелий-неонового лазера

Устройство гелий-неонового лазера схематически показано на рисунке 6.12. В комплект прибора входят источник питания 1 и излучатель 2. Основными элементами излучателя 2 являются колебательная система 3,4 и активный элемент 5.

денные состояния неона обозначены по Пашену: ns — метастабильные уровни, np — короткоживущие уровни. Эти состояния являются вырожденными — каждое из них представляет собой группу близко расположенных подуровней. Подуровни каждого состояния нумеруются в порядке убывания энергии дополнительными индексами, которые указываются сбоку около каждой группы. Так около состояния $2p$ стоят цифры $1 \dots 10$; это означает, что 10 подуровней этого состояния нумеруются от $2p_1$ до $2p_{10}$.

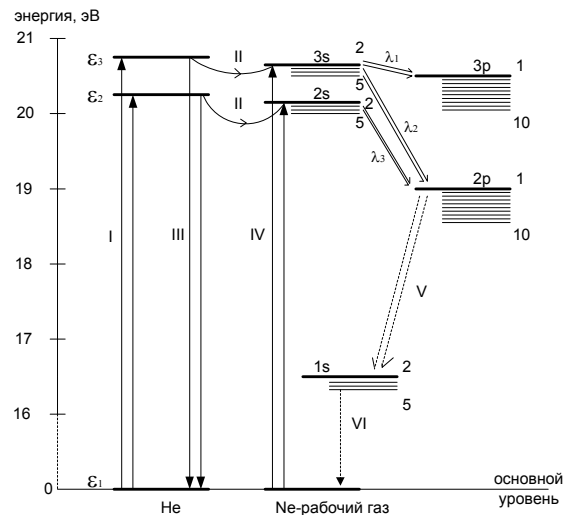
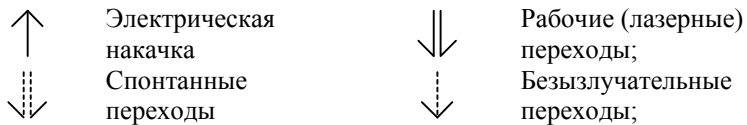


Рисунок 6.11. Диаграмма энергетических уровней и квантовых переходов в гелий-неоновом лазере.



ϵ_1 — основной уровень; ϵ_2, ϵ_3 — возбужденные метастабильные уровни He;

I — заселение верхних уровней He путем электрической накачки; II — резонансная передача возбуждения от атомов He атомам Ne при их соударениях, сопровождающаяся переходом атомов He в основное состояние (III), а атомов Ne — в возбужденное состояние (IV);

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1.
"ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО
КЛИСТРОНА ОТ НАПРЯЖЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЯ"4

Лабораторная работа №2.
"ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ МОДУЛЯЦИИ
ОТРАЖАТЕЛЬНОГО КЛИСТРОНА..... 13

Лабораторная работа №3.
"ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ТИПА О".....21

Лабораторная работа №4.
"ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАМПЫ ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ ТИПА О"28

Лабораторная работа №5.
"ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕЛИЙ-НЕОНОВОГО ЛАЗЕРА"39

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....48

ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ КЛИСТРОНЫ.....48

ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ТИПА О.....52

ЛАМПЫ ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ ТИПА О.....56

ГЕЛИЙ НЕОНОВЫЙ ЛАЗЕР.....61

Исследование зависимости параметров отражательного клистрона от напряжения отражателя

1.1. Цель работы

Изучить устройство, принцип действия и схему питания отражательного клистрона. Экспериментально исследовать фазовое условие самовозбуждения, зависимости входной мощности и частоты генерируемых колебаний отражательного клистрона от напряжения отражателя.

1.2. Литература для самостоятельной подготовки

1. Андрушко Л. М., Электронные и квантовые приборы СВЧ [Текст] : учебник для вузов/ Л. М. Андрушко, Н.Д. Федоров— М.: Радио и связь, 1981, - 320 с. – (Учебник для вузов)
2. Ключев Д. С. Приборы СВЧ и оптического диапазона [Текст]: конспект лекций/Д.С. Ключев, О.В. Осипов, - Самара: Типография ПГУТИ, 2014, - 210 с. – (Конспект лекций)
3. Куш Г. Г., Приборы и устройства оптического и СВЧ диапазонов [Текст]: учеб. пособие/ Г. Г. Куш, Ж. М. Соколова, Л. И. Шангина - М.: Радио и связь, 2012, - 414 с. – (Учебное пособие)
4. Федоров Н.Д., Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника [Текст] : учеб. пособие /под ред. Н. Д.Федорова - М.: Радио и связь, 2002, - 560 с. – (Учебное пособие)

1.3. Подготовка к работе

1. Используя рекомендуемую литературу (разд.2), изучить устройство, принцип действия и основные характеристики отражательного клистрона.
2. Изучить функциональную схему и описание лабораторной установки (разд.5).

ки, волна, отраженная от нее начинает распространяться вдоль ЗС к коллектору. Затем она отражается от конца ЗС и начинает взаимодействовать с электронами, что приводит к скачкам выходной мощности. В этом случае электронный поток взаимодействует уже с прямыми гармониками волны отраженной от конца ЗС. Для устранения этого явления на конце ЗС (вблизи коллектора) ставят поглотитель, который представляет собой согласованную нагрузку и предотвращает возбуждение ЛОВО на прямых гармониках. Очевидно, что при согласованной выходной нагрузке поглотитель не оказывает никакого влияния на величину выходной мощности ЛОВО.

Поля пространственных гармоник убывают при удалении от замедляющей системы, причем тем быстрее, чем больше номер гармоники. Поэтому работа ЛОВО производится обычно лишь на первой обратной пространственной гармонике с $p = -1$.

6.4. Гелий-неоновый лазер

Принцип работы гелий-неонового лазера

Газовый лазер — это оптический квантовый генератор (ОКГ), в котором для генерации монохроматических когерентных электромагнитных колебаний оптического диапазона используется явление вынужденного излучения в газообразной активной среде.

Исследуемый прибор относится к классу атомных газоразрядных лазеров. Первая характеристика — атомный — означает, что для генерации излучения используются вынужденные квантовые переходы между энергетическими уровнями нейтральных атомов газа. Вторая характеристика — газоразрядный — означает, что инверсия населенностей энергетических уровней, необходимая для возбуждения вынужденного излучения, достигается за счет соударения атомов газа с быстролетающими электронами в процессе электрического разряда.

В исследуемом приборе активной средой является смесь газов гелия (He) и неона (Ne), которая заполняет активный элемент — газоразрядную трубку. Неон является рабочим газом; это означает, что лазерными уровнями, то есть уровнями, используемыми для генерации вынужденного излучения, являются уровни возбужденных атомов неона. Гелий является вспомогательным газом, посредником при передаче возбуждения от электронов к атомам неона.

Для пояснения принципа действия на рисунке 6.11. представлена диаграмма энергетических уровней и квантовых переходов в гелий-неоновом лазере. Основные состояния атомов гелия и неона обозначены через ϵ_1 , возбужденные состояния гелия — через ϵ_2 , ϵ_3 . Возбуж-

другу. Электроны, двигаясь от катода, в начале ЗС модулируется обратной гармоникой по скорости. По мере распространения электронов вдоль ЗС эта модуляция переходит в модуляцию по плотности. Электроны группируются в сгустки, тем самым увеличивая конвекционный ток, который принимает максимальное значение в конце ЗС. Электромагнитная волна распространяется в сторону СВЧ-выхода, поэтому ее поле в конце ЗС мало. На этом участке преобладает процесс отбора кинетической энергии от электронного потока СВЧ-волной, что приводит к увеличению амплитуды обратных гармоник. С другой стороны, у СВЧ-выхода амплитуда поля волны велика, а электроны еще не сгруппированы. Поэтому на этом участке преобладает процесс группировки электронов под действием поля волны. Это неразрывное влияние электронов на волну и обратно происходит по всей длине ЗС, но степень влияния на разных участках — различна. Это показано на рисунке 6.10.

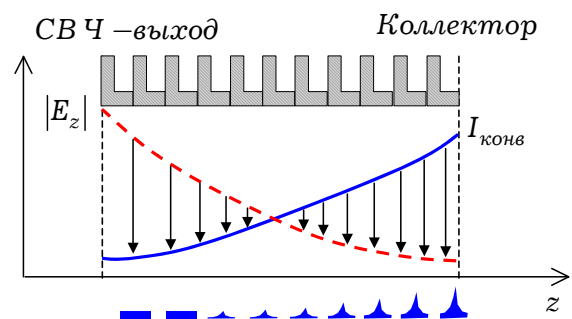


Рисунок 6.10. Внутренняя обратная связь в ЛОВО.

На рис. 6.10 показаны зависимости конвекционного тока $I_{конв}$ (сплошные линии) и модуля продольной составляющей электрического поля $|E_z|$ (штриховые линии) от продольной координаты z . Внизу качественно показан процесс образования электронных сгустков при различных значениях z . Стрелками показано преобладающее направление двухсторонней обратной связи между электронами и СВЧ-волной.

Таким образом, электронный поток в ЛОВО играет двойную роль — как источник энергии и как элемент обратной связи. Обратная связь в ЛОВО распределена по всей ЗС и присуща самому принципу работы лампы, то есть является принципиально неустранимой.

Если к СВЧ-выходу подключена хорошо согласованная нагрузка, то не играет роли какое сопротивление включено на другом конце замедляющей системы. Однако при рассогласовании внешней нагруз-

3. Ответить на контрольные вопросы (разд.4).
4. Оформить заготовку отчета (содержание отчета приведено в разд. 8).

1.4. Содержание контрольных вопросов

1. Устройство и схема питания отражательного клистрона.
2. Распределение потенциалов вдоль оси клистрона.
3. Основные физические процессы, происходящие в отражательном клистроне.
4. Особенности группирования электронов и отбора их энергии СВЧ полем в отражательном клистроне.
5. Пространственно-временная диаграмма движения электронов в пространстве группирования отражательного клистрона.
6. Обосновать фазовое условие самовозбуждения отражательного клистрона.
7. Выражение угла пролета невозмущенного электрона в пространстве группирования.
8. Объяснить наличие зон генерации отражательного клистрона.
9. Построить график и дать объяснение зависимости выходной мощности от напряжения отражателя.
10. Эквивалентная схема СВЧ структуры отражательного клистрона, понятие электронной проводимости.
11. Построить график и дать объяснение зависимости частоты генерации от напряжения отражателя.
12. Понятия диапазона и крутизны электронной перестройки частоты отражательного клистрона.
13. Типичные значения параметров отражательных клистронов.
14. Основные применения отражательных клистронов.

1.5. Функциональная схема и описание лабораторной установки

Функциональная схема лабораторной установки представлена на рис. 1.1. Ее основными узлами являются: генераторная секция 1, блок питания 2, волноводный тракт 3, двухлучевой осциллограф 4. Генераторная секция 1 содержит: исследуемый отражательный клистрон Л1, который с помощью зонда связан с выходным волноводом 5, а также собранный на лампе Л2 (типа 6Н7С) усилитель пилообразного напряжения (позиция 6), подаваемого на отражатель клистрона. Блок пита-

ния 2 обеспечивает необходимые напряжения на электродах клистрона. Волноводный тракт 3 собран из волноводных элементов трехсантиметрового диапазона радиоволн сечением 23x10 мм². В тракт входят: измерительная линия 7, частотомер 8, проходная детекторная секция 9, нагрузка 10, состоящая из регулируемого аттенюатора 11 и короткозамыкающего (КЗ) поршня 12.

В работе исследуется отражательный клистрон Л1 типа К-19 трехсантиметрового диапазона радиоволн с внутренним резонатором, являющийся генератором СВЧ-колебаний. Возбуждение колебаний клистрона возможно не при любых напряжениях на его отражателе $U_{omp} = -|U_{omp}|$, а только в определенных интервалах этого напряжения, поэтому зависимость СВЧ-мощности на выходе клистрона P от U_{omp} имеет вид ряда импульсов, называемых зонами генерации. Частота генерируемых колебаний f в пределах каждой зоны имеет монотонную зависимость от U_{omp} . При подаче на отражатель переменного напряжения клистрон генерирует СВЧ-колебания, модулированные по амплитуде и частоте.

Напряжения U , снимаемые с детекторных выходов измерительной линии 7 и детекторной секции 9, при квадратичных характеристиках детекторов пропорциональны квадрату амплитуды электрического поля в волноводе E_m^2 и, следовательно, СВЧ-мощности в тракте P :

$$U \sim E_m^2 \sim P. \quad (1.1)$$

Благодаря этому снимаемое с детектора напряжение U может использоваться для относительных измерений СВЧ-мощности.

Для измерения частоты генерируемых колебаний используется резонансный частотомер 8 типа Ч2-32. Его чувствительным элементом является объемный резонатор, резонансная частота которого регулируется путем изменения его длины при перемещении КЗ-поршня. Отсчет частоты настройки резонатора производится по шкале, сопряженной с положением поршня.

Электрические токи, протекающие по замедляющей системе, вблизи нее создают электромагнитное поле в периодически-неоднородной системе, которое распространяется в виде двух встречных волн. Это поле представляется в виде бесконечной суммы пространственных гармоник (6.3.2). Если бы ЗС была однородной и поле ее не содержало бы пространственных гармоник, то фазовая скорость была бы направлена только в сторону движения энергии волны (к СВЧ-выходу). Однако фазовые скорости пространственных гармоник могут совпадать по направлению с групповой скоростью (прямые гармоники) и быть противоположно направленными по отношению к v_{zp} (обратные гармоники).

Таким образом, направление движения электронов совпадает с направлением фазовых скоростей $v_{\phi,-p}$ обратных гармоник. Направления движения электронов, прямых и обратных пространственных гармоник показаны на рисунке 6.9.

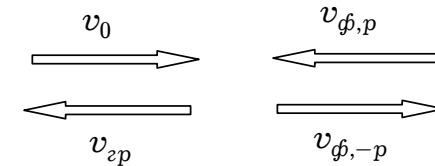


Рисунок 6.9. Направления скоростей электронов, фазовых и групповых скоростей пространственных гармоник.

В результате в ЛОВО электронный поток будет взаимодействовать с обратными пространственными гармониками поля в ЗС.

Подберем ускоряющее напряжение U_0 таким образом, чтобы обеспечить фазовый синхронизм между электронами и одной из обратных пространственных гармоник с номером $-p$. Для этого положим: $v_0 \approx v_{\phi,-p}$. С использованием формулы (6.3.4) получаем значение ускоряющего напряжения:

$$U_0 = \sqrt{\frac{m}{2e}} \left| \frac{\omega}{\beta_0 - 2\pi|p|/S} \right|. \quad (6.3.8)$$

Известно, что для поддержания генерации в устройстве необходимо наличие положительной обратной связи. В ЛОВО она является внутренней и возникает вследствие того, что направления движения электронов и групповой скорости СВЧ-волны противоположны друг

где $\beta_p = \beta_0 + 2\pi p/S$, $E_{zp} = E_{0z}A_p$, A_p — коэффициенты разложения; S — период замедляющей системы.

Поле в периодической замедляющей системе, как видно из (6.3.2), можно представить в виде бесконечной суммы бегущих волн с одинаковой частотой ω и различными фазовыми коэффициентами β_p и амплитудами E_{zp} . Эти волны называются пространственными гармониками (гармониками Хартри). Они могут существовать только совместно, в сумме представляя реальное поле в замедляющей системе.

Рассмотрим основные свойства пространственных гармоник.

1. Постоянные распространения пространственных гармоник определяются соотношением:

$$\beta_p = \beta_0 + \frac{2\pi p}{S}, \quad p = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (6.3.3)$$

Гармоники с $p > 0$ называются прямыми; с $p < 0$ — обратными. Гармоника с $p = 0$ называется основной. В формуле (3.3) β_0 — постоянная распространения нулевой гармоники.

2. Фазовые скорости пространственных гармоник:

$$v_{\phi, p} = \frac{\omega}{\beta_p} = \frac{\omega}{\beta_0 + \frac{2\pi p}{S}}, \quad p = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (6.3.4)$$

5. Для взаимодействия электронного потока с p -ой пространственной гармоникой должно выполняться условие фазового синхронизма:

$$v_{\phi, p} \approx v_0 = \sqrt{\frac{2eU_0}{m}}. \quad (6.3.5)$$

5. Длины волн пространственных гармоник:

$$\lambda_p = \frac{2\pi}{\beta_p} = \frac{2\pi}{\beta_0 + \frac{2\pi p}{S}}, \quad p = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (6.3.6)$$

5. Групповые скорости пространственных гармоник:

$$v_{gp, p} = \frac{d\omega}{d\beta_p} = \frac{d\omega}{d\left(\beta_0 + \frac{2\pi p}{S}\right)} = \frac{d\omega}{d\beta_0} = v_{gp, 0}. \quad (6.3.7)$$

Все пространственные гармоники имеют одинаковую групповую скорость. Гармоники не могут существовать отдельно друг от друга и лишь суперпозиция всех их описывает электромагнитное поле в периодически-неоднородной ЗС.

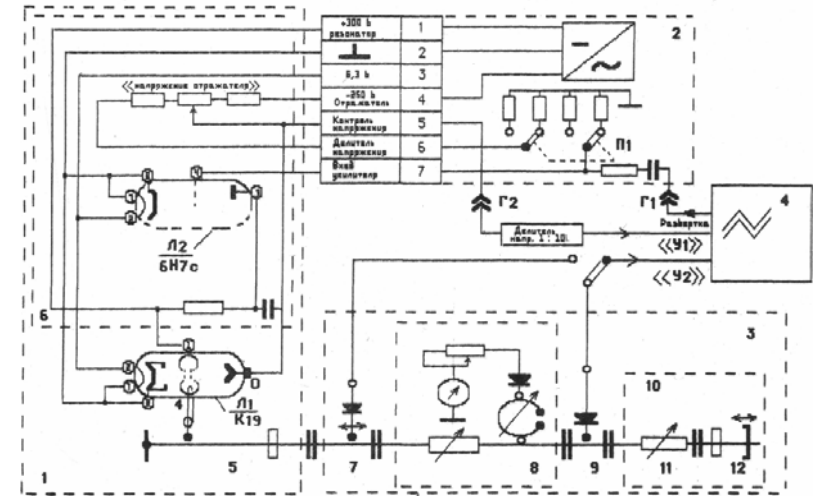


Рисунок 1.1. Функциональная схема установки.

1.6. Лабораторное задание и порядок выполнения

работы

1.6.1. Методика измерения

В работе исследуется зависимость мощности P и частоты f колебаний, генерируемых клистроном, от напряжения на его отражателе $U_{отр} = -|U_{отр}|$. На отражатель подается напряжение развертки осциллографа, усиленное в усилителе пилообразного напряжения 6, на вход осциллографа «YI» — напряжение с СВЧ-детектора, пропорциональное мощности в тракте, на вход осциллографа «YII» — пилообразное напряжение отражателя. При этом на экране осциллографа наблюдаются:

— линия мощности (луч «YI»), т.е. временная зависимость СВЧ-мощности на выходе клистрона в виде ряда импульсов (зон генерации), которая воспроизводит зависимость СВЧ-мощности от напряжения отражателя;

— линия напряжения (луч «YII»), т.е. временная зависимость пилообразного напряжения на отражателе клистрона.

Благодаря частотной модуляции СВЧ-колебаний на выходе клистрона при пилообразном напряжении отражателя и наличию в тракте резонансного частотомера на осциллограмму зон генерации (линию мощности) накладывается частотная метка, соответствующая частоте настройки частотомера и обусловленная поглощением части СВЧ-мощности на этой частоте в резонаторе. Перестраивая резонатор путем перемещения его поршня, можно установить метку и измерить частоту колебаний в любой точке зоны генерации.

Измерения производятся в нескольких отсчетных точках, соответствующих положениям частотной метки на линии мощности. В каждой отсчетной точке измеряются: выходная мощность клистрона P ; частоты генерируемых колебаний f ; напряжение отражателя $|U_{amp}|$.

Выходная мощность клистрона P измеряется по величине напряжения на выходе СВЧ-детектора и определяется как ордината линии мощности в отсчетной точке в условных единицах (делениях масштабной сетки осциллографа). Частота генерируемых колебаний f измеряется в абсолютных единицах (ГГц) по шкале частотомера при положении его поршня, соответствующем выбранной отсчетной точке. Напряжение отражателя U измеряется в следующем порядке: потенциометром «Смещение YI» совместить отсчетную точку (метку) линии мощности с линией напряжения; с помощью масштабной сетки и аттенюатора «Усиление YII» определить напряжение отражателя как ординату линии напряжения в отсчетной точке (точке пересечения этой линии с линией мощности) в абсолютных единицах (В).

1.6.2. Исследование одной зоны генерации

Включить блок питания и осциллограф. Установить режим индикации одной зоны генерации, для чего:

— переключатель (П1) амплитуды пилообразного напряжения в блоке питания перевести в положение 2 (верхнее);

— органы управления осциллографа установить в положения: переключатель «Вход» — в положение "∞", «Длительность развертки» — 20 мкс; «Усиление YI» — 0,05 В/дел.; «Усиление YII» — 1 В/дел.

Установить линии мощности и напряжения в средней части экрана (потенциометры «Смещение по горизонтали», «Смещение YI», «Смещение YII»). Регулируя постоянное напряжение отражателя потенциометром «Напряжение отражателя» в усилителе пилообразного напря-

лампа представляет собой стеклянный вакуумный баллон. В устройство ЛОВО входит «электронная пушка» (система «катод-анод»), служащей для ускорения электронов под действием постоянно-го напряжения U_0 и создания электронного потока. Для возникновения термоэлектронной эмиссии электронов с катода (Кат) используется подогреватель (Под).

Коллектор служит для сбора электронов и возвращения их на источник питания.

Фокусирующая система (ФС) представляет собой внешний соленоид или постоянный магнит, создающий продольное постоянное магнитное поле, которое обеспечивает неизменное поперечное сечение электронного пучка.

В генераторной ЛОВО имеется только СВЧ-выход, служащий для вывода СВЧ-энергии из лампы во внешнюю цепь. Обычно выход конструктивно соединен с коаксиальной линией передачи или полым прямоугольным волноводом.

Замедляющая система (ЗС) служит для уменьшения фазовой скорости электромагнитной волны в замедляющей системе. Это необходимо для выполнения фазового синхронизма между электронным потоком и СВЧ-волной. Обычно в ЛОВО используется гребенчатая замедляющая система, образованная выступами металлических диафрагм.

В пространстве между катодом и анодом под действием постоянного напряжения U_0 осуществляется разгон электронов до одинаковой скорости \vec{v}_0 , определяемую из закона сохранения энергии:

$$eU_0 = \frac{mv_0^2}{2}; \quad v_0 = \sqrt{\frac{2eU_0}{m}}, \quad (6.3.1)$$

где e и m — заряд и масса электрона.

При включении ЛОВО в ней отсутствует СВЧ-поле. Электроны, пролетая вблизи замедляющей системы, наводят на ней СВЧ-токи, которые являются источниками электромагнитного поля в замедляющей периодически-неоднородной системе. Согласно теореме Флоке, электромагнитное поле в соседних ячейках периодически-неоднородной системы одинаково и поэтому продольную составляющую электрического поля E_z в ЗС можно представить в виде ряда Фурье по продольной координаты z :

$$E_z(x, y, z; t) = \sum_{p=-\infty}^{+\infty} E_{zp} e^{i(\omega t - \beta_p z)}, \quad (6.3.2)$$

Рисунок 6.7. Модуляция электронов по плотности вдоль замедляющей системы ЛБВО.

Начальный участок спиральной замедляющей системы выполняет модуляцию электронов по скорости. По мере движения вдоль лампы электроны за счет разницы скоростей группируются в сгустки (модуляция электронов по плотности). Эти сгустки, попадая в тормозящие полупериоды поля волны, отдают энергию СВЧ полю, тем самым усиливая входной сигнал. Процесс образования электронных сгустков показывает зависимость плотности электронного потока ρ от продольной координаты z , которая приведена на рисунке 6.7. Центры сгустков первоначально располагаются в областях тормозящего электрического поля (залитые области), но на выходе лампы сгустки образуются вблизи точек перехода поля от ускоряющего к тормозящему.

6.3. Лампа обратной волны типа О (ЛОВО)

Лампа обратной волны типа О — это электровакуумный прибор, служащий для генерации (усиления) СВЧ сигнала, в основе принципа работы которого лежит длительное взаимодействие между электронным потоком и обратными пространственными гармониками электромагнитного поля в замедляющей системе.

Рассмотрим устройство и принцип работы ЛБВО генераторного типа. Схема лампы представлена на рисунке 6.8.

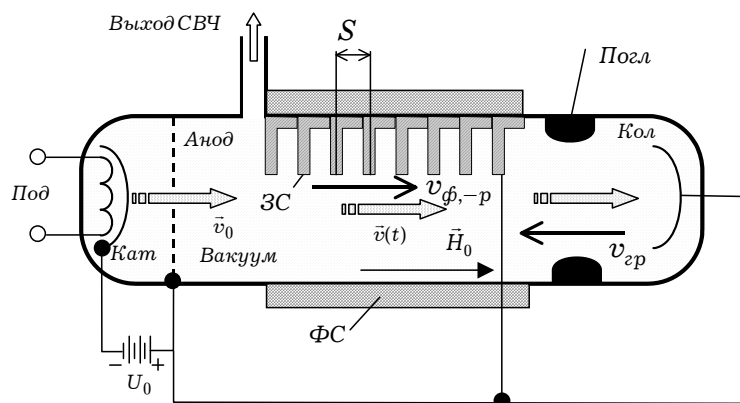


Рисунок 6.8. Лампа обратной волны генераторного типа.

жения (генераторная секция), вывести на середину экрана одну из зон генерации с интенсивностью, достаточной для исследования. Регулируя параметры нагрузки СВЧ-тракта (аттенуатором и КЗ-поршнем), добиться наименьшей асимметрии зоны.

Скопировать осциллограмму.

Измерить мощность генерируемых колебаний P , их частоту f и напряжение отражателя $|U_{omp}|$ в отсчетных точках. В пределах зоны генерации следует взять не менее 5-ти отсчетных точек. Обязательными являются точки: одна в максимуме зоны, по одной на границах зоны, по одной на склонах зоны. Отметить на осциллограмме положение отсчетных точек. Результаты измерений внести в таблицу 1.1.

На осциллограмме параллельно оси времени провести ось напряжения и нанести на ней значения напряжения отражателя, соответствующие отсчетным точкам. Под осциллограммой построить график зависимости частоты колебаний от напряжения отражателя $f(|U_{omp}|)$, соблюдая тот же масштаб по оси абсцисс, что и на осциллограмме.

Таблица 1.1

Условное обозначение зоны	Номер отсчетной точки	$P, \text{y.e.}$	$f, \text{ГГц}$	$ U_{omp} , \text{В}$
a	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
б	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
в	1			
	2			
	3			
	4			

1.6.3. Исследование нескольких зон генерации

Включить блок питания и осциллограф. Установить режим индикации одной зоны генерации, для чего:

— включить блок питания и осциллограф. Установить режим индикации нескольких зон генерации, для чего:

— переключатель (П1) амплитуды пилообразного напряжения в блоке питания перевести в положение 1 (нижнее);

— органы управления осциллографа установить в положения: переключатель «Вход» — в положение "∞"; «Длительность развертки» - 20 мкс; «Усиление У1» — 0,05 В/дел.; «Усиление УП» — 10 В/дел.

Установить линии мощности и напряжения в средней части экрана (потенциометры «Смещение по горизонтали», «Смещение У1», «Смещение УП»). Регулируя постоянное напряжение отражателя потенциометром «Напряжение отражателя» в усилителе пилообразного напряжения (генераторная секция), добиться воспроизведения, на экране 3-х зон генерации. Регулируя параметры нагрузки СВЧ-тракта (аттенюатором и КЗ-поршнем), добиться наименьшей асимметрии зон генерации.

Скопировать осциллограмму.

Таблица 1.2

Условное обозначение зоны	Номер отсчетной точки	$P, \text{y.e.}$	$f, \text{ГГц}$	$ U_{\text{отр}} , \text{В}$
а	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
б	1			
	2			
	3			
	4			
	5			

Измерить мощность генерируемых колебаний P , их частоту f и напряжение отражателя $|U_{\text{отр}}|$ в отсчетных точках. В пределах каждой зоны генерации следует взять не менее 3-х отсчетных точек. Обязательными

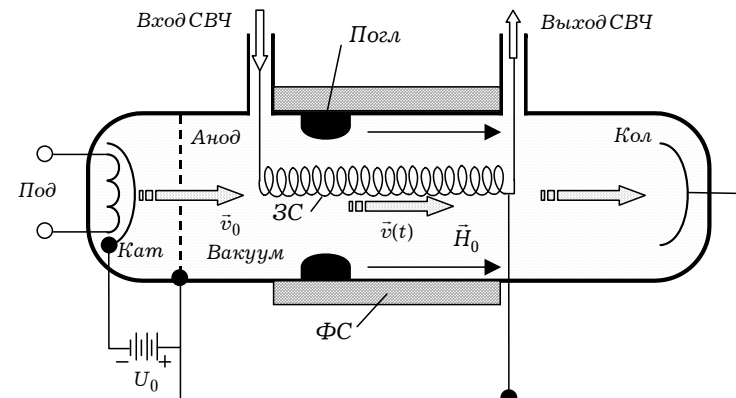


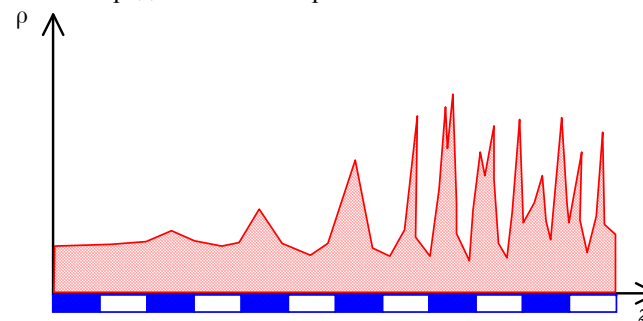
Рисунок 6.6. Лампа бегущей волны усилительного типа.

Фокусирующая система (ФС) представляет собой внешний соленоид, создающий постоянное магнитное поле \vec{H}_0 в продольном направлении лампы. Это поле фокусирует электроны при помощи силы Лоренца: $\vec{F} = e\mu_0 [\vec{v}_0, \vec{H}_0]$ (μ_0 — магнитная постоянная вакуума).

Для возникновения термоэлектронной эмиссии электронов с катода (Кат) используется подогреватель (Под). В пространстве между катодом и анодом под действием постоянного напряжения U_0 осуществляется разгон электронов до одинаковой скорости \vec{v}_0 , определяемую из закона сохранения энергии:

$$eU_0 = \frac{mv_0^2}{2}; \quad v_0 = \sqrt{\frac{2eU_0}{m}}, \quad (6.2.3)$$

где e и m — заряд и масса электрона.



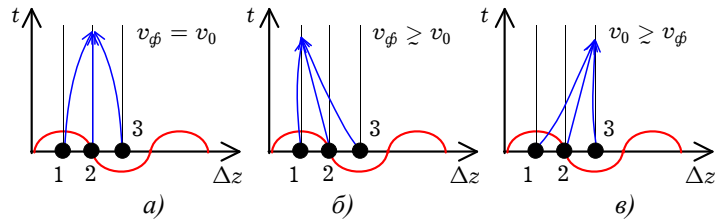


Рисунок 6.5. Условие фазового синхронизма.

В случае идеального выполнения условия фазового синхронизма ($v_\phi = v_0$) сгусток образуется при нулевом поле волны (рис. 6.5 а). При $v_\phi > v_0$ волна «обгоняет» электроны и сгусток образуется в ускоряющем полупериоде поля волны, поэтому электроны забирают энергию у волны и сгусток ускоряется (рис. 6.5 б). При $v_0 > v_\phi$ электроны немного обгоняют волну и сгруппируются в области тормозящего поля. В результате этого электроны отдадут свою энергию СВЧ-волне, что необходимо для усиления входного сигнала. На практике скорость электронов: $v_0 \approx 1.05 \cdot v_\phi$.

Устройство и принцип работы лампы бегущей волны типа О (ЛБВО)

Рассмотрим устройство и принцип работы лампы бегущей волны усилительного типа. Коэффициент усиления ЛБВО определяется отношением мощностей СВЧ сигнала на выходе и входе лампы. Устройство ЛБВО схематично показано на рисунке 6.6. Лампа имеет спиральную замедляющую систему (ЗС) с коаксиальными входом и выходом СВЧ.

являются точки: одна в максимуме зоны, по одной на границах зоны (в начале и в конце зоны). Отметить на осциллограмме положение отсчетных точек. Результаты измерений внести в таблицу 1.2.

На осциллограмме параллельно оси времени провести ось напряжения и нанести на ней значения напряжения отражателя, соответствующие отсчетным точкам. Под осциллограммой построить график зависимости частоты колебаний от напряжения отражателя $f(|U_{omp}|)$, соблюдая тот же масштаб по оси абсцисс, что и на осциллограмме.

1.7. Обработка и оформление результатов

1. По данным п. 6.3 (табл. 1.1) определить для каждой из зон генерации диапазон изменения напряжения отражателя, соответствующий изменению мощности в 2 раза ($P_{1,2}/P_{max} = 0.5$):

$$|\Delta U_{omp}| = |U_{omp}^{(1)} - U_{omp}^{(2)}|.$$

Результаты занести в таблицу 1.3.

2. По данным п. 6.4 (табл. 1.2) определить для каждой из зон генерации диапазон электрической перестройки частоты, соответствующий изменению мощности в 2 раза:

$$\Delta f = |f_1 - f_2|.$$

Результаты занести в табл. 1.3.

3. Для каждой из зон определить среднюю крутизну электронной перестройки частоты:

$$S = \frac{\Delta f}{|\Delta U_{omp}|}.$$

Результаты занести в табл. 1.3

Таблица 1.3

Обозн. зоны	U_{omp}, B	$P_{max}, y.e.$	$ \Delta U_{omp} , B$	$\Delta f, МГц$	$\frac{\Delta f}{f_0} \cdot 100, \%$	$S, МГц/В$
а						
б						
в						
г						

1.8. Содержание отчета

1. Номер, название и цель работы.
2. Функциональная схема лабораторной установки.
3. Результаты измерений: таблицы 1.1, 1.2 и графики зависимостей $P(U_{omr})$ и $f(U_{omr})$.
4. Таблица расчетных данных (таблица 1.3).
5. Выводы по результатам работы.

Процесс уменьшения фазовой скорости в спиральном волноводе заключается в следующем. Фронт волны всегда расположен перпендикулярно проводнику. Волна распространяется вдоль спирали (по ее виткам) со скоростью света и между двумя соседними спиралями ее фронт проходит расстояние $2\pi R$. С другой стороны расстояние между двумя витками по оси Oz равно L .

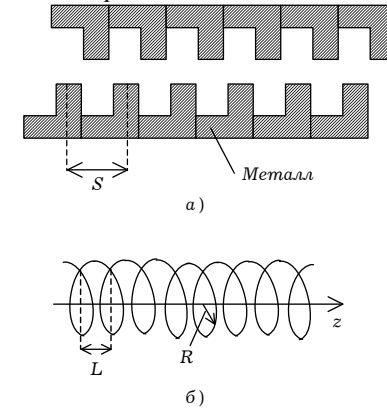


Рисунок 6.4. Виды замедляющих систем.

При взаимодействии с электронным потоком важна проекция фазовой скорости на ось Oz , которая соотносится со скоростью распространения волны вдоль спирали следующим образом:

$$\frac{v_{\phi z}}{c} = \frac{L}{2\pi R}. \quad (6.2.2)$$

На практике используются спиральные замедляющие системы, у которых $R \gg L$, следовательно, $v_{\phi z} < c$.

Параметр $v_{\phi z} / c = k_{зам}$ называется **коэффициентом замедления**.

Рассмотрим процесс группировки электронов в сгустки и передачу энергии от них к волне. Эти процессу удобно описывать пространственно-временной диаграммой. Выберем систему координат, движущуюся вместе с электромагнитной волной со скоростью v_{ϕ} . Через Δz обозначим смещение электрона относительно волны. На рисунке 6.5 показаны три возможные ситуации.

Исследование методов модуляции отражательного клистрона

2.1. Цель работы

Изучить и экспериментально исследовать модуляционные характеристики и режимы модуляции отражательного клистрона.

2.2. Литература для самостоятельной подготовки

1. Андрушко Л.М., Электронные и квантовые приборы СВЧ [Текст] : учебник для вузов/ Л.М. Андрушко, Н.Д. Федоров— М.: Радио и связь, 1981, - 320 с. –(Учебник для вузов)
2. Федоров Н.Д., Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника [Текст] : учебное пособие /под ред. Н.Д.Федорова - М.: Радио и связь, 2002, -560 с. – (Учебное пособие)
3. Куц Г.Г., Приборы и устройства оптического и СВЧ диапазонов [Текст]: учебное пособие/ Г.Г. Куц, Ж.М. Соколова, Л.И. Шангина - М.: Радио и связь, 2012, -414 с. – (Учебное пособие)

4. Клюев Д.С. Приборы СВЧ и оптического диапазона [Текст]: конспект лекций/Д.С. Клюев, О.В. Осипов, - Самара: Типография ПГУТИ, 2014, - 210 с. – (Конспект лекций)

2.3. Подготовка к работе

1. Используя рекомендуемую литературу (разд.2), изучить устройство, схему питания, принцип действия, модуляционные характеристики и режимы модуляции отражательного клистрона.
2. Изучить функциональную схему и описание лабораторной установки (разд.5).
3. Ответить на контрольные вопросы (разд.4).
4. Оформить заготовку отчета (содержание отчета приведено в разд.7).

2.4. Содержание контрольных вопросов

1. Устройство и схема питания отражательного клистрона.

$$\Theta_{ont} = 2\pi \left(n + \frac{1}{2} \right). \quad (6.1.10)$$

Ситуация 3 соответствует возвращению электронного сгустка в межсеточный зазор в конце тормозящего полупериода, что соответствует окончанию генерации в зоне n при угле пролета:

$$\Theta_{ont} = 2\pi (n + 1). \quad (6.1.11)$$

Кроме того отметим, что генерация в любой зоне прекращается при значении параметра группировки $X = 3.81$, при котором $P_{вых} = 0$.

6.2. Лампа бегущей волны типа О

В ЛБВО происходят те же самые физические процессы, что и в клистронах — группировка электронов по скорости, по плотности и отбор энергии от сгруппированного электронного потока. Однако все эти процессы в ЛБВО происходят одновременно по всей длине лампы. В этом и состоит принцип длительного взаимодействия между электронным потоком и СВЧ полем.

Кроме того, в клистронах электроны взаимодействуют происходит с колебаниями СВЧ поля между сетками резонатора, а в ЛБВО — с бегущей электромагнитной волной по всей длине устройства. Благодаря этому основным преимуществом ЛБВО перед клистронными усилителями является их широкополосность. В самом деле, во всех усилительных приборах с резонансной колебательной системой (например, пролетных клистронах) полоса частот ограничивается нагруженной добротностью рабочего типа колебания резонатора. Напротив, в ЛБВО резонансная колебательная система заменена на волновод и указанное ограничение снимается.

Для длительного взаимодействия электронов с электромагнитной волной необходимо соблюдать **условие фазового синхронизма**, которое заключается в приближенном равенстве скорости электронов v_0 и фазовой скорости волны v_ϕ :

$$v_0 \approx v_\phi. \quad (6.2.1)$$

Поскольку скорость электронов всегда меньше скорости света в вакууме, то условие (6.2.1) не выполняется без использования *замедляющих систем* (ЗС). В большинстве ЛБВ используются замедляющие системы, в которых $v_\phi < c$.

Примерами таких структур являются волновод с встречными диафрагмами (рис. 6.4 а) и спиральный волновод (рис. 6.4 б).

2. Основные физические процессы, происходящие в отражательном клистроне.
3. Модуляция электронного потока по скорости.
4. Модуляция электронного потока по плотности.
5. Объяснить механизм образования зон генерации отражательного клистрона.
6. Построить график и дать объяснение амплитудной модуляционной характеристики $P(|U^{om}|)$ отражательного клистрона.
7. Построить график и дать объяснение частотной модуляционной характеристики $f(|U^{om}|)$ отражательного клистрона.
8. Объяснить зависимость глубины амплитудной модуляции от положения рабочей точки на зоне генерации и от амплитуды переменного (модулирующего) напряжения отражателя.
9. Объяснить зависимость девиации частоты от положения рабочей точки на зоне генерации и от амплитуды переменного (модулирующего) напряжения отражателя.
10. Выбор оптимального положения рабочей точки и амплитуды модулирующего напряжения в режиме амплитудно-импульсной модуляции клистрона.

2.5. Функциональная схема и описание лабораторной установки

Функциональная схема лабораторной установки представлена на рис.2.1. СВЧ-тракт установки собран на волноводных элементах трехсантиметрового диапазона радиоволн сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$. В работе исследуется встроенный в генератор СВЧ 1 типа 51И-1 отражательный клистрон 2 типа К-19 с внутренним резонатором, который с помощью зонда связан с выходным прямоугольным волноводом. Кроме того, в генератор СВЧ 1 встроены: переменный аттенюатор 3 для регулирования выходной мощности, направленный ответвитель 4, резонансный частотомер 5 с включенным через детектор 6 стрелочным индикатором И1.

Питание клистрона 2 осуществляется от блока питания 7 типа 51ИМ-2, который соединен с генератором СВЧ 1 многожильным кабелем. В блок питания 7 входят выпрямитель 8 для формирования на

Как видно из графика, функция $y = XJ_1(X)$ имеет максимум при $X = X_{om} = 2.41$: $y(X_{om}) = 2.41 \cdot J_1(2.41) = 1.22$.

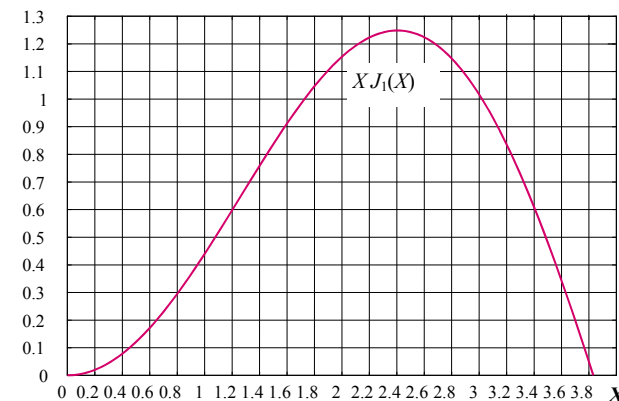


Рисунок 6.2. График функции $XJ_1(X)$.

Определим значения углов пролета Θ , соответствующих началу и концу зоны генерации с номером n . Для этого обратимся к рисунку 1.3.

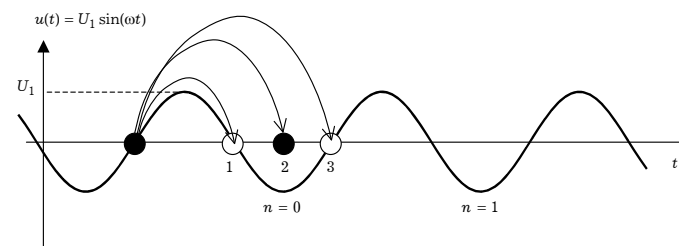


Рисунок 6.3. Механизм образования электронных густков.

Ситуация 2 соответствует возвращению электронного густка в межсеточный зазор в максимуме тормозящего полупериода при угле пролета:

$$\Theta_{om} = 2\pi \left(n + \frac{3}{4} \right). \quad (6.1.9)$$

Ситуация 1 соответствует возвращению электронного густка в межсеточный зазор в начале тормозящего полупериода, что соответствует началу генерации в зоне n при угле пролета:

Оптимальное время пролета электронами пространства между резонатором и отражателем и обратно, при котором они возвращаются в тормозящие полупериоды определяется следующим образом:

$$\tau_{opt} = T \left(n + \frac{3}{4} \right), \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (6.1.4)$$

где T — период СВЧ напряжения.

Оптимальный угол пролета пространства между резонатором и отражателем и обратно определяется с учетом (2.4):

$$\Theta_{opt} = 2\pi \left(n + \frac{3}{4} \right). \quad (6.1.5)$$

Возвращение электронов в межсеточный зазор резонатора в различные тормозящие полупериоды, определяемые целым числом n соответствует различным зонам генерации. Отметим, что зоны генерации при различных n возникают при разных значениях напряжения на отражателе U_{opt} . Если электронный сгусток возвращается в резонатор в ускоряющие полупериоды СВЧ напряжения, мощность не генерируется.

Выходная мощность отражательного клистрона определяется следующим образом:

$$P_{opt} = \frac{2P_0}{\Theta} XJ_1(X), \quad (1.6)$$

где Θ — угол пролета пространства между резонатором и отражателем и в обратном направлении, который выражается следующей формулой:

$$\Theta = \frac{\omega D}{|U_0 - U_{opt}|} \sqrt{\frac{8mU_0}{e}}; \quad (6.1.7)$$

D — расстояние между резонатором и отражателем; $P_0 = I_0 U_0$ — мощность, потребляемая клистроном от источника постоянного напряжения U_0 ; I_0 — конвекционный ток, создаваемый электронным потоком при выходе с анода; X — параметр группировки, определяемый как

$$X = \frac{M(\theta)U_1}{2U_0} (\Theta - \theta); \quad (6.1.8)$$

U_1 — амплитуда переменного СВЧ напряжения между сетками резонатора; $J_1(X)$ — функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка.

Максимальная выходная мощность, как видно из (6.1.6), соответствует максимуму функции $y = XJ_1(X)$, график которой показан на рисунке 6.2.

электродах клистрона необходимых постоянных напряжений и генератор 9 для формирования модулирующего напряжения в режиме импульсной модуляции. На передней панели блока питания 7 расположены:

тумблер “Сеть”, тумблер включения клистрона “Клистрон”, переключатель рода работы клистрона “Непрерывно – манипуляция”, потенциометр “Напряжение отражателя” для регулирования постоянного напряжения отражателя, стрелочный индикатор постоянного напряжения отражателя И2.

К выходу генератора СВЧ 1 подключен проходной резонансный частотомер 10 типа Ч2-32. Настройка частотомера на частоту сигнала осуществляется перемещением поршня резонатора 11, регистрация настройки — по максимуму показаний стрелочного индикатора И3, отсчет частоты — по шкале, сопряженной с поршнем резонатора. Чувствительность индикатора И3 может регулироваться потенциометром “Чувствительность”. Для регулирования СВЧ-мощности в частотомер встроен аттенуатор 12. К выходу частотомера 10 подключена детекторная секция 13, низкочастотный выход которой соединен кабелем со входом “Y” осциллографа 14 типа С1-55.

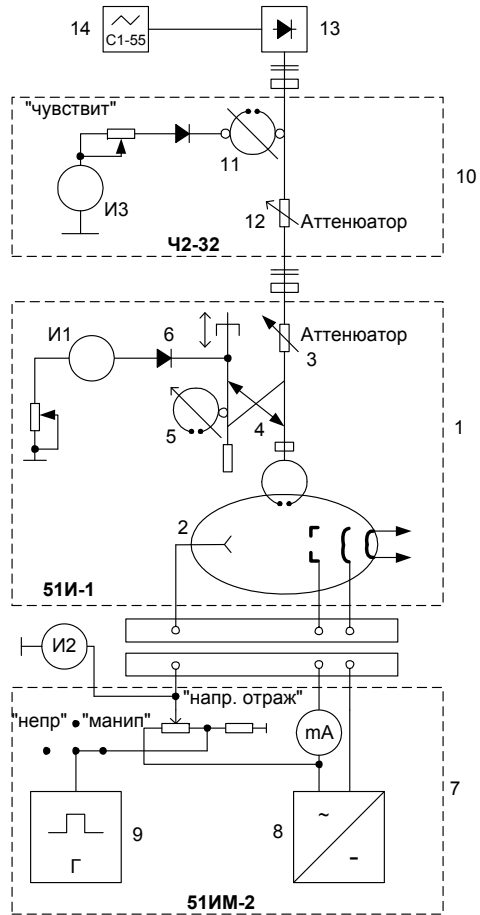


Рис.2.1. Функциональная схема лабораторной установки.

Выходная мощность клистрона (в условных единицах) может быть отсчитана либо по показаниям U стрелочного индикатора И1, подключенного к выходу детектора 6 в генераторе СВЧ 1, либо по смещению Y от нулевого уровня луча осциллографа 14, подключенного к низкочастотному выходу детекторной секции 13. При квадратичных характеристиках детекторов величины U, Y пропорциональны квадра-

ляется разгон электронов до одинаковой скорости \vec{v}_0 , определяемую из закона сохранения энергии:

$$eU_0 = \frac{mv_0^2}{2}; \quad v_0 = \sqrt{\frac{2eU_0}{m}}, \quad (6.1.1)$$

где e и m — заряд и масса электрона.

Когда электроны движутся в пространстве между анодом и резонатором (Рез), создаваемый ими конвекционный ток является постоянным I_0 , так как электроны движутся с одинаковой скоростью и электронный поток не промодулирован по плотности.

В резонаторе (Рез2) под действием переменного СВЧ напряжения в зазоре $u(t) = U_1 \cos(\omega t)$ (ω — частота СВЧ колебаний) осуществляется модуляция электронного потока по скорости. Изменение скорости электронов происходит с частотой ω по закону:

$$v(t) = v_0 + v_1 \sin(\omega t_1), \quad v_1 = \frac{M(\theta)U_1}{2U_0} v_0, \quad (6.1.2)$$

где t_1 — момент времени, когда электрон проходит середину резонатора (Рез);

$$M(\theta) = \frac{\sin(\theta/2)}{\theta/2} \quad (6.1.3)$$

— коэффициент взаимодействия между электронным потоком и СВЧ полем в резонаторе; $\theta = \omega d / v_0$ — угол пролета электроном межсеточного зазора резонатора шириной d .

На рисунке 6.2 приведена зависимость $M(\theta)$, рассчитанная по формуле (6.1.3).

Вследствие скоростной модуляции все электроны, проходя межсеточный зазор резонатора, будут иметь различные скорости. После пролета межсеточного зазора электроны попадают в тормозящее поле, создаваемое напряжением на отражателе U_{omp} . Это постоянное поле заставляет электроны возвращаться обратно в межсеточный зазор, причем электроны, имеющие большую скорость будут проникать к отражателю на большее расстояние. В результате этого существует возможность, когда в межсеточный зазор будут возвращаться сгруппированные электронные сгустки. При определенном выборе напряжения на отражателе U_{omp} сгустки могут возвращаться в зазор в тормозящие полупериоды СВЧ напряжения $u(t)$ и отдавать свою энергию полю резонатора.

6. Краткие теоретические сведения

6.1. Отражательные клистроны

Отражательные клистроны относятся к приборам СВЧ с кратковременным взаимодействием между электронным потоком и СВЧ полем. Это взаимодействие происходит в узком зазоре резонатора СВЧ, ограниченным двумя пронцаемыми сетками. В отличие от пролетного в отражательном клистроне имеется только один резонатор, который выполняет две функции: модуляция электронного потока по скорости и отбор энергии от модулированного электронного потока. Упрощенная схема отражательного клистрона приведена на рисунке 6.1.

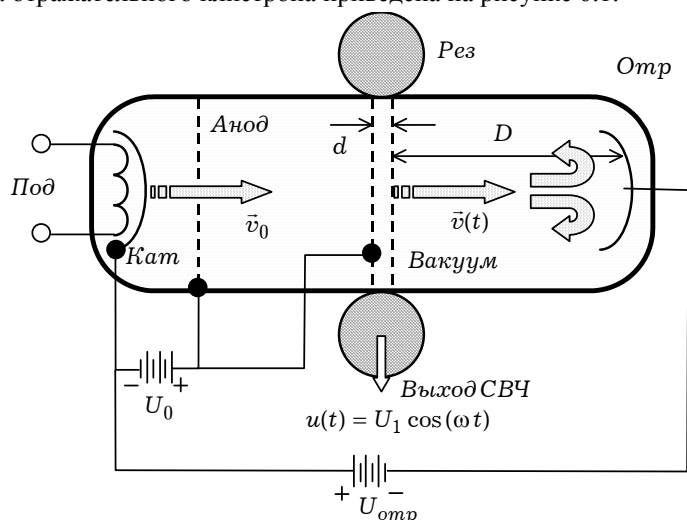


Рисунок 6.1. Схема отражательного клистрона.

В отличие от пролетного клистрона в устройстве отражательного клистрона присутствует электрод, называемый отражателем (Отр), на который подается отрицательный потенциал по сравнению с катодом. Кроме того, на рисунке 4 представлена схема клистрона генераторного типа, поэтому отсутствует СВЧ вход.

Рассмотрим основные физические процессы, лежащие в основе работы отражательных клистронов.

Для возникновения термоэлектронной эмиссии электронов с катода (Кат) используется подогреватель (Под). В пространстве между катодом и анодом под действием постоянного напряжения U_0 осуществ-

ту амплитуды электрического поля E_m и, следовательно, мощности P в СВЧ-тракте:

$$U \sim E_m^2 \sim P, \quad Y \sim E_m^2 \sim P. \quad (2.1)$$

2.6. Лабораторное задание и порядок выполнения работы

Подготовительные операции

2.6.1. Включение и настройка осциллографа

Тумблером “Питание” включить осциллограф 14. Переключатель чувствительности осциллографа установить в положение “0,2 В/дел”, переключатель длительности развертки — в положение “0,2 мс/дел”. Совместить ручкой “Смещение по вертикали” линию развертки с нижней линией масштабной сетки экрана; при этом во всех дальнейших измерениях нижняя линия масштабной сетки будет линией нулевого уровня. Переключатель входа осциллографа перевести в положение “ \sim ”.

2.6.2. Включение блока питания и генератора СВЧ

Тумблер “Сеть” на блоке питания 7 установить в положение “Вкл”, тумблер включения клистрона — в положение “Клистрон”, переключатель рода работы клистрона — в положение “Непрерывно”. Изменяя напряжение отражателя клистрона (ручка “Напряжение отражателя” на блоке питания 7), добиться генерации клистрона. Генерация клистрона индицируется либо по отклонению стрелки индикатора И1, подключенного к выходу детектора 6 в генераторе СВЧ 1, либо по отклонению от нулевого уровня луча осциллографа 14, подключенного к низкочастотному выводу детекторной секции 13.

2.6.3. Настройка частотомера

Вращая ручку настройки частотомера 10, добиться отклонения стрелки индикатора И3. Отсчет частоты генерации производится по шкале частотомера, сопряженной с поршнем резонатора, при настройке на максимум показаний индикатора И3.

2.6.4. Исследование амплитудной и частотной модуляционных характеристик отражательного клистрона

Снять амплитудную $P(|U^{om}|)$ и частотную $f(|U^{om}|)$ модуляционные характеристики отражательного клистрона, т.е. зависимости от напряжения отражателя U^{omp} выходной мощности P и частоты генерации f соответственно. Величина U^{omp} изменяется ручкой “Напряжение отражателя” на блоке питания 7 и определяется по показаниям внешнего индикатора И2. Выходная мощность клистрона P (в условных единицах) отсчитывается либо по показаниям U индикатора И1, подключенного к выходу детектора 6 в генераторе СВЧ 1, либо по смещению Y от нулевого уровня линии развертки осциллографа 14, подключенного к низкочастотному выходу детекторной секции 13 (см. соотношение 2.1). Отсчет частоты генерации производится по шкале частотомера 10, сопряженной с поршнем резонатора 11, при настройке на максимум показаний стрелочного индикатора И3.

Отсчеты P и f производить при одних и тех же значениях U^{omp} . Напряжение отражателя изменять в пределах, обеспечивающих индикацию одной зоны генерации. Необходимо выбирать такие значения напряжения U^{omp} , чтобы в пределы одной зоны генерации попало не менее пяти рабочих точек (центр зоны генерации и по две точки на спадах зоны).

Результаты занести в таблицу 2.1. По экспериментальным данным построить графики модуляционных характеристик $P(|U^{om}|)$, $f(|U^{om}|)$, располагая их один под другим и сохраняя одинаковым масштаб по осям абсцисс.

Таблица 2.1

$ U^{om} , В$							
$P, усл.ед.$							
$f, ГГц$							

2.6.5. Исследование работы отражательного клистрона в режиме импульсной модуляции

Переключатель рода работы клистрона на блоке питания 7 перевести в положение “Манипуляция”, ручкой “Напряжение отражателя” установить рабочую точку на склоне одной из зон генерации. С помо-

(W_-): $W = W_+ + W_-$. Энергию потерь прямой и обратной плоских волн при однократном отражении можно представить в виде $W_{\pm}^o = (1 - R)W_{\pm}$, где R — энергетический коэффициент отражения зеркал. Эта энергия теряется за время $\Delta t = L/c$ одного прохода каждой из плоских волн по длине резонатора L , поэтому мощности потерь этих волн выражаются соотношением $P_{\pm}^o = W_{\pm}^o/\Delta t = (1 - R)W_{\pm}L/c$, а полная мощность потерь резонатора составит $P^n = P_+^n + P_-^n = (1 - R)WL/c$. Используя последнее соотношение и общее энергетическое определение добротности, получаем:

$$Q = \frac{2\pi fW}{P^o} = \frac{2\pi L}{\lambda(1 - R)} \dots$$

Полоса резонанса резонатора определяется соотношением:

$$2\Delta f_p = f/Q = c/(Q\lambda)$$

При вычислениях использовать: $\lambda = \lambda_{cp}$ (п. 5.6.4, табл. 5.3), $R = 0,98$, $L = 0,3 м$.

5.7. Содержание отчета

1. Номер, название и цель работы.
2. Функциональная схема лабораторной установки.
3. Результаты измерений и расчетов:
 - п.5.6.2 — табл. 5.1, график $P(I_p)$;
 - п.5.6.3 — табл. 5.2, график $P^*(\theta)$;
 - п.5.6.4 — табл. 5.3;
 - п.5.6.5 — значения ψ и ψ_{cp} ;
 - п.5.6.6 — значения Q и $2\Delta f_p$.
4. Выводы по результатам работы.

Результаты занести в таблицу 5.3

Таблица 5.3

$l = \dots \text{см}$		
	$k = 1$	$k = 2$
$b_k, \text{см}$		
$\lambda_k, \text{МКМ}$		
$\lambda_{cp} = \dots \text{мм}, f_{cp} = \dots \text{Гц}$		

5.6.5. Измерение угла расходимости лазерного луча

Между излучателем 2 и фотодетектором 3 установить перпендикулярно направлению лазерного луча экран Э (схема рис. 5.1г). Фиксируя экран Э в двух положениях, отстоящих друг от друга на расстоянии $\Delta l = l_2 - l_1 = 500 \text{ мм}$, измерить в каждом из них диаметр пятна, воспроизводимого на экране D_1, D_2 . По результатам измерений определить угол расходимости луча ψ с помощью соотношений:

$$\psi[\text{рад}] = \text{tg } \psi = \frac{\Delta D}{\Delta l} = \frac{D_2 - D_1}{l_2 - l_1};$$

$$\psi[\text{мин}] = \frac{180}{\pi} \cdot 60 \cdot \psi[\text{рад}] = 3,4 \cdot 10^3 \cdot \psi[\text{рад}].$$

Сравнить полученный результат с предельным значением расходимости:

$$\psi_{np}[\text{рад}] = \sqrt{\lambda/L},$$

где L — длина лазера ($L = 0,3 \text{ м}$).

5.6.6. Определение добротности и полосы резонанса оптического резонатора

Используя полученное в п. 5.6.4 значение длины волны излучения λ , определить добротность Q и полосу резонанса $2\Delta f_p$ оптического резонатора. При учете только одного механизма потерь энергии, связанного с выходом энергии через зеркала, добротность определяется на основе следующих соображений. Энергия рабочего типа колебаний резонатора W рассматривается как сумма энергий двух бегущих плоских волн противоположного направления — прямой (W_+) и обратной

пью плавных регулировок длительности развертки и частоты синхронизации осциллографа 14 добиться неподвижного изображения на экране огибающей СВЧ-импульсов. Типичная осциллограмма огибающей СВЧ-импульсов приведена на рис.2.2.

Снять зависимость амплитуды СВЧ-импульсов ΔE (в условных единицах) и глубины модуляции СВЧ-поля m от постоянного напряжения отражателя $|U^{om}|$, изменяя последнее в пределах одной зоны генерации. При квадратичной характеристике детектора в соответствии с соотношением (2.1) величины E и m определяются выражениями:

$$\Delta E[\text{усл.ед.}] = E_{\max} - E_{\min} = \sqrt{Y_{\max}} - \sqrt{Y_{\min}};$$

$$m = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} = \frac{\sqrt{Y_{\max}} - \sqrt{Y_{\min}}}{\sqrt{Y_{\max}} + \sqrt{Y_{\min}}},$$

где Y_{\max}, Y_{\min} — отклонения луча осциллографа от нулевого уровня в средней части вершины импульса и впадины между импульсами соответственно (см. рис. 2.2).

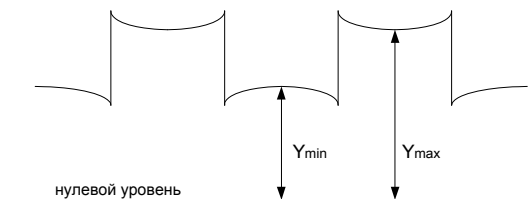


Рис.2.2. Типичная осциллограмма огибающей СВЧ-импульсов на выходе клистрона.

Зарисовать осциллограммы огибающей СВЧ-импульсов для трех рабочих точек (на левом, правом склонах и в центре зоны генерации), зарегистрировать соответствующие этим рабочим точкам значения постоянного напряжения отражателя $|U^{om}|$.

Результаты измерений занести в таблицу 2.2. На одном графике построить зависимости $\Delta E(|U^{om}|)$ и $m(|U^{om}|)$. Определить оптимальное значение постоянного напряжения отражателя $|U_{opt}^{om}|$ в режиме амплитудно-импульсной модуляции.

Таблица 2.2

$ U^{om} $, В					
Y_{max} , усл. ед.					
Y_{min} , усл. ед.					
ΔE , усл. ед.					
m , отн. ед.					
$ U_{onm}^{om} =$					

2.7. Содержание отчета

1. Номер, название и цель работы.
2. Функциональная схема лабораторной установки.
3. Результаты экспериментов в виде:
 - заполненных таблиц 2.1, 2.2;
 - графиков зависимостей $P(|U^{om}|)$, $f(|U^{om}|)$ (п.1.6.3) и $\Delta E(|U^{om}|)$, $m(|U^{om}|)$ (п.1.6.4);
 - осциллограмм огибающей СВЧ-импульсов для трех рабочих точек (п.1.6.4).
4. Выводы по результатам работы.

Изменяя угловое положение поляроида θ в пределах $0 \dots 360^\circ$ через 15° и измеряя при каждом значении θ , фототок I_ϕ , снять нормированную поляризационную характеристику излучения, т.е. зависимость от угла θ нормированной мощности излучения:

$$P^*(\theta) = P(\theta)/P_{max} = I_\phi(\theta)/I_{\phi max}.$$

Результаты занести в таблицу 5.2, построить график зависимости $P^*(\theta)$. Определить характер поляризации излучения.

Таблица 5.2

θ , град										
I_ϕ , мкА										
$P^* = P/P_{max} = I_\phi/I_{\phi max}$										

5.6.4. Наблюдение дифракционной картины и измерение длины волны излучения

Между излучателем 2 и фотодетектором 3 установить перпендикулярно направлению лазерного луча дифракционную решетку ДР и экран Э (схема рис. 5.1в). Изменяя расстояние между ДР и экраном, добиться четкого изображения на экране дифракционной картины, содержащей не менее 5 пятен (дифракционных максимумов): центрального (нулевого порядка, $k = 0$) и двух боковых с каждой стороны (1-го и 2-го порядков, $k = 1, 2$). Измерить расстояние между ДР и экраном l и расстояние b_k между максимумами нулевого и k -го порядков. Используя соотношение (5.1), по полученным данным определить длину волны излучения

$$\lambda_k = d \cdot \sin \varphi_k / k = d \cdot b_k / (k \cdot l),$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$ — порядок дифракционного максимума; d — период решетки ($d = 10$ мкм); φ_k — угол дифракции; b_k — расстояние между максимумами нулевого и k -го порядков; l — расстояние между ДР и экраном.

Произвести измерение λ_k для двух значений $k = 1, 2$, определить средние значения длины волны λ_{cp} и частоты f_{cp} излучения:

$$\lambda_{cp} = (\lambda_1 + \lambda_2)/2; \quad f_{cp} = c/\lambda_{cp},$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме.

луча. По амперметру 8 фотодетектора отсчитать значение тока фоторезистора I_{ϕ} , по величине которого определить мощность излучения P .

Для определения мощности излучения используется зависимость тока фоторезистора (фототока) I_{ϕ} от светового потока, проходящего через рабочую площадь фоторезистора, и выражение светового потока через интенсивность падающего излучения. На основании этого мощность излучения P выражается через величину фототока I_{ϕ} соотношением:

$$P = \frac{M}{K_{\lambda} K} \cdot \frac{S_a}{S_{\phi}} \cdot \frac{I_{\phi}}{U},$$

где $M = 1,466 \cdot 10^{-3} \text{ вт} / \text{лм}$ — механический эквивалент света; K_{λ} — относительная световая эффективность для данной длины волны излучения; K — удельная интегральная чувствительность фоторезистора (См/лм); S_{ϕ} — рабочая площадь фоторезистора; S_a — площадь сечения луча; U — напряжение, приложенное к фоторезистору. Учитывая, что для рабочей длины волны исследуемого лазера ($\lambda \approx 0,63 \text{ мкм}$) $K_{\lambda} = 0,24$ для используемого фоторезистора типа (ФСК-1) $K = 6 \cdot 10^{-3} \text{ См} / \text{лм}$, а также приближенно считая площадь сечения луча равной площади фоторезистора $S_a \approx S_{\phi}$, получим рабочее соотношение для определения мощности излучения P по величине фототока I_{ϕ} :

$$P = 1,02 \cdot I_{\phi} / U. \quad (5.2)$$

Измерив фототок I_{ϕ} , рассчитать значение мощности излучения P . Результаты занести в таблицу 5.1.

Таблица 5.1.

I_{ϕ} , мкА	
P , мкВт	

5.6.3. Исследование поляризационной характеристики лазерного излучения

Между излучателем 2 и фотодетектором 3 установить перпендикулярно направлению лазерного луча поляризатор П (схема рис. 5.1б).

Л Лабораторная работа №3.

Исследование лампы бегущей волны типа О.

3.1. Цель работы

Изучить устройство и принцип действия лампы бегущей волны (ЛБВ) типа О, экспериментально исследовать ее характеристики.

3.2. Литература для самостоятельной подготовки

1. Андрушко Л.М., Электронные и квантовые приборы СВЧ [Текст] : учебник для вузов/ Л.М. Андрушко, Н.Д. Федоров— М.: Радио и связь, 1981, - 320 с. —(Учебник для вузов)
2. Федоров Н.Д., Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника [Текст] : учебное пособие /под ред. Н.Д.Федорова - М.: Радио и связь, 2002, -560 с. — (Учебное пособие)
3. Куш Г.Г., Приборы и устройства оптического и СВЧ диапазонов [Текст]: учебное пособие/ Г.Г. Куш, Ж.М. Соколова, Л.И. Шангина - М.: Радио и связь, 2012, -414 с. — (Учебное пособие)

4. Ключев Д.С. Приборы СВЧ и оптического диапазона [Текст]: конспект лекций/Д.С. Ключев, О.В. Осипов, - Самара: Типография ПГУТИ, 2014, - 210 с. — (Конспект лекций)

3.3. Подготовка к работе

1. Используя рекомендуемую литературу (разд.2), изучить устройство, принцип действия, основные характеристики ЛБВ типа О.
2. Изучить функциональную схему и описание лабораторной установки (разд.5).
3. Ответить на контрольные вопросы (разд.4).
4. Оформить заготовку отчета (содержание отчета приведено в разд.7).

3.4. Содержание контрольных вопросов

1. Принцип длительного взаимодействия электронного потока с полем замедленной бегущей электромагнитной волны.
2. Назначение, устройство и схема питания ЛБВ типа О.
3. Основные физические процессы, происходящие в ЛБВ.

4. Назначение основных элементов ЛБВ.
5. Условие синхронизма движения электронного потока и электромагнитной волны в ЛБВ типа О.
6. Назначение и основные свойства замедляющих систем, предъявляемые к ним требования.
7. Понятие о пространственных гармониках замедляющих систем, волновые параметры пространственных гармоник.
8. Дисперсионная характеристика периодической замедляющей системы, ее особенности.
9. Как определить фазовую и групповую скорости пространственной гармоники по дисперсионной характеристике замедляющей системы?
10. Характер энергообмена в ЛБВ типа О.
11. Коэффициент усиления ЛБВ, факторы, определяющие его величину.
12. Амплитудная характеристика ЛБВ, ее особенности и характерные участки.
13. Характеристика взаимодействия ЛБВ, ее особенности.
14. Частотная характеристика ЛБВ, ее особенности.
15. Как определить полосу усиления ЛБВ по частотной зависимости выходной мощности?
16. Типичные значения параметров усилительных ЛБВ типа О.

3.5. Функциональная схема и описание лабораторной установки

Функциональная схема лабораторной установки представлена на рис. 3.1. В работе исследуется усилительная ЛБВ-О восьмисантиметрового диапазона радиоволн типа УВ-7 с волноводными входом и выходом сечением $61 \times 10 \text{ мм}^2$ (поз.1 на рис. 3.1). Для питания исследуемой ЛБВ используется автономный высоковольтный источник питания 2, обеспечивающий необходимые напряжения на электродах ЛБВ. Напряжение анода (спирали) ЛБВ регулируется в пределах 1,3 -1,7 кВ ручкой “Спираль” на передней панели источника питания.

щью потенциометра 6 и вольтметра 7 установить напряжение питания фотодетектора равным $U = 14 \text{ В}$. В дальнейшем поддерживать это напряжение неизменным.

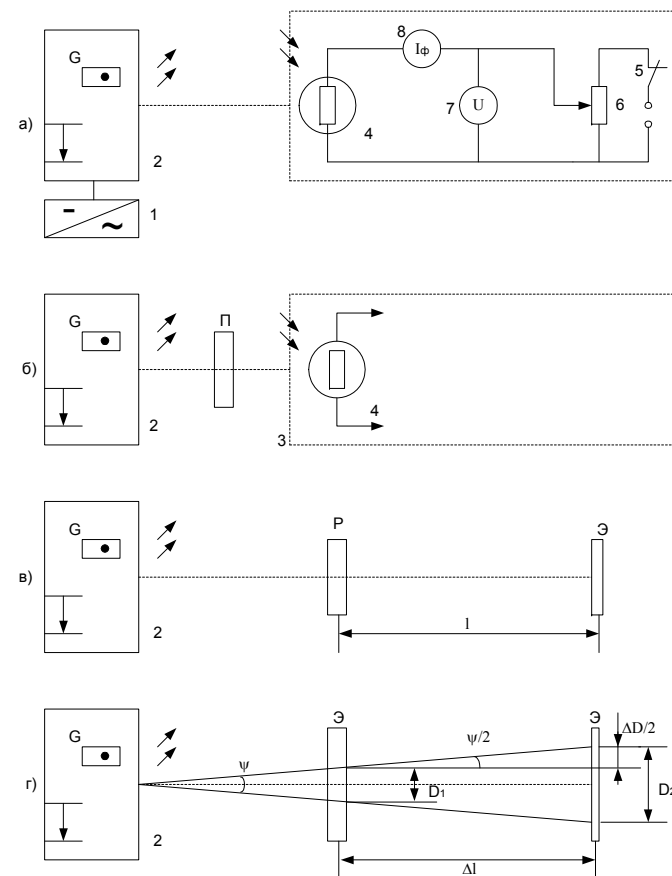


Рис. 5.1. Функциональная схема лабораторной установки для исследования ОКГ.

5.6.2. Измерение мощности излучения и исследование ее зависимости от тока разряда

Установить элементы лабораторной установки согласно схеме рис. 5.1.а, т.е. повернуть поляризатор П, дифракционную решетку ДР и экран Э так, чтобы их плоскости не пересекали направление лазерного

Поляризатор П служит для анализа поляризации оптического излучения. Он выполнен на основе поляроида — тонкой кристаллической пластины, которая пропускает излучение с линейной поляризацией электрического поля в направлении кристаллографической оси поляроида и поглощает излучение, поляризованное в перпендикулярном направлении. Если электрическое поле падающего излучения линейно поляризовано под углом θ к оси поляроида, то через поляроид пройдет только часть светового пучка, энергия которого пропорциональна $\cos^2 \theta$ (закон Малюса). В поляризаторе предусмотрены вращение поляроида и отсчет углового положения его кристаллографической оси по шкале транспортира. Вращение поляроида и регистрация интенсивности прошедшего светового пучка позволяют определить поляризацию падающего света.

Дифракционная решетка ДР представляет собой прозрачную пластину, на которую нанесены штрихи с постоянным расстоянием друг от друга d , называемым периодом решетки. Для используемой в работе решетки $d = 10$ мкм. Если на ДР падает плоская световая волна, то свет, прошедший между штрихами, испытывает дифракцию. Максимумы дифракционной картины наблюдаются в тех направлениях, для которых разность хода соседних лучей $d \cdot \sin \varphi_k$ кратна целому числу длин волн:

$$d \cdot \sin \varphi_k = k \cdot \lambda, \quad (5.1)$$

где φ_k — угол дифракции; d — период решетки; λ — длина волны излучения; $k = 0, 1, 2, \dots$ — порядок дифракционного максимума.

5.6. Лабораторное задание и порядок выполнения работы

Внимание! В процессе выполнения работы следует:

1. Соблюдать правила работы с высоким напряжением.
2. Избегать прямого попадания лазерного излучения в глаза.
3. Не вращать винты юстировки зеркал излучателя.

5.6.1. Подготовительные операции

Тумблером “Сеть” на панели источника питания 1 включить питание лазера, после чего должна загореться индикаторная лампочка включения. Тумблером 5 включить питание фотодетектора 3. С помо-

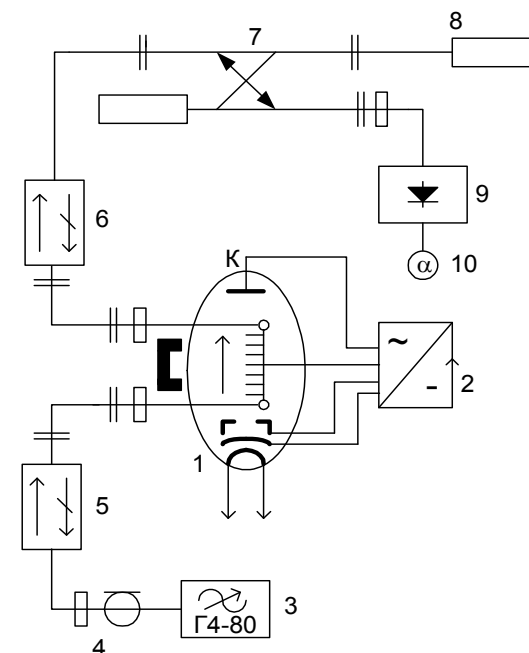


Рис. 3.1. Функциональная схема лабораторной установки для исследования ЛБВ типа О.

В качестве источника усиливаемого входного СВЧ-сигнала используется генератор СВЧ 3 типа Г4-80, имеющий встроенный переменный аттенуатор для регулирования выходной мощности со шкалой вносимого ослабления в дБ, а также орган частотной перестройки с непосредственным отсчетом частоты в МГц.

С выхода генератора 3 усиливаемый СВЧ-сигнал через коаксиально-волноводный переход 4 и ферритовый вентиль 5 поступает на вход ЛБВ 1. Усиленный СВЧ-сигнал с выхода ЛБВ 1 через ферритовый вентиль 6 и направленный ответвитель 7 поступает в поглощающую нагрузку 8. Для относительных измерений мощности выходного СВЧ-сигнала используется подключенный к боковому плечу направленного ответвителя 7 через детекторную секцию 9 стрелочный индикатор 10. При квадратичной характеристике детектора показания индикатора α пропорциональны квадрату амплитуды электрического поля $E_{\text{выс}}$ и, следовательно, мощности $P_{\text{выс}}$ выходного СВЧ-сигнала:

$$\alpha \sim E_{\text{вых}}^2 \sim P_{\text{вых}}. \quad (3.1)$$

3.6. Лабораторное задание и порядок выполнения работы.

Подготовительные операции

3.6.1. Включение и эксплуатация генератора входного СВЧ-сигнала

Предупреждение. В процессе выполнения работы ручки “0” и “Калибровка” не трогать; пользоваться только ручками аттенюатора и перестройки частоты. Ручки вращать плавно, без рывков и больших усилий.

Перед включением прибора переключатель пределов индикатора мощности (в правом верхнем углу) установить в положение “– 40 дБ”.

Тумблер включения сети перевести в верхнее положение; при этом должна загореться сигнальная лампочка. Прогреть прибор в течение 10-15 минут. Переключатель рода работы установить в положение “НГ” (непрерывная генерация) нажатием соответствующей кнопки.

Частота СВЧ-сигнала устанавливается ручкой перестройки частоты. Отсчет частоты производится по счетчиковой шкале, последняя цифра которой соответствует единицам МГц.

Мощность СВЧ-сигнала на выходе генератора регулируется ручкой аттенюатора. Отсчет ослаблений производится по счетчиковой шкале аттенюатора, красные цифры которой соответствуют десятым долям дБ. В процессе выполнения работы определяется ослабление L относительно начального уровня A_0 :

$$L = |A| - |A_0|,$$

где A — отсчет по шкале аттенюатора; $A_0 = -41,7 \text{ дБ}$ — начальное ослабление, соответствующее мощности на выходе генератора $P_0 = 10^{-4} \text{ вт}$.

3.6.2. Включение источника питания ЛБВ

Перед включением источника тумблер “Вкл.- Анод” установить в положение “Анод”, тумблер “Работа-Юстировка” - в положение “Юстировка”, переключатель “Автомат-Ручная” – в положение “Откл”.

Для включения источника переключатель “Автомат - Ручная” перевести в положение “Ручная” (при этом должна загореться лампочка “Накал”), тумблер “Вкл.-Анод” – в положение “Вкл” (при этом в пол-

5.5. Описание исследуемого прибора и лабораторной установки

Функциональная схема и элементы лабораторной установки

В работе исследуется газовый (гелий-неоновый) лазер типа ЛГ-52-2. Это оптический квантовый генератор (ОКГ), в котором для генерации монохроматических когерентных электромагнитных колебаний оптического диапазона используется явление вынужденного излучения в газообразной активной среде.

Исследуемый прибор относится к классу атомных газоразрядных лазеров. Первая характеристика — атомный — означает, что для генерации излучения используются вынужденные квантовые переходы между энергетическими уровнями нейтральных атомов газа. Вторая характеристика – газоразрядный – означает, что инверсия населенностей энергетических уровней, необходимая для возбуждения вынужденного излучения, достигается за счет соударения атомов газа с быстролетающими электронами в процессе электрического разряда.

В исследуемом приборе активной средой является смесь газов гелия (He) и неона (Ne), которая заполняет активный элемент – газоразрядную трубку. Неон является рабочим газом; это означает, что лазерными уровнями, т.е. уровнями, используемыми для генерации вынужденного излучения, являются уровни возбужденных атомов неона. Гелий является вспомогательным газом, посредником при передаче возбуждения от электронов к атомам неона.

Функциональная схема лабораторной установки представлена на рис. 5.1. В установку входят источник питания 1 и излучатель 2 гелий-неонового лазера, а также оптические элементы для исследования лазерного излучения, закрепленные на линейки, жестко связанной с держателем оптики лазера: фотодетектор 3, поляризатор П, дифракционная решетка ДР, экран Э.

Фотодетектор 3 служит для регистрации и измерения мощности оптического излучения. Он состоит из фоторезистора 4 типа ФСК-1, расположенного в непрозрачной экранирующей камере, тумблера включения питания 5, потенциометра 6 для установки напряжения питания фоторезистора, вольтметра 7 для измерения этого напряжения и амперметра 8 для измерения тока фоторезистора, по величине которого определяется мощность излучения.

5.4. Контрольные вопросы

1. Виды квантовых переходов.
2. Связь между разностью энергий рабочих уровней и частотой вынужденного излучения.
3. При каком соотношении населенностей уровней возможны усиление и генерация электромагнитных колебаний в квантовых приборах?
4. Понятия инверсии населенностей уровней и активной среды.
5. К каким классификационным группам относится гелий-неоновый лазер?
6. Устройство, схема питания и назначение основных элементов гелий – неоновго лазера.
7. Диаграмма энергетических уровней и квантовых переходов в гелий- неоновом лазере.
8. Основные физические процессы в гелий-неоновом лазере.
9. Способ создания инверсии населенностей уровней в гелий-неоновом лазере.
10. Рабочий газ и рабочие квантовые переходы в гелий-неоновом лазере.
11. Назначение, тип и устройство колебательной системы гелий-неоновго лазера.
12. Характер поляризации излучения гелий-неоновго лазера. Чем он определяется?
13. Объяснить характер зависимости мощности излучения гелий – неоновго лазера от тока разряда.
14. Спектр излучения гелий-неоновго лазера.
15. Типичные значения основных параметров гелий-неоновых лазеров.
16. Назначение и принцип действия основных элементов лабораторной установки: фотодетектора, поляризатора, дифракционной решетки.
17. Типы квантовых переходов.
18. Закон Бугера-Ламберта.
19. Закон Малюса.

накала загорается лампочка “Анод”), тумблер “Работа - Юстировка” – в положение “Работа” (при этом полным накалом загорается лампочка “Анод”).

3.6.3. Исследование частотной характеристики ЛБВ

Снять зависимость нормированной выходной мощности $P_{\text{вых}}^{\text{к}}$ от частоты входного СВЧ-сигнала f при неизменном анодном напряжении $U_a = 1,5 \text{ кВ}$ и мощности входного СВЧ-сигнала $P_{\text{вх}} = P_0 = 10^{-4} \text{ Вт}$, соответствующей ослаблению аттенюатора $A_0 = -41,7 \text{ дБ}$. Относительные измерения выходной мощности производятся по показаниям α стрелочного индикатора 10, подключенного к выходу ЛБВ через детекторную секцию 9. При квадратичной характеристике детектора в соответствии с соотношением (3.1) нормированная выходная мощность определяется выражением:

$$P_{\text{вых}}^{\text{к}} = P_{\text{вых}} / P_{\text{вых max}} = \alpha / \alpha_{\text{max}}$$

Частота входного сигнала устанавливается по шкале частотомера и изменяется в пределах 3,0-4,0 ГГц через 50 МГц. Результаты измерений занести в таблицу 3.1. По данным эксперимента построить график зависимости $P_{\text{вых}}^{\text{к}}(f)$. Определить оптимальную частоту $f_{\text{опт}}$, соответствующую максимуму $P_{\text{вых}}^{\text{к}}$, а также полосу усиления ЛБВ $\Delta f = f_b - f_H$ по уровню $P_{\text{вых}}^{\text{к}}(f_H) = P_{\text{вых}}^{\text{к}}(f_b) = 0,5$, где f_H, f_b — нижняя и верхняя границы полосы усиления соответственно.

Таблица 3.1

$f, \text{ ГГц}$									
$\alpha, \text{ усл.ед.}$									
$P_{\text{вых}}^{\text{к}} = \alpha / \alpha_{\text{max}}, \text{ отн.ед.}$									
$f_{\text{опт}} = \quad ; f_H = \quad ; f_B = \quad ; \Delta f = f_b - f_H = \quad$									

3.6.4. Исследование характеристики взаимодействия ЛБВ

Снять характеристику взаимодействия ЛБВ, т.е. зависимость нормированной выходной мощности $P_{\text{вых}}^{\text{к}} = \alpha / \alpha_{\text{max}}$ от анодного напряжения U_a при неизменной входной мощности $P_{\text{вх}} = P_0 = 10^{-4} \text{ Вт}$, соответствующей ослаблению аттенюатора $A_0 = -41,7 \text{ дБ}$ и оптимальной

5.1. Цель работы

Изучить устройство и принцип действия гелий-неонового лазера, экспериментально исследовать его характеристики.

5.2. Литература для самостоятельной подготовки

1. Андрушко Л.М., Электронные и квантовые приборы СВЧ [Текст] : учебник для вузов/ Л.М. Андрушко, Н.Д. Федоров— М.: Радио и связь, 1981, - 320 с. –(Учебник для вузов)
2. Федоров Н.Д., Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника [Текст] : учебное пособие /под ред. Н.Д.Федорова - М.: Радио и связь, 2002, -560 с. – (Учебное пособие)
3. Куш Г.Г., Приборы и устройства оптического и СВЧ диапазонов [Текст]: учебное пособие/ Г.Г. Куш, Ж.М. Соколова, Л.И. Шангина - М.: Радио и связь, 2012, -414 с. – (Учебное пособие)
4. Клюев Д.С. Приборы СВЧ и оптического диапазона [Текст]: конспект лекций/Д.С. Клюев, О.В. Осипов, - Самара: Типография ПГУТИ, 2014, - 210 с. – (Конспект лекций)
5. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника [Текст]: учебное пособие для вузов/А.Н. Пихтин, - М.: Высшая школа, 2001, - 297-334- (Учебное пособие для вузов)

5.3. Подготовка к работе

1. Используя рекомендуемую литературу (разд. 5.2) изучить устройство, принцип действия и основные характеристики гелий-неонового лазера.
2. Изучить функциональную схему и описание лабораторной установки (разд. 5).
3. Ответить на контрольные вопросы (разд.5.4).
4. Оформить заготовку отчета (содержание отчета приведено в разд. 5.7).

частоте f_{opt} , определенной в п.6.2. Напряжение анода (спирали) ЛБВ U_a изменять в пределах 1,3-1,7 кВ ручкой “Спираль” на передней панели источника питания 2 через 0,05 кВ. Результаты измерений занести в таблицу 3.2. По данным эксперимента построить график зависимости $P_{вых}^k(U_a)$. Определить оптимальное значение анодного напряжения U_{opt} , соответствующее максимуму $P_{вых}^k$.

Таблица 3.2

U_a , кВ										
α , усл.ед.										
$P_{вых}^k = \alpha/\alpha_{max}$, отн.ед.										
$U_{opt} =$ кВ										

3.6.5. Исследование амплитудной характеристики ЛБВ

Снять амплитудную характеристику ЛБВ, т.е. зависимость нормированной выходной мощности $P_{вых}^k = \alpha/\alpha_{max}$ от нормированной входной мощности $P_{вх}^k = P_{вх}/P_0$ при оптимальной частоте f_{opt} (определенной в п.6.2) и оптимальном анодном напряжении U_{opt} (определенном в п.6.3). Входная мощность $P_{вх}$ регулируется путем изменения ослабления A (в дБ), вносимого аттенуатором входного генератора СВЧ. Ослабление аттенуатора A изменять в пределах от -40 до -60 дБ через 1дБ. Нормированное значение входной мощности определяется с помощью соотношения:

$$P_{вх}^k = P_{вх}/P_0 = 10^{-0,1(|A|-|A_0|)},$$

где P_0 — мощность на выходе генератора СВЧ при ослаблении $A_0 = -41,7$ дБ.

Результаты измерений занести в таблицу 3.3. По данным эксперимента построить график зависимости $P_{вых}^k(P_{вх}^k)$.

Таблица 3.3

A , дБ										
$P_{вх}^k = P_{вх}/P_0$, отн.ед.										
α , усл.ед.										
$P_{вых}^k = \alpha/\alpha_{max}$, отн.ед.										

4.7. Содержание отчета.

1. Номер, название и цель работы.
2. Функциональная схема лабораторной установки.
3. Результаты исследований:
 - п.4.6.2 — табл. 4.1, графики $P^k(U_y), I_k(U_y)$;
 - п.4.6.3 — табл. 4.2, графики $P^k(U_{zc}), f(U_{zc})$;
 - п.4.6.4 — табл. 4.3, осциллограммы огибающей СВЧ- сигнала, временные диаграммы формирования выходного сигнала в режиме АИМ.
4. Выводы по результатам работы.

3.7. Содержание отчета.

1. Номер, название и цель работы.
2. Функциональная схема лабораторной установки.
3. Результаты измерений в виде заполненных таблиц 3.1, 3.2, 3.3 и графиков зависимостей $P_{вых}^k(f)$ (п.3.6.3), $P_{вых}^k(U_a)$ (п.3.6.4), $P_{вых}^k(P_{вх}^k)$ (п.3.6.5).
4. Выводы по результатам работы.

Исследование лампы обратной волны типа О.

4.1. Цель работы

Изучить устройство и принцип действия лампы обратной волны (ЛОВ) типа О, экспериментально исследовать ее характеристики.

4.2. Литература для самостоятельной подготовки

1. Андрушко Л.М., Электронные и квантовые приборы СВЧ [Текст] : учебник для вузов/ Л.М. Андрушко, Н.Д. Федоров— М.: Радио и связь, 1981, - 320 с. –(Учебник для вузов)

2. Федоров Н.Д., Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника [Текст] : учебное пособие /под ред. Н.Д.Федорова - М.: Радио и связь, 2002, -560 с. – (Учебное пособие)

3. Куц Г.Г., Приборы и устройства оптического и СВЧ диапазонов [Текст]: учебное пособие/ Г.Г. Куц, Ж.М. Соколова, Л.И. Шангина - М.: Радио и связь, 2012, -414 с. – (Учебное пособие)

4. Ключев Д.С. Приборы СВЧ и оптического диапазона [Текст]: конспект лекций/Д.С. Ключев, О.В. Осипов, - Самара: Типография ПГУТИ, 2014, - 210 с. – (Конспект лекций)

4.3. Подготовка к работе

1. Используя рекомендуемую литературу (разд.2), изучить устройство, принцип действия и основные характеристики ЛОВ типа О.

2. Изучить функциональную схему и описание лабораторной установки (разд.5).

3. Ответить на контрольные вопросы (разд.4).

4. Оформить заготовку отчета (содержание отчета приведено в разд.7).

4.4. Контрольные вопросы

1. Назначение и основные применения ЛОВ-О.
2. Устройство и схема питания ЛОВ-О.
3. Основные элементы ЛОВ-О, их назначение.

Перерисовать осциллограммы огибающей СВЧ-импульсов и измерить амплитуду импульсной модуляции СВЧ-сигнала U_m (в делениях масштабной сетки осциллографа) при значениях управляющего напряжения $U_y = -\tau 0B$ и $U_y = U_p^{san}$ (см. п. 6.2, табл.4.1). Плавно изменяя управляющее напряжение в сторону больших отрицательных значений, зафиксировать его значение $U_y = U_-^{san}$, соответствующее обращению в нуль амплитуды модуляции СВЧ-сигнала $U_m = 0$ при отрицательной полярности модулирующих импульсов.

Установить положительную полярность импульсов на выходе генератора импульсов (переключатель полярности в положение “ \neg ”), не меняя положение остальных органов управления. Повторить измерения U_m при $U_y = -\tau 0B$ и $U_y = U_p^{san}$. Зафиксировать значение $U_y = U_+^{san}$, соответствующее обращению в нуль амплитуды модуляции СВЧ-сигнала $U_m = 0$ при положительной полярности модулирующих импульсов.

Результаты измерений занести в таблицу 4.3. Используя характеристику управления $P^k(U_y)$, снятую в п.4.6.2, построить временные диаграммы формирования выходного сигнала ЛОВ в режиме АИМ при отрицательной и положительной полярностях модулирующих импульсов, их амплитуде $U_m = 10B$ и положениях рабочей точки: $U_y = -\tau 0B$, $U_y = U_p^{san}$, $U_y = U_-^{san}$, $U_y = U_+^{san}$.

Таблица 4.3



	U_y, B		-20	U_p^{san}
Полярность импульсов		$U_m, дел.$		
		$U_m, дел.$		
$U_-^{san} = \quad ; U_+^{san} = \quad$				

Таблица 4.2

U_{sc}, B								
I_{θ}, B								
$P^k = P/P_{max} = I_d/I_{d,max}$								
Деления нониуса волномера								
f , ГГц								
S , МГц/В								

4.6.4. Исследование ЛОВ в режиме амплитудно-импульсной модуляции

В режиме амплитудно-импульсной модуляции (АИМ) и управляющий электрод ЛОВ наряду с постоянным напряжением смещения U_y подается модулирующее импульсное напряжение, формируемое генератором импульсов 3 типа Г5-15. Для визуального наблюдения и измерения параметров огибающей модулированного СВЧ-сигнала используется осциллограф 4 типа С1-55, подключенный к выходу ЛОВ через детекторную секцию Д2.

Установка рабочих режимов и измерения проводятся в следующем порядке. На электродах ЛОВ установить напряжения: $U_y = -\tau 0B$, $U_{a1} = 180B$, $U_{sc} = 1050B$. Установить отрицательную полярность импульсов на выходе генератора импульсов (переключатель полярности в положение “ \neg ”). Включить генератор импульсов. Переключателем “Диапазон частот следования” и плавным регулятором “Частота следования” установить частоту импульсов 10 КГц. Регулятором “Длительность импульсов” установить длительность импульсов 10 мкс. Амплитуду модулирующих импульсов установить равной $U_m = 10B$, для чего: регулятор “Амплитуда импульсов” вывести в крайнее левое положение; визирную линию регулятора “Измерение амплитуды” совместить с отметкой “10”; плавно вращать ручку “Амплитуда импульсов” вправо до появления мерцания лампочки “Индикатор амплитуды”, что свидетельствует о равенстве амплитуды импульсов 10 В.

Включить осциллограф. Регулируя длительность развертки и частоту синхронизации осциллографа, добиться неподвижного изображения на экране огибающей СВЧ-импульсов с выхода ЛОВ.

4. Основные физические процессы, происходящие в ЛОВ-О.
5. Характер энергообмена в ЛОВ-О.
6. Условие синхронизма движения электронов и электромагнитной волны в ЛОВ, способы обеспечения этого условия.
7. Назначение и основные свойства замедляющих систем, предъявляемые к ним требования.
8. Какие пространственные гармоники могут быть рабочими в ЛОВ-О.
9. Взаимное направление скорости электронов, фазовой скорости рабочей пространственной гармоники и групповой скорости электромагнитной волны в ЛОВ-О.
10. Обосновать фазовое условие самовозбуждения ЛОВ-О, объяснить наличие зон генерации.
11. Объяснить механизм электронной настройки ЛОВ-О.
12. Типичный вид и объяснение основных характеристик ЛОВ-О: характеристики управления, характеристики взаимодействия, характеристики электронной настройки, пусковой характеристики.
13. Типичные значения основных параметров ЛОВ-О.
14. Принципы осуществления модуляции колебаний ЛОВ-О.

4.5. Функциональная схема и описание

лабораторной установки

В работе исследуется генератор СВЧ на лампе обратной волны (ЛОВ) типа О шестисантиметрового диапазона радиоволн марки ОВ-20. Функциональная схема лабораторной установки представлена на рисунке 4.1. В установку входят: СВЧ-блок 1, блок питания 2, генератор импульсов 3 типа Г5-15, осциллограф 4 типа С1-55.

Исследуемая ЛОВ (поз.5 на рис. 4.1) расположена в СВЧ-блоке 1. Элементы ЛОВ обозначены: П — подогреватель, К — катод, УЭ — управляющий электрод, А1 — первый анод, ЗС — замедляющая система (второй анод), Кл — коллектор, КВ — коаксиальный выход, МС — магнитная система. Генерируемый СВЧ-сигнал с коаксиального выхода ЛОВ подается через коаксиально-волноводный переход (КВП) в двоярный волноводный направленный ответвитель (НО), в котором делится по трем каналам. К одному из выходов НО подключена детекторная секция Д1, в низкочастотную цепь которой включен стрелоч-

ный индикатор тока детектора “ $I_{\text{детек}}$ ”. При квадратичной характеристике детектора ток детектора $I_{\text{д}}$ пропорционален квадрату амплитуды СВЧ электрического поля E и, следовательно, СВЧ-мощности на выходе ЛОВ P :

$$I_{\text{д}} \sim E^2 \sim P.$$

Это позволяет непосредственно по показаниям индикатора “ $I_{\text{детек}}$ ” производить относительные измерения СВЧ-мощности:

$$P_{\text{к}} = P/P_{\text{max}} = I_{\text{д}}/I_{\text{дmax}}. \quad (4.1)$$

Ко второму выходу НО подключена детекторная секция Д2, низкочастотный выход которой выведен на лицевую панель СВЧ-блока (гнезда “ \sqcap Выход”) для подачи огибающей СВЧ-сигнала на осциллограф 4. К третьему выходу НО подключен резонансный волномер, состоящий из механически перестраиваемого объемного резонатора (ОР), СВЧ-детектора Д3 и стрелочного индикатора настройки волномера “ $I_{\text{волном}}$ ”.

4.6.3. Исследование характеристик взаимодействия и электронной настройки

Исследовать характеристики взаимодействия и электронной настройки ЛОВ, т.е. зависимости нормированной выходной мощности $P_{\text{к}} = P/P_{\text{max}}$ и частоты генерации f соответственно от напряжения замедляющей системы $U_{\text{зс}} : P_{\text{к}}(U_{\text{зс}}), f(U_{\text{зс}})$. Измерения проводить при неизменных напряжениях на управляющем электроде $U_{\text{у}} = -10\text{В}$ и на первом аноде $U_{\text{а1}} = 160\text{В}$. Относительные измерения выходной мощности производятся по величине тока детектора согласно соотношению (4.1). Частота генерации измеряется с помощью волномера: настройка волномера на частоту сигнала осуществляется вращением ручки “Волномер”, регистрация настройки — по максимуму показаний стрелочного индикатора “ $I_{\text{волном}}$ ”, отсчет — по положению поршня резонатора в делениях нониуса, которые переводятся в частоту с помощью градуировочного графика (рис. 4.2). Напряжение ЗС $U_{\text{зс}}$ измеряется с помощью вольтметра “ $U_{\text{а}}$ ” (верхняя шкала) при установке тумблера “Измерение” в положение “ $U_{\text{зс}} 100\text{В}$ ” и изменяется регулятором “200 – 1100 В”.

Первоначально, изменяя $U_{\text{зс}}$ в пределах 0-1200 В, найти нижнюю $U_{\text{зс1}}$ и верхнюю $U_{\text{зс2}}$ границы области генерации по возникновению и исчезновению тока детектора. Дальнейшие измерения провести в интервале изменения $U_{\text{зс}}$ между $U_{\text{зс1}}$ и $U_{\text{зс2}}$, взяв в этом интервале не менее 7 отсчетных точек. Результаты занести в таблицу 4.2. На одном графике построить зависимости $P_{\text{к}}(U_{\text{зс}}), f(U_{\text{зс}})$, расположив шкалу $P_{\text{к}}$ слева, а шкалу f справа. По графику $f(U_{\text{зс}})$ определить крутизну электронной настройки лампы обратной волны $S = \tau \Delta f / (\tau \Delta U_{\text{зс}})$ при $U_{\text{зс}} \pm \Delta U_{\text{зс}} = 1050 \pm 50\text{В}$.

После выполнения указанных операций стрелки амперметров катодного тока “ $I_{\text{катод}}$ ” и тока детектора “ $I_{\text{детект}}$ ” на лицевой панели СВЧ-блока 1 должны отклониться примерно до середины шкал, что свидетельствует о выходе ЛОВ в рабочий режим.

4.6.2. Исследование характеристик управления

Исследовать характеристики управления ЛОВ, т.е. зависимости нормированной выходной мощности $P^{\text{н}} = P/P_{\text{max}}$ и катодного тока I_k от управляющего напряжения U_y : $P^{\text{н}}(U_y), I_k(U_y)$ при $U_{a1} = \text{const}$, $U_{ac} = \text{const}$.

Относительные измерения выходной мощности производятся по величине тока детектора согласно соотношению (4.1): $P^{\text{н}} = P/P_{\text{max}} = I_d/I_{d\text{max}}$.

Измерения производить при $U_{ac} = 1050\text{В}$ и двух значениях $U_{a1} = 160\text{В}, 180\text{В}$. Управляющее напряжение U_y измерять от 0 до исчезновения катодного тока, взяв в указанном интервале не менее 7 отсчетных точек. Отметить напряжение запираения по выходной мощности $U_p^{\text{зан}}$ (значение U_y , при котором срывается генерация, $P = 0$) и напряжение запираения по катодному току $U_k^{\text{зан}}$ (значение U_y , при котором исчезает катодный ток $I_k = 0$). Результаты занести в таблицу 4.1. Построить графики зависимостей $P^{\text{н}}(U_y), I_k(U_y)$, разместив их один под другим и совместив шкалы U_y этих графиков.

Таблица 4.1

$U_{a1}, \text{В}$	160							180							
$U_y, \text{В}$															
$I_k, \text{мА}$															
$I_d, \text{мА}$															
$P^{\text{н}} = P/P_{\text{max}} = I_d/I_{d\text{max}}$															
$U_p^{\text{зан}}, \text{В}$															
$U_k^{\text{зан}}, \text{В}$															

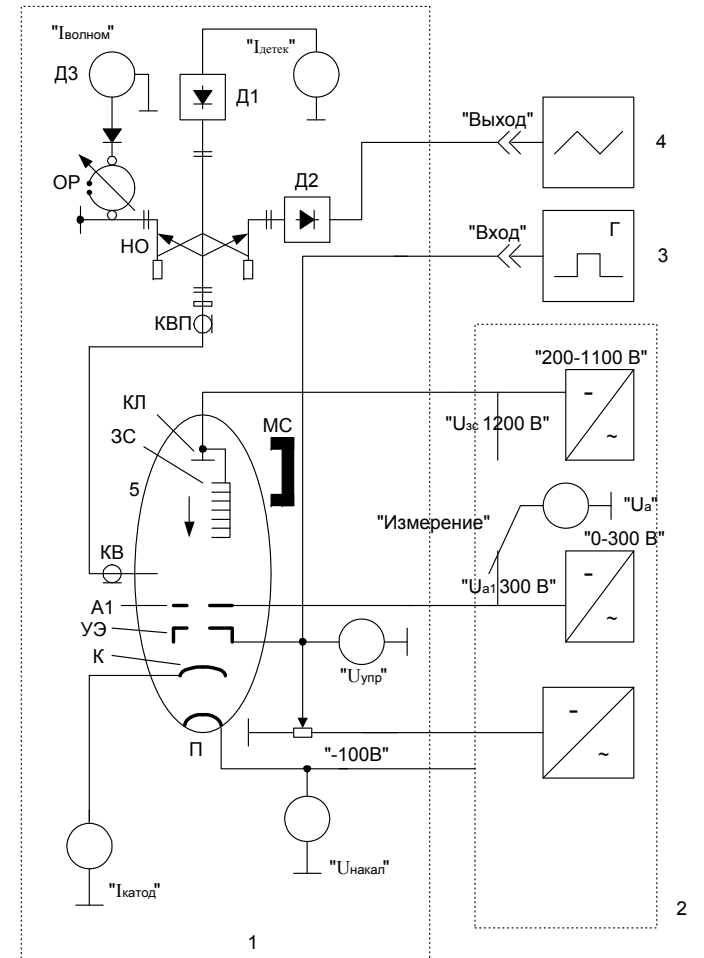


Рис. 4.1. Функциональная схема лабораторной установки для исследования ЛОВО.

Настройка волномера на частоту генерируемых колебаний осуществляется путем перемещения поршня резонатора при вращении ручки “Волномер”, регистрация настройки — по максимальному отклонению стрелки индикатора “ $I_{\text{волном}}$ ”, отсчет настройки — по положению поршня резонатора в делениях нониуса, которые переводятся в частоту с помощью градуировочного графика (рис. 4.2). Стрелочные индикато-

ры “ $I_{детек}$ ”, “ $I_{волном}$ ”, ручки “Волномер”, “Чувствительность волномера” расположены на лицевой панели СВЧ-блока 1, где, кроме того, размещены: регулятор “-100 В” и вольтметр “ $U_{упр}$ ” для установки и измерения управляющего напряжения (напряжения на управляющем электроде), амперметр “ $I_{катод}$ ” для измерения катодного тока ЛОВ, вольтметр “ $U_{накала}$ ” для измерения напряжения накала, гнезда “ \square Вход” для подключения к управляющему электроду внешнего генератора импульсов 3 в режиме модуляции ЛОВ, гнезда “ \square Выход” для подачи огибающей СВЧ-сигнала в режиме модуляции с детекторной секции Д2 на осциллограф 4.

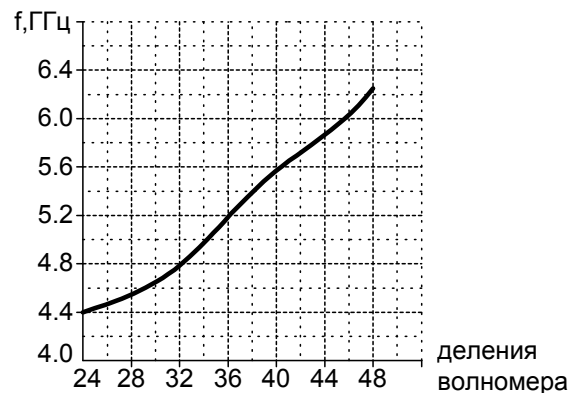


Рис. 4.2. Градуировочный график волномера.

Для питания исследуемой ЛОВ используется блок питания 2, обеспечивающий необходимые напряжения на электродах ЛОВ и их регулировку в пределах: напряжение накала $U_n = 5...6 В$, управляющее напряжение $U_y = 0... -\tau 0В$, напряжение на первом аноде $U_{a1} = 0...y00В$, напряжение на замедляющей системе (2-м аноде) $U_{zc} = \tau 00...1\tau 00В$. На лицевой панели блока питания расположены: ручка регулятора напряжения ЗС “200 – 1100 В”, ручка регулятора напряжения первого анода “0 – 300 В”, вольтметр “ U_a ” для измерения анодных напряжений, переключаемый тумблером “Измерение”. В положении этого тумблера “ $U_{zc} 1\tau 00В$ ” вольтметр включен на измерение напряжения ЗС (верхняя

шкала), в положении “ $U_{a1}y00В$ ” – на измерение напряжения 1-го анода (нижняя шкала). Кроме того, на лицевой панели блока питания размещены: тумблер “Сеть”, тумблер включения высокого напряжения “300 В, 1100 В”, ручка регулятора напряжения накала “Рег. 6,3 В”.

Генератор импульсов 3 предназначен для формирования модулирующих импульсов, подаваемых через гнезда “ \square Вход” на управляющий электрод ЛОВ в режиме амплитудно-импульсной модуляции (АИМ).

Осциллограф 4 служит для визуального наблюдения и измерения параметров огибающей СВЧ-сигнала с АИМ на выходе ЛОВ. Огибающая СВЧ-сигнала выделяется детекторной секцией Д2 и через гнезда “ \square Выход” на лицевой панели СВЧ – блока подается на осциллограф 4.

4.6. Лабораторное задание и порядок выполнения работы

4.6.1. Подготовительные операции

Тумблер “Сеть” на лицевой панели блока питания 2 перевести в положение “Вкл”; при этом должна загореться индикаторная лампочка включения. С помощью регулятора “Рег. 6,3 В” (блок питания 2) и вольтметра “ $U_{накала}$ ” (СВЧ-блок 1) установить напряжение накала ЛОВ в пределах 5,0 В. С помощью регулятора “-100 В” и вольтметра “ $U_{упр}$ ” на лицевой панели СВЧ – блока 1 установить на управляющем электроде ЛОВ напряжение $U_y = -\tau 0В$. После двухминутного прогрева прибора включить напряжения 1-го анода U_{a1} и замедляющей системы U_{zc} переводом тумблера “300 В, 1100 В” (блок питания 2) в положение “Вкл”.

Установив тумблер “Измерение” (блок питания 2) в положение “ $U_{zc} 1\tau 00В$ ”, включить вольтметр “ U_a ” на измерение напряжения ЗС; с помощью регулятора “200–1100 В” и вольтметра “ U_a ” (верхняя шкала) установить напряжение ЗС $U_{zc} = 1050В$. Переведя тумблер “Измерение” в положение “ $U_{a1}y00В$ ”, включить вольтметр “ U_a ” на измерение напряжения 1-го анода; с помощью регулятора “0–300 В” и вольтметра “ U_a ” (нижняя шкала) установить на 1-м аноде напряжение $U_{a1} = 160В$.