

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра электроники

В.Б. Рожанский

СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ И КВАНТОВЫЕ ПРИБОРЫ

Лабораторный практикум
для студентов радиотехнических и телекоммуникационных
специальностей БГУИР
всех форм обучения

Минск 2004

УДК 321.385.6 (075.8)

ББК 32.86 – 5 я 73

Р 62

Рецензент:

доцент кафедры АиУСВЧ БГУИР,
канд. техн. наук Н.А. Чмырев

Рожанский В.Б.

Р 62

Сверхвысокочастотные и квантовые приборы: Лаб. практикум для студ. радиотехнических и телекоммуникационных спец. БГУИР всех форм обуч. / В.Б. Рожанский. – Мн: БГУИР, 2004. – 88 с.: ил.

ISBN 985-444-606-9

В практикуме представлен цикл лабораторных занятий, предполагающий изучение широко используемых в настоящее время СВЧ-приборов: клистронов, ламп бегущей и обратной волны, магнетрона, полупроводниковых генераторных диодов, лазеров.

Практикум предназначен для студентов радиотехнических и телекоммуникационных специальностей БГУИР всех форм обучения, изучающих дисциплину «Сверхвысокочастотные и квантовые приборы». Может быть рекомендован студентам специальности «Медицинская электроника», изучающим дисциплину «Приборы квантовой электроники для медицинской техники».

УДК 321.385.6 (075.8)

ББК 32.86 – 5 я 73

ISBN 985-444-606-9

© Рожанский В.Б., 2004

© БГУИР, 2004

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Исследование пролётного клистрона

Лабораторная работа № 2. Исследование отражательного клистрона

Лабораторная работа № 3. Исследование лампы бегущей волны О-типа

Лабораторная работа № 4. Исследование лампы обратной волны О-типа

Лабораторная работа № 5. Исследование многорезонаторного магнетрона

Лабораторная работа № 6. Исследование митрона

Лабораторная работа № 7. Исследование генератора на лавинно-пролетном диоде

Лабораторная работа № 8. Исследование генератора на диоде Ганна

Лабораторная работа № 9. Исследование полупроводникового инжекционного лазера

Лабораторная работа № 10. Исследование гелий-неонового оптического квантового генератора

Инструкции по эксплуатации измерительных приборов

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЛЁТНОГО КЛИСТРОНА

Цель работы

Изучить устройство и принцип действия пролётного клистрона, экспериментально исследовать основные характеристики и параметры клистрона.

Краткие теоретические сведения

Пролётный клистрон представляет собой усилитель колебаний СВЧ, работа которого основана на кратковременном взаимодействии электронов с электрическим полем двух и более резонаторов.

Схема устройства и включения двухрезонаторного пролётного клистрона изображена на рис. 1.1.

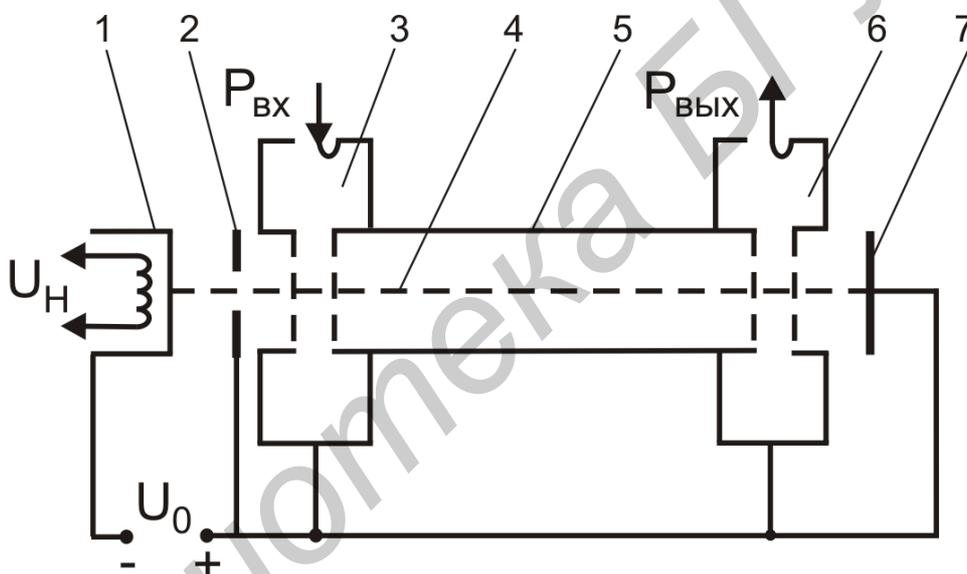


Рис. 1.1. Схема устройства и питания клистрона:

- 1 – катод; 2 – ускоряющий электрод; 3 – входной резонатор; 4 – электронный луч; 5 – труба дрейфа;
- 6 – выходной резонатор; 7 – коллектор

Электроны, эмиттируемые подогреваемым катодом, ускоряются полем ускоряющего электрода, на который подается положительное ускоряющее напряжение U_0 . Этот электрод также несколько фокусирует электронный поток, движущийся далее к входному резонатору. Это же напряжение прикладывается к резонаторам, трубе дрейфа и коллектору клистрона, которые обычно заземляются. Это удобно, поскольку резонаторы связаны с линиями передачи, а коллекторы в мощных клистронах охлаждаются жидкостью.

Скорость электронов, приобретённая под действием ускоряющего напряжения, равна: $V_0 = \sqrt{2 \frac{e}{m} U_0}$. (1.1)

К входному резонатору, называемому обычно модулятором, через коаксиальную линию или волновод и петлю связи подводятся СВЧ-колебания, подлежащие усилению.

Наводимое входным сигналом между сетками входного резонатора переменное напряжение $U_1 = U_{m1} \sin \omega t$ имеет амплитуду, значительно меньшую ускоряющего напряжения $U_{m1} \ll U_0$. Поэтому электронный поток, проходя промежуток между сетками резонатора, под воздействием переменного напряжения почти не изменяет своей плотности, но после прохождения резонатора электроны будут иметь различные скорости. Время прохождения электронами через зазор резонатора много меньше периода колебания, т.е. $t_1 \ll T$, из-за достаточно большой скорости электронов V_0 . Поскольку переменное напряжение между сетками резонатора мало, то и различие в скоростях электронов, прошедших входной резонатор, будет небольшим. Дальнейшее движение электронов в трубе дрейфа будет проходить в отсутствие электрического поля под действием сил инерции. Эту область, где электроны движутся по инерции, но с различными начальными скоростями, называют пространством дрейфа.

Время движения электронов в пространстве дрейфа велико по сравнению с периодом колебаний, поэтому быстрые электроны успевают догнать медленные, образуя сгустки и разрежения электронов.

Таким образом, небольшие изменения по скорости электронов, происходящие под воздействием переменного напряжения между сетками входного резонатора, приводят к значительным изменениям плотности электронного потока. Непрерывный электронный поток превращается в прерывистый, состоящий из сгустков и разрежений электронов. Сгустки электронов поступают в выходной резонатор с частотой, равной частоте входного сигнала, и наводят в нем импульсы тока. В резонаторе возникают СВЧ-колебания с частотой, равной частоте колебаний, подводимых к входному резонатору.

Появляющееся между сетками резонатора электрическое поле тормозит сгруппированные электроны, кинетическая энергия электронов, полученная ими от источника ускоряющего напряжения U_0 , передаётся переменному электрическому полю резонатора, поддерживая таким образом возникшие в резонаторе колебания.

Электроны, прошедшие выходной резонатор и отдавшие часть своей энергии СВЧ-полю резонатора, попадают на коллектор, где рассеивают оставшуюся часть кинетической энергии в виде тепла.

Мощность колебаний, установившихся в выходном резонаторе, превышает мощность колебаний, подводимых к входному резонатору, так как расход энергии усиливаемых колебаний на группирование электронов близок к нулю, поскольку в течение одной половины периода при ускорении электроны отби-

рают энергию от переменного электрического поля, а в течение другой – тормозятся и отдают свою энергию, а обмен энергией в выходном резонаторе происходит в одном направлении – от электронов к полю, из-за того что сгустки электронов попадают в выходной резонатор в моменты времени, когда поле в зазоре резонатора тормозящее. Таким образом, мощность колебаний увеличивается за счёт отбора энергии от источника постоянного напряжения. Электронный поток служит лишь для передачи этой энергии переменному полю выходного резонатора, а процесс модуляции электронов по скорости и группирование их в сгустки необходим для рациональной передачи этой энергии.

Коэффициент усиления двухрезонаторного клистрона не превышает 10-15 дБ, значение КПД тоже невелико – порядка 10-15 %. Полоса пропускания двухрезонаторного полётного клистрона зависит в основном от полосы пропускания резонаторов и составляет менее 1 %. По этим причинам двухрезонаторные клистроны редко используются как усилители.

Значительное расширение полосы пропускания, увеличение коэффициента усиления и КПД достигается в многорезонаторных клистроны. Наиболее распространены трёх- и четырёхрезонаторные клистроны, однако в некоторых типах усилительных клистронов число резонаторов достигает шести. Коэффициент усиления трёх- и четырёхрезонаторных клистронов составляет 30-50 дБ, а шестирезонаторных – достигает 60-70 дБ, КПД обычно лежит в пределах 35-45%, полоса пропускания достигает 10%.

Многорезонаторные клистроны позволяют получать на выходе мощности, достигающие нескольких сотен киловатт в непрерывном режиме и до нескольких десятков мегаватт в импульсном режиме в диапазоне частот от 0,22 до 36 ГГц. Пролётные клистроны в основном применяются в качестве выходных усилителей радиолокационных и телевизионных передатчиков, импульсные клистроны большой мощности используются в линейных ускорителях частиц.

Измерительная установка для исследования пролётного клистрона

Схема измерительной установки приведена на рис. 1.2.

В работе исследуется двухрезонаторный клистрон средней мощности сантиметрового диапазона длин волн типа КУ-103 с волноводными входом и выходом.

Источником входного сигнала служит генератор типа Г4-82. Выходная мощность генератора усиливается усилителем мощности и подаётся на вход пролётного клистрона через высокочастотный переключатель ЭЗ-14 и коаксиально-волноводный переход.

Входная и выходная мощности клистрона измеряются с помощью измерителя мощности типа МЗ-28, подключаемого поочерёдно к входу и выходу клистрона с помощью высокочастотных переключателей типа ЭЗ-14. При положении переключателя 1 измеряется мощность, подаваемая на вход клистрона, а в положении 2 измеряется выходная мощность клистрона.

Питание клистрона осуществляется от регулируемого источника питания, выходное напряжение и ток контролируются стрелочными приборами. Включение источника питания клистрона производится тумблером «Сеть», при этом на клистрон подаётся напряжение накала и включается вентилятор обдува, после 2-3 минут прогрева включением тумблера «Клистрон» подаётся напряжение резонатора U_0 . Соответствие тока резонатора клистрона паспортному значению при установленном паспортном значении напряжения резонатора свидетельствует о нормальной работе пролётного клистрона.

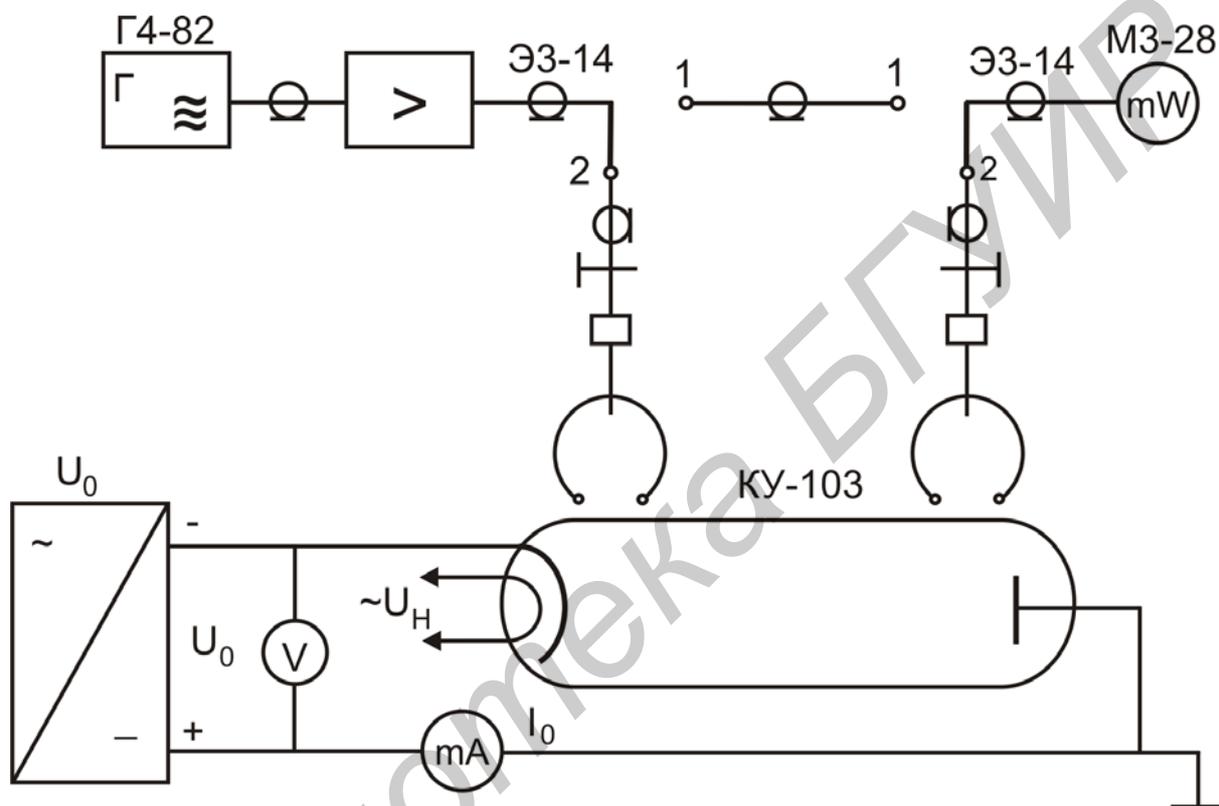


Рис 1.2. Схема измерительной установки для исследования клистрона

Задание и порядок выполнения работы

1. Согласно инструкции по эксплуатации подготовить к работе измерительные приборы.
2. Включить источник питания клистрона и установить рабочий режим прибора.
3. Снять вольт-амперную характеристику клистрона $I_0 = f(U_0)$ при $P_{\text{вх}} = 0$.
4. Определить частоту f_0 , на которой клистрон отдаёт максимальную выходную мощность $P_{\text{вых}}$ при заданном значении $P_{\text{вх}}$.
5. Снять зависимость $P_{\text{вых}} = f(P_{\text{вх}})$ на частоте входного сигнала, равной f_0 , и номинальном значении напряжения резонатора U_0 . Определить оптимальное значение входной мощности $P_{\text{вх опт}}$, при котором выходная мощность достигает максимального значения.

6. Снять амплитудно-частотную характеристику клистрона $P_{\text{ВЫХ}} = \varphi(f)$ при $P_{\text{ВХ}} < P_{\text{ВХ. ОПТ}}$, $P_{\text{ВХ}} = P_{\text{ВХ. ОПТ}}$.

7. Снять зависимость выходной мощности клистрона от напряжения резонатора $P_{\text{ВЫХ}} = f(U_0)$ при $P_{\text{ВХ}} = P_{\text{ВХ. ОПТ}}$, $f = f_0$.

8. По результатам измерений:

а) построить следующие зависимости:

$I_0 = f(U_0)$, $P_{\text{ВЫХ}} = f(P_{\text{ВХ}})$, K_p , дБ, $= f(P_{\text{ВХ}})$ при $f = f_0$, где $K_p = 10 \lg \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}$, дБ;

$P_{\text{ВЫХ}} = \varphi(f)$, K_p , дБ, $= \varphi(f)$ при $P_{\text{ВХ}} < P_{\text{ВХ. ОПТ}}$, $P_{\text{ВХ}} = P_{\text{ВХ. ОПТ}}$;

б) определить: максимальное значение электронного КПД

$\eta_e = \frac{P_{\text{ВЫХ. МАКС}}}{I_0 U_0} \cdot 100\%$, рабочий диапазон частот Δf , относительную полосу про-

пускания $\frac{\Delta f}{f_0} \cdot 100\%$.

Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Паспортные данные исследуемого прибора.
3. Схема измерительной установки.
4. Таблицы результатов измерений.
5. Графики полученных зависимостей.
6. Краткие выводы.

Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип действия пролётного клистрона.
2. Основные параметры клистрона.
3. Амплитудная характеристика клистрона.
4. Амплитудно-частотная характеристика клистрона.
5. Измерительная установка и методика снятия характеристик клистрона.
6. Конструкции пролётных клистронов.
7. Области применения пролётных клистронов.

Литература

1. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Н.Д. Федорова. – М.: Радио и связь, 1988.
2. Андрушко Л.М., Федоров Н.Д. Электронные и квантовые приборы СВЧ. – М.: Радио и связь, 1981.
3. Панфилов И.Г. Приборы СВЧ и оптического диапазонов. – М.: Радио и связь, 1983.
4. Рожанский В.Б. Электронные приборы СВЧ: Учеб. пособие. – Мн.: БГУИР, 1997.
5. Березин В.М. и др. Электронные СВЧ приборы. – М.: Радио и связь, 1981.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО КЛИСТРОНА

Цель работы

Изучить устройство и принцип действия отражательного клистрона, экспериментально исследовать основные характеристики и параметры клистрона.

Краткие сведения из теории отражательного клистрона

Отражательный клистрон представляет собой резонансный генератор колебаний СВЧ малой мощности (рис.2.1).

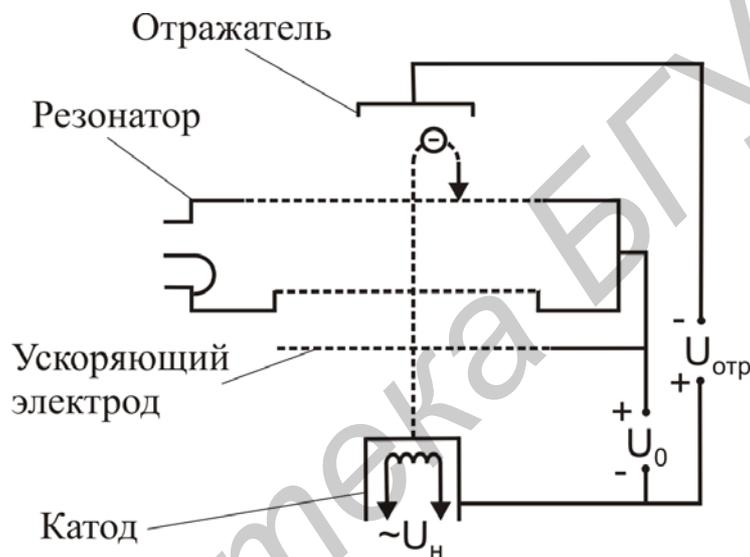


Рис.2.1. Схема устройства и питания отражательного клистрона

Работа отражательного клистрона основана на кратковременном взаимодействии электрического поля резонатора с электронным потоком.

Электроны, эмиттируемые катодом, ускоряются в пространстве между катодом и резонатором, к которому приложено ускоряющее напряжение U_0 .

Возникающее между сетками резонатора СВЧ-напряжение $U(t)=U_m \sin \omega t$ производит модуляцию скорости электронов.

После вылета из резонатора электроны, двигаясь равнозамедленно в тормозящем поле отражателя, уменьшают свою скорость до нулевого значения, затем начинают обратное движение и возвращаются в резонатор. В процессе этого движения к отражателю и обратно из-за различия скоростей электронов происходит образование сгустков электронов.

Чтобы образовавшиеся электронные сгустки отдавали энергию СВЧ-полю и поддерживали колебания в резонаторе, они должны возвращаться в резонатор в тормозящий полупериод.

Для этого необходимо, как это видно из пространственно-временной диаграммы (рис.2.2), чтобы сгустки электронов возвращались в резонатор через целое число периодов без одной четверти, т.е.

$$\tau = T \left(n - \frac{1}{4} \right), \quad (2.1)$$

где $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

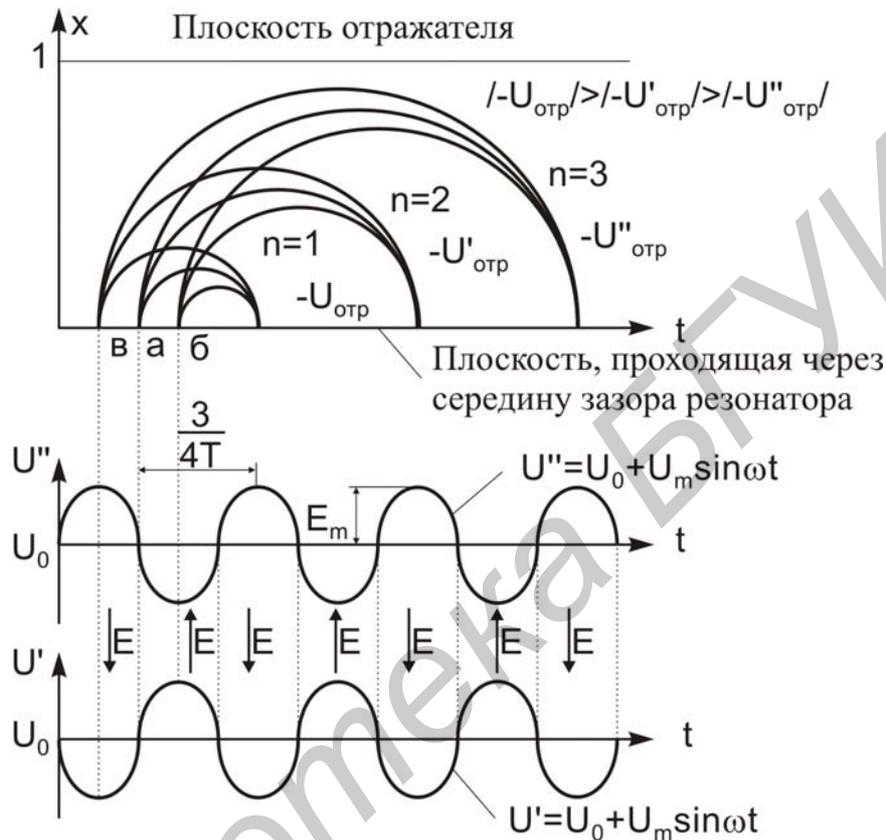


Рис.2.2. Пространственно-временная диаграмма отражательного клистрона

Поскольку величина времени группирования τ зависит от тормозящего поля отражателя, условие (2.1) может быть приведено к виду

$$2000 \frac{\ell}{\lambda} \cdot \frac{\sqrt{U_0}}{U_0 + U_{отр}} = n - \frac{1}{4}, \quad (2.2)$$

где ℓ - расстояние между резонатором и отражателем;

λ - длина волны генерируемых колебаний.

Так как для работы отражательного клистрона достаточно даже приближенного выполнения условия (2.2), то при изменении $U_{отр}$ в широких пределах генерация отражательного клистрона может иметь место в отдельных областях (зонах) значений напряжения отражателя (рис.2.3).

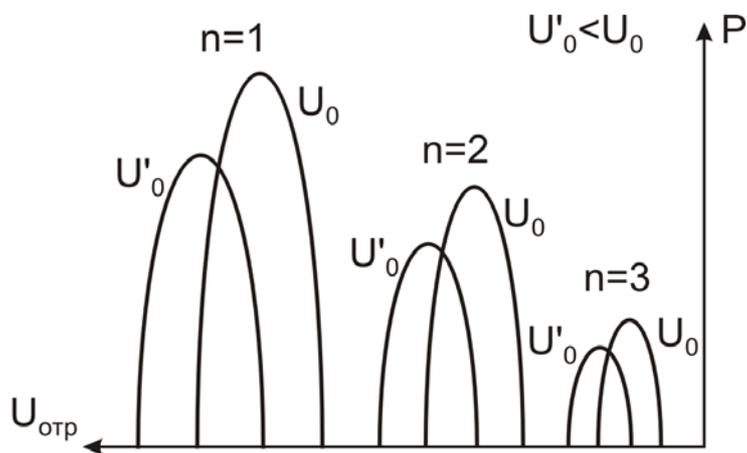


Рис.2.3. Зависимость мощности колебаний в клистроне от напряжения на отражателе $U_{отр}$

Изменение напряжения отражателя приводит также к изменению частоты генерируемых колебаний (рис.2.4).

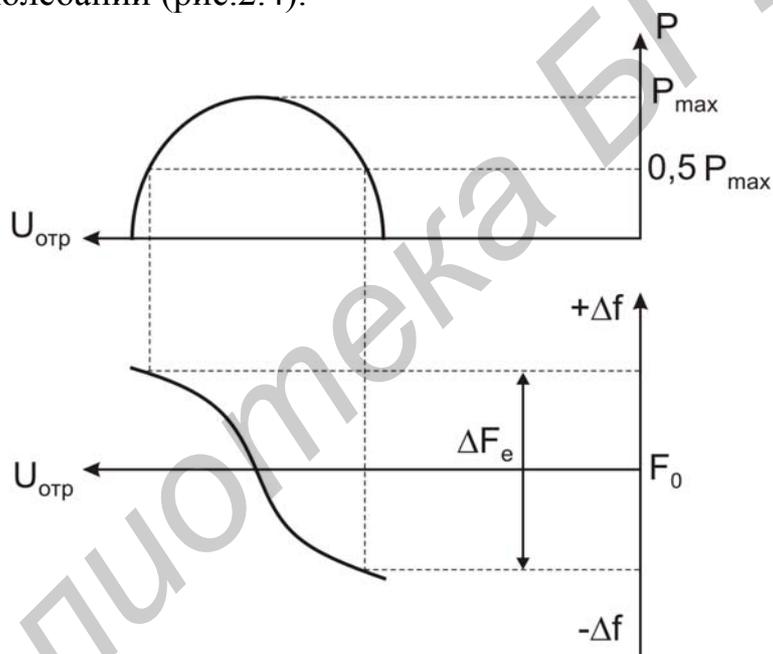


Рис.2.4. Зависимость частоты и мощности колебаний в клистроне от напряжения отражателя в пределах зоны генерации

Это связано с возникновением фазового сдвига между током, наводимым в резонаторе сгустками электронов, и напряжением на сетках резонатора. Область изменения частоты колебаний, внутри которой выходная мощность клистрона уменьшается не более чем вдвое, называется диапазоном электронной перестройки ΔF_e . Обычно ΔF_e равна 0,3...0,8% от средней частоты F_0 . Крутизна электронной перестройки частоты клистрона

$$S_e = \frac{df}{dU_{отр}} \quad (2.3)$$

составляет единицы мегагерц на вольт в сантиметровом диапазоне.

Кроме электронной перестройки частоты, возможна механическая перестройка, связанная с перестройкой резонансной частоты резонатора клистрона, за счет изменения геометрических размеров резонатора. При механической перестройке изменения частоты генерируемых колебаний достигают 10...20 % от средней частоты.

Из-за низкого КПД (единицы процентов) применение отражательных клистронов ограничивается областями малых мощностей (десятки и сотни милливатт), где малый КПД не является существенным недостатком. Отражательные клистроны способны работать в диапазоне частот от 0,8 до 220 ГГц. В основном отражательные клистроны нашли широкое применение в качестве гетеродинов радиоприемных устройств СВЧ-диапазона, задающих генераторов различного рода измерительных устройств и т.п.

В настоящее время отражательные клистроны постепенно вытесняются полупроводниковыми приборами СВЧ.

Измерительная установка для исследования отражательного клистрона

Схема измерительной установки приведена на рис.2.5. В работе исследуется отражательный клистрон 3-сантиметрового диапазона волн.

Для питания отражательного клистрона используются два стабилизированных источника питания с регулируемыми выходными напряжениями.

Ток резонатора клистрона может регулироваться с помощью переменного резистора в цепи накала клистрона.

Включение источников питания клистрона производится тумблером "Сеть", при этом подаются напряжения на отражатель и подогреватель катода клистрона. Включением тумблера "Клистрон" подается напряжение на резонатор клистрона, предварительно нужно прогреть клистрон в течение 3-5 минут, установив ручку "Ток резонатора" в крайнее правое положение. Ток резонатора не должен превышать допустимый.

Мощность, генерируемая клистроном через развязывающий ферритовый вентиль Э8-24 и прецизионный аттенюатор Д5-5, подается на резонансный частотомер Ч2-32 и измеритель мощности М3-10А.

Часть мощности через направленный ответвитель поступает на детекторную секцию, с выхода которой снимается сигнал, пропорциональный выходной мощности клистрона. Этот сигнал подается на вход Y осциллографа С1-72.

На отражатель клистрона при включенном тумблере "Модуляция" кроме постоянного напряжения подается переменное модулирующее напряжение с частотой сети. В результате с детекторной секции будут сниматься видеоимпульсы, возникающие в момент времени, когда сумма мгновенного напряжения отражателя окажется равной напряжению какой-либо зоны генерации. Если развертка осциллографа синхронизирована с частотой сети, то изображение на его экране будет представлять в некотором масштабе зависимость выходной мощности клистрона от напряжения отражателя, т.е. зоны генерации клистрона. Характеристики клистрона снимаются при выключенном тумблере «Модуляция».

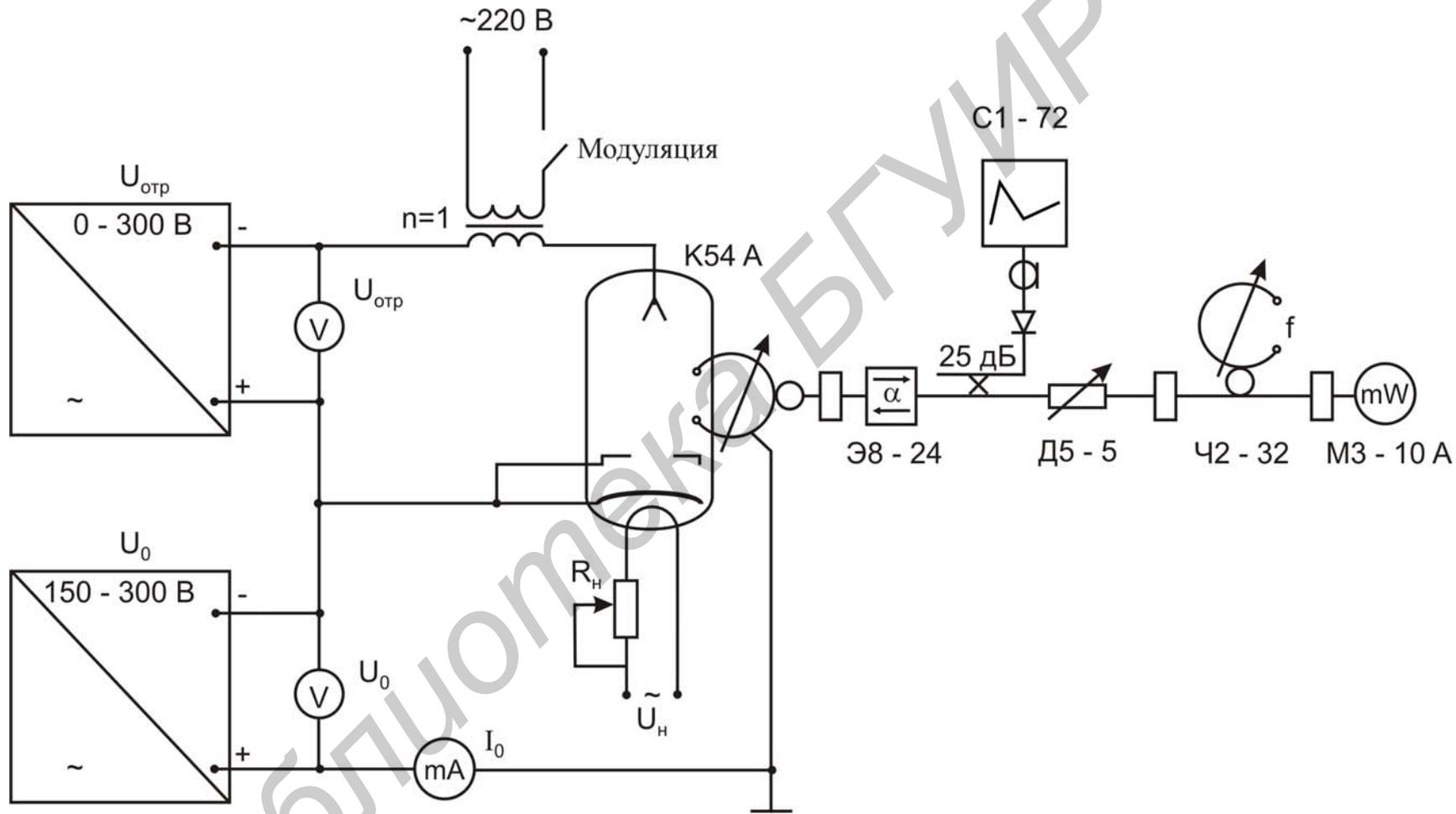


Рис. 2.5. Схема измерительной установки для исследования отражательного клистрона

Задание и порядок выполнения работы

1. Согласно инструкциям по эксплуатации подготовить к работе измерительные приборы.

2. Установить паспортные значения напряжения отражателя и резонатора клистрона.

3. В режиме модуляции напряжения отражателя получить изображение зон на экране осциллографа, просмотреть распределение мощности, колебаний по зонам генерации при $U_0=250$ В.

4. Используя измеритель мощности (при выключенном тумблере "Модуляция"), определить напряжения отражателя, соответствующие максимумам зон генерации для различных значений напряжения резонатора: $U_0 = 200; 220; 250; 260; 280$ В. Рассчитать значения номера зоны n для полученных значений напряжения отражателя, используя выражение (2.2). Значение длины волны λ определяется по частоте генерируемых колебаний при напряжении отражателя, соответствующем центру зоны. Рассчитанные значения n необходимо округлять до ближайшего большего значения.

5. По результатам п. 4 построить зависимости $U_{отр}=f(U_0)$ при $n=const$.

6. Снять зависимости мощности и частоты генерируемых клистроном колебаний от напряжения отражателя: $P=f(U_{отр}); f=F(U_{отр})$, при паспортном значении напряжения резонатора U_0 . При снятии этих зависимостей необходимо изменять напряжение отражателя в большую и меньшую сторону от найденного центра зоны, с минимально возможным шагом. При напряжениях отражателя, соответствующих центрам зон, измерить величину тока резонатора I_0 . По полученным данным определить абсолютные (ΔF_e) и относительные $\left(\frac{\Delta F_e}{f_0} \cdot 100\% \right)$ значения диапазона электронной перестройки, значения крутизны электронной перестройки S_e и электронного КПД $\left(\eta = \frac{P}{U_0 I_0} \right)$ для полученных зон генерации. Установить связь между значением номера зоны и полученными значениями параметров клистрона. Измерения проделать для двух зон генерации с наибольшей мощностью.

7. Снять зависимости мощности и частоты генерируемых клистроном колебаний от напряжения резонатора:

$P=f(U_0), f=F(U_0)$ при напряжениях отражателя, соответствующих центрам зон генерации.

8. Снять зависимость мощности генерации клистрона от тока резонатора для разных зон генерации:

$P=f(I_0)$ при паспортном значении напряжения резонатора.

Напряжения отражателя должны соответствовать центрам зон.

9. Снять зависимость отдаваемой клистроном мощности от частоты при механической перестройке резонатора:

$P=F(f)$ при паспортном значении напряжения резонатора.

Напряжением на отражателе поддерживать максимально возможное значение мощности клистроны.

По результатам измерений построить зависимости оптимального напряжения отражателя от частоты:

$U_{отр}=F(f)$.

Определить диапазон механической перестройки частоты.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Паспортные данные исследуемого клистроны.
3. Схема измерительной установки.
4. Результаты измерений и вычислений.
5. Графики полученных зависимостей.
6. Краткие выводы.

Контрольные вопросы

1. Изложить порядок выполнения лабораторной работы.
2. Устройство и назначение отражательного клистроны.
3. Объяснить принцип группирования электроны в отражательном клистроны.
4. Условие самовозбуждения в отражательном клистроны.
5. Баланс мощностей в отражательном клистроны.
6. Зависимость мощности колебаний от номера области генерации.
7. Электронная перестройка частоты в отражательном клистроны.
8. Технические характеристики и параметры отражательного клистроны.

Литература

1. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника: Учеб. пособие для вузов /Под ред. Н.Д. Федорова. – М.: Радио и связь, 1988.
2. Андрушко Л.М., Федоров Н.Д. Электронные и квантовые приборы СВЧ. – М.: Радио и связь, 1981.
3. Панфилов И.Г. Приборы СВЧ и оптического диапазоны. – М.: Радио и связь, 1983.
4. Рожанский В.Б. Электронные приборы СВЧ: Учеб. пособие. – Мн.: БГУИР, 1997.
5. Березин В.М. и др. Электронные СВЧ приборы. – М.: Радио и связь, 1981.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ О-ТИПА

Цель работы

Изучить конструкцию, принцип действия, основные характеристики и параметры лампы бегущей волны (ЛБВ).

Краткие сведения из теории ЛБВ

ЛБВ представляет собой усилительный электронный сверхвысокочастотный прибор с длительным взаимодействием между электронным потоком и электромагнитной волной, распространяющейся вдоль замедляющей системы (рис.3.1).

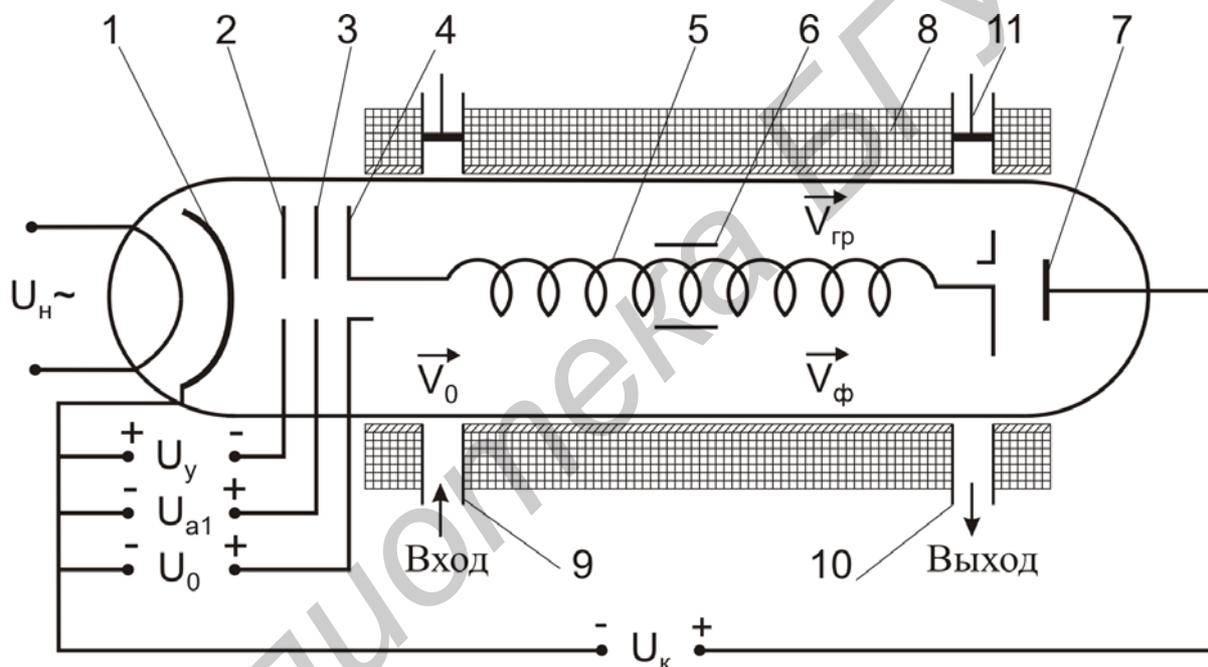


Рис.3.1. Схема устройства и питания спиральной ЛБВ:

1 - катод; 2 - управляющий электрод; 3 - первый анод; 4 - второй анод; 5 - замедляющая система (спираль); 6 - поглотитель; 7 - коллектор; 8 - фокусирующая система (соленоид); 9 - вход; 10 - выход; 11 - подстроечные элементы

На управляющий электрод ЛБВ подается обычно небольшое отрицательное напряжение либо его соединяют с катодом. К первому аноду прикладывается положительное напряжение порядка нескольких десятков вольт, которое определяет величину тока луча.

На второй анод и соединенную с ним замедляющую систему (спираль) подается ускоряющее напряжение U_0 порядка нескольких сотен вольт. Регули-

ровкой этого напряжения обеспечивают оптимальную для работы ЛБВ скорость электронов в пространстве спирали. К коллектору подается напряжение, равное или близкое напряжению спирали.

Электромагнитная волна, поступающая на вход лампы, распространяется вдоль замедляющей системы (ЗС), которая понижает фазовую скорость волны до значения, близкого к скорости электронного потока.

При распространении волны вдоль ЗС продольная составляющая электрического поля E_z модулирует по скорости пучок электронов, предварительно ускоренных постоянным напряжением U_0 , приложенным между катодом и ЗС. В результате модуляции по скорости при дальнейшем движении электронный поток получает модуляцию по плотности, обуславливающей появление переменной составляющей конвекционного тока пучка. Электронные сгустки образуются непосредственно позади областей, где продольное поле E_z оказывается тормозящим. Если средняя скорость электронного пучка несколько превышает фазовую скорость волны, то электронный пучок, медленно обгоняя волну, будет все время находиться в области тормозящего поля, отдавая ему часть своей энергии. Поэтому интенсивность распространяющейся волны по мере ее движения синхронно с электронным потоком вдоль ЗС возрастает, что, в свою очередь, повышает эффективность их взаимодействия. Мощность волны на конце ЗС может в сотни и тысячи раз превышать мощность входного колебания. Для того чтобы в ЗС существовал режим бегущей волны, степень согласования ЗС с нагрузкой и источником сигнала должна быть высокой во всем рабочем диапазоне частот. Наличие даже слабого рассогласования приводит в результате двойного отражения волны – от конца и начала ЗС – к появлению положительной обратной связи и, следовательно, к самовозбуждению ЛБВ. Для повышения устойчивости работы лампы приходится увеличивать затухание ЗС путем введения поглощающих вставок примерно посередине ЗС (ближе ко входу ЛБВ).

Распространяющаяся в ЗС волна, вообще говоря, представляет собой бесконечную сумму пространственных гармоник, имеющих одинаковые частоты ω , но различные фазовые постоянные β_n , а следовательно, и различные фазовые скорости:

$$V_{\text{фн}} = \frac{\omega}{\beta_n}. \quad (3.1)$$

Электронный пучок в ЛБВ взаимодействует лишь с той пространственной гармоникой, фазовая скорость которой достаточно близка к скорости электронов и совпадает с ней по направлению. При этом необходимое для нормальной работы ЛБВ превышение начальной скорости электронов V_0 над фазовой скоростью волны $V_{\text{ф}}$ не должно быть чрезмерным, с тем чтобы за время движения вдоль ЗС электронный сгусток не вышел из области тормозящего поля, т.е.

$$V_0 \geq V_{\text{ф}}. \quad (3.2)$$

Это условие называется условием примерного синхронизма. Обычно разница между V_0 и V_ϕ не более 5 – 10%. Поэтому усиление ЛБВ сильно зависит от ускоряющего напряжения U_0 , которое должно тщательно подбираться (рис.3.2).

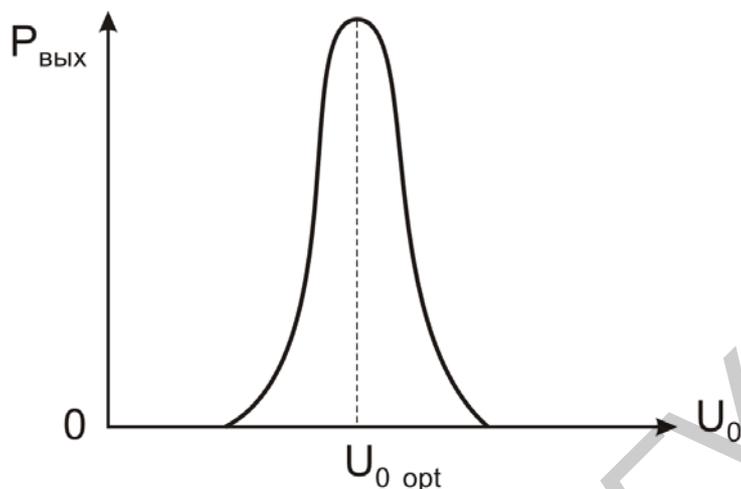


Рис.3.2. Зависимость выходной мощности ЛБВ от ускоряющего напряжения на фиксированной частоте

Характерной особенностью ЛБВ является нелинейность ее амплитудной характеристики (рис.3.3).

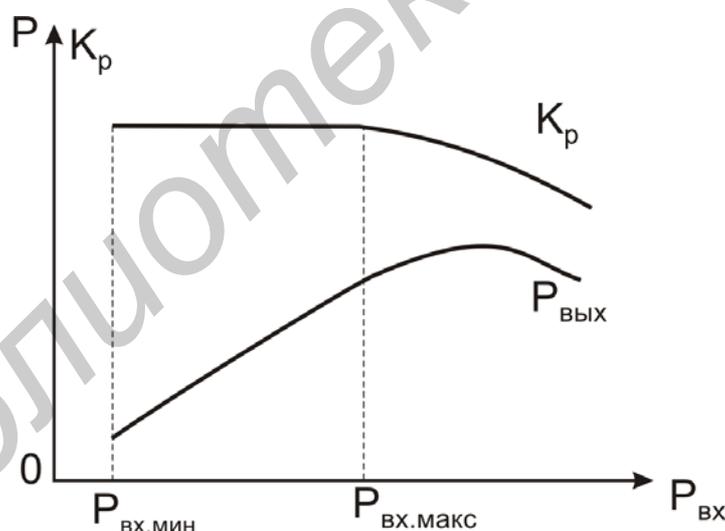


Рис.3.3. Амплитудная характеристика ЛБВ

При малых значениях входной мощности наблюдается линейная зависимость $P_{\text{вых}} = kP_{\text{вх}}$, т.е. коэффициент усиления остается постоянным. При дальнейшем увеличении $P_{\text{вх}}$ выходная мощность растет, но коэффициент усиления падает, что вызвано перегруппировкой электронов, нарушением условия синхронизма из-за уменьшения скорости электронов вследствие торможения электронных сгустков.

Диапазон входных мощностей $P_{\text{вх.макс}} - P_{\text{вх.мин}}$, в котором коэффициент усиления имеет наибольшую величину, называют динамическим диапазоном. Величина динамического диапазона в ЛБВ ($10 \lg P_{\text{вх.макс}} / P_{\text{вх.мин}}$) достигает 80...90 дБ.

Величина минимального входного сигнала $P_{\text{вх.мин}}$ определяется уровнем собственных шумов ЛБВ.

Основными видами шумов в ЛБВ являются: дробовой шум; шум, связанный с флуктуацией разброса скоростей электронов, эмиттируемых катодом; поверхностный шум катода; шумы токораспределения.

Шумы ЛБВ оцениваются коэффициентом шума

$$K_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{вх}} / P_{\text{ш.вх}}}{P_{\text{вых}} / P_{\text{ш.вых}}}, \quad (3.3)$$

который показывает, во сколько раз отношение мощностей сигнала и шума на выходе ЛБВ меньше этого же отношения на входе. Для идеальной (не шумящей) ЛБВ $K_{\text{ш}} = 1$ (или $K_{\text{ш}} = 0$ дБ). Реальные входные ЛБВ имеют $K_{\text{ш}} = 2,5 \dots 20$ (или 4 ... 13 дБ).

Коэффициент усиления ЛБВ, который обычно выражается в децибелах:

$$K_p = 10 \lg \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}, \quad (3.4)$$

где $P_{\text{вых}}$ и $P_{\text{вх}}$ – выходная и входная мощности, соответственно.

Для линейного участка амплитудной характеристики коэффициент усиления можно записать

$$K_p = 43,7CN - 9,54 \text{ дБ}. \quad (3.5)$$

Здесь N - число длин волн, укладываемых вдоль спирали длиной ℓ ;

$$N = \frac{\ell}{\lambda_c}, \quad (3.6)$$

где λ_c - длина волны усиливаемого сигнала в замедляющей системе;

C - параметр усиления, равный:

$$C = \sqrt[3]{\frac{R_{\text{св}} I_0}{4U_0}}. \quad (3.7)$$

Здесь I_0 - постоянный ток электронного потока, А;

U_0 - ускоряющее напряжение, В;

$R_{\text{св}}$ - сопротивление связи замедляющей системы, определяемое как

$$R_{\text{св}} = 20 \frac{\lambda^2}{(2\pi R)^3 n_1} \text{ Ом}, \quad (3.8)$$

где R – радиус спирали;

n_1 – число витков спирали на единицу длины.

С учетом уменьшения усиления из-за наличия поглотителя формула (3.5) принимает вид

$$K_p = 47,3CN - 9,54 - L \text{ дБ},$$

где $L=(5...10)$ дБ – затухание поглотителя.

В реальных ЛБВ $C \approx 0,02...0,5$, $N=10...30$. При этих условиях коэффициент усиления ЛБВ достигает значения $15...35$ дБ, а в маломощных лампах доходит до 60 дБ.

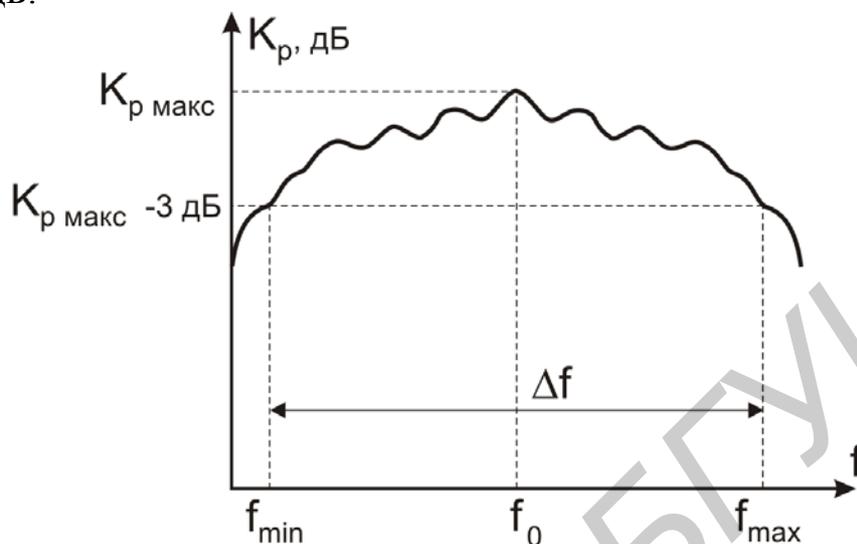


Рис.3.4. Амплитудно-частотная характеристика ЛБВ

Частотные свойства ЛБВ характеризуются амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) (рис.3.4).

Рабочим диапазоном частот ЛБВ или полосой пропускания называют Полосу частот Δf , в пределах которой коэффициент усиления уменьшается не более чем на 3 дБ относительно максимального значения.

Полоса пропускания может быть указана также в процентах, т.е. $\Delta f / f_0 \cdot 100\%$, где f_0 - средняя частота полосы пропускания.

Снижение коэффициента усиления ЛБВ на частоте ниже рабочей обусловлено, в частности, увеличением длины волны λ_c в замедляющей системе и уменьшением в результате этого параметра N (3.5).

При увеличении частоты сигнала коэффициент усиления снижается из-за уменьшения сопротивления связи замедляющей системы (3.8).

Кроме того, полоса пропускания ограничивается возможностью широкополосного согласования замедляющей системы со входом и выходом ЛБВ. По этой причине АЧХ ЛБВ в пределах полосы пропускания изрезана.

Спиральные замедляющие системы характеризуются слабой дисперсией, поэтому нарушение условия синхронизма за счет изменения фазовой скорости волны при изменении частоты слабо влияет на усиление ЛБВ.

Нужно отметить, что ЛБВ со спиральной ЗС обладает наиболее широкой полосой пропускания среди всех типов усилителей СВЧ. Полоса пропускания может достигать 2–3 октав.

При использовании ЛБВ в качестве усилителей мощности важным параметром является значение максимальной выходной мощности:

$$P_{\text{вых}} = 2I_0U_0C. \quad (3.9)$$

Из выражения (3.9) следует, что получение высоких выходных мощностей требует прежде всего мощного электронного потока, обладающего большим запасом кинетической энергии.

Используя (3.9), легко получить выражение для электронного коэффициента полезного действия:

$$\eta_e = \frac{P_{\text{вых}}}{P_0} = 2C, \quad (3.10)$$

где $P = U_0I_0$ - подводимая мощность.

В реальных ЛБВ электронный КПД обычно невелик: единицы процентов для ламп миллиметрового диапазона и 20...30% для ЛБВ, работающих в дециметровом диапазоне волн.

По величине выходной мощности в режиме насыщения ЛБВ подразделяются на маломощные (доли милливатта – 1 Вт), средней мощности (1–100 Вт), большой мощности (более 100 Вт) и сверхмощные (более 100 кВт). По режиму работы различают ЛБВ непрерывного и импульсного действия.

Маломощные ЛБВ применяются для усиления слабых сигналов на входе приемников СВЧ радиорелейных линий связи, радиолокационных станций и т.п. Как правило, такие ЛБВ имеют низкий коэффициент шума, широкую полосу пропускания, большой коэффициент усиления.

ЛБВ средней мощности используются в качестве выходных усилителей мощности в маломощных передатчиках.

Мощные и сверхмощные ЛБВ используются в передатчиках радиолокационных станций, в наземных станциях систем космической связи и т.д. Для мощных ЛБВ основное внимание уделяют получению максимально возможного КПД и выходной мощности.

Измерительная установка для исследования ЛБВ

Схема измерительной установки приведена на рис.3.5. В работе исследуется маломощная ЛБВ с периодической фокусировкой потока системой постоянных магнитов (пакетированная ЛБВ), с волноводными входом и выходом сигнала. Замедляющая система ЛБВ - проволочная спираль.

Источником входного сигнала служит генератор типа Г4-82, имеющий калиброванный выход, подключенный через коаксиально-волноводный переход к входу ЛБВ, выходная мощность лампы измеряется с помощью измерителя мощности МЗ-28, включенного на выход лампы с помощью коаксиально-волноводного перехода.

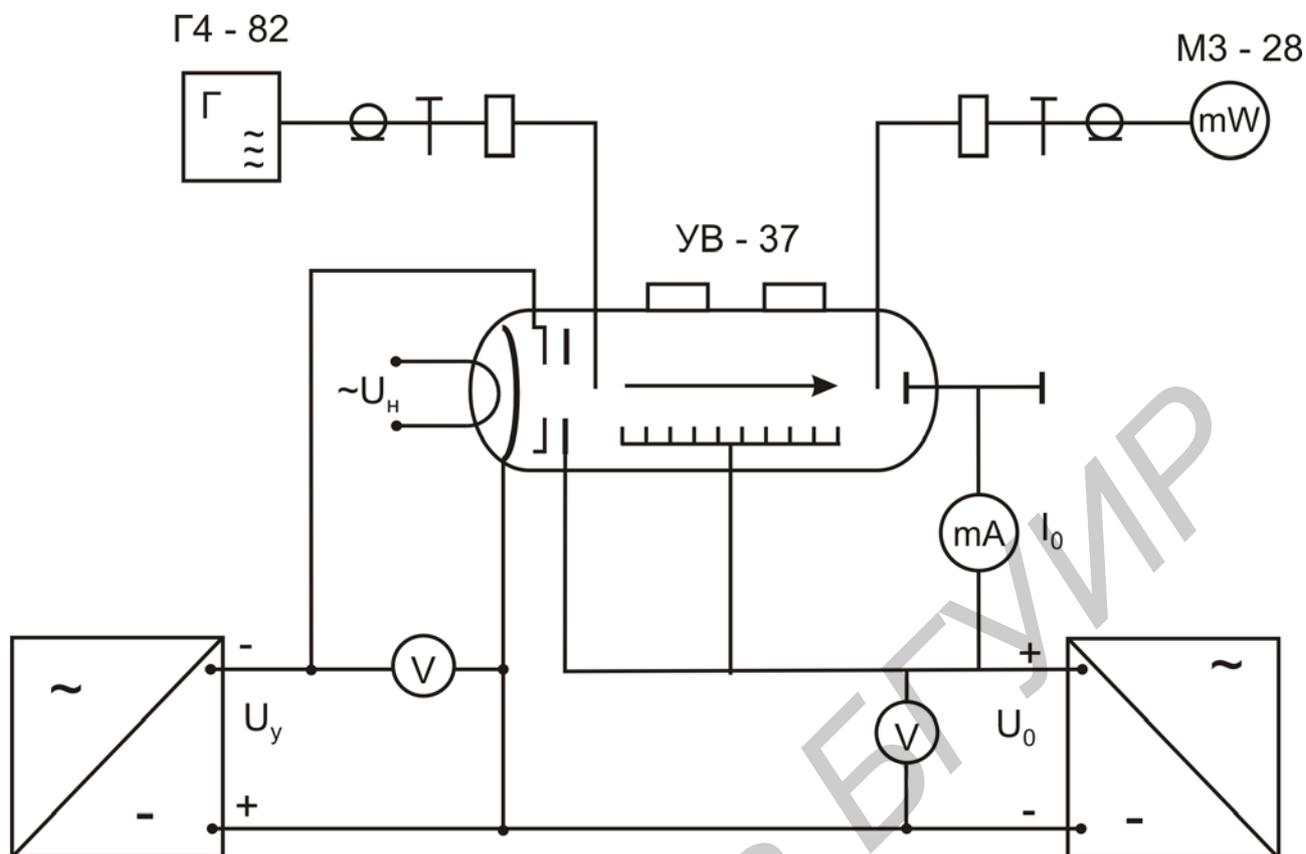


Рис.3.5. Схема измерительной установки для исследования ЛБВ

Задание и порядок выполнения работы

1. Согласно инструкциям по эксплуатации подготовить к работе измерительные приборы.
2. Установить паспортные значения напряжений на электродах ЛБВ, проверить значение тока коллектора.
3. На заданной частоте снять амплитудную характеристику $P_{\text{вых}} = f(P_{\text{вх}})$ при $f = \text{const}$. Измерения выполнить при значениях входной мощности, равных: 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 100 мкВт.
4. Снять АЧХ ЛБВ $P_{\text{вых}} = F(f)$ при $P_{\text{вх}} = 1$ мкВт и $P_{\text{вх}} = 5$ мкВт. Определить значения рабочего диапазона частот Δf и относительной полосы пропускания $\Delta f / f_0 \cdot 100\%$.
5. На средней частоте f_0 рабочего диапазона ЛБВ снять зависимость выходной мощности от тока коллектора.
 $P_{\text{вых}} = f(I_0)$ при $P_{\text{вх}} = 1$ мкВт и $P_{\text{вх}} = 5$ мкВт.
 Ток коллектора изменять изменением напряжения на управляющем электроде, при этом категорически запрещается превышать максимальное значение тока коллектора.

6. На средней частоте рабочего диапазона f_0 снять зависимость выходной мощности от ускоряющего напряжения: $P_{\text{вых}} = f(U_0)$ при $P_{\text{вх}} = 1$ мкВт, $P_{\text{вх}} = 5$ мкВт, $P_{\text{вх}} = 10$ мкВт и номинальном значении тока коллектора.

7. Снять АЧХ ЛБВ при $P_{\text{вх}} = 1$ мкВт, подбирая для каждой частоты ускоряющее напряжение U_0 , соответствующее максимальной выходной мощности. Определить зависимость оптимального ускоряющего напряжения от частоты, найти значения рабочего диапазона и относительной полосы пропускания ЛБВ.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Паспортные данные исследуемой лампы.
3. Схема измерительной установки.
4. Таблица результатов измерений и расчетов.
5. Графики зависимостей.
 $P_{\text{вых}} = f(P_{\text{вх}})$; $K_{\text{db}} = f(P_{\text{вх}})$; $P_{\text{вых}} = F(f)$; $K_{\text{db}} = F(f)$ при $U_0 = \text{const}$; $U_0 = U_{0\text{opt}}$;
 $U_{0\text{opt}} = F(f)$; $P_{\text{вых}} = f(I_0)$; $P_{\text{вых}} = f(U_0)$.
6. Краткие выводы.

Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип действия ЛБВ.
2. Основные параметры ЛБВ.
3. Измерительная установка и методика снятия характеристик ЛБВ.
4. Амплитудная характеристика ЛБВ.
5. Амплитудно-частотная характеристика ЛБВ.
6. Конструкция ламп бегущей волны.
7. Области применения ЛБВ.

Литература

1. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника: Учеб. пособие для вузов /Под ред. Н.Д. Федорова. – М.: Радио и связь, 1988.
2. Андрушко Л.М., Федоров Н.Д. Электронные и квантовые приборы СВЧ. – М.: Радио и связь, 1981.
3. Панфилов И.Г. Приборы СВЧ и оптического диапазонов. – М.: Радио и связь, 1983.
4. Рожанский В.Б. Электронные приборы СВЧ: Учеб. пособие. – Мн.: БГУИР, 1997.
5. Березин В.М. и др. Электронные СВЧ приборы. – М.: Радио и связь, 1981.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАМПЫ ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ О-ТИПА

Цель работы

Изучить устройство и принцип действия лампы обратной волны (ЛОВ), экспериментально исследовать основные характеристики и параметры ЛОВ.

Краткие сведения из теории ЛОВ

Лампы обратной волны О-типа (ЛОВ) являются электронными приборами длительного взаимодействия электронного потока с электромагнитной волной, распространяющейся по замедляющей системе, и представляют собой маломощные генераторы СВЧ-колебаний с электронной перестройкой частоты в широких пределах (рис.4.1).

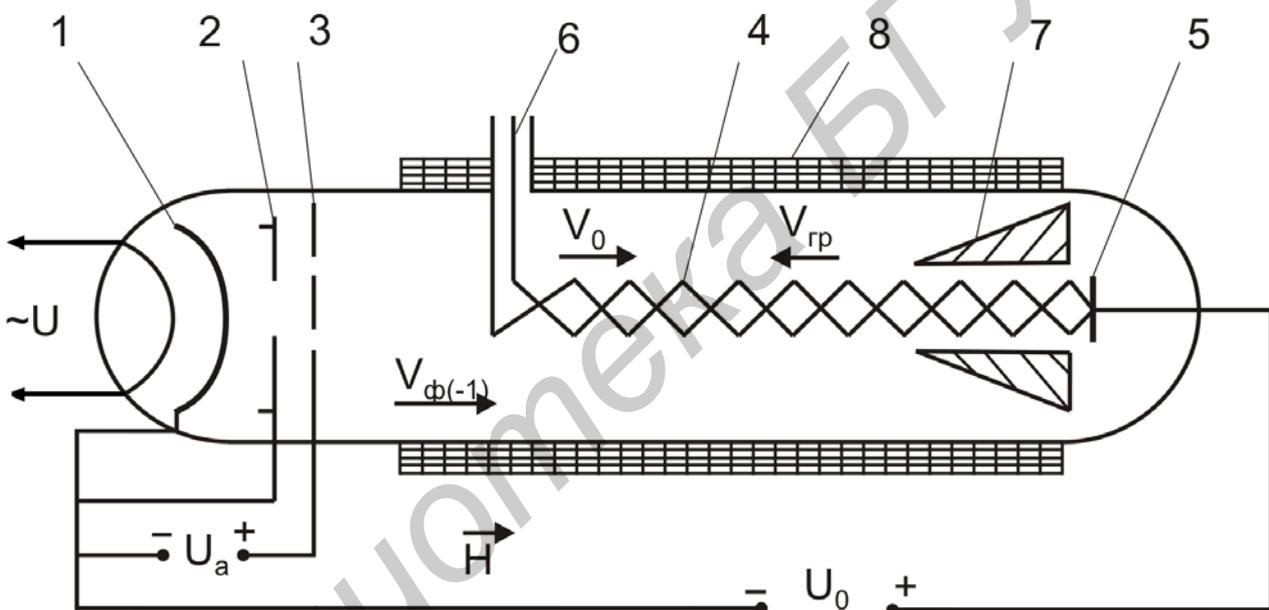


Рис.4.1. Схема устройства и питания лампы обратной волны О-типа:

- 1 – катод; 2 – управляющий электрод; 3 – первый анод;
- 4 – замедляющая система (спираль); 5 – коллектор; 6 – вывод СВЧ-энергии; 7 – поглотитель; 8 – фокусирующая система (постоянный магнит или соленоид)

К первому аноду прикладывается положительное относительно катода напряжение U_a порядка нескольких десятков или сотен вольт, позволяющее регулировать величину тока коллектора.

Управляющий электрод обычно соединяют с катодом. На замедляющую систему и коллектор подается ускоряющее напряжение U_0 порядка нескольких сотен или тысяч вольт, за счет изменения которого осуществляется перестройка частоты генерации ЛОВ.

Флуктуации электронного потока наводят в замедляющей системе слабые колебания, возникшая при этом электромагнитная волна может быть представлена суммой пространственных гармоник. Фазовая скорость одной из этих гармоник может удовлетворять условию синхронизма:

$$V_{\text{фн}} \approx V_0. \quad (4.1)$$

Замедляющие системы ламп обратной волны выполняют таким образом, чтобы амплитуда первой обратной гармоники в замедляющей системе была максимальной.

Взаимодействуя с полем обратной гармоники, электроны начнут группироваться в сгустки и отдавать свою энергию полю волны. Амплитуда волны будет нарастать, эффект группирования электронов и передачи энергии волне увеличится ещё более и т.д.

Вектор групповой скорости волны противоположен по направлению векторам скорости электронов и фазовой скорости обратной гармоники (см. рис.4.1). Использование электронного потока, движущегося навстречу потоку электромагнитной энергии, обеспечивает в ЛОВ положительную обратную связь.

Чтобы в лампе обратной волны установились стационарные колебания, необходимо выполнение двух условий: баланса фаз и баланса амплитуд.

Для лампы обратной волны баланс фаз можно записать в виде

$$\frac{\omega \ell}{V_{\text{ф}(-1)}} - \frac{\omega \ell}{V_0} = \pi(2n + 1), \quad (4.2)$$

где ℓ - длина замедляющей системы;

$n = 0, 1, 2, 3, \dots$ - номер зоны (порядка) генерации;

V_0 - скорость электронов;

$V_{\text{ф}(-1)}$ - фазовая скорость первой обратной гармоники.

При $n=0$ в лампе возникнут колебания основного вида. Для их возбуждения необходимо наименьшее значение скорости электронов V_0 , а следовательно, наименьшая величина ускоряющего напряжения U_0 . Генерация колебаний в ЛОВ начинается при определённом минимальном значении тока коллектора I_0 , которое называется пусковым. При этом выполняется условие баланса амплитуд, которое для ЛОВ заключается в следующем: энергия, получаемая электромагнитной волной, в результате взаимодействия с электронным потоком должна быть достаточной для покрытия всех видов потерь и поддержания процессов модуляции электронного потока.

Для колебаний основного вида величина пускового тока

$$I_{n0} = \frac{0,124U_0}{R_c N^3}, \quad (4.3)$$

где U_0 – ускоряющее напряжение;

R_c – сопротивление связи замедляющей системы для первой обратной гармоники;

N – отношение длины замедляющей системы ℓ к длине волны в замедляющей системе λ_c .

Для самовозбуждения в ЛОВ колебаний основного порядка необходимо, чтобы выполнялось условие

$$I_{n1} > I_0 > 2 \dots 5 I_{n0}, \quad (4.4)$$

где I_{n1} – пусковой ток для колебаний первого порядка;

I_0 – ток коллектора.

Одним из наиболее ценных свойств лампы обратной волны является возможность перестройки частоты генерации за счёт изменения электрического режима работы лампы.

Длина волны генерируемых колебаний определяется выражением

$$\lambda = \frac{2\ell}{2n+1} \left(\frac{c}{V_{\phi(-1)}} - \frac{505}{U_0} \right). \quad (4.5)$$

Из этого выражения следует, что с изменением ускоряющего напряжения U_0 и, следовательно, скорости электронов V_0 меняется длина волны генерируемых колебаний.

Так как замедляющая система для всех обратных гармоник обладает аномальной дисперсией, т.е. абсолютная величина фазовой скорости возрастает с ростом частоты, то увеличение ускоряющего напряжения вызовет увеличение частоты генерируемых колебаний. Зависимость частоты от ускоряющего напряжения (рис.4.2) является нелинейной, закон изменения частоты обусловлен дисперсией замедляющей системы. Ширину рабочего диапазона электронной перестройки принято оценивать коэффициентом перекрытия диапазона:

$$\delta = \frac{f_{\max}}{f_{\min}}, \quad (4.6)$$

где f_{\max} , f_{\min} – максимальная и минимальная граничные частоты диапазона, на которых выходная мощность ЛОВ уменьшается вдвое по сравнению с максимальным значением.

При коаксиальном выходе энергии ЛОВ имеют коэффициент перекрытия диапазона $\delta = 2$, а с волноводным выходом – $\delta = 1,5 \dots 1,6$.

Для оценки зависимости частоты от напряжения U_0 используют значение крутизны электронной перестройки частоты S_e :

$$S_e = \frac{df}{dU_0}. \quad (4.7)$$

Крутизна электронной перестройки частоты уменьшается с ростом U_0 (см. рис.4.2). Для ЛОВ сантиметрового диапазона крутизна – не больше нескольких мегагерц на вольт, а для миллиметрового – десятки мегагерц на вольт.

Выходная мощность ЛОВ зависит от ускоряющего напряжения U_0 (см. рис.4.2). Немонотонность зависимости связана с наличием отражений от поглотителя и недостаточностью согласования вывода энергии с замедляющей системой.

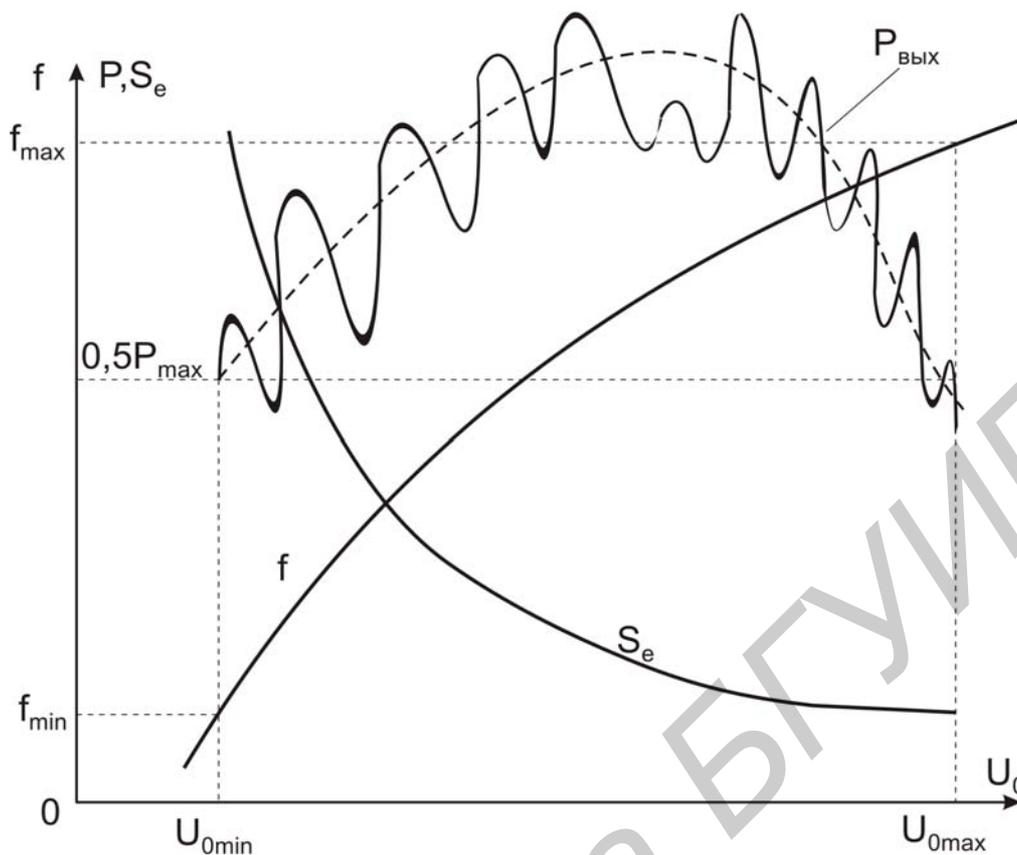


Рис.4.2. Зависимость выходной мощности, частоты генерации крутизны электронной перестройки от напряжения U_0

Выходная мощность ЛОВ может быть оценена выражением

$$P_{\text{вых}} = \frac{2}{\pi N} U_0 (I_0 - I_{n0}), \quad (4.8)$$

где $N = \frac{\ell}{\lambda c}$ – электрическая длина замедляющей системы;

I_0 – ток луча (коллектора);

I_{n0} – пусковой ток.

С ростом U_0 выходная мощность вначале растёт, так как растёт подводимая к ЛОВ мощность постоянного тока $P=U_0 I_0$, а затем в связи с увеличением I_{n0} рост выходной мощности уменьшается, возможно наступление спада мощности.

Лампы обратной волны О-типа обычно используются для генерирования небольших мощностей – от милливатт до нескольких ватт в диапазоне 0,5...1000 ГГц. Следует отметить, что ЛОВ является единственным видом электровакуумных приборов, позволяющих получить колебания в субмиллиметровом диапазоне волн, с достаточным для практики уровнем выходной мощности.

Выходную мощность ЛОВ можно регулировать изменением тока луча, который зависит от напряжения анода. При этом наблюдается изменение частоты (электронное смещение частоты). При увеличении тока I_0 в ЛОВ наблюдается уменьшение частоты.

Электронный коэффициент полезного действия ЛОВ О-типа не превышает нескольких процентов.

Теоретическая величина электронного КПД определяется соотношением

$$\eta_e = 0.84C, \quad (4.9)$$

где $C = \sqrt[3]{\frac{R_c I_0}{4U_0}}$ – параметр усиления;

R_c – сопротивление связи замедляющей системы;

I_0 – ток луча;

U_0 – ускоряющее напряжение.

Лампы обратной волны применяются в качестве гетеродинов радиолокационных и связанных приёмников, маломощных генераторов в широкодиапазонной аппаратуре радиотехнической разведки и радиопротиводействия, а также в измерительной аппаратуре в качестве свип-генераторов.

В настоящее время ЛОВ выпускаются в основном для замены вышедших из строя в уже существующей аппаратуре. Новые типы ЛОВ разрабатываются только для субмиллиметрового диапазона. На более низких частотах ЛОВ заменяются полупроводниковыми приборами СВЧ.

Измерительная установка для исследования ЛОВ О-типа

Схема измерительной установки для исследования ЛОВ-О с волноводным выходом приведена на рис.4.3. В лабораторной работе исследуется один из видов ЛОВ сантиметрового диапазона волн типа ОВ-21.

Генерируемая лампой СВЧ мощность измеряется с помощью измерителя мощности типа МЗ–10, который подключён к выходу лампы через аттенюатор ДЗ–34А. Частота генерируемых колебаний измеряется с помощью резонансного частотомера типа Ч2–31 проходного типа. Питание ЛОВ осуществляется от стабилизированного источника питания с регулируемыми напряжениями на выходе. Контроль напряжений и токов электродов ЛОВ производится с помощью стрелочных измерительных приборов.

Источник питания ЛОВ включается тумблером «Сеть». Предварительно необходимо установить ручки регулировок питающих напряжений в крайнее левое положение, тумблер «Модуляция» должен быть в выключенном положении.

После 3-5 минут прогрева включением тумблера «ЛОВ» на лампу подаются напряжения коллектора и первого анода. Напряжение на первом аноде устанавливается не более величины, при которой достигается максимально допустимый ток коллектора.

Для наблюдения на экране осциллографа зависимости выходной мощности от ускоряющего напряжения используют режим модуляции коллекторного напряжения. Чтобы наблюдать указанную зависимость, необходимо включить тумблер «Модуляция», предварительно установив напряжение коллектора $U_0 = 700$ В. Амплитуда модулирующего напряжения равна 550 В, поэтому напряжение на коллекторе и соединенной с ним замедляющей системе будет из-

меняться в пределах 150...1250 В с частотой сети, что приведет к соответствующему изменению частоты и мощности генерируемых колебаний.

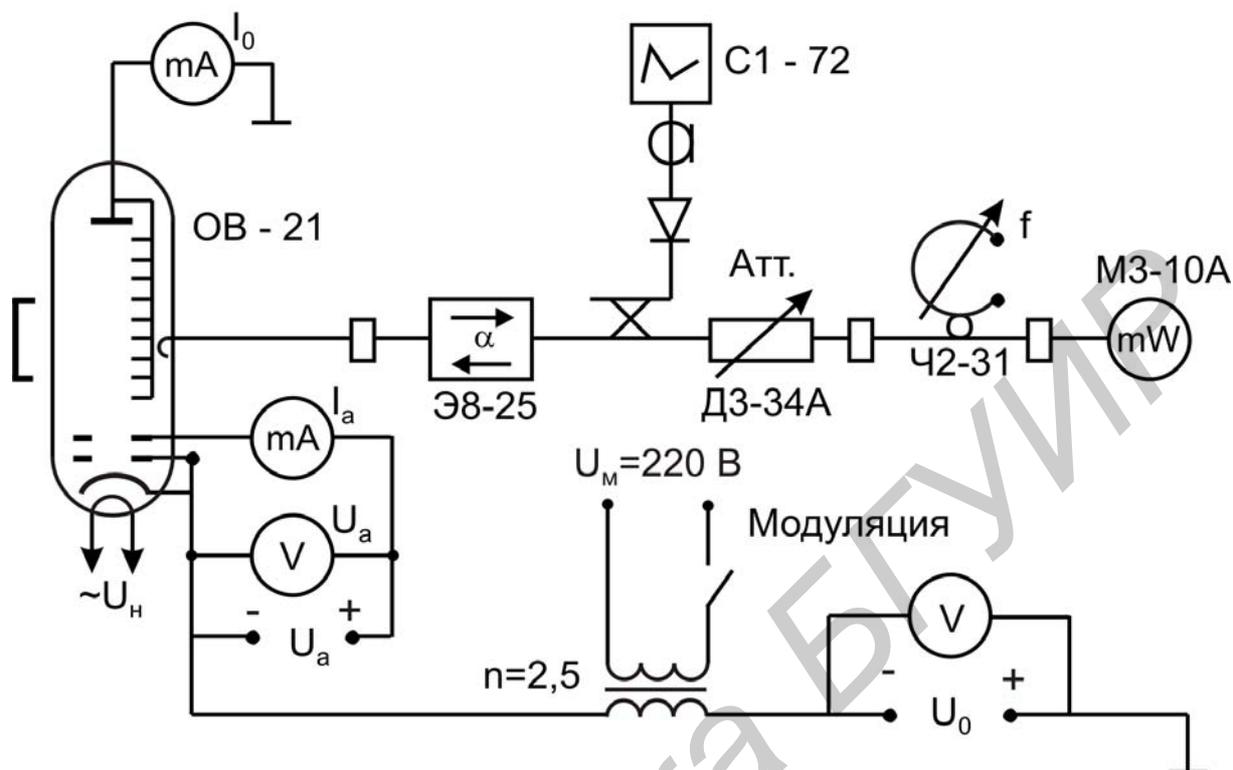


Рис.4.3.Схема измерительной установки исследования ЛОВ О-типа

Часть генерируемой мощности через направленный ответвитель поступает на детекторную секцию, с которой снимается сигнал, пропорциональный мощности генерируемых колебаний, подаваемый на вход осциллографа.

Если развертка осциллографа синхронизирована с частотой сети, то изображение на его экране будет представлять в некотором масштабе зависимость выходной мощности ЛОВ от напряжения коллектора, т.е. зону генерации ЛОВ.

Характеристики ЛОВ следует снимать при выключенной модуляции коллекторного напряжения.

Задание и порядок выполнения работы

1. Согласно инструкции по эксплуатации подготовить к работе измерительные приборы.
2. Включить источник питания ЛОВ, установить рабочий режим лампы.
3. Получить на экране осциллографа изображение зоны генерации ЛОВ.
4. Снять зависимости выходной мощности, частоты и тока коллектора от напряжения коллектора U_0 :

$$P = f(U_0), f = F(U_0), I_0 = f(U_0) \text{ при } U_a = \text{const.}$$

U_0 изменять в пределах 150...1250 В с заданным шагом.

5. Снять зависимости мощности и частоты генерируемых ЛОВ-колебаний от тока коллектора I_0 :

$P = f(I_0)$, $f = \varphi(U_0)$, при $U_0 = \text{const}$.

Значение U_0 выбирать произвольно. Величину тока коллектора изменять, меняя напряжение первого анода U_a ; при этом снять зависимость тока коллектора I_0 от напряжения первого анода U_a :

$I_0 = f(U_a)$ при $U_0 = \text{const}$.

6. Снять зависимость пускового тока ЛОВ от напряжения коллектора:

$I_{0n} = f(U_0)$.

Для этого, изменяя напряжение анода от нуля, найти для различных значений напряжения коллектора минимальные значения тока коллектора I_{0n} , при которых наблюдается появление выходной мощности ЛОВ. Высокочастотный переключатель измерителя мощности должен находиться в положении 1.

7. По результатам измерений построить следующие зависимости:

$P = f(U_0)$; $f = F(U_0)$; $I_{0n} = f(U_0)$; $Se = f(U_0)$;

$I_0 = f(U_a)$; $I_0 = f(U_0)$;

$P = f(I_0)$; $f = \varphi(I_0)$; $P = f(U_0)$;

$\eta_e = \varphi(f)$, где η_e – электронный КПД $\eta_e = \frac{P}{I_0 U_0} \cdot 100\%$.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Паспортные данные исследуемой ЛОВ.
3. Схема измерительной установки.
4. Таблицы с результатами измерений, графики полученных зависимостей.
5. Краткие выводы.

Контрольные вопросы

1. Устройство ЛОВ О-типа.
2. Основные параметры и характеристики ЛОВ О-типа.
3. Электронная перестройка в ЛОВ О-типа.
4. Условия баланса фаз и баланса мощностей в ЛОВ О-типа.
5. Измерительная установка, порядок выполнения работы.

Литература

1. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника: Учеб. пособие для вузов /Под ред. Н.Д. Федорова. – М.: Радио и связь, 1988.
2. Андрушко Л.М., Федоров Н.Д. Электронные и квантовые приборы СВЧ. – М.: Радио и связь, 1981.
3. Панфилов И.Г. Приборы СВЧ и оптического диапазонов. – М.: Радио и связь, 1983.
4. Рожанский В.Б. Электронные приборы СВЧ: Учеб. пособие. – Мн.: БГУИР, 1997.
5. Березин В.М. и др. Электронные СВЧ приборы. – М.: Радио и связь, 1981.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОРЕЗОНАТОРНОГО МАГНЕТРОНА

Цель работы

Изучить устройство и принцип действия многорезонаторного магнетрона, экспериментально исследовать основные характеристики и параметры магнетрона.

Краткие сведения из теории многорезонаторного магнетрона

Многорезонаторными магнетронами называют электронные приборы, в которых образование электронного потока и его взаимодействие с переменными электрическими полями ряда колебательных контуров – резонаторов происходит в стационарных скрещенных электрическом и магнитном полях.

Устройство типичного многорезонаторного магнетрона показано схематически на рис.5.1.

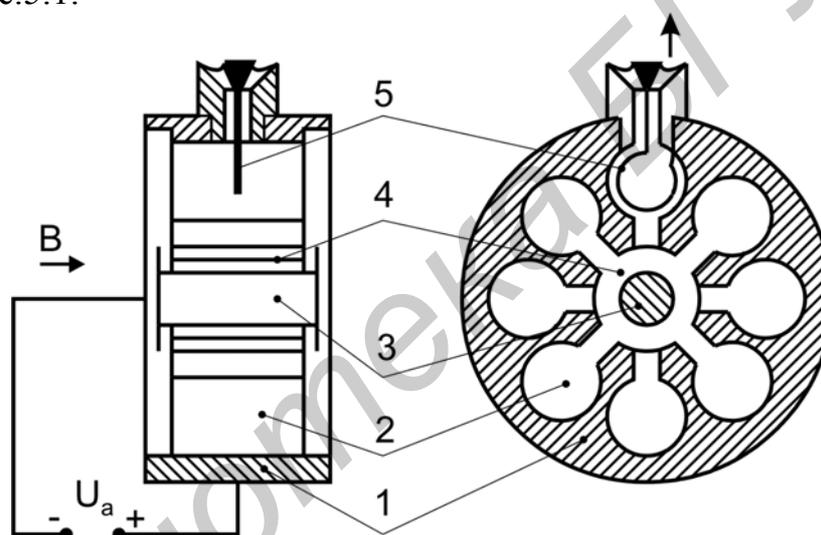


Рис.5.1. Схема устройства и питания многорезонаторного магнетрона

Анод магнетрона 1 представляет собой сплошной цилиндрический медный блок, разделенный на сегменты продольными щелями. Эти щели входят в состав полых резонаторов 2, расположенных на равных расстояниях по окружности анода. Катод магнетрона 3 имеет цилиндрическую форму и расположен внутри анода вдоль его оси.

Пространство 4 между катодом и анодным блоком называется пространством взаимодействия.

Магнетрон помещается в постоянное магнитное поле, направленное вдоль оси прибора, которое создается постоянным магнитом. Постоянное или импульсное анодное напряжение U_a , прикладываемое между катодом и анодом, создает электрическое поле, перпендикулярное к направлению магнитного поля.

Вывод СВЧ-энергии осуществляется обычно от одного из резонаторов, например, с помощью петли 5 и коаксиальной линии.

Работа многорезонаторного магнетрона основана на длительном взаимодействии электронов с электрическим полем резонаторов.

Электроны, эмиттируемые катодом магнетрона, подвергаются действию скрещенных постоянных электрического и магнитного полей и переменного СВЧ-поля системы резонаторов.

В случае отсутствия СВЧ-поля (статический режим) электроны, двигаясь ускоренно под действием анодного напряжения, пересекают силовые линии магнитного поля. При этом их траектории искривляются и в зависимости от соотношения электрического и магнитного полей могут иметь различный вид, как показано на рис.5.2, а.

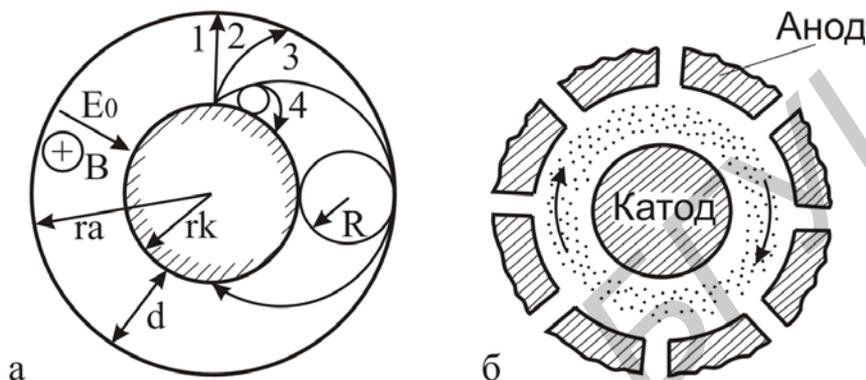


Рис.5.2. Возможные траектории электронов в магнетроне и электронное облако

Траектория 1 соответствует случаю, когда индукция магнитного поля $B = 0$. При увеличении магнитного поля траектории электронов искривляются (кривые 2 - 4) и начиная с некоторого значения индукции магнитного поля, называемого критическим ($B_{кр}$), электроны не попадают на анод, а возвращаются к катоду.

При этом анодный ток магнетрона резко падает. Такой режим работы магнетрона называется критическим.

Как показывает расчет, траектории электронов в магнетроне по форме близки к эпициклоиде - кривой, которую описывает точка окружности, катящейся без скольжения по поверхности катода (траектории 3-4 на рис. 5.2, а).

Так как электроны эмиттируются катодом непрерывно, то в пространстве взаимодействия образуется электронное облако, вращающееся вокруг катода (рис. 5.2, б). Средняя окружная скорость электронов в облаке равна

$$V = \frac{E}{B} \quad (5.1)$$

и называется переносной скоростью электронов.

Искривление траекторий электронов магнитным полем вызывает увеличение времени пролета электронов от катода к аноду, в результате чего анодный ток магнетрона зависит от величины индукции магнитного поля (рис. 5.3, а).

Характеристики магнетрона, показывающие зависимость анодного тока от анодного напряжения, представлены на рис.5.3, б; пунктиром изображена характеристика при $B = 0$, идущая согласно закону степени $3/2$.

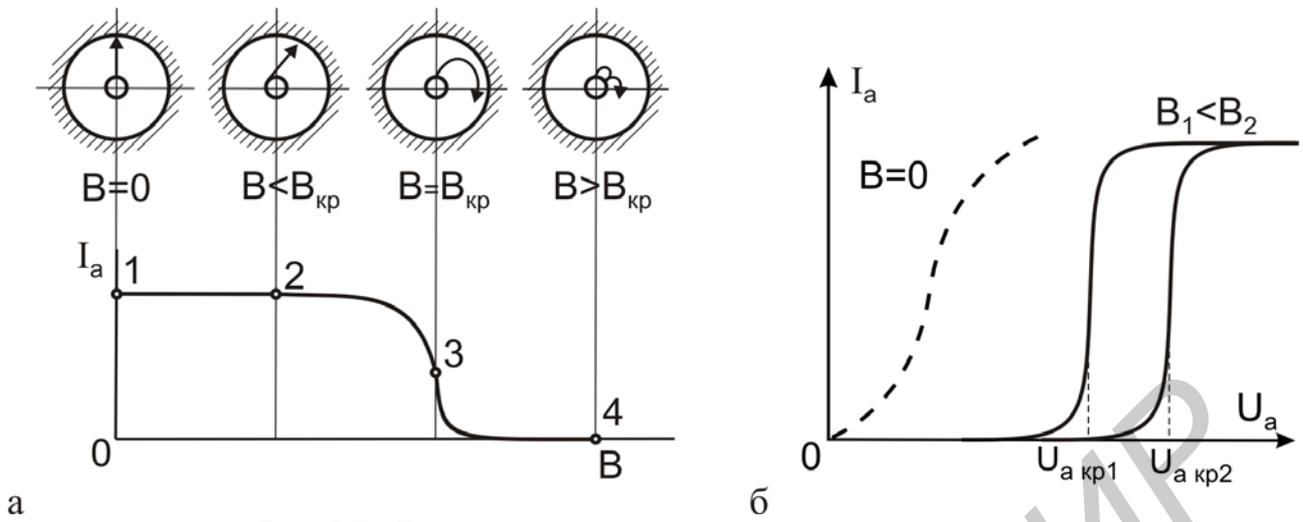


Рис.5.3. Статические характеристики магнетрона

Критический режим магнетрона может быть достигнут путем изменения анодного напряжения при постоянном по величине магнитном поле. При заданной величине индукции магнитного поля критическое анодное напряжение можно найти из выражения

$$U_{\text{акр}} = \frac{eB^2 r_a^2}{8m} \left[1 - \left(\frac{r_a}{r_k} \right)^2 \right]^2, \quad (5.2)$$

где r_k - радиус катода;

r_a - радиус анода;

e - заряд электрона;

m - масса электрона;

B - индукция магнитного поля.

Зависимость $U_{\text{акр}} = f(B)$ называется параболой критического режима (рис.5.4).

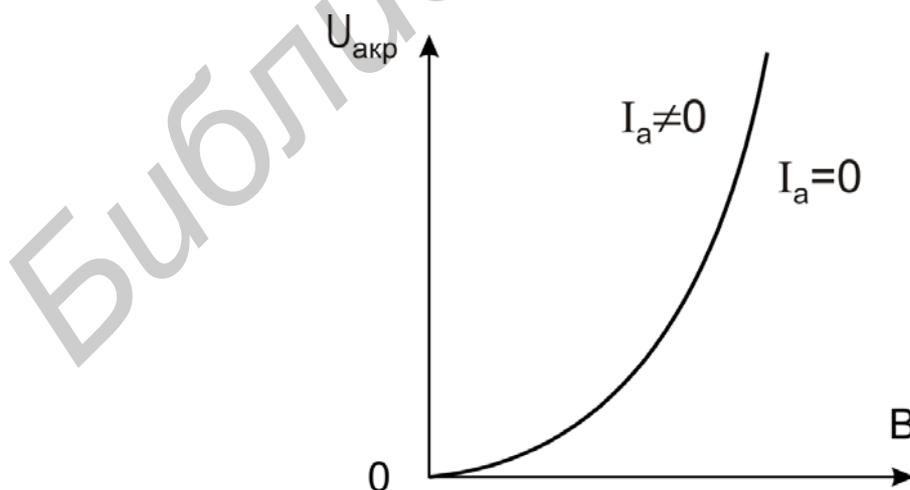


Рис.5.4. Парабола критического режима магнетрона

Важнейшей частью магнетрона является его резонансная система. Она выполняет следующие основные функции: во-первых, определяет частоту генерируемых колебаний, во-вторых, обеспечивает взаимодействие электронов с СВЧ-полем и, в-третьих, передает полученную в результате этого взаимодействия энергию СВЧ-колебаний в нагрузку.

Как видно из рис.5.1, резонансная система с анодным блоком представляет собой цепочку из N объемных резонаторов, свернутую в кольцо. Вообще говоря, в такой системе связанных резонаторов может возникнуть N различных видов колебаний. Однако в замкнутой системе из N резонаторов существуют только те колебания, для которых суммарная разность фаз при обходе по окружности анодного блока равна:

$$\Phi = 2\pi n, \quad (5.3)$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$ определяет число целых периодов высокочастотного колебания, укладываемых вдоль окружности анодного блока.

Иначе говоря, если волна в некоторой точке анодного блока характеризовалась фазой φ , то при распространении вдоль цепочки резонаторов она должна возвратиться в эту точку с той же фазой. В противном случае в результате интерференции волна уничтожится.

Разность фаз колебаний в соседних резонаторах, следовательно, должна быть равна:

$$\varphi = \frac{2\pi n}{N}. \quad (5.4)$$

Наиболее важным для работы магнетрона является случай, когда разность фаз φ равна π . Такой вид колебаний в резонансной системе называется противофазным или π -видом и имеет место при значении $n = \frac{N}{2}$.

При колебаниях π -вида достигается наиболее высокий КПД магнетрона. Поэтому анодные блоки многорезонаторных магнетронов обязательно содержат четное число резонаторов.

Для возбуждения и поддержания колебаний в магнетроне необходимо, чтобы электроны отдавали полю резонаторов большую энергию, чем они получают от него.

Такую направленную передачу энергии можно осуществить, если электронный поток взаимодействует с переменным электрическим полем не непрерывно, а лишь в те моменты времени, когда поле является для электронов тормозящим. Для этого электронный поток должен быть сгруппирован в сгустки, время прохождения которых вблизи щели резонатора совпадало бы со временем существования там тормозящего поля.

Группирование потока электронов в магнетроне осуществляется переменным электрическим полем резонаторов.

Электрон A , вылетевший с поверхности катода в момент времени $t = 0$, описывая дугу эпициклоиды, оказывается вблизи переменного поля ближайшего резонатора, которое в данный момент является для него ускоряющим (рис.5.5).

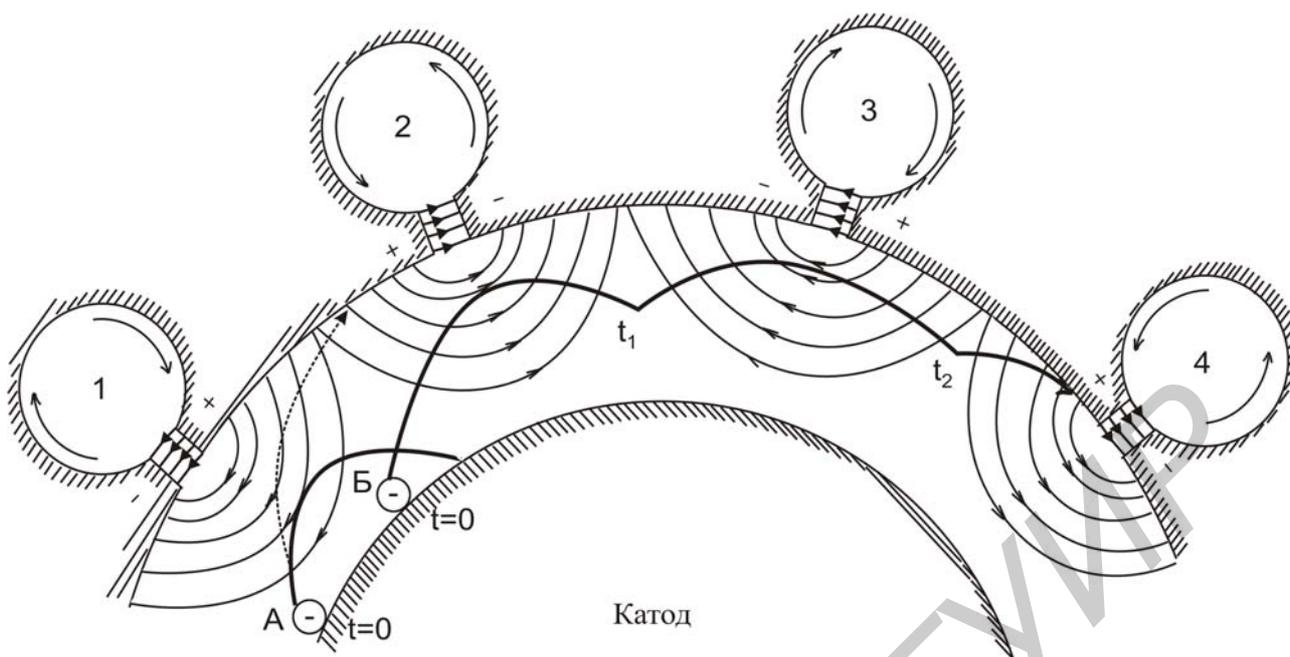


Рис.5.5. Движение электронов в магнетроне

Проходя верхнюю часть дуги, он получает дополнительную энергию и оказывается у поверхности катода с некоторым запасом кинетической энергии, которую рассеивает в виде тепла при соударении с поверхностью катода.

Количество таких электронов составляет примерно половину всех электронов, покидающих катод в каждый момент времени. Возвращающиеся электроны дополнительно разогревают катод, а также создают вторичную эмиссию электронов с поверхности катода. Поэтому магнетроны средней и большей мощности после возникновения колебаний работают с выключенным накалом катода, в магнетронах малой мощности после запуска уменьшают напряжение накала.

Электрон Б, вылетевший из катода в момент времени $t = 0$, попадает в тормозящее переменное электрическое поле близлежащего резонатора и отдает часть энергии, приобретенной в постоянном электрическом поле.

Такой электрон, потеряв скорость в момент времени t_1 , под действием постоянного поля анода и магнитного поля снова начнет движение по эпициклоиде. Если путь электрона до щели следующего резонатора займет время, равное половине периода высокочастотных колебаний, то электрон и у этой щели попадет в тормозящее поле и отдаст часть своей энергии.

В момент времени t_2 скорость электрона вновь окажется равной нулю и он будет находиться ближе к аноду, чем в момент времени t_1 . Описывая петлеобразную кривую, электрон достигает поверхности анода. Число «петель» в траектории зависит от анодного напряжения и интенсивности переменного электрического поля.

Таким образом, на анод, описывая петлеобразные траектории, устремляются лишь электроны, вылетевшие с участков катода, против которых в данный момент времени существует тормозящее поле; в магнетроне образуются электронные «спицы» (рис.5.6).

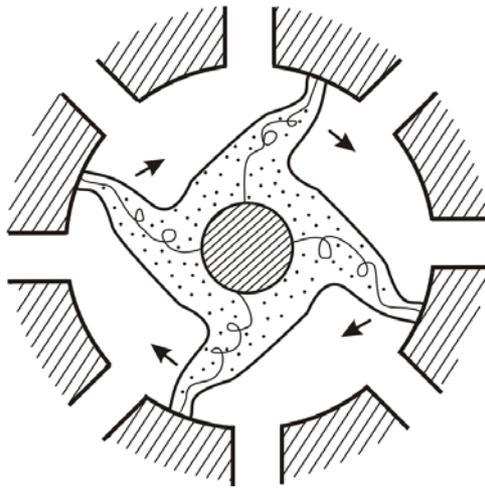


Рис.5.6. Электронные «спицы» в 8-резонаторном магнетроне

Число таких спиц при π -виде колебаний равно половине числа резонаторов.

При взаимодействии электронов с переменным электрическим полем происходит дальнейшее уплотнение электронных спиц.

Группировка электронов в спицах обусловлена взаимодействием электронов с радиальной составляющей высокочастотного поля. Как видно из рис.5.7, электрон 1 ускоряется радиальной составляющей поля резонатора и под влиянием силы, возникающей в присутствии магнитного поля, приобретает дополнительную скорость в тангенциальном направлении; тангенциальная скорость электрона 2 изменяться не будет, поскольку радиальная составляющая поля для этого электрона равна нулю.

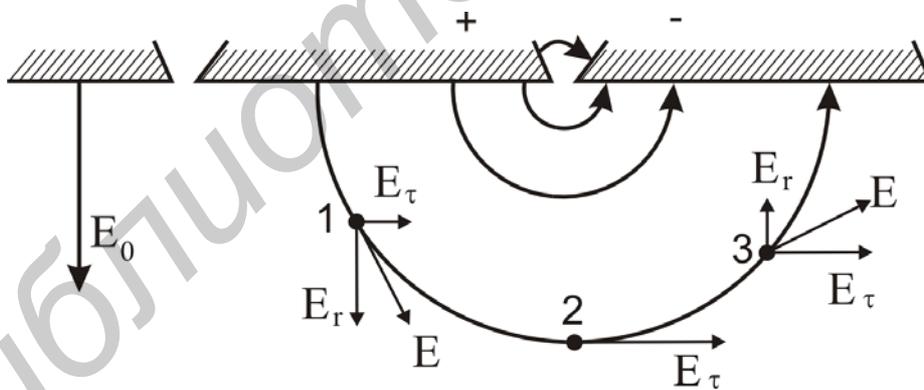


Рис.5.7. Группирование электронов в спице

Радиальная составляющая переменного поля резонатора для электрона 3 направлена против направления постоянного поля анода, в результате чего движение электрона в тангенциальном направлении будет замедляться.

Таким образом, в результате взаимодействия электронов с переменным электрическим полем происходит группирование (фазовая фокусировка) электронов внутри спицы вокруг центрального электрона 2.

Поскольку через каждые полпериода знаки высокочастотных потенциалов на сегментах анодного блока меняются на обратные, электронные спицы должны перемещаться от одного резонатора к другому - вращаться в пространстве взаимодействия вслед за перемещающимся тормозящим полем.

Электроны, образующие спицу, одновременно с вращательным движением, описывая витки эпициклоиды, поднимаются от катода и постепенно уходят на анод. По мере вращения спица пополняется электронами с новых участков катода; электроны в спицах непрерывно перемещаются в радиальном направлении от катода к аноду. Эта составляющая движения электронов сопровождается уменьшением их потенциальной энергии.

Энергия электронов передается электромагнитному полю резонаторов, взаимодействие с электрической составляющей которого и служит причиной рассмотренного движения электронов.

Однако условия такого движения электронов могут быть удовлетворены лишь при определенных величинах анодного напряжения U_a и индукции магнитного поля B .

Если анодное напряжение магнетрона больше критического, то условия передачи электронами энергии высокочастотному полю не выполняются, так как электроны не описывают петель и практически не взаимодействуют с переменным электрическим полем вблизи щелей резонаторов.

Поэтому рабочие значения анодных напряжений должны лежать ниже параболы критического режима (см. рис.5.4), которая описывается выражением (5.2).

Однако для нормальной работы магнетрона недостаточно движения электронов по петлеобразным траекториям. Необходимо, кроме того, добиться вращения спиц с определенной угловой частотой, синхронной с изменением фазы сверхвысокочастотных колебаний. Для этого величина анодного напряжения при π виде колебаний должна быть равна

$$U_c = \frac{2m\pi^2 c^2}{e} \left(\frac{r_a}{N\lambda} \right)^2, \quad (5.5)$$

где r_a - радиус анода;

N - число резонаторов.

Эта величина, называемая потенциалом синхронизации, определяет наименьшее значение анодного напряжения, при котором возможно синхронное вращение электронных спиц.

При движении в тормозящем поле резонатора электроны расходуют значительную часть своей энергии. Эти электроны должны удаляться из пространства взаимодействия. В противном случае такие отработавшие, медленно движущиеся электроны отстанут от спицы, попадут в ускоряющее поле одного из резонаторов и отберут энергию у него. Для того чтобы отработавшие электроны попадали на анод, требуется анодное напряжение несколько выше потенциала синхронизации U_c .

Наименьшее значение анодного напряжения U_n , при котором отработавшие электроны удаляются на анод, называется пороговым, при этом возникает генерация колебаний и появляется анодный ток.

$$U_n = \frac{\pi c}{N\lambda} B(r_a^2 - r_k^2) - U_c. \quad (5.6)$$

Выражения параболы критического режима (5.2), потенциала синхронизации (5.5) и порогового напряжения (5.6) определяют рабочий режим магнетрона.

Эти зависимости, нанесенные на один график, образуют диаграмму рабочих режимов магнетрона (рис.5.8).

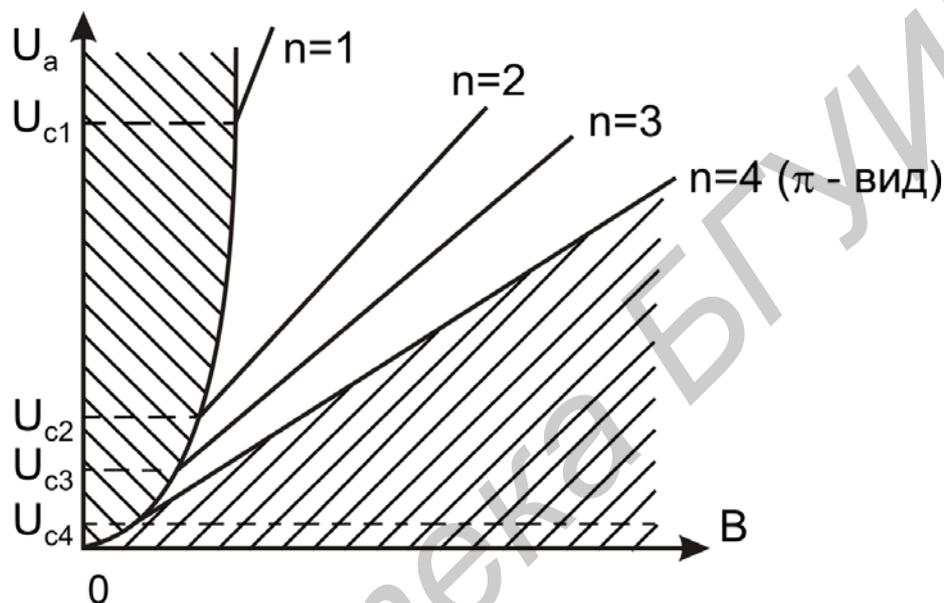


Рис.5.8. Диаграмма рабочих режимов магнетрона

Парабола критического режима определяет на плоскости $B - U_a$ нерабочую область (заштрихована). При значениях B и U_a для любой точки в этой области электроны и магнетрона не описывают петлеобразных траекторий и колебания отсутствуют. Для колебаний π -вида нерабочей областью является также часть плоскости, лежащая ниже прямой порогового напряжения. При этих значениях U_a и B либо не выполняется условие синхронного движения спиц ($U_a < U_c$), либо отработавшие электроны не попадают на анод ($U_c < U_a < U_n$). Для возбуждения колебаний π -вида требуется меньшее анодное напряжение по сравнению с величинами U_a , необходимыми для колебаний других видов.

При значительном превышении порогового напряжения для колебаний π -вида возможен переход на другой вид колебаний, при этом произойдет резкое изменение ("перескок") частоты генерируемых колебаний.

Многорезонаторные магнетроны, как правило, - мощные генераторы СВЧ. Важнейшим параметром магнетрона является величина генерируемой мощности

$$P_{\text{вых}} = \eta \cdot I_a \cdot U_a, \quad (5.7)$$

где η - полный КПД магнетрона.

Полный КПД магнетрона определяется отношением мощности СВЧ-колебаний к мощности, поступающей от источника анодного напряжения.

Потери мощности в магнетроне происходят по двум основным причинам. Во-первых, часть мощности расходуется на омические потери в резонансной системе и выводе энергии. Во-вторых, часть мощности тратится на нагрев анода электронами, что обусловлено значительными остаточными скоростями электронов, попадающих на анод после взаимодействия с высокочастотными полями резонаторов.

Поэтому принято общий КПД магнетрона представлять в виде произведения электронного КПД η_e , учитывающего эффективность взаимодействия электронного потока с высокочастотным полем на КПД резонансной системы η_p :

$$\eta = \eta_e \cdot \eta_p. \quad (5.8)$$

КПД резонансной системы можно считать постоянным и равным приблизительно 80-90% в диапазоне дециметровых волн.

Электронный КПД магнетрона достигает величины 50-70% и более. Типичные значения полного КПД магнетронов составляют от 60-70% на дециметровых волнах до 20-30% в миллиметровом диапазоне. Выходная мощность магнетронов составляет от долей ватта до нескольких десятков киловатт для магнетронов непрерывного действия, для магнетронов импульсного действия – от 10 Вт до 10 мВт.

Электронный КПД, выходная мощность $P_{\text{вых}}$ магнетрона зависят от режима работы, т.е. от анодного напряжения магнитной индукции B , анодного тока I_a .

Так как анодный ток магнетрона при постоянной индукции сильно зависит от анодного напряжения, то рабочий режим магнетрона устанавливают и контролируют по постоянной составляющей анодного тока I_a . При изменении анодного тока магнетрона происходит некоторое изменение частоты генерируемых колебаний. Это явление называется электронным смещением частоты (ЭСЧ). Стабильность частоты генерации по отношению к режиму питания магнетрона характеризуется крутизной электронного смещения частоты:

$$S_{\text{ЭСЧ}} = \frac{df}{dI_a} \left[\frac{\text{мГц}}{\text{А}} \right]. \quad (5.9)$$

Она может составлять несколько десятков мегагерц на ампер или больше.

В качестве характеристик магнетрона принимают зависимости $U_a = f(I_a)$ для постоянных значений B , $P_{\text{вых}}$, η . Обычно линии постоянных значений B , $P_{\text{вых}}$, η изображают на одном графике в координатах $U_a - I_a$. Эти семейства кривых называют рабочими характеристиками магнетрона (рис.5.9).

Выбор режима работы магнетрона производят по рабочим характеристикам так, чтобы обеспечить максимальные мощность и КПД. Различные по назначению магнетроны перекрывают диапазон частот от 300 мГц - 300 ГГц. Различают магнетроны, работающие на фиксированной частоте, и магнетроны, перестраиваемые по частоте в небольшом диапазоне (5 - 10%) механическим изменением емкости или индуктивности резонаторов.

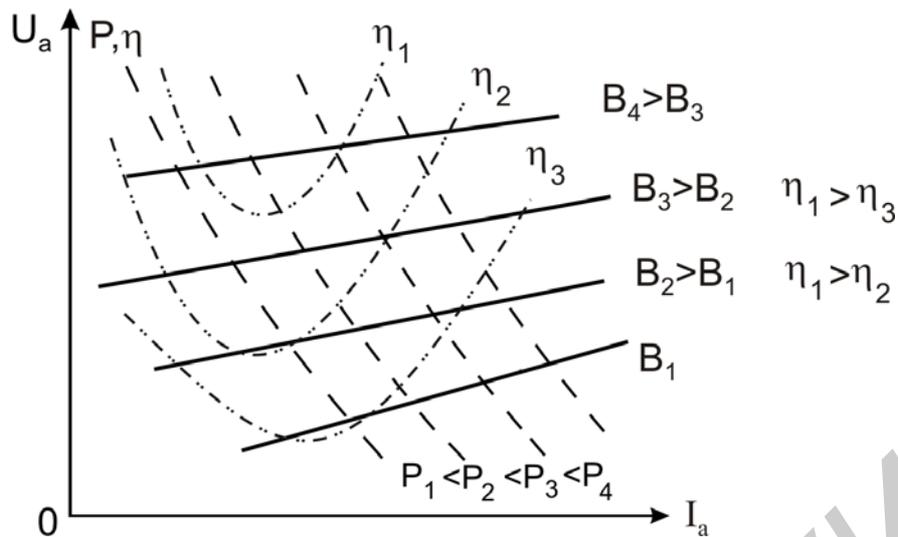


Рис.5.9. Рабочие характеристики магнетрона

Магнетроны импульсного режима используются в передатчиках радиолокационных станций, а магнетроны непрерывного режима – в установках СВЧ-нагрева промышленного и бытового назначения.

Измерительная установка для исследования магнетрона

Схема измерительной установки приведена на рис.5.10. В работе исследуется многорезонаторный магнетрон непрерывного действия сантиметрового диапазона волн типа М857. В исследуемом магнетроне имеются два волноводных выхода СВЧ-мощности. К одному из выходов подключена короткозамкнутая СВЧ-линия, изменением длины которой можно регулировать величину реактивной нагрузки магнетрона. Мощность СВЧ-колебаний с другого выхода магнетрона через фиксированный аттенюатор поступает на измеритель мощности МЗ-10А и резонансный частотомер Ч2-32.

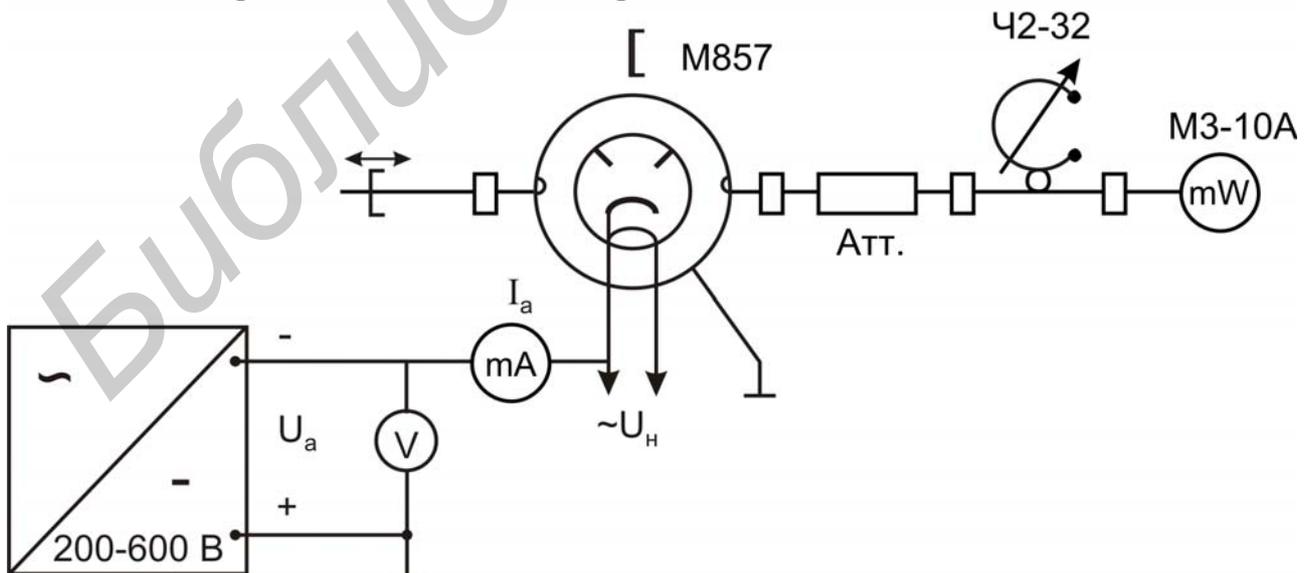


Рис.5.10. Схема измерительной установки для исследования многорезонаторного магнетрона

Затухание аттенюатора зависит от частоты и определяется по графику, расположенному на его корпусе.

Анодное напряжение на магнетрон подается от регулируемого источника постоянного тока.

Контроль режима магнетрона производится с помощью включенных в анодную цепь вольтметра и миллиамперметра.

Для увеличения точности измерений анодного напряжения используется вольтметр, у которого ноль шкалы может быть смещен влево, начало шкалы соответствует напряжению 500 В. Величина магнитной индукции в магнетроне может быть изменена с помощью магнитного шунта - стальной пластины, устанавливаемой между полюсами постоянного магнита магнетрона.

Включать магнетрон рекомендуется в приведенной ниже последовательности.

Тумблером "Сеть" включить источник питания магнетрона, предварительно установив ручку регулировки анодного тока в крайнее левое положение.

После прогрева магнетрона в течение 1-2 минут включить тумблер "Магнетрон" и установить паспортное значение анодного напряжения (магнитный шунт должен быть убран).

Проверить соответствие анодного тока магнетрона выходной мощности и частоты паспортным значениям.

При выполнении работы не следует допускать увеличения анодного тока выше допустимого значения, в перерывах между измерениями необходимо выключать анодное напряжение тумблером "Магнетрон".

Задание и порядок выполнения работы

1. Согласно инструкциям по эксплуатации подготовить к работе измерительные приборы.
2. Включить источник питания, установить рабочий режим магнетрона.
3. Снять зависимость выходной мощности, анодного тока магнетрона от напряжения анода:

$$P = f(I_a), I_a = f(U_a) \text{ при } B = \text{const.}$$

Измерения провести для двух значений индукции.

Примечание. Зависимость анодного тока и выходной мощности от анодного напряжения представляет собой разрывную функцию, поэтому целесообразно вначале просмотреть вид характеристик магнетрона, изменяя анодное напряжение, при этом отметить значения анодного напряжения, при которых происходят скачки тока и мощности. Зависимость выходной мощности и тока магнетрона от анодного напряжения может получиться разной; при различных направлениях изменения анодного напряжения в силу различных начальных условий возбуждения колебаний тех или иных видов, поэтому при необходимости уточнить значение тока или мощности следует значительно снизить напряжение, а затем вновь установить напряжение проверяемой точки.

4. Определить зависимость частоты колебаний магнетрона от величины анодного тока при номинальном значении магнитной индукции (без магнитного шунта) $f = F(I_a)$ при $V = V_{ном}$.

Снятие зависимости производится в пределах одного вида колебаний.

5. Снять зависимость частоты и мощности генерируемых колебаний от положения короткозамыкателя линии, включенной на выходе магнетрона: $P = f(\ell)$, при паспортных значениях напряжения анода и индукции.

6. По результатам измерений рассчитать и построить зависимость КПД магнетрона от анодного тока:

$$\eta = f(I_a),$$

где $\eta = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{U_a I_a} \cdot 100\%$.

7. Рассчитать и построить графики параболы критического режима, пороговой прямой для заданных значений параметров пространства взаимодействия магнетрона.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема измерительной установки.
3. Результаты измерений и вычислений, графики полученных зависимостей.
4. Краткие выводы.

Контрольные вопросы

1. Устройство, принцип действия, назначение многорезонаторного магнетрона.
2. Объяснить процесс группирования электронов в магнетроне.
3. Статические характеристики магнетрона.
4. Технические характеристики и параметры магнетронов.
5. Элементы конструкции магнетрона.

Литература

1. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника: Учеб. пособие для вузов /Под ред. Н.Д. Федорова. – М.: Радио и связь, 1988.
2. Андрушко Л.М., Федоров Н.Д. Электронные и квантовые приборы СВЧ. – М.: Радио и связь, 1981.
3. Панфилов И.Г. Приборы СВЧ и оптического диапазонов. – М.: Радио и связь, 1983.
4. Рожанский В.Б. Электронные приборы СВЧ: Учеб. пособие. – Мн.: БГУИР, 1997.
5. Березин В.М. и др. Электронные СВЧ приборы. – М.: Радио и связь, 1981.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ МИТРОНА

Цель работы

Изучить устройство, принцип действия митрона, экспериментально исследовать основные характеристики и параметры митрона.

Краткие теоретические сведения

Митроном называется генератор магнетронного типа, обладающий широким диапазоном электронной перестройки частоты (рис. 6.1).

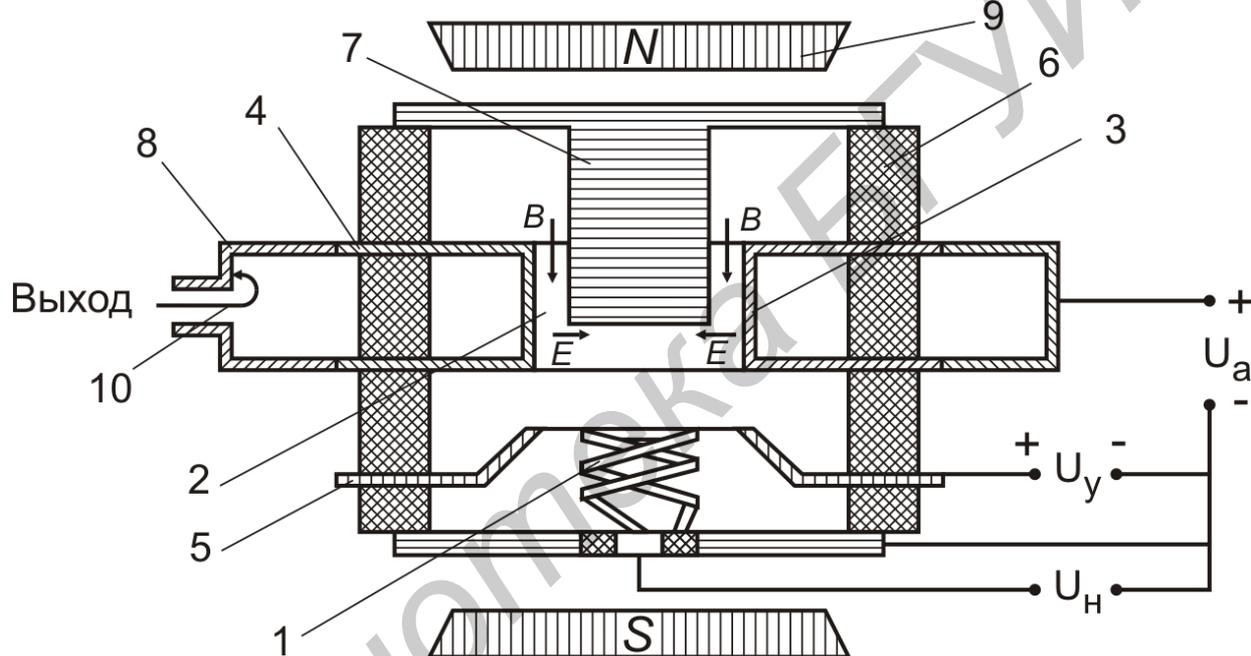


Рис. 6.1. Схема устройства и питания митрона

Особенностью конструкции митрона является то, что катод 1 вынесен из пространства взаимодействия 2, т.е. находится ниже анодной структуры, которая представляет собой встречноштыревую замедляющую систему, свернутую в кольцо. Штыри 3 укреплены на двух дисках 4. Внутри анодной высокочастотной структуры 3, 4 располагается холодный катод 7, создающий в пространстве взаимодействия постоянное радиальное электрическое поле, как в обычном магнетроне. Холодный катод изготавливается из материала с низким коэффициентом вторичной эмиссии. Эмиттирующий катод 1 в виде вольфрамовой спирали окружен управляющим электродом 5, представляющим собой усеченный конус с отверстием посередине.

Вся система элементов митрона механически связана с помощью керамических шайб 6 и помещается между полюсами магнита 9. С помощью дисковых

выводов 4 анодная структура соединяется с внешней резонансной системой 8, содержащей вывод энергии 10.

Анодный блок митрона обычно заземляется, на катод подается отрицательное напряжение порядка нескольких сотен вольт и выше, изменением которого осуществляется перестройка частоты колебаний митрона.

К управляющему электроду прикладывается положительное относительно катода напряжение U_y порядка нескольких десятков или сотен вольт, позволяющее регулировать величину тока анода, а следовательно, выходную мощность митрона.

Принцип действия митрона практически тождественен принципу работы многорезонаторного магнетрона. Митрон, как и обычный магнетрон, работает на колебаниях π -вида, так же в пространстве взаимодействия формируются электронные спицы, вращающиеся синхронно с высокочастотным полем, протекают те же процессы взаимодействия электронов с полем, при которых они отдают волне потенциальную энергию.

Различия заключаются в несколько ином электрическом режиме, который обеспечивается вынесением из пространства взаимодействия эмиттирующего катода, наличием управляющего электрода и использованием внешней низкочастотной колебательной системы. Эти различия обуславливают возможность электронного управления частотой колебаний при изменении анодного напряжения. Поэтому митрон называют также магнетроном, настраиваемым напряжением.

Анодный ток митрона слабо зависит от напряжения анода и определяется напряжением управляющего электрода. При изменении анодного напряжения изменяется скорость вращения электронных спиц, а передача энергии от электронов высокочастотному полю бегущей волны в условиях фазового синхронизма происходит на той частоте, где фазовая скорость волны соответствует скорости электронных спиц. Поэтому изменение анодного напряжения приводит к перестройке частоты колебаний митрона. Связь между частотой генерации и напряжением анода в первом приближении определяется формулой

$$f = NU_a / [2\pi(r_a^2 - r_k^2)B],$$

где N - число штырей в анодном блоке;

r_a - радиус анода;

r_k - радиус катода;

B - магнитная индукция,

т.е. при постоянной магнитной индукции частота должна линейно возрастать с увеличением анодного напряжения.

В силу слабой зависимости анодного тока митрона от анодного напряжения перестройка частоты не связана с сильным изменением мощности в диапазоне перестройки.

Из-за низкой добротности внешней резонансной системы митроны обладают широким диапазоном электронной перестройки частоты, достигающим до одной октавы у маломощных митронов, их КПД составляет 10 - 20%. Мощные

митроны имеют высокий КПД, превышающий - 70%, но диапазон электронной перестройки всего 7...10%. Выходная мощность митронов составляет 10 мВт...500 Вт в диапазоне частот 0.2...11 ГГц.

Крутизна электронной перестройки находится в пределах 0,2...10 МГц/В, что выше, чем у ЛОВ типов О и М. Достоинствами митронов являются малые габариты и вес.

Митроны используются в быстроперестраиваемых передатчиках систем радиопротиводействия, в передающих устройствах радиовзрывателей, радиовысотомерах, а также в панорамных измерительных устройствах.

Измерительная установка для исследования митрона

Схема измерительной установки приведена на рис. 6.2. В работе исследуется митрон сантиметрового диапазона волн типа М-307М. Выходная мощность митрона измеряется с помощью измерителя мощности типа МЗ-28, подключенного через фиксированный аттенюатор, генерируемая частота измеряется резонансным частотомером, включенным через направленный ответвитель.

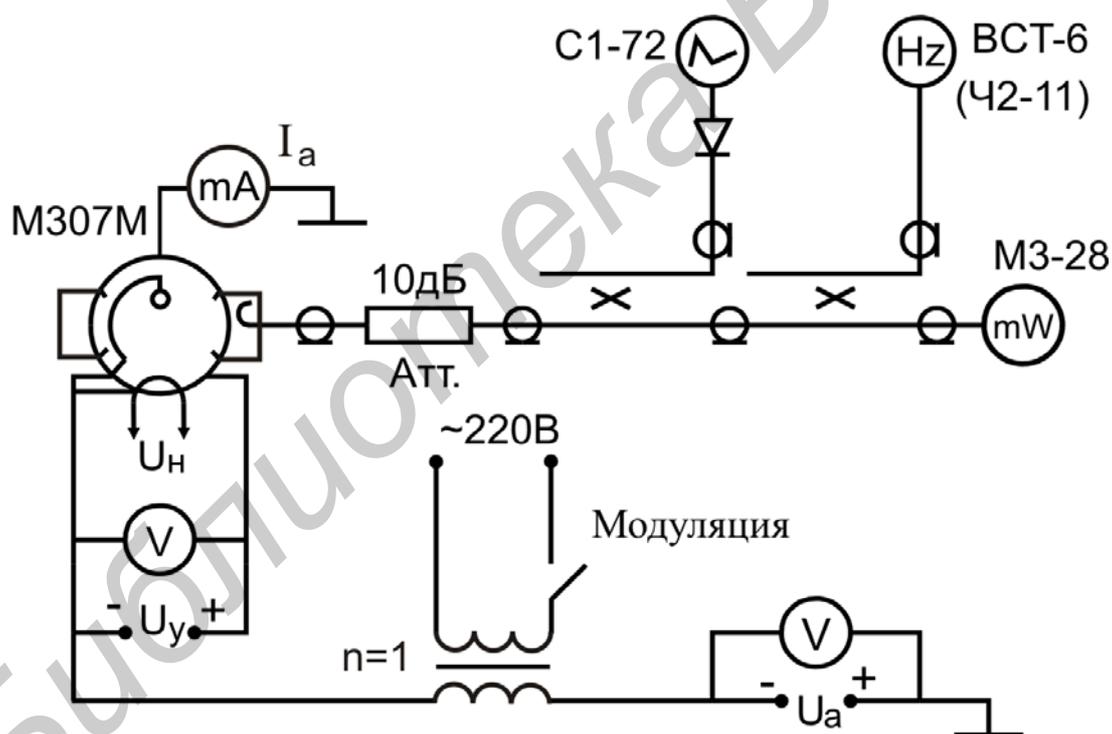


Рис. 6.2. Схема измерительной установки для исследования митрона

Питание митрона производится от источника питания с регулируемыми напряжениями на выходе. Контроль напряжений и токов электродов митрона осуществляется стрелочными измерительными приборами. Источник питания митрона включается тумблером "Сеть", предварительно необходимо устано-

вить ручки регулировок напряжения в крайнее левое положение, тумблер "Модуляция" должен быть выключен. После 2-3 минут прогрева включением тумблера "Митрон" подаются напряжения анода и управляющего электрода. Установив паспортные значения напряжений, измерить анодный ток, выходную мощность, частоту. Полученные значения должны соответствовать паспортным значениям.

Для наблюдения на экране осциллографа зависимости выходной мощности митрона от анодного напряжения необходимо включить тумблер "Модуляция", при этом напряжение анода будет периодически меняться от $(U_a - U_{\sim})$ до $(U_a + U_{\sim})$, где U_{\sim} - амплитуда переменного напряжения на вторичной обмотке трансформатора, включенной последовательно с источником анодного напряжения. Такие изменения напряжения анода сопровождаются изменением выходной мощности и частоты колебаний митрона. Часть выходной мощности через направленный ответвитель поступает на детекторную секцию, с которой снимается напряжение, пропорциональное выходной мощности, подаваемое на вход осциллографа.

Если развертка осциллографа синхронизирована с частотой сети, то изображение на его экране будет представлять в некотором масштабе зависимость выходной мощности митрона от напряжения анода (зону генерации).

При снятии характеристик митрона модулирующее напряжение нужно отключить.

Задание и порядок выполнения работы

1. Согласно инструкциям по эксплуатации подготовить к работе измерительные приборы.
2. Включить источник питания и установить рабочий режим митрона.
3. Получить на экране осциллографа изображение зоны генерации митрона и зарисовать его.
4. Снять зависимость выходной мощности, анодного тока, частоты от напряжения анода $P = f(U_a)$; $I_a = f(U_a)$; $f = \varphi(U_a)$ при паспортном значении напряжения управляющего электрода U_y .
5. Снять зависимости выходной мощности, генерируемой частоты анодного тока от напряжения на управляющем электроде $P = f(U_y)$; $I_a = f(U_y)$; $f = \varphi(U_y)$. Измерения проделать при напряжении анода, соответствующем наибольшему максимальному значению выходной мощности.

6. По результатам измерений построить следующие зависимости:
 $P = f(U_a)$; $I_a = f(U_a)$; $f = \varphi(U_a)$, $\eta_e = f(U_a)$, где η_e - электронный КПД
 $\eta_e = \frac{P}{I_a U_a} \cdot 100\%$; $P = f(U_y)$; $I_a = f(U_y)$; $f = \varphi(U_y)$, $P = F(f)$.

7. Определить перепад мощности по диапазону перестройки в децибелах, крутизну электронной перестройки частоты по анодному напряжению $S_{упр}$ (максимальное значение).

8. Определить пределы регулировки выходной мощности напряжением управляющего электрода в децибелах, найти крутизну электронной перестройки частоты по управляющему напряжению $S_{упр}$ (максимальное значение).

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Паспортные данные исследуемого митрона.
3. Схема измерительной установки.
4. Результаты измерений вычислений, графики полученных зависимостей.
5. Краткие выводы.

Контрольные вопросы

1. Устройство митрона.
2. Основные характеристики и параметры митрона.
3. Измерительная установка, порядок выполнения работы.

Литература

1. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника: Учеб. пособие для вузов /Под ред. Н.Д. Федорова. – М.: Радио и связь, 1988.
2. Андрушко Л.М., Федоров Н.Д. Электронные и квантовые приборы СВЧ. – М.: Радио и связь, 1981.
3. Панфилов И.Г. Приборы СВЧ и оптического диапазонов. – М.: Радио и связь, 1983.
4. Рожанский В.Б. Электронные приборы СВЧ: Учеб. пособие. – Мн.: БГУИР, 1997.
5. Березин В.М. и др. Электронные СВЧ приборы. – М.: Радио и связь, 1981.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА НА ЛАВИННО-ПРОЛЕТНОМ ДИОДЕ

Цель работы

Ознакомиться с устройством и принципом действия лавинно-пролетного диода, экспериментально исследовать основные характеристики и параметры генератора СВЧ на лавинно-пролетном диоде.

Краткие теоретические сведения

Лавинно-пролетный диод (ЛПД) - это полупроводниковый прибор с динамическим отрицательным сопротивлением, которое является следствием двух происходящих в приборе процессов: а) лавинного пробоя, сопровождающегося образованием большого числа свободных электронов и дырок; б) дрейфа (пролета) носителей в полупроводнике под действием электрического поля.

ЛПД представляет собой полупроводниковую структуру, состоящую из ряда областей, отличающихся типом и концентрацией атомов примеси (уровнем легирования). Для изготовления ЛПД применяют чаще всего кремний или арсенид галлия.

В зависимости от последовательности расположения областей можно выделить несколько видов ЛПД, например: двухслойные диоды n-p-типа, трехслойные $p^+ - n - n^+$ - типа, четырехслойные $n^+ - p - i - p^+$ - типа, или диоды Рида, четырехслойные двухпролетные $p^+ - p - n - n^+$ - типа, М-n- n^+ - типа (с барьером Шоттки).

Широкое распространение получили ЛПД со структурой $p^+ - n - n^+$ - типа (рис. 7.1,а).

Сильнолегированные области структуры p^+ , n^+ с концентрацией примеси $N_a, N_d = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ являются, по существу, контактами прибора.

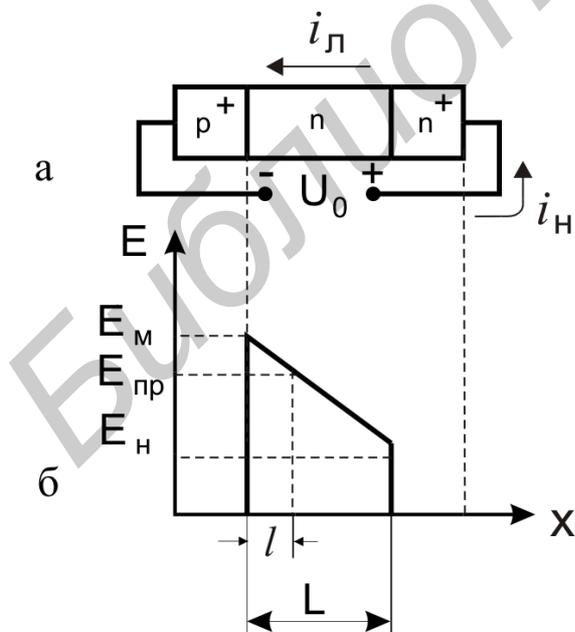


Рис. 7.1. Структура ЛПД (а), распределение электрического поля (б)

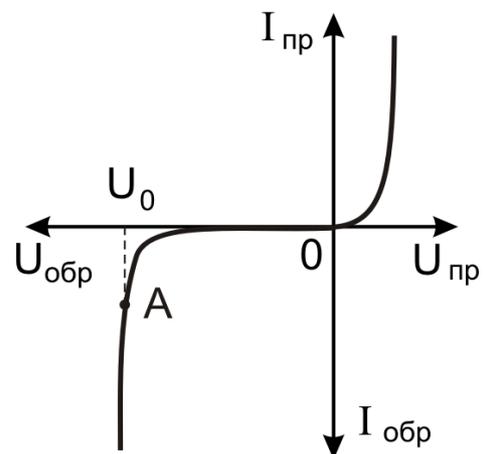


Рис. 7.2. Статическая вольт-амперная характеристика ЛПД

Концентрация примеси в n-области значительно ниже, поэтому переход p⁺-n оказывается несимметричным, запиорный слой полностью располагается в n-области.

При некоторой величине обратного напряжения U_0 , приложенного к диоду, напряженность электрического поля может превысить значение $E_{пр} = 10^5$ В/см, соответствующее началу лавинного пробоя в небольшой области запиорного слоя шириной ℓ (рис. 7.1,б), в связи с чем весь запиорный слой p⁺-n-перехода шириной L разделяется на две области: узкую область шириной $\ell < \frac{L}{3}$, в которой происходит процесс ударной ионизации и умножения (лавинообразного увеличения) числа носителей, так называемый слой умножения, и область дрейфа (пролета) носителей шириной $(L - \ell)$, где происходит движение носителей, образовавшихся в слое умножения.

Дрейф носителей происходит с постоянной скоростью $V_n = 10^7$ см/с, так как напряженность электрического поля в области пролета выше значения $E_n \approx 10$ кВ/см, при превышении которого скорость дрейфа от величины напряженности поля не зависит.

Ток диода при напряжениях, близких к пробивному U_0 , очень сильно зависит от приложенного напряжения (рис. 7.2).

Если не принять мер по ограничению тока, то лавинный пробой перейдет в тепловой и в результате этого диод выйдет из строя. Поэтому для питания ЛПД используются источники стабильного тока.

Следует отметить, что вольт-амперная характеристика ЛПД не имеет участка с отрицательным сопротивлением. Необходимое для генерирования колебаний СВЧ отрицательное сопротивление может быть обеспечено только в результате использования динамических свойств пространственного заряда подвижных носителей – дырок и электронов.

Если ЛПД включить в колебательный контур (резонатор), то при установившихся колебаниях в контуре к диоду будет приложено постоянное напряжение U_0 и высокочастотное переменное напряжение $U = U_m \sin \omega t$ с постоянной амплитудой $U_m \ll U_0$ (рис. 7.3,а).

В положительный полупериод, когда напряженность электрического поля в слое умножения $E_m > E_{пр}$, происходит лавинный пробой этого слоя. Наибольшее количество носителей обоих типов (максимум заряда) из-за инерционности процессов развития лавины получается к концу положительного полупериода (рис. 7.3,б). Дырки уходят из слоя в p⁺-область, электроны чтобы попасть в n⁺-область, должны пройти через область дрейфа $(L - \ell)$.

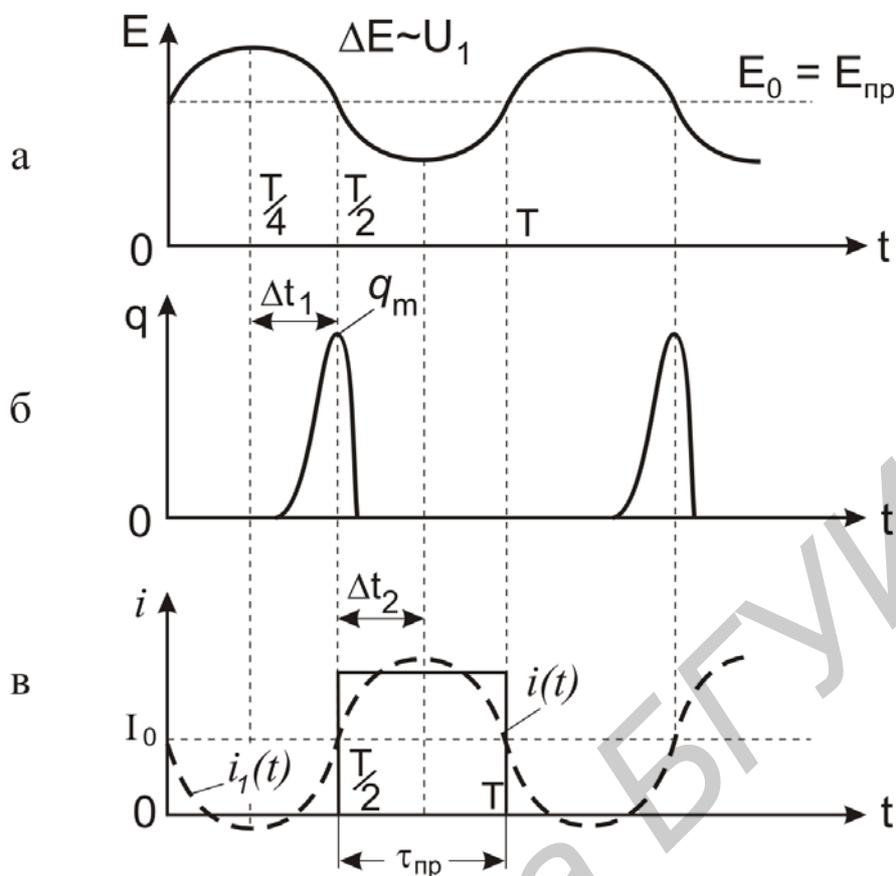


Рис. 7.3. Изменения напряжения и тока в ЛПД, соответствующие установившемуся режиму

В течение всего времени пролета носителей $\tau_{\text{пр}} = \frac{L - \ell}{V_{\text{H}}}$ во внешней цепи диода наводится ток, совпадающий по направлению с дрейфовым (конвекционным) током движущихся в приборе электронов.

На рис. 7.3, в построен график наведенного тока $i(t)$, постоянной составляющей I_0 , первой гармоники тока $i_1(t)$ для такой частоты колебаний $f_0 = \frac{1}{T_0}$,

для которой $\tau_{\text{пр}} = \frac{T_0}{2}$.

Сравнивая графики (см. рис. 7.3, а, в), можно заметить, что первая гармоника тока $i_1(t)$ находится в противофазе с напряжением $U_1(t)$. Это является следствием инерционности процессов в ЛПД: максимум заряда q_m запаздывает относительно напряжения U_1 на $\Delta t_1 = \frac{T_0}{4}$, а максимум тока $I_1(t)$ запаздывает относительно момента окончания процессов лавинного умножения на $\Delta t_2 = \frac{\tau_{\text{пр}}}{2} = \frac{T_0}{4}$.

В итоге полное время запаздывания тока i_1 относительно напряжения U_1

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 = \frac{T_0}{2}.$$

Следовательно, прибор обладает динамическим отрицательным сопротивлением на частоте f_0 .

Режим работы ЛПД, обусловленный процессами лавинного умножения носителей и движения их в пролетном пространстве, называется пролетным или IMPATT-режимом и является наиболее распространенным (Impact Avalanche Transit Time - ударная ионизация и пролетное время).

Конструкция ГЛПД определяется в основном диапазоном рабочих частот. На рис. 7.4 приведена одна из возможных конструкций ГЛПД радиально-волноводного типа, получившая широкое распространение.

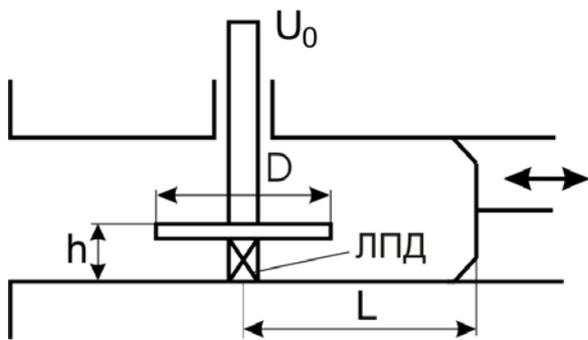


Рис. 7.4. Устройство ГЛПД

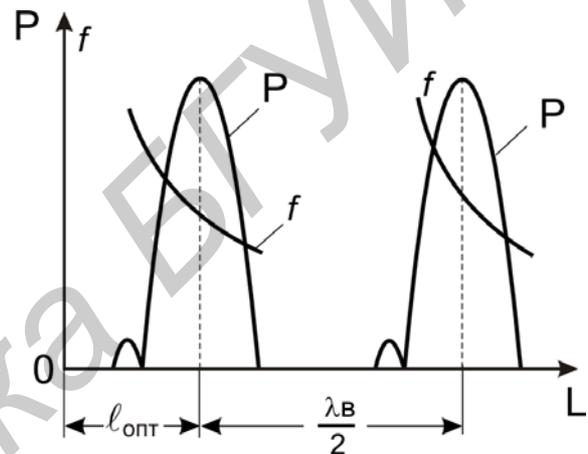


Рис. 7.5. Зависимость мощности и частоты колебаний ГЛПД от длины короткозамыкателя

В такой конструкции частота ГЛПД определяется в основном диаметром диска D и его расстоянием h от нижней стенки волновода. Перемещение короткозамыкающего поршня существенно сказывается на выходной мощности генератора и меньше на частоте (рис. 7.5), что связано с изменением нагрузки на контактах прибора, установленного между диском и нижней стенкой волновода. Перемещение короткозамыкателя на расстояние $\Delta l = \frac{\lambda_B}{2}$, где λ_B - длина волны в волноводе, не изменяет нагрузку на контактах прибора.

В элементах генератора (в диоде, в различных частях резонатора) имеются потери энергии. Самовозбуждение генератора может происходить только в том случае, если при малых амплитудах колебаний энергия, отдаваемая отрицательным сопротивлением, больше энергии, потребляемой положительным сопротивлением r_n , т.е. если $|r_d(I_0, I_1 \approx 0)| > r_n$.

Минимальный ток $I_{0п}$, при котором происходит возбуждение колебаний в генераторе, называется пусковым током.

ЛПД обеспечивают получение мощностей в широком диапазоне частот (0,5...200 ГГц), на их основе реализуются генераторы с выходными мощностями до 5...10 Вт на 10 ГГц и до 0,5...1 Вт на 100 ГГц с высоким КПД (10...30% на 10 ГГц).

Измерительная установка для исследования ГЛПД

В работе исследуется ГЛПД волноводно-радиального типа (см. рис. 7.4) на арсенид-галлиевом ЛПД с барьером Шотки, типа АА707И.

Схема измерительной установки приведена на рис. 7.6.

Выходная мощность ГЛПД через развязывающий вентиль Э8-24 поступает в волноводный тракт, нагрузкой которого является измеритель мощности типа МЗ-10А.

Переменный аттенюатор Д5-5 служит для расширения пределов измеряемой мощности.

Частота колебаний генератора измеряется резонансным частотомером типа Ч2-32.

Питание ГЛПД производится от блока питания, который представляет собой источник стабильного тока.

В цепь питания включены измерительные приборы для измерения напряжения и тока диода.

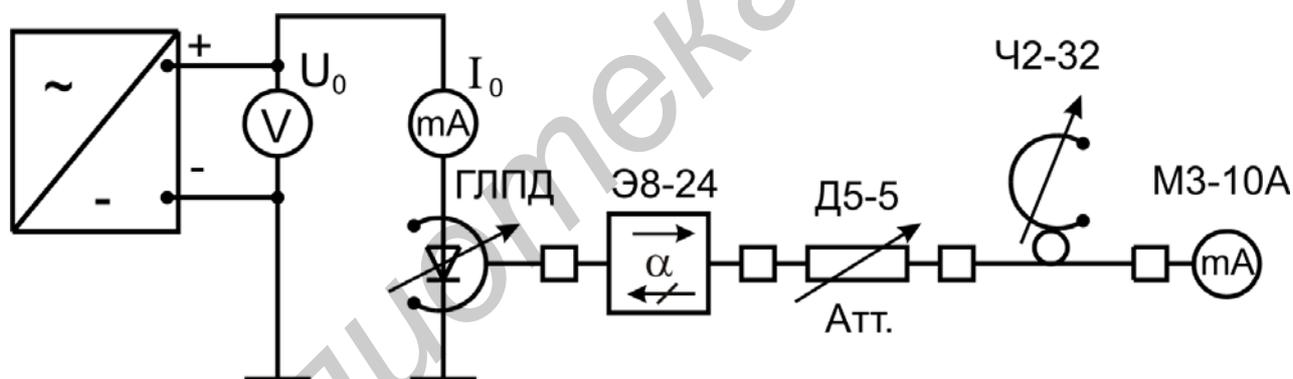


Рис. 7.6. Схема измерительной установки для исследования ГЛПД

Задание и порядок выполнения работы

1. Согласно инструкциям по эксплуатации подготовить к работе измерительные приборы.

2. Снять статическую вольт-амперную характеристику ЛПД $I_0=f(U_0)$. Ток диода не должен превышать максимального значения $I_{0\text{макс}}$.

3. Снять зависимость выходной мощности и частоты ГЛПД от положения короткозамыкателя l . $P = f(l)$; $f = \varphi(l)$ при $I=I_{0\text{макс}}$; l изменять в пределах 0...40 мм с шагом 1 мм.

4. Снять зависимость выходной мощности и частоты ГЛПД от тока питания: $P = f(I_0)$; $f = \varphi(I_0)$ при $l = \text{const}$. Измерения проделать при положении ко-

роткозамыкателя, соответствующем найденному максимальному значению выходной мощности ГЛПД.

5. Определить зависимость пускового тока генератора от положения короткозамыкателя для одной области генерации.

$$I_{0n} = f(\ell).$$

ℓ изменяется в пределах интервала значений, в котором при выполнении п.2 выходная мощность ГЛПД $P \geq 0,5P_{\text{макс}}$.

6. По результатам измерений:

а) построить следующие зависимости:

$$I_0 = f(U_0);$$

$$P = f(L); f = \varphi(L) \text{ при } I = I_{0\text{макс}},$$

$$I_{0n} = f(\ell),$$

где $L = \ell + 5$ - расстояние между центром диода и короткозамыкателем, мм;

ℓ - положение короткозамыкателя;

$$P = f(I_0); f = \varphi(I_0) \text{ при } L = \text{const};$$

$$\eta_e = f(I_0), \text{ где } \eta_e = \frac{P}{I_0 U_0} \cdot 100\%;$$

б) определить величину напряжения лавинного пробоя U_0 , соответствующую току $I_0 = 1 \text{ мА}$;

в) для частоты f_0 , соответствующей максимальной мощности $P_{\text{макс}}$, рассчитать длину волны в волноводе $a \times b = 23 \times 10 \text{ мм}$ для волны H_{10} , используя соотношение $\lambda_B = \lambda / \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}$, где λ - длина волны в свободном пространстве.

Сравнить эту величину со значением λ_B , полученным из зависимости $P(L)$;

г) определить крутизну электронной перестройки частоты

$$S = \frac{\Delta f_0}{\Delta I_0} \left(\frac{\text{МГц}}{\text{мА}} \right);$$

д) найти величину диапазона механической перестройки частоты $\frac{\Delta f_M}{f_0} \cdot 100\%$; Δf_M определяется величиной изменения частоты $f(L)$, в пределах

которого $P \geq 0,5P_{\text{макс}}$;

е) сравнить экспериментальные значения параметров ЛПД ($P_{\text{макс}}$, η_e , $I_{0\text{макс}}$, U_0 , f) с паспортными.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема измерительной установки.
3. Графики полученных зависимостей.
4. Результаты вычислений.
5. Краткие выводы.

Контрольные вопросы

1. Структура ЛПД, распределение электрического поля при обратном смещении.
2. Механизм возникновения отрицательного дифференциального сопротивления в ЛПД.
3. Конструкция ГЛПД.
4. Характеристики, основные параметры ГЛПД.

Литература

1. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Н.Д. Федорова. – М.: Радио и связь, 1988.
2. Андрушко Л.М., Федоров Н.Д. Электронные и квантовые приборы СВЧ. – М.: Радио и связь, 1981.
3. Панфилов И.Г. Приборы СВЧ и оптического диапазонов. – М.: Радио и связь, 1983.
4. Рожанский В.Б. Электронные приборы СВЧ: Учеб. пособие. – Мн.: БГУИР, 1997.
5. Березин В.М. и др. Электронные СВЧ приборы. – М.: Радио и связь, 1981.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА НА ДИОДЕ ГАННА

Цель работы

Ознакомиться с принципом действия диодов Ганна. Экспериментально исследовать основные характеристики и параметры генератора СВЧ на диоде Ганна.

Краткие теоретические сведения

Диоды Ганна (ДГ) - это полупроводниковые приборы СВЧ с отрицательным сопротивлением. Диод Ганна представляет собой полупроводниковую структуру из однородного полупроводника, обычно арсенида галлия n-типа (n-GaAs), не содержащую p-n - переходов (рис. 8.1).

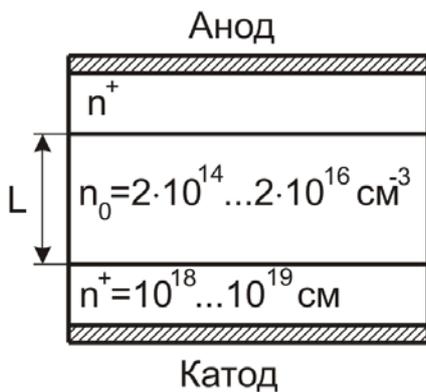


Рис 8.1. Структура диода Ганна

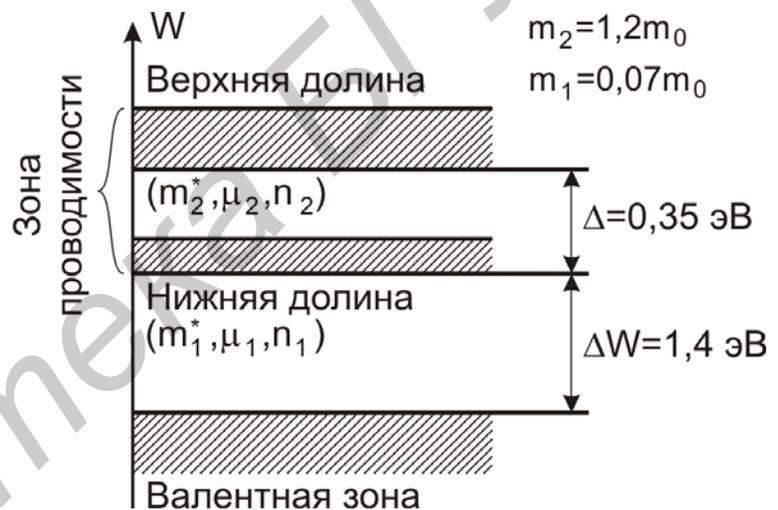


Рис 8.2. Зонная диаграмма n-GaAs

Размеры структуры выбираются исходя из условий режима их работы и требуемых параметров. Площадь обычно составляет $0,25 \cdot 10^{-4} \dots 10^{-2} \text{ см}^2$, толщина изменяется в пределах $5 \cdot 10^{-4} \dots 0,1 \text{ см}$.

Для защиты от внешних воздействий и удобства включения в СВЧ-цепь диод Ганна помещают в специальный корпус.

Отрицательная проводимость ДГ возникает из-за эффекта междолинного переноса электронов, характерного для арсенида галлия, зона проводимости которого имеет две долины (рис. 8.2). В состоянии термодинамического равновесия, т.е. в отсутствии внешнего воздействия, концентрации электронов n_1 и n_2 в нижней и верхней долинах определяются законом Больцмана:

$$\frac{n_1}{n_2} = A e^{-\frac{q\Delta E}{kT}}, \quad (8.1)$$

где $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град – постоянная Больцмана;
 $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона;
 $A = 70$ для GaAs.

При комнатной температуре $T=300^\circ$ К согласно (8.1) $\frac{n_2}{n_1} \approx 7 \cdot 10^{-5}$, т.е. все

электроны зоны проводимости будут находиться в нижней долине.

С увеличением напряжения U , прикладываемого к диоду, возрастают напряженность поля $E = U/L$ (L – длина диода) и энергия электронов проводимости, в результате чего возрастает число электронов, переходящих из нижней долины в верхнюю (n_2 – возрастает, n_1 – уменьшается).

Средняя дрейфовая скорость электронов определяется как средняя арифметическая скорость электронов нижней (V_1) и верхней (V_2) долин:

$$V = \frac{n_1 V_1 + n_2 V_2}{n_1 + n_2} = \frac{\mu_1 n_1 + \mu_2 n_2}{n_1 + n_2} \cdot E. \quad (8.2)$$

График зависимости скорости электронов $V(E)$ от напряженности электрического поля приведен на рис. 8.3.

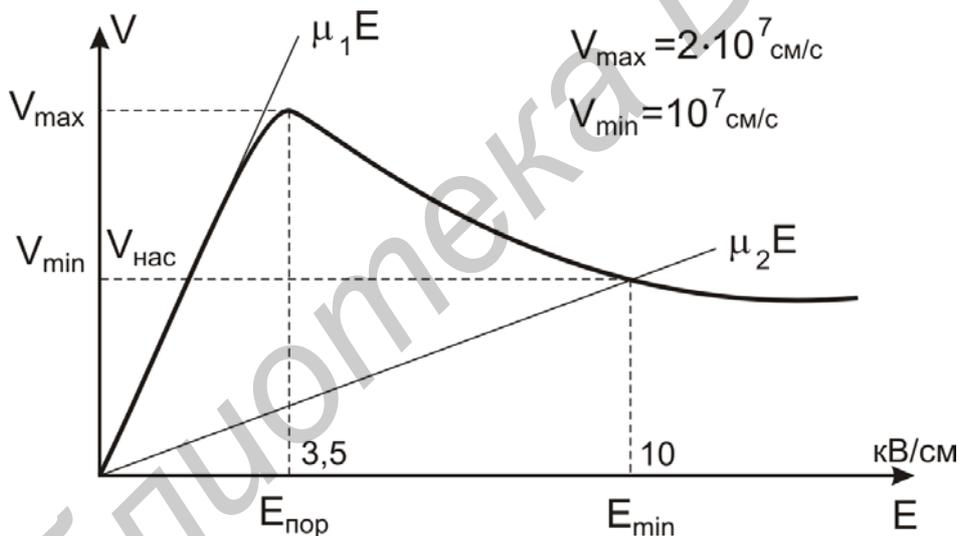


Рис. 8.3. Характеристика $V(E)$ для n-GaAs

Напряженность поля, при которой скорость электронов максимальна, называют пороговой (или критической). Для GaAs n-типа $E_{\text{пор}} \approx 3,5$ кВ/см.

С увеличением напряженности поля происходит уменьшение средней дрейфовой скорости электронов и при $E \gg E_{\text{пор}}$ насыщение скорости электронов из-за взаимодействия их с кристаллической решеткой.

$$V_{\text{min}} = V_{\text{нас}} = 10^7 \text{ см/с}. \quad (8.3)$$

Для однородного полупроводника напряженность поля пропорциональна приложенному напряжению, плотность тока пропорциональна средней дрейфо-

вой скорости электронов, поэтому вольт-амперная характеристика прибора $I=f(U)$ подобна характеристике $V(E)$.

$$j=q(\mu_1 n_1 + \mu_2 n_2)E = q(n_1 + n_2)V. \quad (8.4)$$

При напряжении, соответствующем падающему участку, в однородном образце GaAs возникают спонтанные колебания электрического тока. Это явление носит название эффекта Ганна. Этот эффект связан с образованием, движением и исчезновением доменов сильного электрического поля в структуре диода.

Если в какой-то области структуры ДГ (заштрихованная область на рис. 8.4, а) электрическое поле почему-либо (вследствие флуктуации в распределении ионизированных атомов примеси) оказалось немного больше среднего, средняя дрейфовая скорость электронов в этой области несколько упадет.

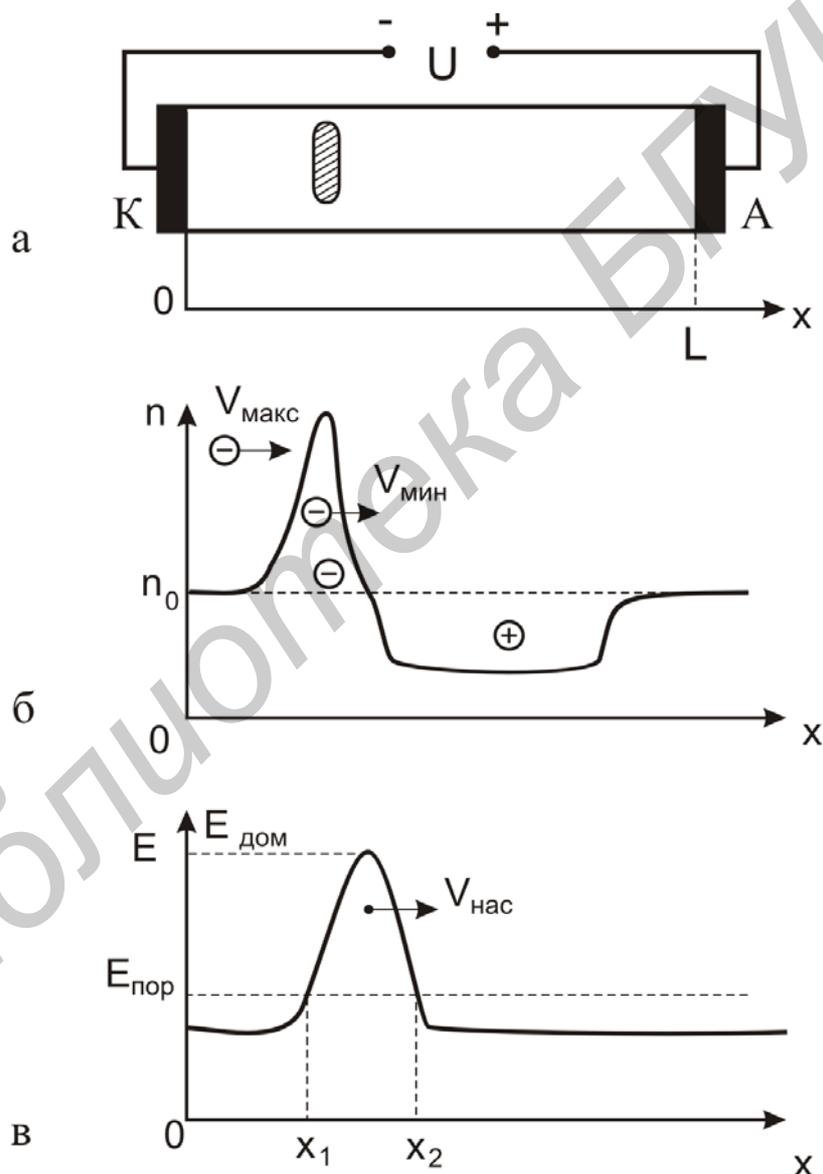


Рис. 8.4. Структура ДГ (а), распределение концентрации электронов (б) и напряженности электрического поля (в) при образовании домена

Поэтому к замедлившимся электронам, догоняя их, притекают носители, находящиеся ближе к катоду, и от них начнут убегать электроны, находящиеся ближе к аноду. Так образуются и растут области отрицательного и положительного зарядов, одновременно будет расти и электрическое поле в области флуктуации, аналогично тому, как растет пропорционально увеличению плотности заряда на пластинах поле внутри плоского конденсатора. С ростом поля движение электронов из области флуктуации еще более замедлится, процесс образования слоев объемного заряда усилится и т. д. При этом, если напряжение на диоде поддерживается постоянным, поле (а следовательно, и дрейфовая скорость носителей) вне флуктуации будет падать. Равновесие в такой приближенной модели наступит тогда, когда скорость движения образовавшегося электрического слоя окажется равной дрейфовой скорости электронов вне его. Устанавливаемое при этом распределение зарядов и электрического поля показано на рис. 8.4, б, в.

Область высоких значений электрического поля называется доменом сильного поля (область $X_1 - X_2$). Максимальное поле в домене достигает величин $40 \dots 100$ кВ/см, тогда как поле вне домена равно примерно $1 \dots 2$ кВ/см.

Обычно в кристалле полупроводника возникает всего один домен сильного поля. Действительно, часть напряжения, приложенного к кристаллу, падает на домене, и вне домена напряженность электрического поля оказывается ниже порогового значения.

Домен образуется в ганновских диодах в непосредственной близости от катода и, пройдя через кристалл со скоростью порядка 10^7 см/с (примерно равной дрейфовой скорости носителей вне домена), подойдя к аноду, исчезает. После этого у катода образуется новый домен, и цикл повторяется.

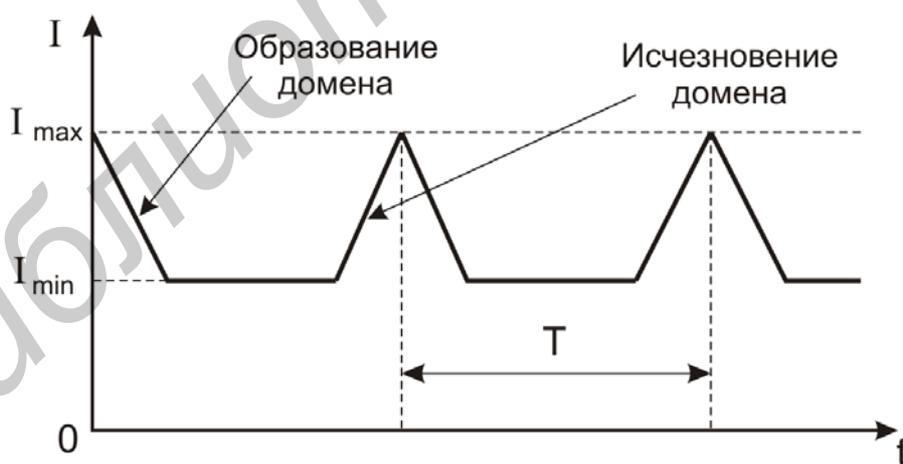


Рис. 8.5. Зависимость тока через ДГ от времени

Образование домена вызывает спадание тока через диод до минимального значения, которое будет сохраняться в течение всего времени пролета домена от катода к аноду (рис. 8.5).

Частота колебаний определяется временем пролета домена

$$f_{\text{пр}} = \frac{1}{T} = \frac{V_{\text{min}}}{L}. \quad (8.5)$$

Простейшим генератором СВЧ могла бы быть цепь, в которой последовательно включены ДГ, нагрузочное сопротивление и источник постоянного напряжения. Такой режим работы ДГ называется пролетным. На практике он не получил распространения из-за низкого КПД и невозможности управления частотой.

Обычно ГДГ представляет собой объемный резонатор, в соответствующем месте которого помещается диод Ганна; в этом случае на постоянное напряжение источника питания накладывается СВЧ-напряжение резонатора, которое будет оказывать влияние на процессы образования и исчезновения доменов, а следовательно, частота колебаний ГДГ будет определяться резонатором. В зависимости от частоты и амплитуды переменного напряжения резонатора возможны процессы задержки образования, подавления домена, возможны режимы, когда домен вообще не будет успевать образовываться либо будет образовываться частично. Поэтому частота ГДГ может значительно отличаться от пролетной частоты диода.

Диапазон механической перестройки частоты достигает половины октавы. Электронная перестройка мала – типичная величина составляет 5...90 МГц/В.

Конструкция генератора на диоде Ганна определяется в основном диапазоном рабочих частот. На рис. 8.6 приведена одна из возможных конструкций ГДГ волноводного типа.

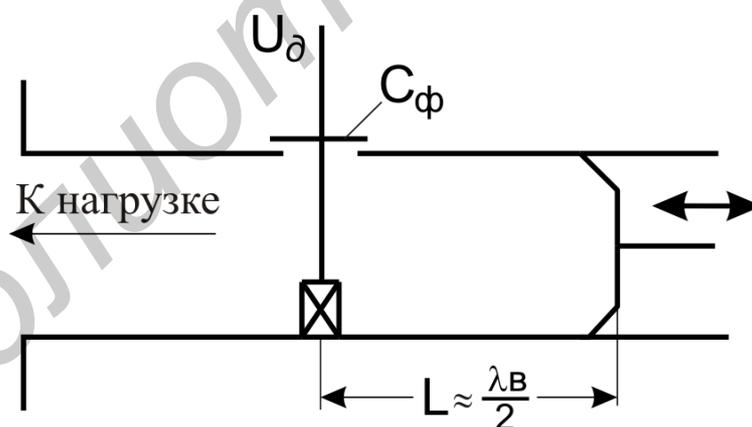


Рис. 8.6. Устройство ГДГ

Колебательная система генератора образована короткозамкнутым отрезком волновода. Расстояние между диодом и короткозамкнутой стенкой волновода определяет частоту колебаний генератора. Питающее напряжение подается через емкостный фильтр, предотвращающий попадание СВЧ-колебаний в цепь питания. Конструкция генератора должна обеспечивать отвод тепла от диода.

ГДГ обеспечивают получение мощностей в широком диапазоне частот (5...100 ГГц), выходная мощность достигает нескольких сотен милливатт.

ГДГ широко используются в качестве гетеродинов приемников, возбуждателей передатчиков и источников накачки параметрических усилителей и т.п.

Измерительная установка для исследования ГДГ

В данной работе исследуется ГДГ трехсантиметрового диапазона длин волн на диоде Ганна типа АА723.

Используется генератор волноводной конструкции (см. рис. 8.6), в котором перестройка частоты производится перемещением короткозамыкателя.

Схема измерительной установки приведена на рис.8.7.

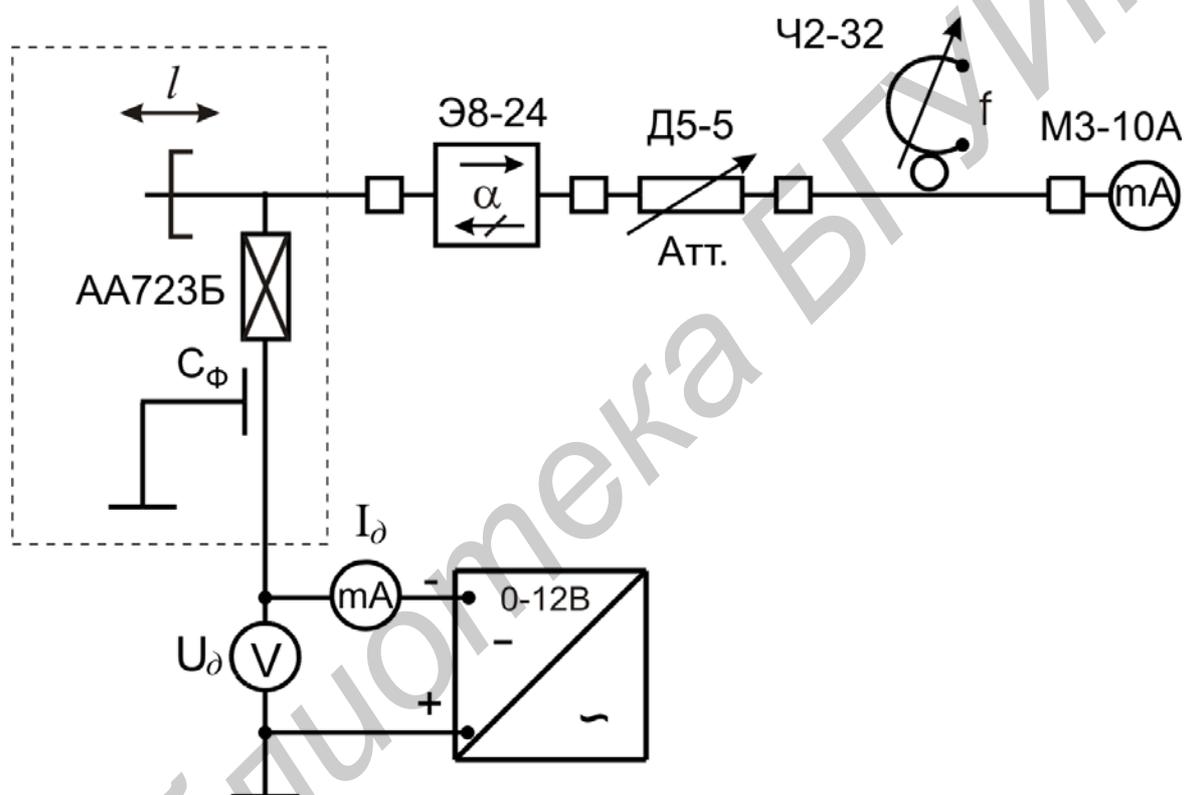


Рис. 8.7. Измерительная установка для исследования ГДГ

Выходная мощность ГДГ через развязывающий ферритовый вентиль Э8-24 поступает в волноводный тракт, нагрузкой которого является измеритель мощности типа М3-10А.

Переменный аттенюатор Д5-5 служит для расширения пределов измеряемой мощности.

Частота генерируемых колебаний измеряется резонансным частотомером типа Ч2-32.

Питающее напряжение на диод Ганна подается от стабилизированного источника питания. В цепь питания включены измерительные приборы для измерения напряжения и тока диода.

Задание и порядок выполнения работы

1. Согласно инструкциям по эксплуатации подготовить к работе измерительные приборы.

2. Снять вольт-амперную характеристику диода Ганна. Напряжение на диоде изменять в пределах $0 \dots 12$ В через $0,4$ В.

3. Снять зависимость выходной мощности и частоты от положения короткозамыкателя ℓ :

$$P=f(\ell); f=\varphi(\ell), \text{ при } U_d=9\text{В};$$

ℓ - изменять в пределах $0 \dots 50$ мм с шагом 2 мм.

4. Снять зависимость выходной мощности ГДГ от положения короткозамыкателя, подбирая напряжение U_d для каждого значения ℓ по максимуму выходной мощности:

$$P=f(\ell) \text{ при } U_d=U_{\text{допт}};$$

при этом определить зависимость оптимального напряжения на диоде от частоты $U_{\text{допт}}=F(f)$.

Значения частоты берутся из результатов измерений п.3 при одинаковых значениях ℓ .

5. Снять зависимость частоты и выходной мощности ГДГ от напряжения на диоде: $P=f(U_d)$.

Изменения проделать при положении короткозамыкателя, соответствующем найденному максимальному значению выходной мощности.

6. Снять зависимость крутизны электронной перестройки генератора $S_e = \frac{\Delta f}{\Delta U_d}$ от положения короткозамыкателя ℓ при $U_d=U_{\text{допт}}$; ℓ изменять в пределах $0 \dots 10$ мм.

7. По результатам измерений:

а) построить следующие зависимости:

$$I_d=f(U_d); P=f(U_d); f=\varphi(U_d); \eta_e=f(U_d) \text{ при } L=\text{const};$$

$$P=f(L); f=\varphi(L), \text{ при } U_d=\text{const}, U_d=U_{\text{допт}}, S_e=f(L);$$

$$P=F(f) \text{ при } U_d=\text{const}, U_d=U_{\text{допт}}, U_{\text{допт}}=F(f),$$

где $L=\ell+15$ – расстояние между центром диода и короткозамыкателем, мм;

ℓ – положение короткозамыкателя;

η_e – электронный КПД;

б) определить величину порогового напряжения $U_{\text{пор}}$ диода Ганна, найти диапазон механической перестройки ГДГ $\left(\frac{\Delta f}{f}\right)$, %, при номинальном и оптимальных значениях напряжения диода, определяя Δf по величине изменения частоты, в пределах которого $P \geq 0,5P_{\text{max}}$, а также диапазон электронной перестройки частоты, используя зависимость $f=F(U_d)$;

в) сравнить экспериментальные значения параметров ДГ (P_{\max} , η_e , f , $U_{\text{пор}}$) с паспортными.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема измерительной установки.
3. Таблицы результатов измерений.
4. Графики полученных зависимостей.
5. Краткие выводы.

Контрольные вопросы

1. Механизм возникновения отрицательной дифференциальной проводимости в арсениде галлия.
2. Принцип работы ГДГ.
3. Конструкция генератора на диодах Ганна.
4. Характеристики, основные параметры генераторов на ДГ.

Литература

1. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника: Учеб. пособие для вузов /Под ред. Н.Д. Федорова. – М.: Радио и связь, 1988.
2. Андрушко Л.М., Федоров Н.Д. Электронные и квантовые приборы СВЧ. – М.: Радио и связь, 1981.
3. Панфилов И.Г. Приборы СВЧ и оптического диапазонов. – М.: Радио и связь, 1983.
4. Рожанский В.Б. Электронные приборы СВЧ: Учеб. пособие. – Мн.: БГУИР, 1997.
5. Березин В.М. и др. Электронные СВЧ-приборы. – М.: Радио и связь, 1981.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ИНЖЕКЦИОННОГО ЛАЗЕРА

Цель работы

Изучить устройство, принцип действия полупроводникового инжекционного лазера, экспериментально исследовать основные характеристики и параметры лазера.

Краткие теоретические сведения

Широкое распространение получил инжекционный лазер на основе арсенида галлия (GaAs), конструкция которого показана на рис. 9.1. Монокристалл арсенида галлия имеет форму призмы, на основаниях которой изготовлены контакты, один из контактов выполняется массивным для отвода тепла от области р-п-перехода.

Полупроводниковые лазеры, изготовленные из одного вида полупроводника называются гомолазерами.

В инжекционном лазере используется р-п-переход между вырожденными полупроводниками п- и р-типа. Состояние с инверсией населенностей получается при прямом включении р-п-перехода. В этом случае происходит встречная инжекция электронов из п-области и дырок из р-области. В результате этого в области перехода значительно возрастает число свободных электронов и дырок и уменьшается число валентных электронов (растет число дырок). При достаточной величине прямого напряжения в некотором узком слое перехода возникает состояние с инверсией населенностей и появляется возможность усиления. Этот слой становится активной средой.

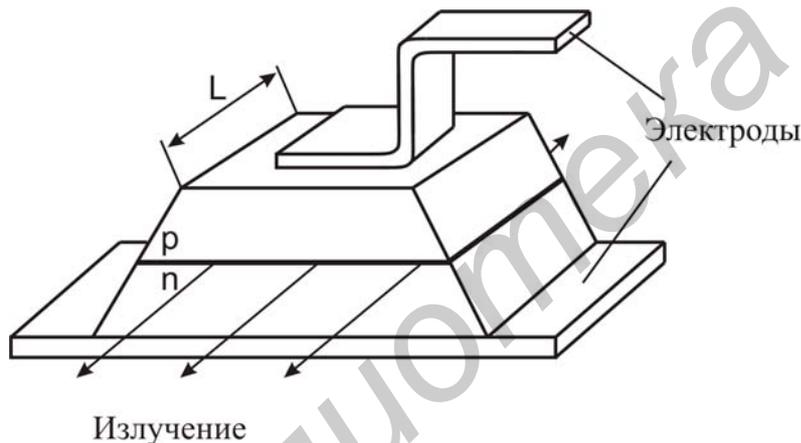


Рис. 9.1. Полупроводниковый инжекционный лазер

При достаточной величине прямого напряжения в некотором узком слое перехода возникает состояние с инверсией населенностей и появляется возможность усиления. Этот слой становится активной средой.

Положительная обратная связь, необходимая для самовозбуждения лазера, обеспечивается следующим образом. Из-за различия показателей преломления материала и воздуха излучение, распространяющееся в активной среде, частично отражается от границы раздела. Чтобы усилить обратную связь, две грани призмы кристалла (передняя и задняя на рис 9.1) делаются параллельными друг другу и перпендикулярными плоскости р-п-перехода. Отражающие поверхности (грани) образуют оптический резонатор. Так как расстояние между гранями превышает длину волны оптического излучения, самовозбуждение лазера возможно только на некоторых собственных частотах резонатора. Две дру-

гие грани наклонены к плоскости р-n-перехода, чтобы не создавать в этом направлении условий для самовозбуждения. Размеры сторон полупроводника порядка нескольких десятых долей миллиметра.

Спонтанное излучение, всегда имеющееся в веществе, вызывает вынужденные переходы. Лавинообразно нарастает число фотонов, направление распространения и частота которых удовлетворяет условиям самовозбуждения.

Возможны три режима работы инжекционного лазера, соответствующие различным значениям коэффициента усиления активной среды K_y и коэффициента обратной связи β_{oc} :

- 1) $K_y < 1$ режим люминесценции (спонтанное излучение, шум);
- 2) $\left. \begin{array}{l} K_y > 1, \\ K_y \beta_{oc} < 1 \end{array} \right\}$ режим сверхлюминесценции (регенеративное усиление спонтанного излучения);
- 3) $\left. \begin{array}{l} K_y > 1, \\ K_y \beta_{oc} > 1 \end{array} \right\}$ режим когерентного излучения (режим самовозбуждения колебаний, доля спонтанного излучения невелика).

Вольт-амперная характеристика (рис 9.2) – это зависимость тока, проходящего через диод I , от прикладываемого к нему напряжения U .

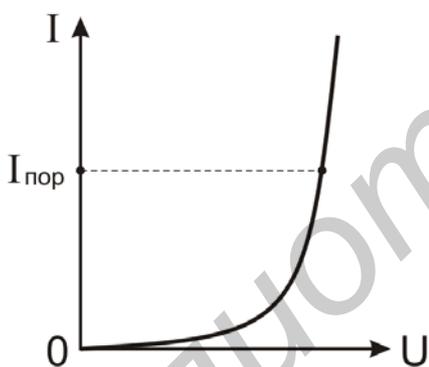


Рис. 9.2. Вольт-амперная характеристика лазера

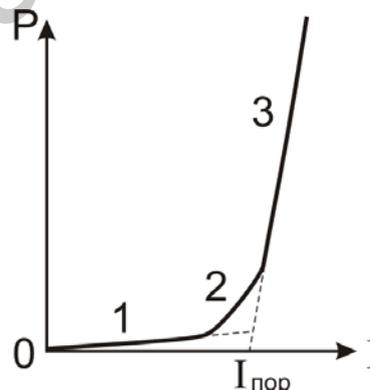


Рис. 9.3. Энергетическая характеристика лазера

Энергетической характеристикой (рис 9.3) называется зависимость мощности излучения P от тока лазера. На этой характеристике видны участки, соответствующие различным режимам работы. Участок 1 с малым наклоном соответствует режиму люминесценции, участок 3 с большим наклоном – режиму когерентного излучения. Участок 2 соответствует режиму сверхлюминесценции. Граница между участками 2 и 3 характеризуется так называемым пороговым током $I_{пор}$.

Спектральная характеристика (рис 9.4) – это зависимость спектральной плотности мощности излучения от частоты излучения. Вид характеристики зависит от режима работы.

Лазерное излучение обладает направленностью, которая характеризуется диаграммой направленности (рис 9.5). Диаграмма направленности представляет собой зависимость мощности, излучаемой в единичном угле, от значения угла, под которым наблюдается излучение. Различают диаграмму направленности излучения в плоскости перехода (горизонтальная плоскость на рисунке 9.1) или диаграмму направленности в плоскости, перпендикулярной плоскости перехода (вертикальная плоскость).

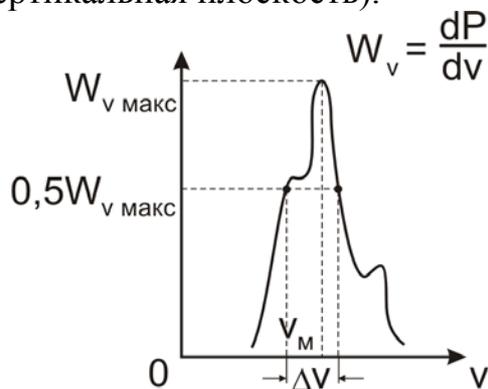


Рис. 9.4. Спектральная характеристика лазера

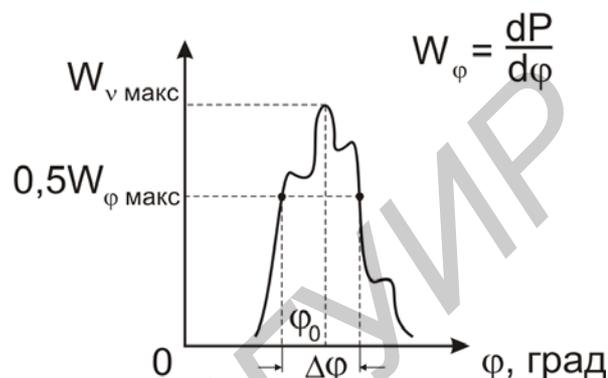


Рис. 9.5. Диаграмма направленности излучения лазера

Вводится понятие оси диаграммы направленности: это такое направление, в котором мощность излучения максимальна. Под расходимостью излучения в горизонтальной или вертикальной плоскости понимают угол $\Delta\varphi$ в соответствующей плоскости, который содержит ось диаграммы направленности и в пределах которого $W_{\varphi} \geq 0,5W_{\varphi \text{ макс}}$. Диаграмма направленности зависит от режима работы лазера.

Лазер характеризуется различными параметрами, которые обычно относят к режиму когерентного излучения: мощности излучения, длина волны, ширина линии излучения, расходимость излучения в горизонтальной и вертикальной плоскости, внешний квантовый выход, КПД, срок службы, рабочая температура и т.д. Все эти параметры зависят от тока лазера, который должен указываться как параметр.

Длина волны излучения – это длина волны, соответствующая максимальной спектральной плотности мощности излучения (частоте ν_M на рис.9.4). Внешним квантовым выходом $\eta_{\text{внеш}}$ называется соотношение числа излучаемых фотонов к числу рекомбинирующих за то же время пар носителей. КПД есть отношение полезной мощности излучения к мощности, затрачиваемой источником питания.

Из предельно допустимых параметров наиболее важными являются максимально допустимый ток и предельно допустимая мощность излучения, а в режиме импульсного генерирования – также максимальные длительность и частота повторения импульсов.

Современные приборы обеспечивают мощность излучения порядка 100 Вт в режиме непрерывного генерирования при температуре жидкого гелия 4,2 К и порядка 10 Вт в режиме импульсного генерирования при комнатной температуре. КПД в лучших экземплярах составляет 60...70%.

Практическая реализация непрерывного режима работы полупроводникового лазера при комнатной температуре стала возможной в результате использования гетеропереходов, основанных на контакте полупроводников с различной шириной запрещенной зоны. Отличие структуры гетеролазеров от простейшей структуры лазера, показанной на рис.9.1, состоит в том, что по обе стороны от активного слоя создаются слои из полупроводника с большей шириной запрещенной зоны (так называемые лазеры с двойной гетероструктурой). Образовавшиеся гетеропереходы препятствуют проникновению инжектированных в активный слой носителей из одного широкозонного слоя в другой. Поэтому наблюдается эффект удержания носителей в узком активном слое и снижается необходимый пороговый ток. Кроме этого, наблюдается эффект удержания света в активном слое. Связано это с тем, что коэффициент преломления материала с большей шириной запрещенной зоны оказывается меньше, чем в активном слое, имеющем меньшую ширину запрещенной зоны. Происходящая концентрация света и носителей в активном слое обеспечивает их эффективное взаимодействие и делает возможным создание лазеров с низким пороговым током, которые могут работать при комнатных температурах. В качестве материала для активного слоя может быть, например, использован GaAs (p-типа), а в соседних слоях – сложные соединения $Al_xGa_{1-x}As$ (n- и p⁺-типа). Индекс x определяет соотношение компонентов (Al и As), которое влияет на значение ширины запрещенной зоны.

Измерительная установка для исследования инжекционного лазера и методические указания к выполнению работы

В лабораторной работе исследуются полупроводниковые инжекционные лазерные излучатели ИЛПН-103 или ИЛПН-205, основой которых служат полупроводниковые диоды полосковой конструкции из арсенид-галлиевых-арсенид-алюминиевых гетероструктур. Лазерные излучатели предназначены для генерирования в непрерывном режиме когерентного оптического излучения в дискретных точках видимого (ИЛПН-205) и ближнего инфракрасного (ИЛПН-103) световых диапазонов. Внутри корпуса излучателей размещены две термоэлектрические батареи на основе элементов Пельтье, служащие для охлаждения диода излучателя, а также терморезистор – датчик температуры диода. Напряжение на лазерном диоде можно изменять от нуля до максимально допустимого значения. Ток и напряжение в цепи лазерного диода контролируются стрелочными приборами. Исследуемый лазерный излучатель установлен на поворотном устройстве, снабженном угломерной шкалой, и может вращаться вокруг вертикальной оси перпендикулярной плоскости, в которой лежит излучение лазер-

ного излучателя, которое может быть направлено на один из двух фотодиодов, расположенных на неподвижном основании поворотного устройства.

Фотодиод ФД-1 расположен вблизи лазера и имеет большую фоточувствительную площадку. Он предназначен для измерения полной мощности излучения лазера. Фотодиод ФД-2 расположен дальше от лазера и имеет небольшую фоточувствительную площадку.

На фотодиоды подается постоянное напряжение от источника питания. Ток в цепи фотодиода (фототок) I_{ϕ} пропорционален мощности излучения, падающего на фоточувствительную площадку фотодиода. Он измеряется микроамперметром подключаемого в цепь фотодиода с помощью тумблера.

Мощность излучения лазера определяется формулой $P=K(I_{\phi}-I_{\phi 0})$, где $I_{\phi 0}$ – начальный ток фотодиода, практически определяемый фоновой (паразитной) освещенностью в лаборатории при напряжении лазера $U_{\delta}=0$, значение коэффициента K указано на корпусе фотодиода. Энергетическая и вольт-амперная характеристики снимаются одновременно. Энергетическую характеристику в её начале следует снимать с малым шагом тока, чтобы точно определить значение порогового тока и границы режимов.

В процессе измерений не допускать попадания в глаза прямого либо отраженного излучения лазера. Время работы лазера в когерентном режиме должно быть по возможности малым, не следует делать перерывов в измерении при когерентном режиме работы лазера, нужно выключить установку сразу после проведения необходимых измерений.

Задание и порядок выполнения работы

1. Снять вольт-амперную и энергетическую характеристики лазера:

$$I_{\delta}=f(U_{\delta}), \quad P=f(I_{\delta}).$$

Напряжение на лазерном диоде менять от нуля до значения, при котором ток лазерного диода не превышает максимально допустимого значения. Для снятия энергетической характеристики необходимо обеспечить правильное угловое положение лазера относительно фотодиода ФД-1. Для этого после подачи напряжения на фотодиод ФД-1 установить напряжение на лазерном диоде, обеспечивающее заметное значение фототока I_{ϕ} , а затем с помощью поворотного устройства найти положение лазера, при котором фототок будет иметь максимальное значение. При дальнейших измерениях энергетической характеристики это положение не следует изменять.

2. Снять диаграмму направленности излучения в плоскости перехода для различных режимов работы лазера. Для этого необходимо определить зависимость фототока в цепи фотодиода ФД-2 от угла поворота φ лазера в горизонтальной плоскости относительно фотодиода ФД-2.

Эту зависимость нужно определить для значений тока лазера соответствующих режимам свертлюминесценции и когерентного излучения.

3. По результатам измерений рассчитать:

а) значение КПД $\eta = \frac{P}{P_0} = \frac{P}{I_0 U_0}$;

б) внешний квантовый выход $\eta_{\text{внеш}}$, который определяется как отношение числа излученных фотонов в 1 секунду к числу рекомбинирующих за это время пар носителей. Число электронов, рекомбинирующих за 1 секунду, находится делением тока лазера на заряд электрона ($q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), а число излучаемых за 1 секунду фотонов – делением мощности излучения лазера на энергию одного кванта $h\nu$, определяемую исходя из значения длины волны излучения лазера ($\nu = c/\lambda$, $c=3 \cdot 10^8$ м/с, $\lambda=0,84$ мкм, $h=6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с). Для расчета используются вольт-амперная и энергетическая характеристики, соответствующие режиму когерентного излучения лазера;

в) значение угла расходимости излучения $\Delta\phi$, который определяется по диаграмме направленности излучения в плоскости перехода.

Результаты расчета представить в виде таблицы, содержащей экспериментальные значения тока лазера, напряжения на лазере, мощности излучения и расчетные значения параметров лазера. Выводы по работе должны быть сделаны относительно зависимости параметров лазера от режима работы лазера.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Паспортные данные исследуемого лазера.
3. Графики полученных зависимостей, таблица с результатами расчетов.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Устройство инжекционного лазера.
2. Способ создания инверсной населенности в инжекционном лазере.
3. Что такое пороговый ток и как он зависит от температуры?
4. Объяснить энергетическую характеристику лазера.
5. Объяснить зависимость диаграммы направленности и спектральной характеристики от тока лазера.
6. Способы модуляции лазерного излучения.
7. Параметры инжекционного лазера

Литература

1. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника: Учеб. пособие для вузов /Под ред. Н.Д. Федорова. – М.: Радио и связь, 1988.
2. Андрушко Л.М., Федоров Н.Д. Электронные и квантовые приборы СВЧ. – М.: Радио и связь, 1981.
3. Панфилов И.Г. Приборы СВЧ и оптического диапазонов. – М.: Радио и связь, 1983.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕЛИЙ-НЕОНОВОГО ОПТИЧЕСКОГО КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА

Цель работы

1. Ознакомиться с устройством и принципом работы оптического квантового генератора (ОКГ).
2. Изучить характеристики ОКГ в режиме непрерывной генерации.
3. Ознакомиться со свойствами излучения ОКГ.

Краткие теоретические сведения

Квантовыми приборами называют приборы, в которых для различного рода преобразований электромагнитных колебаний используется энергия, связанная с квантовыми переходами частиц, входящих в единый ансамбль (молекула, кристалл твердого тела, газ и др.).

В обычных усилителях или генераторах СВЧ-процесс возбуждения электромагнитных колебаний или их усиления осуществляется за счет преобразования кинетической энергии заряженных частиц в энергию электромагнитного высокочастотного поля. Существенно, что кинетическая энергия частиц, так же как и энергия электромагнитного поля, изменяется непрерывно и в соответствии с этим все явления в подобных генераторах и усилителях описываются закономерностями классической электродинамики.

В квантовых генераторах и усилителях в результате взаимодействия электромагнитного поля с молекулами, атомами или электронами изменяется не кинетическая, а их внутренняя энергия. Поскольку внутренняя энергия молекул, атомов, электронов и других частиц может иметь лишь строго определенные квантовые значения (которые называются устойчивыми или стационарными), то переходить из одного состояния в другое они могут только скачком, а не путем постепенного изменения энергии. Это значит, что энергетические состояния подобных квантовых систем характеризуются рядом дискретных значений потенциальной энергии W_1, W_2, \dots, W_n , т.е. рядом уровней энергий. Вследствие этого все явления, происходящие при взаимодействии электромагнитного поля с квантовыми системами, описываются законами квантовой механики. В частности, если энергия на верхнем энергетическом уровне W_n , а на нижнем W_m (т.е. $W_n > W_m$), то переход атома с верхнего на нижний уровень (n - m -переход) сопровождается излучением электромагнитной энергии строго определенной частоты f_{nm} , которая определяется из известного соотношения Бора

$$f_{nm} = \frac{W_n - W_m}{h}, \quad (10.1)$$

где $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с - постоянная Планка.

Если же атом поглощает квант энергии частоты f_{mn} внешнего электромагнитного поля, то он переходит с нижнего уровня на верхний (m-n-переход), т.е. возбуждается.

Возбужденное состояние атома малоустойчиво: через время порядка $10^{-8} \dots 10^{-9}$ с атом возвращается в нормальное состояние. Эту величину обычно называют временем жизни возбужденного атома. Из такого возбужденного состояния атом может перейти в основное состояние двояким образом:

- а) самопроизвольно;
- б) под действием внешнего электромагнитного поля соответствующей частоты.

Излучение, вызванное первым переходом, называется спонтанным и является некогерентным излучением.

Излучение, вызванное вторым переходом, называется индуцированным. Оно пропорционально плотности электромагнитного поля и находится с ним в определенных фазовых соотношениях, т.е. оно когерентно с полем. Последний вид излучения лежит в основе принципа действия квантовых генераторов.

Главная задача при создании таких генераторов состоит в получении "активного вещества", т.е. вещества, в котором в возбужденном состоянии способно находиться больше атомов, чем в стационарном ($N_n > N_m$). Без применения специальных искусственных приемов обогащения активного вещества возбужденными атомами излучение возбужденных атомов будет целиком поглощено атомами в основном состоянии и мы не получим когерентного излучения.

Для перевода частицы в возбужденное состояние необязательно поглощать энергию на частоте перехода, она может быть сообщена другим способом. Например, за счет соударения атомов газа со свободными электронами при электрическом разряде, за счет быстрого перепада давления, путем сортировки, когда из квантовой системы удаляются микрочастицы, находящиеся на низшем из двух выбранных уровней, и т.д. (эти активизирующие процессы обычно называют "накачкой").

Таким образом, подобно обычным генераторам и усилителям, соответствующие квантовые приборы требуют источник питания, энергия которого преобразуется в энергию электромагнитного поля. Допустим теперь, что тем или иным способом мы получили возбужденное состояние или так называемую отрицательную температуру вещества. Тогда любой квант света (или, что то же самое, фотон) подходящей частоты, пролетая в возбужденной системе, вызовет лавину фотонов. Интенсивность такой лавины будет расти с увеличением протяженности активной среды. Практически нельзя создать среду очень большой протяженности, и, кроме того, за один "проход" фотонной лавины далеко не все возбужденные атомы подвергнутся воздействию стимулирующих фотонов. Коэффициент использования возбужденных атомов получается незначительным.

Для увеличения коэффициента использования возбужденных атомов активную среду можно поместить между двумя плоскими параллельными зерка-

лами и заставить световой луч многократно проходить через активную среду, отражаясь от зеркал. Эта система из двух зеркал, известная как интерферометр Фабри–Перо, является резонатором оптического диапазона.

Волна, возникшая в активном веществе и распространяющаяся вдоль оси квантовой системы, будет возрастать из-за вынужденного излучения активной среды. Отразившись от противоположного зеркала, она снова попадет в активную среду, так что увеличение её амплитуды будет продолжаться. Если усиление волны, получающееся при каждом прохождении ею активной среды, достаточно для возмещения потерь при отражении, то в системе возникает стоячая волна. Одну из зеркальных поверхностей можно сделать полупрозрачной, и тогда часть света будет проходить через нее; в результате на выходе квантового генератора возникает мощный световой поток.

Волны, распространяющиеся под некоторым углом к оси (отличным от 90°), выйдут из оптического резонатора после нескольких отражений. В отличие от волн, распространяющихся строго вдоль оси системы, такие волны не будут усиливаться ввиду отсутствия необходимых условий. В результате выходной луч такого резонатора будет узконаправленным, т.е. с малым углом расходимости, так как он многократно (несколько тысяч раз) проходит через резонатор без заметного отклонения от оси. Таким образом, система из двух параллельных зеркал отбирает из множества возможных типов колебаний (мод) те немногие, которые распространяются в направлениях, очень близких к оси системы.

Поле между зеркалами может быть представлено как суперпозиция полей плоских волн, распространяющихся в прямом и обратном направлениях. Аксиальные волны образуют стоячую волну, которая является устойчивой, если расстояние между зеркалами (L) равно целому числу полуволн. Следовательно, прибор будет генерировать на тех частотах, для которых выполняется условие

$$L = q \frac{\lambda_q}{2}, \quad q = 1, 2, 3, \dots \quad (10.2)$$

где q - целое число - индекс;

λ_q - длина волны при выбранном значении q .

Каждому индексу q соответствует своя частота V_q :

$$V_q = \frac{c}{\lambda_q} = \frac{qc}{2L}, \quad (10.3)$$

где интервал между частотами соседних продольных видов колебаний, различающихся по величине q на единицу, составляет

$$\Delta V = V_q - V_{q-1} = \frac{c}{2L}. \quad (10.4)$$

Соседние по частоте типы колебаний (моды) находятся так близко друг от друга, что одновременно многие из них оказываются в полосе индуцированного излучения. Таким образом, генерация обычно происходит на нескольких типах колебаний.

Кроме того, условия генерации могут выполняться и для целого ряда колебаний, распространяющихся под некоторым углом θ к оси резонатора, если этот угол меньше угла дифракции. Собственные частоты этих угловых (или поперечных) колебаний равны

$$V_q = \frac{qc(\cos \theta)}{2L}. \quad (10.5)$$

Таким образом, в резонаторе одновременно возможно возбуждение очень большого числа типов колебаний. Типы колебаний в интерферометре Фабри–Перо являются ТЕМ-типами, т.е. электрические и магнитные составляющие поля перпендикулярны продольной оси интерферометра.

В резонаторе с плоскими зеркалами основным типом колебаний являются ТЕМ₀₀-колебания, обладающие четной радиальной симметрией и соответствующие большому числу эквидистантно расположенных частот, так как обычно $q \geq 10^6$.

Существенным недостатком оптического резонатора с плоскими зеркалами является требование высокой точности относительно параллельности зеркал и обработки их плоскостей (допускается непараллельность порядка нескольких угловых секунд, а неплоскость не должна превышать $\frac{\lambda}{50} \dots \frac{\lambda}{100}$). Поэтому в ряде приборов используется оптический резонатор, образованный двумя сферическими зеркалами с равной кривизной, расположенными одно от другого на расстоянии радиуса кривизны, – так называемый конфокальный резонатор.

Дифракционные потери в таком резонаторе меньше, чем в плоскопараллельном. В конфокальном резонаторе типы колебаний отстоят один от другого на еще меньшее расстояние $\frac{c}{4L}$. Колебания имеют небольшие аксиальные составляющие электрического и магнитного полей и обозначаются ТЕМ_{qmn}, где m означает число изменений знака поля по углу (0,1,2, ...), а n – вдоль радиуса (0,1,2, ...).

В газовых лазерах широкое распространение получил резонатор, состоящий из плоского и сферического зеркал, расположенных одно от другого на расстоянии радиуса кривизны сферического зеркала. Он обладает достоинствами как плоскопараллельного, так и конфокального резонаторов.

Подводя итоги, можно отметить, что для создания оптического усилителя или генератора нужно иметь:

- 1) активное вещество с уровнями, переходы между которыми соответствуют заданной частоте;
- 2) источники энергии для перевода системы в возбужденное состояние, т.е. устройства "накачки";
- 3) цепь положительной обратной связи, т.е. резонатор.

Устройство и принцип действия гелий-неонового ОКГ

Широкое распространение получил гелий-неоновый ОКГ. Рабочей средой в этом ОКГ служит смесь двух газов – гелия и неона, а рабочими уровнями – энергетические уровни возбужденных атомов неона. ОКГ, в которых используются уровни возбужденных атомов, называют атомарными.

Схематическое устройство гелий-неонового ОКГ показано на рис 10.1.

Стеклоанная или кварцевая трубка 1 (газовая кювета) заполнена смесью газов гелия и неона, взятых в отношении 1:10 при общем давлении порядка 1 мм рт.ст.

Длина кюветы в различных генераторах может быть разной - от нескольких сантиметров до нескольких метров.

К торцам кюветы приварены плоскопараллельные стеклянные или кварцевые пластины 2, расположенные относительно оси кюветы под углом Брюстера θ .

Как известно из оптики, луч света, плоскость поляризации которого совпадает с плоскостью падения на такую пластину, практически не претерпевает отражений.

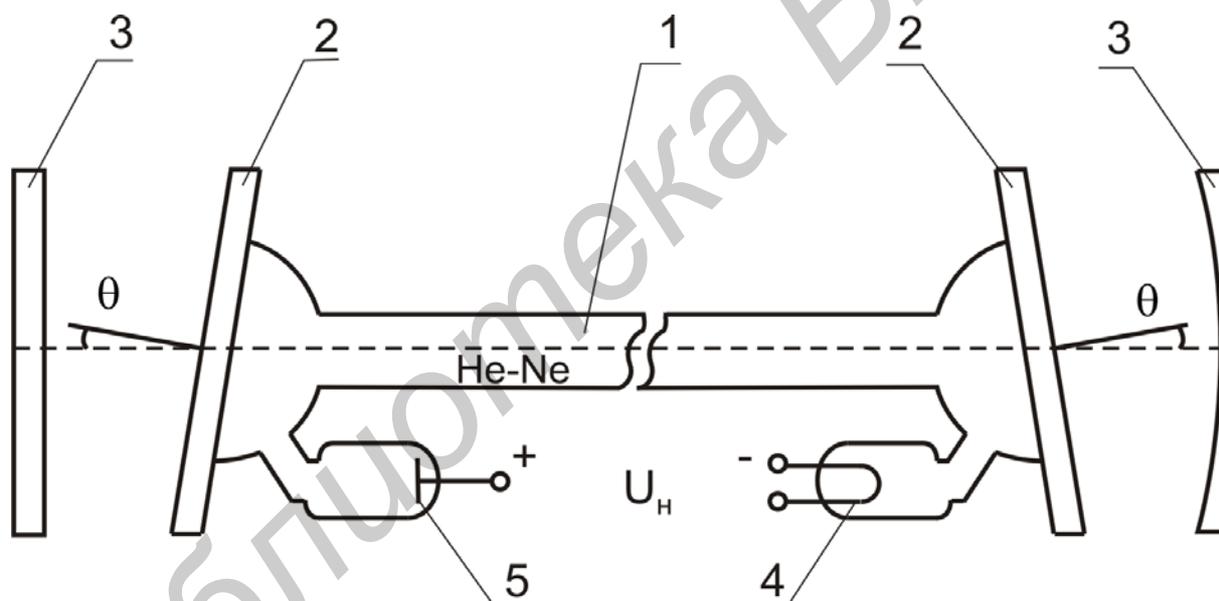


Рис. 10.1. Устройство гелий-неонового лазера

По обе стороны кюветы располагают вогнутые либо плоские зеркала 3, образующие оптический резонатор.

Одно из зеркал, через которое луч выходит наружу, делают полупрозрачным.

Для увеличения коэффициента отражения зеркал на отражающую поверхность зеркал наносят диэлектрические покрытия, состоящие из 10-15 четвертьволновых чередующихся между собой слоев сульфида цинка и фторида магния.

Для возбуждения газовой смеси внутри газовой кюветы за пределами зоны генерации располагают термоэлектронный катод 4 и анод 5, к которым при-

кладывается постоянное высокое напряжение: 1...2 кВ на 1 м разрядного промежутка.

Упрощенная диаграмма нижних энергетических уровней гелия и неона для наиболее широко используемого режима генерации ($\lambda=0,63$ мкм) приведена на рис.10.2.

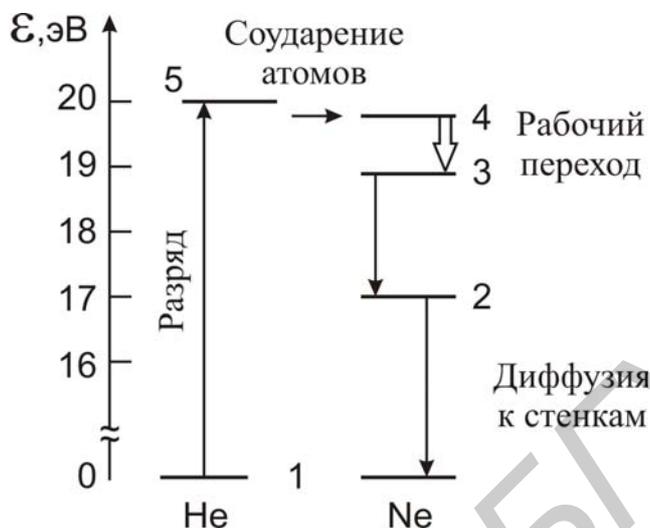


Рис. 10.2. Энергетические диаграммы гелия и неона

Возбужденному уровню 5 атома гелия соответствует энергия 20,61 эВ. Оптические спонтанные переходы из состояния 5 в основное 1 оказываются запрещенными. Следовательно, состояние 5 имеет большое время жизни и является метастабильным. Это время жизни порядка 10^{-3} с. Возбужденный уровень 4 атома неона по энергии очень близок к уровню 5 гелия (разница в энергии составляет 0,04 эВ).

Для создания инверсии населенности используется метод электрического разряда. При наличии разряда за счет неупругих соударений с быстрыми электронами происходит возбуждение атомов гелия: атомы гелия переходят из основного состояния 1 в возбужденное метастабильное состояние 5 по схеме $\text{He}(1) + \bar{e} \rightarrow \text{He}(5) + e$, где число в скобках означает номер уровня на рис.10.2, а \bar{e} и e – быстрый и медленный электроны. В результате соударения кинетическая энергия электрона уменьшается.

Если электроны в разряде имеют более высокую энергию, то может происходить ионизация атомов гелия. Энергетический уровень иона гелия располагается выше уровня 5 (энергия 24,6 эВ).

Появившиеся в результате разряда возбужденные атомы гелия сталкиваются с невозбужденными атомами неона – другого газа смеси. В результате неупругих соударений возбужденный атом гелия $\text{He}(5)$ передает свою кинетическую энергию невозбужденному атому неона $\text{Ne}(1)$ и переходит в основное состояние $\text{He}(1)$. При этом невозбужденный атом неона переходит в возбужденное состояние $\text{Ne}(4)$. Таким образом, схема процесса соударения имеет вид $\text{He}(5) + \text{Ne}(1) \rightarrow \text{He}(1) + \text{Ne}(4)$.

Этот процесс передачи энергии идет достаточно эффективно, так как разница в энергиях состояний Ne (5) и Ne (4) очень мала. Энергия, которую отдает атом гелия, почти полностью переходит к атому неона, а небольшой излишек энергии атома гелия переходит в кинетическую энергию сталкивающихся атомов.

Для получения инверсной населенности важно также соотношение времен жизни уровней 4 и 3 рабочего перехода. Время жизни верхнего уровня 4 перехода, связанное со спонтанным излучением, должно быть больше, чем у нижнего уровня 3. При этом условии скорость убывания населенности верхнего уровня меньше скорости убывания населенности нижнего уровня и таким образом возможно поддержание инверсной населенности. Для гелий-неонового ОКГ это условие выполняется, так как время жизни верхнего уровня около 10^{-7} с, а нижнего уровня 10^{-8} с.

Атомы гелия являются посредниками при передаче энергии от быстрых электронов к атомам неона. Поэтому гелий можно назвать вспомогательным, а неон – основным, или рабочим, газом. Вообще существует и обратный, нежелательный, процесс – передача энергии от атомов неона к атомам гелия. Чтобы преобладала передача энергии от атомов гелия к атомам неона, необходимо значительное преобладание концентрации вспомогательного газа (гелия) над концентрацией неона.

Увеличение населенности уровня Ne (4) может при определенных условиях привести к получению инверсной населенности перехода 4 – 3. При этом необходимо иметь в виду, что в разряде идет не только возбуждение атомов гелия, но и атомов неона. В результате неупругих соударений быстрых электронов с атомами неона может происходить образование возбужденных атомов неона, характеризующихся уровнями 2, 3 и 4. При этом имеются как прямые переходы с уровня 1 на каждый из верхних, так и ступенчатые, когда атом переходит в состояние 2, а после нового столкновения с электроном в состояние 3 и т.д.

Установлено, что прямое возбуждение уровней 3 и 4 можно не учитывать. Значение ступенчатого возбуждения весьма существенно при больших токах разряда, так как уровень 2 в разряде интенсивно заселяется, а время жизни для него велико (метастабильный уровень). При достаточно большой населенности уровня 2 увеличивается число возбужденных атомов в состоянии 3, получившихся в результате ступенчатого возбуждения, т.е. дополнительного возбуждения атомов Ne (2) электронами. Это увеличивает населенность уровня 3 и снижает разность населенностей уровней 4 и 3.

Следует иметь в виду, что населенность уровня Ne (5) определяется числом быстрых электронов и поэтому примерно пропорциональна току разряда. В то же время ступенчатый процесс заселения уровня Ne (3) через промежуточный уровень Ne (2) примерно квадратичен числу электронов или току разряда. При больших токах разряда преобладает второй процесс, поэтому происходит увеличение населенности уровня Ne (3), уменьшается инверсия населенностей уровня перехода 4 – 3 и возможен срыв колебаний.

Для борьбы с этим нежелательным явлением необходимо избегать роста населенности уровня 2. Причиной, которая может переводить атомы неона из

метастабильного состояния 2 в основном, является соударение атомов со стенками кюветы в результате диффузии. Поэтому следует облегчить диффузию возбужденных частиц к стенкам. Очевидно, для этой цели необходимо уменьшить диаметр газоразрядной трубки. Поэтому в гелий-неоновых ОКГ диаметр трубки не превышает 10 мм.

Генерация в ОКГ начинается со спонтанного излучения, которое не поляризовано, но в результате применения окон Брюстера создадутся благоприятные условия для прохождения излучения одной поляризации. Это излучение вызовет в активной среде вынужденные переходы с той же поляризацией. Таким образом, применение окон Брюстера позволяет не только уменьшить потери и облегчить генерацию, но также дополнительно получить поляризованное излучение.

На рис. 10.2 была приведена упрощенная схема энергетических уровней. В действительности число уровней очень велико и возможно возбуждение колебаний на нескольких частотах. В гелий-неоновых ОКГ получено инфракрасное излучение ($\lambda = 3,39$ и $1,15$ мкм) и видимое излучение ($\lambda=0,63$ мкм) с мощностью несколько десятков и сот милливольт.

Выходная мощность зависит от тока разряда, общего давления в газовой смеси, соотношения парциальных давлений гелия и неона, диаметра разрядной трубки.

С ростом тока разряда увеличиваются число электронов в разряде и населенность возбужденного уровня гелия и верхнего уровня рабочего перехода неона. Увеличение инверсной населенности приводит к росту выходного излучения. При большом токе разряда (свыше 100...200 мА) выходная мощность уменьшается из-за влияния процесса ступенчатого возбуждения нижнего рабочего уровня неона с метастабильного уровня (уровень 2 на рис. 10.2). При достаточно больших токах ($I>400$ мА) генерация срывается.

С ростом общего давления в смеси увеличивается концентрация атомов гелия и неона, растет населенность возбужденных уровней и выходная мощность. Однако при высоком давлении, когда концентрация частиц в разряде становится большой, уменьшается длина свободного пробега электронов и соответственно уменьшается энергия, приобретаемая электроном на этом пути в электрическом поле. Последнее приводит к ослаблению процесса передачи энергии от электронов к атомам гелия и, в конце концов, к падению выходной мощности.

В гелий-неоновом ОКГ, как и в других газовых ОКГ, концентрация частиц невысока, поэтому влияние взаимодействия между частицами на ширину спектральной линии мало. Ширина спектральной линии газовых ОКГ порядка $10^{-3} \dots 10^{-2}$ Å по шкале длин волн. Ширина спектральной линии генерации газовых ОКГ самая минимальная среди всех типов ОКГ и достигает около 1 Гц. Дополнительно преимущество газовых ОКГ, в том числе и гелий-неонового, состоит в малой угловой расходимости выходного излучения (порядка угловых минут).

Излучение квантовых генераторов может быть промодулировано и использовано для передачи информации.

Модуляцию излучения можно осуществлять либо внутри лазера (внутренняя модуляция), либо вне его (внешняя модуляция). Под внутренней модуляцией поэтому понимают управление процессом генерации в лазере, а под внешней - воздействие на излучение вне лазера.

Мощность излучения лазера зависит от инверсии населенностей уровней $N_n - N_m$, которая, в свою очередь, зависит от интенсивности накачки. Изменение интенсивности накачки вызывает и изменение интенсивности полезного индуцированного излучения. Поэтому если подавать на лазер промодулированную мощность накачки, то мощность излучения также окажется промодулированной примерно по тому же закону.

Однако при внутренней модуляции получить большие коэффициенты модуляции трудно из-за возникающих при этом больших нелинейных искажений.

Осуществление внешней модуляции оптического излучения основано на использовании различного рода эффектов, возникающих при прохождении оптического излучения: через анизотропные среды.

Наиболее удобным является электрооптический эффект, сущность которого заключается в изменении поляризации оптического излучения под действием электрического поля.

Указанный эффект вызывает амплитудную модуляцию излучения следующим образом (рис.10.3).

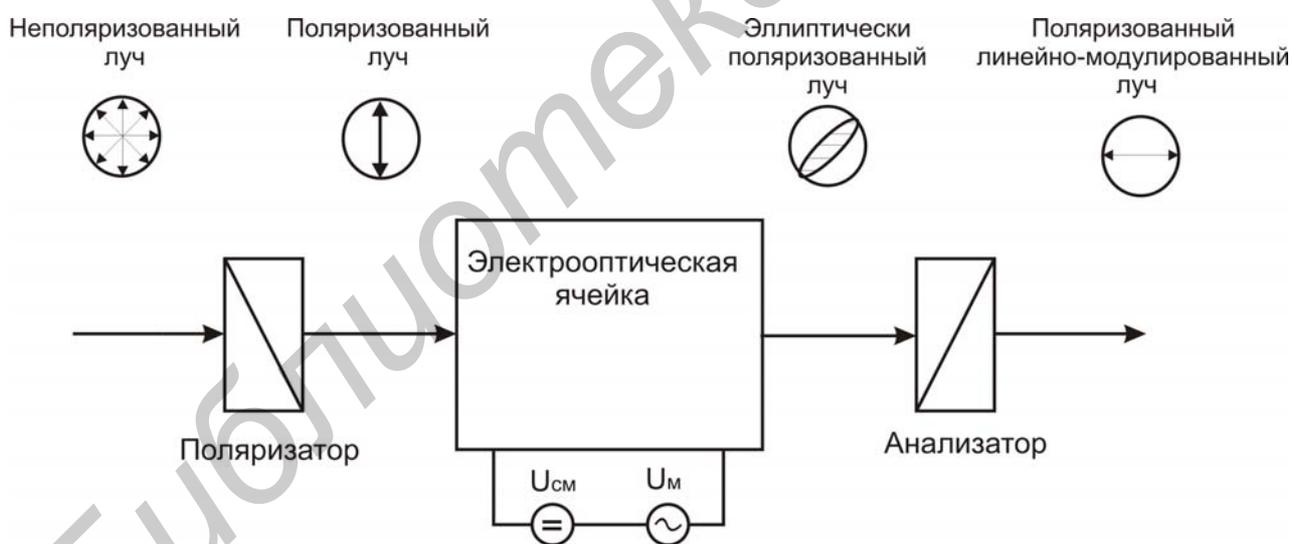


Рис.10.3. К пояснению внешней амплитудной модуляции, основанной на использовании электро-оптического эффекта

Неполяризованный луч падает на поляризатор и линейно поляризуется.

В электрооптической ячейке, в качестве которой обычно используется анизотропное вещество, линейно поляризованный луч расщепляется на два линейно поляризованных луча с взаимно перпендикулярными плоскостями поляризации – на так называемые обыкновенный и необыкновенный лучи. Из опти-

ки известно, что эти лучи имеют разные коэффициенты преломления и, следовательно, разные скорости распространения. После выхода из ячейки, складываясь, они создают излучение, уже поляризованное эллиптически. Вещество электрооптической ячейки находится под действием электрического поля, определяемого напряжением U_m . При изменении U_m изменяются показатели преломления обоих лучей, что ведет к изменению разности фаз между лучами и, таким образом, к изменению эксцентриситета эллипса.

Пропуская далее луч через анализатор, плоскость поляризации которого скрещена с плоскостью поляризатора, на его выходе получаем изменяющееся вместе с U_m линейно поляризованное излучение.

Существуют вещества с двумя различными видами электрооптического эффекта. В одном случае разность фаз между обыкновенным и необыкновенным лучом на выходе ячейки пропорциональна U_m^2 . Электрооптический эффект в этом случае называют квадратичным. Когда же разность фаз пропорциональна U_m , эффект называют линейным. Квадратичный электрооптический эффект наблюдается в жидкостях (эффект Керра) - в нитробензоле и др.

Линейный эффект (Поккельса) имеет место в кристаллах дигидрофосфата калия (КДР), дигидрофосфата аммония (АДР) и ниобата лития.

Измерительная установка и методические указания к выполнению работы

В работе исследуется атомарный одномодовый газовый лазер непрерывного режима работы типа ЛГН-208Б.

Измерительная установка для исследования лазера состоит из дифракционной решетки, поляризатора света с угломерной шкалой, экрана с микрометрическими винтами, фотодетектора, модулятора света, которые установлены на оптической скамье.

Интенсивность излучения лазера измеряется с помощью фотодетектора, состоящего из фотодиода, источника постоянного напряжения и микроамперметра, измеряющего ток в цепи фотодиода (фототок I_Φ).

Мощность излучения лазера P определяется формулой

$$P = K(I_\Phi - I_{\Phi 0}), \quad (10.6)$$

где $I_{\Phi 0}$ - начальный фототок, определяемый фоновой освещенностью в лаборатории.

Значение коэффициента K указано на корпусе фотодетектора.

При измерении мощности излучения лазера используется фотодиод с большой фоточувствительной площадкой.

Фотодетектор с таким фотодиодом необходимо располагать вблизи выходного окна лазера, подобрав положение фотодетектора относительно луча лазера по максимальному значению фототока.

Для определения поляризации излучения ОКГ используется поляризатор с угломерной шкалой, который устанавливают между квантовым генератором и фотодетектором. Вращением поляризатора в пределах 180° определяется зависимость

мощности излучения ОКГ от угла поворота поляризатора. Угол, при котором показания индикатора мощности минимальны, определяет направление плоскости поляризации излучения. Степень поляризации излучения находится отношением минимального показания индикатора мощности к максимальному показанию.

Для измерения плоского угла расхождения ОКГ используется устройство, состоящее из экрана и микрометрического винта со шкалой, который позволяет перемещать в горизонтальной плоскости фотодиод с малой площадью окна, выделяющей лишь часть лазерного луча.

Угол расхождения луча ОКГ может быть измерен, как это показано на рис. 10.4.

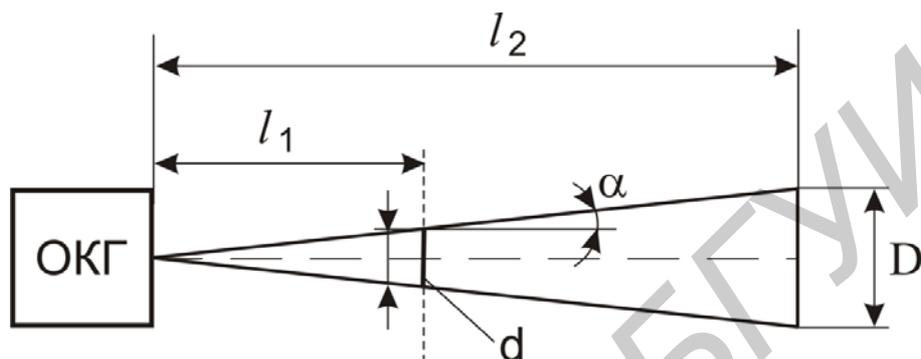


Рис. 10.4. Определение плоского угла расходимости луча ОКГ

Диаметры D и d определяются на уровне половинной мощности. Угол расхождения вычисляется по формуле

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{D - d}{l_2 - l_1}. \quad (10.7)$$

Расстояние l_1 выбирается минимально возможным, а l_2 - максимальным.

Для измерения распределения энергии излучения по поперечному сечению луча необходимо перемещать фотодиод с помощью микрометрического винта через 0,05 мм в пределах поперечного сечения луча, фиксировать значения фототока I_{Φ} и соответствующие положения r микрометрического винта.

Измерения проделать 2-3 раза при больших удалениях l_2 фотодиода от ОКГ.

Измерения длины волны излучения в данной работе осуществляется дифракционным методом. Если дифракционную решетку расположить перпендикулярно направлению распространения лазерного луча, то на экране, помещенном на некотором расстоянии от решетки, четко виден ряд дифракционных максимумов (рис. 10.5). Эти максимумы обусловлены тем, что волны, исходящие из различных элементов решетки, приходят в данные точки в фазе, что выполняется при условии

$$a \sin \phi = n\lambda, \quad (10.8)$$

где a - расстояние между штрихами решетки (постоянная решетки);

ϕ - угол дифракции;

λ - длина волны излучения;

n - целое число - порядок дифракции.

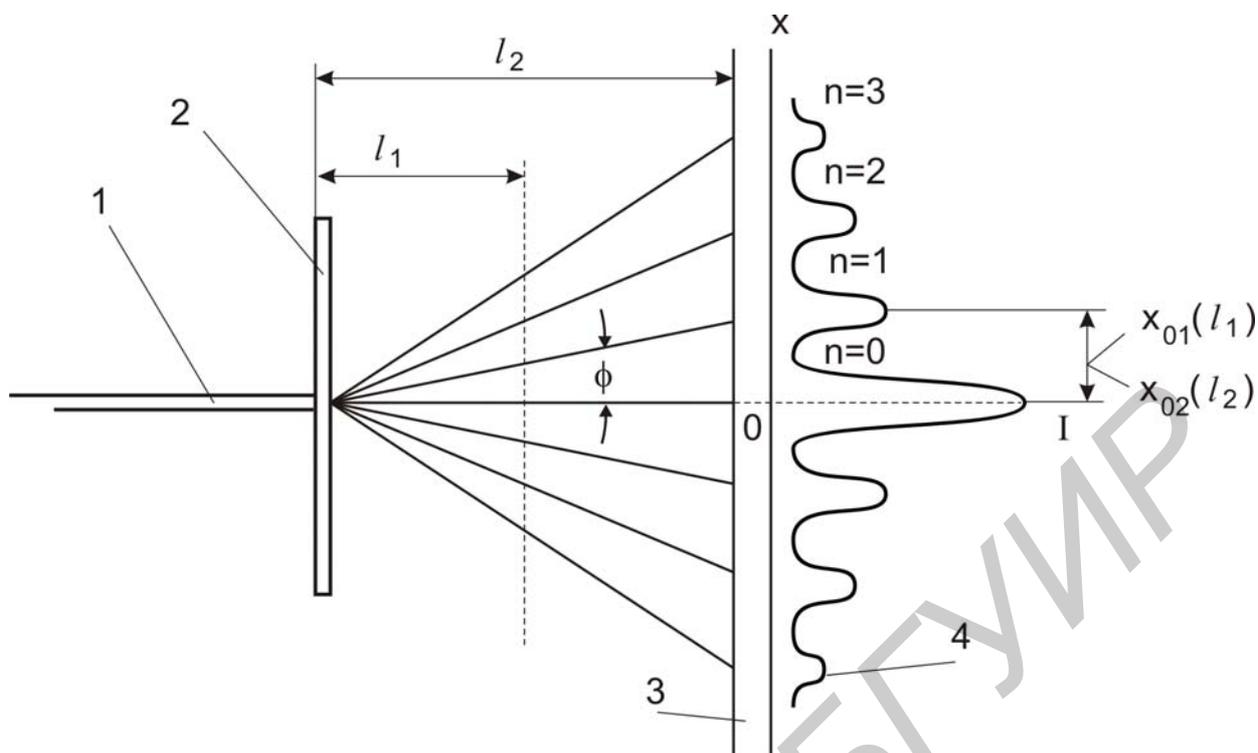


Рис. 10.5. Дифракция луча ОКГ:

1 - луч ОКГ; 2 - дифракционная решетка; 3 - экран; 4 - распределение интенсивности дифракционных максимумов на экране

Числу $n = 0$ соответствует свет, прошедший без отклонения.

Если угол ϕ мал, то можно считать, что $\sin \phi \approx \operatorname{tg} \phi \approx \phi$ и его величину можно найти как отношение расстояния между максимумами к расстоянию от экрана до решетки (рис. 10.5). При $n = 1$

$$\lambda = \frac{a(X_{02} - X_{01})}{l_2 - l_1}, \quad (10.9)$$

где X_{01} - расстояние между соседними максимумами (при $n=0$ и $n=1$) для величины l_1 удаления экрана от решетки;

X_{02} - такое же расстояние, но для величины удаления l_2 .

Расстояния X_{01} и X_{02} находятся как разность показаний микрометрического винта, соответствующих максимальным значениям фототока I_{Φ} для дифракционных максимумов $n = 0$ и $n=1$.

Измерение расстояний между дифракционными максимумами повторить для 3-4 значений l_2 , оставляя величину l_1 неизменной. Вычислить длину волны λ по формуле (10.10), где $a = 0,01$ мм для каждого измерения, и затем найти среднеарифметическое значение длины волны $\lambda_{\text{ср}}$.

Внешняя модуляция излучения ОКГ производится с помощью модулятора света типа МЛ-3. Модулятор МЛ-3 предназначен для непрерывной и импульсной амплитудной модуляции линейно поляризованного светового излуче-

ния газовых ОКГ в спектральном диапазоне 3000-18000 Å в диапазоне частот 1 кГц ... 100 мГц.

Действие модулятора основано на линейном электрооптическом эффекте в кристаллах КДР.

Зависимость изменения интенсивности излучения ОКГ, прошедшего модулятор, от величины электрического поля называется характеристикой пропускания модулятора.

На модулятор подаются модулирующее высокочастотное напряжение и напряжение смещения постоянного тока. Величина напряжения смещения определяет рабочую точку на характеристике пропускания модулятора. Рабочая точка должна находиться на линейном участке характеристики пропускания модулятора.

Приемником модулированного излучения ОКГ служит фотодетектор, выходной сигнал которого поступает на вход осциллографа типа С1-72, модулирующее напряжение на модулятор подается с выхода генератора сигналов типа ГЗ-112.

Задание и порядок выполнения работы

1. Включить ОКГ и измерить выходную мощность.
2. Снять и построить график зависимости выходной мощности ОКГ от угла поворота поляризатора, определить степень поляризации излучения.
3. Снять и построить график распределения мощности излучения по сечению луча лазера. $P = f(r)$. Определить угол расходимости луча излучения ОКГ, вычислить плотность энергии ($\text{Вт}/\text{см}^2$) излучения ОКГ на различных расстояниях. При расчетах считать, что форма лазерного луча в поперечном сечении представляет собой круг.
4. Измерить длину волны излучения ОКГ. По найденному значению $\lambda_{\text{ср}}$ определить энергию излучения на рабочем переходе.

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda_{\text{ср}}}, \quad (10.10)$$

где $h=6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с;

$$c=3 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

5. Снять характеристику пропускания модулятора света.
6. Произвести модуляцию луча ОКГ сигналом заданной частоты, посмотреть форму сигнала на выходе фотодетектора, получить неискаженный сигнал выбором рабочей точки на характеристике пропускания модулятора, убедиться в том, что наблюдаемый сигнал – результат модуляции излучения ОКГ.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Блок-схемы установок для снятия характеристик ОКГ и модулятора.
3. Графики полученных зависимостей.
4. Расчет значений углов расходимости, длины волны излучения.
5. Краткие выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Устройство гелий-неонового ОКГ.
2. Резонансные системы ОКГ.
3. Принцип действия гелий-неонового ОКГ.
4. Основные параметры ОКГ.
5. Модуляция излучения ОКГ.

Литература

1. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника: Учеб. пособие для вузов /Под ред. Н.Д. Федорова. – М.: Радио и связь, 1988.
2. Андрушко Л.М., Федоров Н.Д. Электронные и квантовые приборы СВЧ. – М.: Радио и связь, 1981.
3. Панфилов И.Г. Приборы СВЧ и оптического диапазонов. – М.: Радио и связь, 1983.

ИНСТРУКЦИИ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

ВАТТМЕТР ТЕРМИСТОРНЫЙ МЗ-28

Ваттметр поглощаемой мощности термисторный МЗ-28 предназначен для измерения мощности непрерывных колебаний и средней мощности импульсно-модулированных СВЧ-сигналов.

Ваттметр состоит из термисторного моста Я2М-64 и высокочастотного переключателя (преобразователя СВЧ-мощности).

Порядок включения и проведения измерений мощности

Перед включением ваттметра необходимо:

ручку «УСТАНОВКА НУЛЯ» повернуть влево до упора;

все клавиши переключателя «ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЯ» должны быть выключены;

ручку «ВЧ» переключателя установить в положение «0»;

тумблер «СЕТЬ» поставить в верхнее положение, при этом загорается индикаторная лампа;

установить переключатель «ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЯ» в положение 10 мВт и ручками «УСТАНОВКА НУЛЯ» сбалансировать мост, т.е. установить нуль ваттметра;

прогреть ваттметр в течение 15 минут;

после прогрева ваттметра проверить и, если это необходимо, установить нуль ваттметра и перевести ВЧ-переключатель в положение «100», сделать отсчет по шкале стрелочного прибора.

Измеряемая мощность вычисляется по формуле

$$P_{\text{изм}} = (P_{\text{отсч}}/K_э) 100,$$

где $P_{\text{изм}}$ – измеряемая мощность;

$P_{\text{отсч}}$ – мощность, отсчитываемая по шкале ваттметра;

$K_э$ – коэффициент эффективности ВЧ-переключателя (преобразователя) = 0,9.

Примечание. При переходе на другой предел измерений необходимо проверять установку нуля на этом пределе (ВЧ-переключатель в положении «0»).

ВАТТМЕТР ТЕРМИСТОРНЫЙ МЗ-10А

Ваттметр поглощаемой мощности термисторный МЗ-10А предназначен для измерения мощности непрерывных колебаний и средней мощности импульсно-модулированных СВЧ-сигналов.

Ваттметр термисторный состоит из термисторного моста Я2М-64 и выносных термисторных преобразователей СВЧ-мощности (М5-89, М5-27, М5-42 и др.).

Порядок включения и проведения измерений мощности

Перед включением ваттметра необходимо:

ручку «УСТАНОВКА НУЛЯ» повернуть влево до упора;

все клавиши переключателя «ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ» должны быть выключены;

тумблер «СЕТЬ» поставить в верхнее положение, при этом загорается индикаторная лампочка;

установить переключатель «ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ» в положение 10 мВт и ручками «УСТАНОВКА НУЛЯ» сбалансировать мост, т.е. установить нуль ваттметра;

установку баланса производить при отсутствии СВЧ-мощности на входе преобразователя ваттметра, для чего необходимо установить максимальное затухание внешнего аттенюатора либо выключить источник СВЧ-мощности;

прогреть ваттметр в течение 15 минут;

после прогрева ваттметра проверить и, если это необходимо, установить нуль ваттметра, подать измеряемую СВЧ-мощность, сделать отсчет по шкале стрелочного прибора.

При переходе на другие пределы измерений необходимо предварительно установить нуль на них.

Значение измеряемой мощности подсчитывается по формуле

$$P_{\text{изм}} = (P_{\text{отсч}}/K_9) A,$$

где $P_{\text{изм}}$ – значение измеряемой мощности;

$P_{\text{отсч}}$ – отсчитанное по прибору значение мощности;

$K_э$ – коэффициент эффективности термисторного преобразователя;

$K_э = 0,8$ для преобразователя М5-89;

$K_э = 0,9$ для преобразователей М5-27 и М5-42;

A – ослабление внешнего аттенюатора в абсолютных единицах.

Отношение мощностей, выраженное в децибелах

$$A[\text{дБ}] = 10\lg P1/P2$$

$A,$ дБ	$\frac{P1}{P2},$ абс.ед.	$A,$ дБ	$\frac{P1}{P2},$ абс.ед.	$A,$ дБ	$\frac{P1}{P2},$ абс.ед.	$A,$ дБ	$\frac{P1}{P2},$ абс.ед.
0	1	0,8	1,202	7	5,01	60	10^6
0,1	1,023	0,9	1,230	8	6,32	70	10^7
0,2	1,047	1	1,260	9	7,95	80	10^8
0,3	1,071	2	1,586	10	10	90	10^9
0,4	1,091	3	1,995	20	10^2	100	10^{10}
0,5	1,122	4	2,510	30	10^3		
0,6	1,148	5	3,160	40	10^4		
0,7	1,175	6	3,980	50	10^5		

Пример. Пусть дано 34,7 дБ, в абсолютных единицах это будет составлять $30 \text{ дБ} = 10^3$; $4 \text{ дБ} = 2,51$; $0,7 \text{ дБ} = 1,175$.

Итого: $10^3 \times 1,175 \times 2,51 = 2,95 \times 10^3$.

ГЕНЕРАТОР СИГНАЛОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ Г4-82

Генератор Г4-82 используется в качестве источника СВЧ-мощности при проведении различного рода измерений в диапазоне СВЧ.

Диапазон рабочих частот генератора 5,6...7,5 ГГц. Выходная мощность генератора на разъеме ВЫХОД регулируется в пределах от 10^{-3} до 10^{-15} Вт.

Для подготовки генератора к работе необходимо:

ручку «ВЫХОД» установить в крайнее левое положение, аттенуатор – в положение – 40 дБ;

переключатель рода работ установить в положение Γ или \perp нажатием соответствующей кнопки;

тумблером «СЕТЬ ВКЛ» включить генератор и прогреть в течение не менее 5...10 минут;

ручкой, связанной со шкалой МГц, установить нужное значение частоты;

установить ручкой, связанной со шкалой (-дБ), ослабление аттенуатора для получения нужного уровня выходной мощности, определяемого по формуле

$$A_{ш} = |A| - (40 - |A_n|),$$

где $A_{ш}$ – показания шкалы аттенуатора, дБ;

A_n – поправка к показаниям аттенуатора, соответствующая уровню 100 мкВт, определяемая по графику, прилагаемому к генератору;

A – требуемый уровень мощности, дБ, определяемый по формуле

$$A = 10 \lg P/P_0.$$

Здесь P – нужное значение выходной мощности, Вт;

P_0 – мощность, равная 1 Вт.

После этого переключатель рода работ устанавливают в положение НГ.

РЕЗОНАНСНЫЙ ЧАСТОТОМЕР Ч2-31

Резонансный частотомер Ч2-31 предназначен для измерения частоты непрерывных и импульсно-модулированных колебаний. Диапазон измеряемых частот 16660...12000 МГц.

При измерении частоты непрерывных колебаний включать прибор в сеть не нужно, необходимо только тумблер «НГ» – «П» установить в положение «НГ».

Ручку «АТТЕНЮАТОР» установить в крайнее левое положение, ручку «ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ» - в среднее положение.

Для измерения частоты необходимо медленно вращать ручку перестройки частоты до получения максимального отклонения стрелки индикатора.

Показания шкалы частотомера, при которых стрелка индикатора максимально отклоняется, будут соответствовать измеренной частоте. При зашкаливании стрелки индикатора необходимо уменьшить чувствительность прибора ручкой «ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ».

При измерении частоты необходимо вести настройку частотомера со стороны высоких частот и производить отсчет частоты по первому резонансу.

РЕЗОНАНСНЫЙ ЧАСТОТОМЕР Ч2-32

Резонансный частотомер Ч2-32 предназначен для измерения частоты непрерывных и импульсно-модулированных колебаний. Диапазон измеряемых частот 8870...12000 МГц.

При измерении частоты непрерывных колебаний включать прибор в сеть не нужно, необходимо только тумблер «НГ» – «П» установить в положение «НГ».

Ручку «АТТЕНЮАТОР» установить в крайнее левое положение, ручку «ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ» - в среднее положение.

Для измерения частоты необходимо медленно вращать ручку перестройки частоты до получения максимального отклонения стрелки индикатора.

Показания шкалы частотомера, при которых стрелка индикатора максимально отклоняется, будут соответствовать измеренной частоте. При зашкаливании стрелки индикатора необходимо уменьшить чувствительность прибора ручкой «ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ».

При измерении частоты необходимо вести настройку частотомера со стороны высоких частот и производить отсчет частоты по первому резонансу.

РЕЗОНАНСНЫЙ ЧАСТОТОМЕР Ч2-9А

Резонансный частотомер Ч2-9А предназначен для измерения частоты непрерывных и импульсно-модулированных колебаний. Прибор относится к классу точности 0,05 по ГОСТ 9772-68.

Диапазон измеряемых частот 1765...3750 МГц. Чувствительность прибора в режиме непрерывных колебаний не хуже 1 мВт на половину шкалы. Максимальная величина измеряемого сигнала, подаваемого непосредственно на вход прибора, не более 5 мВт.

Измерение частоты непрерывных колебаний

Тумблер «НЕПРЕРЫВН.-ИМПУЛЬСН.» поставить в положение «НЕПРЕРЫВН.»

Если освещенность шкалы частотомера достаточна, то включать прибор в сеть необязательно. Ручку «АТТЕНЮАТОР» поставить в среднее положение.

При включенном источнике колебаний медленным вращением ручки «НАСТРОЙКА» найти точку максимума таким образом, чтобы получить отклонение стрелки индикатора прибора от половины до двух третей шкалы.

Если отклонение стрелки индикатора велико (прибор зашкаливает) или незначительно, следует уменьшить либо увеличить ослабление аттенюатора прибора.

По показаниям шкалы частотомера с помощью градуировочной таблицы находится соответствующее значение измеряемой частоты в мегагерцах.

Учебное издание

Рожанский Виктор Борисович

СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ И КВАНТОВЫЕ ПРИБОРЫ

Лабораторный практикум
для студентов радиотехнических и телекоммуникационных
специальностей БГУИР
всех форм обучения

Редактор Т.А. Лейко
Корректор Е.Н. Батурчик
Компьютерная верстка С.А. Щуцкий

Подписано в печать 03. 02. 2004.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура Times New Roman.	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 5,35
Уч.- изд. л. 5,0.	Тираж 300 экз.	Заказ 355.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Лицензия ЛП № 156 от 30.12. 2002.
Лицензия ЛВ № 509 от 03.08. 2001.
220013, Минск, П. Бровки, 6.