

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



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Задания и методические рекомендации к выполнению контрольной работы
по дисциплине

«Электронные и квантовые приборы СВЧ»

для студентов заочной формы обучения
по направлению 6.050901 — Радиотехника.

Севастополь
2013 г.

Методические указания «Задания и методические рекомендации к выполнению контрольной работы по дисциплине «Электронные и квантовые приборы СВЧ» для студентов дневной и заочной форм обучения по направлению 6.050901 — Радиотехника / Сост. А.В. Лукьянчиков — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013. — 29 с.

Целью данной работы является оказание помощи студентам в освоении дисциплины «Электронные и квантовые приборы СВЧ». В процессе изучения дисциплины студенты осваивают физические основы работы, принцип действия, устройство, параметры и характеристики, области применения электровакуумных, полупроводниковых приборов СВЧ и квантовых приборов; приобретают практические навыки работы с данными приборами и определения их основных параметров и характеристик.

Контрольное задание содержит вопросы, отвечая на которые, студент должен показать знания теоретических основ и продемонстрировать умение практически использовать полученные знания.

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

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний.

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	5
2. ПЕРЕЧЕНЬ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	5
3. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА	5
4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....	7
5. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....	8
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	25
Приложение А Образец титульного листа	26

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина "Электронные приборы и квантовые приборы СВЧ" должна обеспечить базовую подготовку студентов, необходимую для успешного изучения специальных дисциплин и последующего решения производственных и исследовательских задач в соответствии с квалификационной характеристикой специальности 6.050901 — Радиотехника. Изучение дисциплины должно подготовить студентов к решению задач, связанных с рациональным выбором приборов, их режима работы в различных радиотехнических системах и устройствах.

По дисциплине "Электронные приборы СВЧ и квантовые приборы" выполняется одно контрольное задание в 7 семестре.

Задачи, входящие в контрольное задание, сгруппированы по вариантам. Вариант задачи выбирается по последней цифре (n) номера зачетной книжки. Предпоследняя цифра (m) номера зачетной книжки используется для определения исходных данных в пределах варианта.

Контрольное задание выполняется на листах формата А4 с использованием ЭВМ или в рукописном варианте согласно требованиям [6]. Шаблон титульного листа приведен в Приложении А.

Необходимые рисунки, графики, диаграммы выполняются с применением чертежных принадлежностей либо персональной ЭВМ в пакете *OpenOffice Word*.

Обязательны ссылки на используемую литературу. Перечень ссылок, оформленный в соответствии с требованием [6], приводится в конце выполненного контрольного задания.

Расчеты обязательно должны сопровождаться пояснениями выполняемых операций. Ответы на теоретические вопросы должны быть полными, отражающими суть излагаемого материала.

1. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Электровакуумные приборы СВЧ

Физические основы работы, принцип действия, устройство, параметры и характеристики, области применения электровакуумных приборов СВЧ: двух резонаторного усилительного клистрона, умножительного клистрона, многорезонаторного усилительного клистрона, отражательного клистрона, ламп бегущей и обратной волны типов «О» и «М», магнетрона, амплитрона, стабилотрона, митрона.

1.2. Полупроводниковые СВЧ приборы

Устройство, принцип действия, параметры и характеристики, области применения полупроводниковых приборов СВЧ: варакторов, диодов с накоплением заряда, диодов с барьером Шоттки, р-1-п диодов, лавинно-пролетных диодов, диодов Ганна, биполярных и полевых СВЧ транзисторов.

Квантовые приборы сверхвысокочастотного и оптического диапазонов

Физические основы квантовых приборов. Квантовые приборы сверхвысоких частот (мазеры). Квантовые парамагнитные усилители, их устройство, особенности колебательных систем. Квантовые приборы оптического диапазона: газовые лазеры, лазеры на твердом теле, полупроводниковые лазеры.

2. ПЕРЕЧЕНЬ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

- 2.1. Исследование отражательного клистрона.
- 2.2. Исследование многорезонаторного магнетрона непрерывного действия.
- 2.3. Исследование лампы обратной волны.
- 2.4. Исследование диода Ганна и генератора на его основе.

3. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

Контрольное задание состоит из трех задач и одного теоретического вопроса.

3.1 Задачи

Задача 1 (для $n=0; 1; 2; 3; 4$).

Определить параметры пролетного двухрезонаторного клистрона. Напряжение на резонаторах $U_0 = (350+10n)$ В, амплитуда напряжения между сетками входного резонатора $U_1 = (2,5+0,1n)$ В, угол пролета электронов в зазоре $\theta = (80+m+n)^\circ$, частота $f = (10+0,1n)$ ГГц.

— Рассчитать максимальное и минимальное значения скоростей электронов после выхода их из зазора входного резонатора клистрона.

— Определить коэффициент связи электронного пучка с полем зазора (M).

- Найти ширину зазора резонатора.
- Определить длину пространства дрейфа для оптимального параметра группировки.
- Объяснить характер изменения амплитудной характеристики усилительного клистрона.

Задача 1 (для $n=5; 6; 7; 8; 9$).

Определить параметры отражательного клистрона. Напряжение на резонаторе $U_0=(250+10n)$ В, частота $f=(10+0,1n)$ ГГц; ширина зазора резонатора $d=2,5 \cdot 10^{-4}$ м; номера зон генерации: 0, 1, 2; расстояние между выходной сеткой резонатора и отражателем $L=(9 \cdot 10^{-4}+10^{-5}n)$ м.

- Нарисовать и объяснить пространственно-временную диаграмму.
- Вычислить коэффициент электронного взаимодействия M .
- Определить углы пролета невозмущенного электрона для номеров зон генерации: 1, 2, 3.
- Для найденных углов пролета вычислить напряжение на отражателе.
- Определить параметр группировки для максимального значения напряжения на отражателе и $U_1=0,1U_0$ (U_1 — амплитуда синусоидального напряжения между сетками резонатора).

Задача 2.

Замедляющая система ЛБВО выполнена в виде коаксиальной линии со спиральным проводником. Диаметр спирали $D=(10+n)$ мм; шаг спирали $L=(2+0,1m)$ мм; частота $f=(3+0,1n+0,1m)$ ГГц.

— Нарисовать пространственно-временные диаграммы ЛБВО и ЛОВО. Пояснить процесс группирования и энергетическое взаимодействие электронов с бегущей волной для трех случаев: $V_e = V_\phi$, $V_e \leq V_\phi$, $V_e \geq V_\phi$, где V_e — скорость электронов, V_ϕ — фазовая скорость электромагнитной волны.

— Определить: фазовую скорость нулевой, плюс первой и минус первой пространственных гармоник, длину замедленной волны $\lambda_z = \lambda_0$, коэффициент замедления.

— Вычислить максимальную длину замедляющей системы L , если скорость электронов $V_e = 1,03V_{\phi(-1)}$.

— Объяснить каким образом осуществляется электронная перестройка частоты генератора на ЛОВО.

Задача 3.

Напряжение на аноде магнетрона равно $U_a=(2+0,1n)$ кВ; магнитная индукция $B=(0,1+0,5m)$ Тл; расстояние между анодом и катодом $d=(5+0,1n+0,01m)$ мм.

- Определить значение циклотронной частоты.
- Рассчитать значение поступательной скорости электронов.
- Вычислить критическое значение магнитной индукции.
- Найти радиус окружности вращательного движения электрона (при начальной скорости $V_0 = 0$).
- Определить сдвиг фаз колебаний в двух соседних резонаторах восьмirezона-

торного магнетрона для всех видов колебаний.

- Определить электронный КПД.
- Объяснить процесс образования электронных спиц в пространстве взаимодействия магнетрона [1].

3.2. Теоретические вопросы

Ответить письменно на приведенные ниже вопросы:

- Для $n=0$ Изложить устройство, принцип работы диодов с барьером Шоттки и область их применения [2, 5].
- Для $n=1$. Изложить устройство, принцип работы варакторных диодов и область их применения [2, 5].
- Для $n=2$. Объяснить принцип работы диодов Ганна. Описать режимы работы диодов Ганна [1, 2, 5].
- Для $n=3$. Изложить принцип работы диодов с накоплением заряда и область их применения [2, 5].
- Для $n=4$. Изложить устройство и принцип работы лавинно-пролетных диодов. Описать режимы работы лавинно-пролетных диодов [1, 2, 5].
- Для $n=5$. Кратко изложить физические основы квантовых приборов (энергетические спектры, спонтанное и вынужденное излучение, инверсия населенности энергетических уровней) [1, 3, 4].
- Для $n=6$. Объяснить устройство и принцип действия квантовых парамагнитных усилителей [1, 3, 4].
- Для $n=7$. Описать функциональную схему оптического квантового генератора (лазера), оптического резонатора [1, 3, 4].
- Для $n=8$. Изложить устройства и принцип работы газовых лазеров, особенности создания инверсии населенности, энергетические диаграммы [1, 3, 4].
- Для $n=9$. Изложить устройство, принцип работы СВЧ транзисторов и область их применения [2].

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Работа большинства электровакуумных приборов СВЧ основана на использовании метода динамического управления электронным потоком. Особенности его состоят в модуляции электронов по скорости, превращение модуляции по скорости в модуляцию по плотности и в передаче энергии от модулированного по плотности потока СВЧ полю колебательной системы. Надо четко осознать каким образом, осуществляется скоростная модуляция (а, следовательно, и модуляция по плотности) в клистронах, лампах бегущей и обратной волны типа «О», в приборах магнетронного типа, знать каким образом передается энергия от сгруппированного электронного сгустка электромагнитной волне колебательной системы. Как известно, в приборах типа «О», в клистронах в энергию СВЧ поля переходит кинетическая энергия электронов, а в приборах типа «М» — потенциальная. В клистронах, ЛБВО, ЛОВО скорость электронов, подлетающих к резонатору, замедляющей системе определяется потенциалом, под которым находится ко-

лебательная система.

В приборах магнетронного типа переносная скорость $V_{\text{п}}$ электронов определяется из равенства электрической $\vec{F}_e = -e\vec{E}$ и магнитной сил $\vec{F}_m = -e[\vec{V}_e \times \vec{B}]$: где $\vec{E}$ — напряженность электрического поля, $\vec{B}$ — магнитная индукция, e — заряд электрона.

Изучать дисциплину следует систематически в течение учебного семестра, составляя при этом краткий конспект. Изучение курса в сжатые сроки перед экзаменом не дает глубоких и продуманных знаний. Материал можно изучить по любому из учебных пособий, рекомендованных выше, а также по другим книгам, аналогичным по содержанию.

При решении задач 1...4 рекомендуется использовать учебные пособия [1...4], ответы на вопросы задачи 5 можно найти в пособиях, номера которых указаны непосредственно в условиях задачи.

5. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

5.1. Пролетные клистроны

Пролетные клистроны — это разновидность приборов с кратковременным взаимодействием электронов с высокочастотным электрическим полем.

В зависимости от назначения пролетные клистроны подразделяют на усилительные, умножительные и генераторные. Пролетные клистроны классифицируются также по числу резонаторов.

5.1.1. Устройство и принцип работы двухрезонаторного усилительного пролетного клистрона

В клистроне имеются два объемных резонатора с емкостными зазорами. Первый резонатор называется входным, или модулятором, а второй — выходным. Пространство между ними называется пространством дрейфа или группирования. Электроны, эмитируемые катодом, ускоряются постоянным напряжением U_0 и попадают в узкий зазор между сетками первого резонатора. Между ними имеется продольное высокочастотное электрическое поле, которое периодически ускоряет и замедляет электроны, т.е. модулирует скорость электронов. В пространстве дрейфа быстрые электроны догоняют медленные, обеспечивая группирование электронов, т.е. преобразование модуляции электронного потока по скорости в модуляцию по плотности. Модулированный электронный поток поступает во второй резонатор и создает в нем наведенный ток, протекающий по внутренней поверхности его стенок. В резонаторе возникают колебания, а между его сетками появляется электрическое высокочастотное поле, которое должно вызывать торможение сгруппированных электронов. В выходном резонаторе кинетическая энергия тормозящихся электронов преобразуется в энергию СВЧ колебаний. Электроны, прошедшие через второй резонатор и отдавшие СВЧ полю часть своей кинетической энергии, попадают на коллектор, где рассеивают оставшуюся часть кинетической энергии в виде тепла.

5.1.2. Скоростная модуляция электронов

К сетке входного резонатора все электроны подлетают с одинаковой скоростью, определяемой ускоряющим напряжением U_0 .

$$V_e = \sqrt{2eU_0/m} \quad (5.1)$$

где e и m — заряд и масса электрона.

Пусть между сетками входного резонатора приложено переменное напряжение $U_{m1} \sin \omega t$. Если пренебречь временем пролета электронов через достаточно узкий зазор между сетками, то скорость электронов на выходе из зазора первого резонатора будет определяться, как

$$V_1 = \sqrt{2e(U_0 + U_{m1} \sin \omega t)/m} = V_e \sqrt{1 + \frac{U_{m1}}{U_0} \sin \omega t} \quad (5.2)$$

Считая, что амплитудное значение переменного напряжения много меньше ускоряющего напряжения, т.е. $U_{m1}/U_0 \ll 1$, скорость электронов можно вычислить по приближенной формуле

$$V_1 = V_e \left(1 + \frac{U_{m1}}{2U_0} \sin \omega t \right) \quad (5.3)$$

Такой поток электронов называется модулированным по скорости. В течение ускоряющего полупериода напряжения между сетками входного резонатора электроны будут выходить из зазора с увеличенными скоростями, а в течение замедляющего — с уменьшенными. Это приводит к тому, что на некотором расстоянии от зазора быстрые электроны догоняют более медленные. В результате этого модулированный по скорости поток электронов преобразуется в модулированный по плотности поток, т.е. образуются сгустки электронов.

Так как в реальных клистродах угол пролета электрона в зазоре представляет конечную величину необходимо ввести соответствующую поправку. Высокочастотное напряжение $U_{m1} \sin \omega t$ нужно усреднить за время пролета электронов в зазоре. Будем считать время пролета всех электронов через зазор одинаковым и равным, тогда

$$V_1 = V_e \left(1 + \frac{M_1 U_{m1}}{2U_0} \sin \omega t \right) \quad (5.4)$$

где $M_1 = \frac{\sin \theta_1/2}{\theta_1/2}$ — называют коэффициентом эффективности электронного взаимодействия или коэффициентом связи электронного пучка с полем зазора;

$\theta_1 = \omega \tau$ — угол пролета электрона в зазоре;

$\tau = d_1/V_e$ — время пролета электронов через зазор;

d_1 — расстояние между сетками резонатора.

Для расчетов реальных клистронов необходим учёт влияния пространственного заряда. Рассмотрим, какая существует связь при синусоидальной скоростной модуляции между моментами прихода электронов t_2 во второй резонатор и моментом t_1 прохождения их через первый. Можно показать, что

$$\omega t_2 - \theta_0 = \omega t_1 - X \sin \omega t_1, \quad (5.5)$$

где $X = \theta_0 M_1 U_1 / 2U_0$ — параметр группировки;

$\theta_0 = \omega l / V_e$ — угол пролета в пространстве дрейфа электронов, не изменивших своей скорости (невозмущенных электронов). Угол θ_0 называют также невозмущенным углом пролета; l — длина пространства дрейфа.

5.2. Отражательный клистрон

Отражательные клистроны предназначены для генерирования СВЧ колебаний малой мощности.

Клистрон имеет только один объемный резонатор, который должен выполнять две функции: модуляция скорости электронов и отбор СВЧ энергии от модулированного по плотности электронного потока. За резонатором расположен отражатель, на который по отношению к катоду подано отрицательное напряжение. Мощность колебаний, генерируемых клистроном, выводится из резонатора с помощью петли связи, переходящей в коаксиальную линию. Скорость электронов перед резонатором определяется напряжением ускоряющего электрода U_0 . Поток электронов от катода, разгоняемый полем ускоряющего электрода, проходит через сетки резонатора. Вследствие флуктуаций электрического потока в резонаторе наводятся слабые колебания. Электронный поток модулируется по скорости электрическим полем этих колебаний и поступает в пространство между зазором резонатора и отражателем. Так как на отражатель подано отрицательное напряжение, то электроны попадают в тормозящее поле и возвращаются назад, проходя второй раз через зазор резонатора в обратном направлении. При движении электронного потока в пространстве между выходной сеткой резонатора и отражателем электронный поток преобразуется из модулированного по скорости в модулированный по плотности. Сгусток электронов тормозится в зазоре резонатора и отдает часть своей кинетической энергии полю резонатора.

Сгруппированный электронный поток должен возвращаться в резонатор в пределах того полупериода СВЧ напряжения на зазоре, который оказывает тормозящее действие. Тогда он отдает часть своей кинетической энергии высокочастотному полю резонатора и поддерживает колебания в резонаторе (положительная обратная связь). Следует заметить, что полупериод, названный ускоряющим для электронов, идущих от катода, одновременно будет тормозящим для электронов, возвращающихся в резонатор под действием напряжения на отражателе.

Если электрон возвращается в резонатор при амплитудном значении тормозящего поля, то отдаваемая им кинетическая энергия максимальна. Очевидно, что сгусток отдаст наибольшую энергию СВЧ полю, если центральный его электрон (невозмущенный) приходит в момент максимума поля. Для обеспечения этого требования для невозмущенного электрона угол пролета

$$\theta_0 = 2\pi(n + 3/4), \quad (5.6)$$

где $n=0, 1, 2, \dots$ — целое число, называемое номером зоны генерации;

θ_0 — оптимальный угол пролета невозмущенного электрона в пространстве группировки.

Напряжение отражателя, при котором выходная мощность максимальна, соответствует углам пролета (5.6) и может быть определено по формуле

$$|U_{\text{отр}}| = \frac{2L\omega\sqrt{U_0}}{\pi\sqrt{2e/m}(n+3/4)} - U_0 \quad (5.7)$$

где ω — частота генерируемых колебаний;

$U_{\text{отр}}$ — напряжение на отражателе;

L — расстояние между второй сеткой и отражателем;

d — расстояние между сетками отражателя.

С ростом номера n необходимое абсолютное значение напряжения $|U_{\text{отр}}|$ уменьшается. Этот вывод очевиден, так как, чем больше номер n , т.е. больше угол пролета θ_0 , тем слабее должно быть тормозящее поле (5.6, 5.7), создаваемое отражателем. Передача энергии от электронного сгустка СВЧ полю резонатора должна ухудшаться, если угол пролета отличается от оптимального, и полностью прекратится, если невозмущенный электрон, являющийся центром сгустка, возвращается в резонатор в моменты нулевого поля, т.е. при $\theta_0 - \pi/2$ или $\theta_0 + \pi/2$, когда торможение электронов отсутствует.

Таким образом, вблизи каждого оптимального угла пролета имеется область значений $\pm \pi/2$, в пределах которой возможна передача энергии от электронного потока СВЧ полю и генерация колебаний. Следовательно, имеется ряд областей значений $U_{\text{отр}}$, соответствующих различным номерам n , в которых возможна генерация колебаний. Поэтому зависимость мощности колебаний от напряжения отражателя имеет зонный характер, а номер n называется номером зоны генерации.

В центре каждой зоны мощность колебаний максимальна и соответствует прохождению сгустка электронов в момент максимального тормозящего поля между сетками резонатора. Определим параметр группировки как

$$X_1 = (\theta_2 - \theta_1)M_1U_1/2U_0 \quad (5.8)$$

где θ_1 , θ_2 — углы пролета невозмущенного электрона между сетками резонатора и центра сгустка от второй сетки к отражателю и обратно. Из (5.8) U_1 через параметр группировки определяется как

$$U_1 = 2X_1U_0/((\theta_2 - \theta_1)M_1), \quad (5.9)$$

при этом $\theta_2 + \theta_1 = \theta_0 = 2\pi(n + 3/4)$, тогда $\theta_2 - \theta_1 = 2\pi(n + 3/4) - 2\theta_1$.

Одно из замечательных свойств отражательного клистрона, определивших широкое использование его в различных радиотехнических устройствах - электронная перестройка частоты — явление изменения частоты генерируемых колебаний при изменении напряжения на отражателе. Явление электронной перестройки можно объяснить так. Если угол пролета равен $2\pi(n + 3/4)$, то при любом n частота колебаний одна и та же. Она равна собственной частоте резонатора. Если несколько увеличить напряжение на отражателе, то пролетное время электронов, образующих сгусток, уменьшится. Электронные сгустки будут чаще пролетать резонатор, и частота генерирующих колебаний повысится. При уменьшении напряжения на отражателе частота колебаний уменьшится.

Электронная перестройка характеризуется крутизной - отношением изменения частоты генерируемых колебаний к изменению напряжения на отражателе. С увеличением номера зоны снижается максимальная электронная мощность в ней и возрастает крутизна кривой электронной перестройки. Важным параметром электронной перестройки

является её диапазон Δf (т.е. область частот), в пределах которого электронная мощность изменяется на 3 дБ относительно максимального значения мощности в данной зоне. Диапазон электронной перестройки отражательных клистронов обычно составляет около 0,5 % средней частоты. Крутизна электронной перестройки равна (0,5...1) МГц/В. Механическая перестройка до 50 %. Мощность отражательных клистронов колеблется от единиц мВт до (2... 3) Вт. Основной диапазон длин волн, для которого изготавливаются клистроны — от 1 до 60 см, но имеются клистроны и для миллиметрового диапазона.

5.3. Широкополосные СВЧ приборы «О»-типа

Для создания широкополосных приборов необходимо использовать принцип непрерывного длительного взаимодействия электронного потока с полем бегущей электромагнитной волны в нерезонансной колебательной системе. Приборами такого типа являются лампа бегущей волны типа «О» (ЛБВО) и лампа обратной волны типа «О» (ЛОВО).

В приборах с длительным взаимодействием, также как и в клистронах, используются модуляции скорости электронов и плотности электронного потока. При сравнительно слабом входном сигнале в результате длительного взаимодействия электронов с полем бегущей волны получается необходимое группирование электронов. Очевидно, что обмен энергией между электронами и полем происходит в результате взаимодействия с составляющей напряженности электрического поля, совпадающей по направлению со скоростью электронов. Для эффективного взаимодействия электронов с бегущей волной нужно, чтобы скорость электрона V_e была приближенно равна фазовой скорости электромагнитной волны V_ϕ в направлении движения электронов. Это называется условием фазового синхронизма и записывается следующим образом:

$$V_\phi - V_e \approx 0. \quad (5.10)$$

Так как скорость электронов всегда меньше скорости света в свободном пространстве, то для выполнения (5.10), необходимо уменьшать фазовую скорость волны, взаимодействующей с электронами. Для этого используются специальные устройства, которые называются замедляющими системами.

Чаще всего одна из линий замедляющей структуры имеет гладкую поверхность, а другая характеризуется рядом периодически повторяющихся ячеек. Иногда обе линии имеют периодическую структуру. Гладкую линию называют обычно основанием или холодным катодом. Расстояние L между соседними идентичными элементами замедляющей системы называется периодом структуры

Основное назначение замедляющей системы — уменьшить скорость распространения электромагнитной волны. Эффективное взаимодействие потока электронов с полем волны может быть получено только при условии приблизительного равенства фазовой скорости волны V_ϕ и скорости V_e движения электронов. При реально допустимых ускоряющих напряжениях, порядка сотен или тысячи вольт, скорость движения электронов V_e не превышает сотых или десятых долей от величины скорости света. Таким образом, фазовая скорость V_ϕ волны должна быть в несколько единиц или десят-

ков раз меньше скорости c . Отношение c/V_ϕ называют коэффициентом замедления системы. В реальных приборах $c/V_\phi = (3...50)$.

Принцип замедления волны легко показать на примере спиральной замедляющей системы. При возбуждении такой линии от генератора СВЧ колебаний волна распространяется по внутреннему проводнику со скоростью, близкой к скорости света. Следовательно, за время движения вдоль одного витка спирали длиной πD , где D — диаметр спирали, волна переместится вдоль оси системы лишь на величину шага спирали L . Таким образом, коэффициент замедления при $L \ll \pi D$

$$\frac{c}{V_\phi} \approx \frac{\pi D}{L}. \quad (5.11)$$

Коэффициент замедления тем больше, чем больше отношение длины витка к шагу спирали. Изменяя диаметр спирали D и ее шаг L , можно в широких пределах изменять коэффициент замедления.

Более точный анализ распространения электромагнитных волн вдоль спирали показывает, что спираль обладает дисперсией, т.е. фазовая скорость волны в спирали зависит от частоты.

Замедляющая система в виде цилиндрической спирали широко используется в серийно выпускаемых ЛБВ, что объясняется многими ее достоинствами. Ни одна из известных замедляющих систем не может конкурировать со спиралью в отношении широкополосности. Одним из недостатков спиральной системы является малая теплорассеивающая способность и невозможность в связи с этим использовать ее в СВЧ приборах большой мощности. Более высокой теплорассеивающей способностью обладает гребенчатая замедляющая система. Ей присуща значительно более сильно выраженная дисперсия, чем спиральной системе.

Вдоль поверхности ЗС в направлении оси Z распространяется замедленная электромагнитная волна. Зависимость $E_z = f(z)$ несинусоидальная, поэтому, используя аппарат Фурье, теорему Флоке, поле в периодической замедляющей системе можно представить бесконечной суммой бегущих волн с одинаковой частотой ω и различными коэффициентами фазы β_m .

$$E(z, t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} E_{zm}(x, y) e^{j(\omega t - \beta_m z)} \quad (5.12)$$

где E_{zm} — амплитуды бегущих волн;

$$\beta_m = \beta_0 + \frac{2\pi m}{L}; \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots;$$

$$\beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}.$$

Эти волны называются пространственными гармониками. Все пространственные гармоники изменяются во времени с частотой входного сигнала, а появление различных коэффициентов фазы — это результат несинусоидальной зависимости поля E_z от координаты Z .

Пространственные гармоники существуют только совместно, в сумме представляя

реальное поле в ЗС. Решение в виде одной пространственной гармоники не может удовлетворить граничным условиям. Гармоника $m=0$ называется нулевой пространственной гармоникой, $m=+1$ — плюс первой, $m=-1$ — минус первой и т.д. Гармоники с $m>0$ называются положительными, а с $m<0$ — отрицательными. Величина β_0 — коэффициент фазы нулевой пространственной гармоники.

Длина волны гармоники

$$\lambda_m = \frac{2\pi}{\beta_m} \quad (5.13)$$

Фазовая скорость пространственной гармоники

$$V_{\phi m} = \frac{\omega}{\beta_m} = \frac{\omega}{\beta_0 + \frac{2\pi m}{L}} \quad (5.14)$$

Сравним величины фазовых скоростей.

Если $\frac{2\pi}{L} > \beta_0$, то для положительных m (+1, +2, ...) $V_{\phi m} > 0$, т.е. направлена вдоль оси Z и будет уменьшаться с ростом номера гармоники m .

Для отрицательных m (-1, -2, ...) $V_{\phi m} < 0$, т.е. направление фазовой скорости изменилось на обратное. Абсолютная величина $V_{\phi m}$ при $m < 0$ так же уменьшается с ростом номера гармоники. Таким образом, максимальное значение фазовой скорости и длины волны соответствует нулевой пространственной гармонике. Часто пространственную гармонику, имеющую наибольшую фазовую скорость, называют основной.

Групповая скорость всех пространственных гармоник одинакова и равна групповой скорости нулевой гармоники

$$V_{\text{гр}} = \frac{d\omega}{d\beta_m} = \frac{d\omega}{d\beta_0} \quad (5.15)$$

Удобно считать групповую скорость всегда положительной.

Волну, в которой направления $V_{\text{гр}}$ и V_{ϕ} совпадают, называют прямой волной, волну с противоположными направлениями скоростей — обратной волной. Соответственно и пространственные гармоники можно разделить на прямые и обратные. Нулевая гармоника может быть прямой и обратной.

Дисперсия — зависимость фазовой скорости от частоты — одно из важнейших свойств замедляющих систем.

Дисперсию называют нормальной, если абсолютное значение фазовой скорости уменьшается с ростом частоты.

Дисперсию называют аномальной, если абсолютное значение фазовой скорости увеличивается с ростом частоты.

Для всех обратных гармоник дисперсия аномальная, прямые гармоники могут иметь как нормальную, так и аномальную дисперсию.

Вычисление амплитуд пространственных гармоник показывает, что с увеличением t не только уменьшается амплитуда поля непосредственно у поверхности замедляющей системы, но и растет степень уменьшения E_z по мере удаления от поверхности. Поэтому взаимодействие электронного потока с высшими пространственными гармониками получается неэффективным. Вследствие этого, в приборах СВЧ используются в основном

нулевая и плюс первая или минус первая гармоники.

6.3.1. Усилитель на лампе бегущей волны (ЛБВО)

Лампой бегущей волны типа «О» называют электронный прибор СВЧ диапазона, в котором используется длительное взаимодействие сгруппированного потока электронов, движущихся в продольных электрическом и магнитном полях, с прямой гармоникой сигнала (бегущей волной), распространяющейся вдоль замедляющей системы.

6.3.1.1. Устройство ЛБВО

Электронная пушка формирует электронный пучок с определенным сечением и интенсивностью. Скорость электронов определяется ускоряющим напряжением U_0 . С помощью фокусирующей системы, создающей продольное магнитное поле, обеспечивается необходимое поперечное сечение пучка на всем пути вдоль замедляющей системы. В ЛБВ электронная пушка, спиральная замедляющая система и коллектор размещаются в металlostеклянном или металлокерамическом баллоне, а фокусирующий соленоид располагается снаружи. Спираль крепится между электрическими стержнями, которые должны обладать малыми потерями на СВЧ и хорошей теплопроводностью. На входе и выходе замедляющей системы есть специальные устройства для согласования ее с линиями передачи. Последние могут быть либо волноводными, либо коаксиальными. На вход поступает СВЧ сигнал, который усиливается в приборе и с выхода передается в нагрузку. Трудно получить хорошее согласование во всей полосе частот усиления лампы. Поэтому есть опасность возникновения внутренней обратной связи из-за отражения электромагнитной волны на концах замедляющей системы, при этом ЛБВ может перестать выполнять свои функции усилителя. Для устранения самовозбуждения вводится поглотитель, который может быть выполнен в виде стержня из поглощающей керамики или в виде поглощающих пленок.

6.3.1.2. Принцип действия

Процесс группирования электронного потока по плотности зависит от соотношения скорости электронов v_e и скорости электромагнитной волны v_{ϕ} .

Если $V_e = V_{\phi}$, то электроны группируются в области нулевого значения высокочастотного поля и электронный поток не обменивается энергией с бегущей волной.

Если $V_e \leq V_{\phi}$, то электроны отстают от волны и группируются в области ускоряющего полупериода высокочастотного поля, которое сообщает электронам дополнительную скорость. В результате выходной сигнал не усиливается, а ослабляется.

Если $V_e \geq V_{\phi}$, то электроны группируются в области тормозящего полупериода высокочастотного поля, где их движение замедляется, и они передают часть своей кинетической энергии бегущей волне. Амплитуда электромагнитной волны по мере распространения вдоль замедляющей системы будет возрастать. Поэтому необходимым условием усиления ЛБВ является такое соотношение между скоростями V_e и V_{ϕ} , при кото-

ром скорость электронов V_e немного превышает скорость электромагнитной волны.

Так как скорость электронов в процессе взаимодействия с полем будет уменьшаться, то по мере движения вдоль замедляющей системы сгустки электронов будут смещаться относительно бегущей волны. Необходимо такое различие в скоростях, чтобы за время движения сгустка вдоль всей длины замедляющей системы он не вышел из тормозящего полупериода поля.

Принцип действия ламп бегущей волны (ЛБВ) основан на рассмотренном выше механизме длительного взаимодействия электронного потока с полем бегущей электромагнитной волны, т.е. на модуляции электронного потока по скорости, которая по мере движения электронов к коллектору переходит в модуляцию по плотности, и отбору энергии от модулированного по плотности пучка. Здесь, так же как и в клистроне, сгустки электронов возбуждают наведенный ток, протекание которого по ЗС вызывает появление высокочастотной напряженности электрического поля в направлении продольной оси ЗС. Однако, в отличие от клистронов, резонаторы которого обладают высокой добротностью, напряженность переменного электрического поля вдоль оси ЗС оказывается небольшой по сравнению с напряженностью поля в зазоре резонатора. Поэтому достаточно эффективное торможение сгустков электронов, а следовательно и отбор энергии от модулированного по плотности электронного пучка удастся осуществить вдоль всей длины замедляющей системы.

Амплитуда электромагнитной волны нарастает экспоненциально, а не линейно, так как усиливаемая волна в свою очередь воздействует на электронный поток, увеличивая его модуляцию. На практике максимальное усиление достигается при скорости электронов, на единицы процентов превышающей фазовую скорость замедленной электромагнитной волны.

6.3.2. Генератор на лампе обратной волны

Лампа обратной волны также является СВЧ прибором с длительным взаимодействием. ЛОВ обычно используются в качестве генераторов сантиметрового и миллиметрового диапазона.

В ЛОВ используется магнитная фокусировка электронного потока. В отличие от ЛБВ, электронный поток взаимодействует с одной из обратных пространственных гармоник бегущей волны (обычно первой), которая характеризуется тем, что ее фазовая и групповая скорости имеют противоположные направления.

Так как сопротивление связи пространственных гармоник резко уменьшается с увеличением номера гармоники, то в ЛОВ используются обычно такие замедляющие системы, в которых обратная пространственная гармоника является основной гармоникой. К таким ЗС относятся двухзаходная спираль (биспираль) и встречные штыри.

Фазовая скорость гармоники совпадает с направлением движения электронов и равна

$$V_{\Phi(-1)} = \frac{\omega}{\beta_{(-1)}} = \frac{\omega}{\beta_0 - 2\pi/L} \quad (5.16)$$

Для эффективного взаимодействия, так же как и в ЛБВ, скорость электронного потока V_e должна немного превышать скорость волны $V_{\Phi(-1)}$. Электроны группируются в

сгустки, которые расположены в области тормозящего поля, и отдают при торможении часть кинетической энергии электромагнитной волне. При этом энергия в замедляющей системе в соответствии с направлением групповой скорости распространяется навстречу электронному потоку, т.е. от коллектора к пушке. Поэтому в ЛОВ вывод энергии необходимо располагать возле электронной пушки. Поглотитель в ЛОВ необходим для предотвращения возбуждения на прямой гармонике, а также для устранения влияния отражений от нагрузки. Если ЛОВ на выходе плохо согласована с нагрузкой, то отраженная волна возвращается в пространство взаимодействия и движется к коллектору без взаимодействия с электронным потоком, так как не выполняется условие синхронизма. Затем она отражается от конца замедляющей системы у коллектора (если там нет поглотителя) и движется к выходу ЛОВ и взаимодействует с электронным потоком. На выходе суммируются мощности основной волны и отраженной. Если фазы этих волн совпадают, то выходная мощность возрастает, если противоположны — то уменьшается. Поэтому при отсутствии поглотителя наблюдаются колебания выходной мощности в рабочем диапазоне частот.

Распространение энергии в направлении, обратном направлению движения электронного потока, создает внутреннюю положительную обратную связь между полем волны и потоком электронов. Эта связь распределена во всем пространстве взаимодействия. Часть энергии волны возвращается электронному потоку, что способствует дальнейшему группированию потока и возникновению автоколебательного режима.

Фазовое условие самовозбуждения колебаний связано с условием наилучшей передачи энергии от электронного потока СВЧ полю. Это условие состоит в том, что образовавшийся сгусток электронов не должен выходить из тормозящего поля электромагнитной волны. Другими словами, необходимо, чтобы относительный сдвиг фаз $\Delta\varphi$ волны и сгустка не превышал π , т.е.

$$\Delta\varphi = \frac{\omega l}{V_{\Phi(-1)}} - \frac{\omega l}{V_e} \leq \pi, \quad (5.17)$$

где $\frac{\omega l}{V_{\Phi(-1)}}$ — определяет сдвиг фаз, создаваемый волной обратной пространственной гармоники;

$\frac{\omega l}{V_e}$ — определяет сдвиг фаз, создаваемый электронным потоком;

l — длина замедляющей системы ЛОВ.

Если путем изменения ускоряющего напряжения U_0 изменить скорость движения электронов V_e , то (5.17) будет выполняться уже для другого значения фазовой скорости $V_{\Phi(-1)}$ обратной пространственной гармоники. Например, с увеличением U_0 скорость электронов V_e возрастает и для выполнения (5.17) необходимо увеличение $V_{\Phi(-1)}$. Так как дисперсия фазовой скорости обратных пространственных гармоник аномальная, то фазовая скорость $V_{\Phi(-1)}$ возрастает при увеличении частоты. Таким образом, увеличение U_0 приводит к увеличению частоты генерируемых колебаний. Этим и объясняется электронная перестройка частоты генерируемых колебаний. Генерация колебаний в ЛОВ начинается при определенном минимальном значении анодного тока $I_{\text{п}}$, который назы-

вается пусковым. При этом мощность возбуждаемых колебаний в ЛОВ превышает потери мощности в замедляющей системе (условие баланса амплитуд).

5.4. Электронные приборы СВЧ со скрещенными полями

Наиболее распространенным источником мощных СВЧ колебаний является магнетрон. Этот прибор был изобретен русскими инженерами Н.Ф.Алексеевым и Д.Е.Маляровым в 1939 году. Появление магнетрона позволило сделать большой шаг в развитии радиолокации. Имея относительно простую конструкцию, малые массу и габариты, магнетрон позволил существенно увеличить частоту и мощность СВЧ колебаний радиопередающих устройств при весьма высоком КПД.

Магнетрон был первым в серии так называемых приборов типа «М», в которых используется движение электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях. В последующие годы появились другие приборы типа «М»: ЛБВМ, ЛОВМ, платинотрон и т.д.

5.4.1. Физические основы приборов типа «М»

Приборами типа «М» называют приборы, в которых в энергию СВЧ поля непосредственно преобразуется потенциальная энергия электронов, а не кинетическая энергия, как в приборах типа «О». Такое взаимодействие электронов и СВЧ поля обеспечивается при использовании взаимно перпендикулярных (скрещенных) электрического и магнитного полей.

Приборы типа «М» отличаются простотой конструкции. Основными элементами являются катод, анод и магнит. Electroды выполняются плоскими или цилиндрическими.

Рассмотрим движение электронов в пространстве между двумя плоскими электродами, где имеется постоянное электрическое поле с напряженностью $E_a = U_a/d$ (d — расстояние между электродами) и статическое магнитное поле с индукцией B .

Предположим, что постоянное магнитное поле отсутствует ($B=0$), а к аноду приложено постоянное напряжение U_a . На электроны, вылетевшие из катода, действует электрическая сила

$$\vec{F}_e = -e\vec{E}_a. \quad (5.18)$$

Под действием этой силы электроны движутся от катода к аноду. Вся кинетическая энергия электронов выделяется на аноде в виде тепла; в анодной цепи протекает постоянный ток, I_{a1} и магнетрон работает в режиме диода.

Установим теперь постоянное магнитное поле с величиной магнитной индукции, меньшей некоторого критического значения ($B < B_{кр}$). На электроны будет действовать не только электрическая, но и магнитная сила (сила Лоренца)

$$\vec{F}_m = -e[\vec{V}_e \times \vec{B}], \quad (5.19)$$

направленная перпендикулярно вектору скорости электронов $\vec{V}_e$. Магнитная сила (не изменяя величины скорости электронов $\vec{V}_e$), искривляет траекторию их движения. В результате этого путь движения электронов удлиняется, но анодный ток не уменьшается.

При увеличении индукции B траектории электронов все более искривляются и при

некотором ее значении, называемом критическим электроны проходят вблизи анода и возвращаются на катод. Анодный ток при этом резко падает до величины близкой к нулю.

Только некоторые электроны, вылетающие из катода с большой начальной скоростью, долетают до анода, создавая небольшой анодный ток.

Анализ показывает, что при $B > B_{кр.}$ траектория электронов представляет собой кривую линию, описываемую точкой, лежащей на круге радиусом R равномерно катящимся по поверхности катода. Эта кривая называется эпициклоидой. Движение электронов в скрещенных полях можно представить как сложение движений: поступательного со скоростью $\bar{V}_n$ и вращательного по окружности с радиусом R с постоянной циклотронной скоростью $\bar{V}_ц$ и циклотронной частотой $\omega_ц$. В данной модели $\bar{V}_n$ — скорость перемещения центра воображаемого круга, равномерно катящегося по катоду, назовем ее переносной скоростью. Таким образом, скорость движения электрона будет определяться

$$\bar{V}_e = \bar{V}_n + \bar{V}_ц. \quad (5.20)$$

Из условия равенства центростремительной и центробежной сил получим уравнение движения электрона по окружности

$$mV_ц^2/R = eV_цB. \quad (5.21)$$

Тогда радиус окружности будет равен

$$R = mV_ц/eB = V_ц/\omega_ц, \quad (5.22)$$

где $\omega_ц = eB/m$; $V_ц = E_a/B$.

Скорость V_n направлена параллельно электродам. Поступательное движение центра окружности с неизменным радиусом R и постоянной скоростью V_n возможно только при равенстве электрической и магнитной сил

$$F_e = F_m, \quad (5.23)$$

$$eE_a = eV_nB, \quad (5.24)$$

$$V_n = E_a/B. \quad (5.25)$$

На электрон, находящийся на катоде, действует лишь электрическая сила F_e , т.к. его скорость равна нулю. Эта сила ускоряет электрон, и на него начинает действовать магнитная сила F_m , которая искривляет траекторию движения электрона. В процессе движения скорость электрона меняется от нуля, электрон на катоде, $\bar{V}_{e\min} = \bar{V}_n - \bar{V}_ц = 0$ и до $V_{e\max} = 2E_a/B$, электрон находится в точке максимального удаления от катода. В данной точке переносная и циклоидная совпадают по направлению и равны между собой.

При магнитной индукции B большей $B_{кр.}$ электроны не достигают анода и возвращаются на катод, после чего цикл повторяется. Анодный ток равен нулю.

Поскольку движется очень большое число электронов, то в пространстве взаимодействия (между цилиндрическими катодом и анодом) вращается электронное облако, то есть образуется пространственный вращающийся заряд в виде кольца.

Наличие вращающегося заряда является необходимым условием работы магнетрона. Следовательно, магнетрон может работать только при $B > B_{кр.}$ Электроны в пространстве взаимодействия, не находятся в нем постоянно. Ранее вылетевшие электроны воз-

вращаются на катод, а на их место из катода вылетают новые электроны.

Определим зависимость $U_{\text{акр}} = f(B_{\text{кр}})$

При $U_{\text{а}} = U_{\text{акр}}, B = B_{\text{кр}}$.

$$R = \frac{d}{2} = \frac{mE_{\text{а}}}{eB_{\text{кр}}^2} = \frac{mU_{\text{акр}}}{eB_{\text{кр}}^2 \cdot d}. \quad (5.26)$$

Тогда

$$U_{\text{акр}} = \frac{ed^2 B_{\text{кр}}^2}{2m}. \quad (5.27)$$

Зависимость $U_{\text{акр}} = f(B_{\text{кр}})$ называется параболой критического режима. При $U_{\text{а}} > U_{\text{акр}}$ электроны достигают анода. Такой режим называется докритическим. При $U_{\text{а}} < U_{\text{акр}}$ — режим закритический. Электронные приборы типа «М» работают в закритическом режиме.

6.4.2. Многорезонаторный магнетрон

6.4.2.1. Назначение и устройство

Многорезонаторный магнетрон — электронный прибор типа «М», предназначенный для генерирования СВЧ колебаний, которое происходит в результате взаимодействия электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях с СВЧ полем замкнутой (кольцевой) замедляющей системы, образованной цепочкой резонаторов. В многорезонаторном магнетроне используется внутренний цилиндрический катод, который создает эмиссию электронов по всей длине кольцевого пространства взаимодействия и обеспечивает получение замкнутого электронного потока.

Анодный блок представляет собой ряд объемных резонаторов типа «щель-отверстие». Пространство между катодом и анодом называется областью взаимодействия. В этой области происходит обмен энергией между электронами и СВЧ полем. Объемные резонаторы связаны с областью взаимодействия через щели. Электрическая составляющая электромагнитного поля «провисает» в эту область. СВЧ мощность выводится с помощью витка связи, находящегося в одном из резонаторов. Выход магнетрона может быть выполнен в виде коаксиальной линии или волновода. Вакуумная камера помещена между полюсами электромагнита или постоянного магнита, причем направление магнитного поля совпадает с осью катода.

5.4.2.2. Свойства колебательной системы магнетрона

Колебательная система многорезонаторного магнетрона состоит из объемных резонаторов и области взаимодействия. Соседние резонаторы связаны емкостной связью через область взаимодействия и индуктивной связью из-за наличия общей магнитную составляющей СВЧ поля, поэтому колебательную систему можно представить замкнутой цепочкой связанных объемных резонаторов.

Каждый резонатор в отдельности эквивалентен одиночному колебательному контуру с индуктивностью L_0 и емкостью C_0 . $C_{\text{к}}$ — емкость между сегментом и катодом, которая определяет емкостную связь между резонаторами.

Эквивалентная схема представляет собой замкнутую систему (цепочку) полосовых фильтров, поэтому в такой системе могут возбуждаться только те колебания, для которых сумма сдвигов фазы в звеньях при одном обходе кратна величине 2π , т.е. сдвиг фазы φ_0 на одно звено, или между колебаниями в соседних резонаторах, может принимать лишь следующие дискретные значения:

$$\varphi_0 = \frac{2\pi n}{N}, \quad (5.28)$$

где N — число резонаторов,

n — целое число, называемое номером вида колебания.

Вид колебаний $n=0$ ($\varphi_0=0$) называют синфазным, а $n=N/2$, при котором $\varphi_0 = \pi$ — противофазным, или π -видом. Соотношение (5.28) называют условием цикличности или замкнутости СВЧ поля магнетрона.

Каждому виду колебаний соответствует собственная частота колебательной системы. Действительно, переход к другому виду означает изменение сдвига фазы φ_0 на одно звено, а при заданных параметрах L_0 , C_0 , C_k каждого звена новое значение φ_0 можно получить только на другой частоте.

Колебания π -вида обладают наименьшей рабочей частотой. Этот тип колебаний является основным в современных магнетронах, он позволяет получить наибольшую выходную мощность и наиболее высокий КПД.

5.4.2.3. Стабилизация рабочего вида колебаний

Зависимость частоты колебаний от номера n для эквивалентной схемы колебательной системы магнетрона определяется

$$\omega_n = \frac{\omega_{\text{рез}}}{\sqrt{1 + C_k / 2C_0 (1 - \cos \varphi_0)}}, \quad (5.29)$$

где $\omega_{\text{рез}} = 1/\sqrt{L_0 C_0}$ — собственная частота изолированного резонатора. По формуле (5.28) увеличение n приводит к росту частоты.

При увеличении числа резонаторов N разница частот между π -видом и ближайшим видом уменьшается. Эту разницу частот называют разделением частот. Относительное разделение частот $\Delta f/f$ небольшое, порядка 1% или меньше.

Для устойчивой работы магнетрона на π -виде колебаний желательно иметь разделение частот порядка (10...20) %. При одинаковых размерах резонаторов Δf увеличивают с помощью связок. Связки представляют собой проволочные или ленточные проводники, расположенные над торцами анодного блока и присоединенные в определенной последовательности к его сегментам.

Каждая связка присоединена к анодному блоку через один сегмент. Если в магнетроне возбуждены колебания π -вида, то каждая связка соединяет точки с одинаковым потенциалом. Поэтому связки не изменяют распределение поля. Однако между связкой и анодным блоком появляется ёмкость, которая понижает резонансную частоту π -вида колебаний по сравнению со случаем отсутствия связок. Для других видов колебаний те же точки уже не имеют одинаковый потенциал. По связкам потекут уравнивающие токи, влияние которых эквивалентно подключению индуктивности параллельно резона-

торам. Это повышает частоты нерабочих видов колебаний.

В результате применения связок частота π -вида колебаний уменьшилась и повысилась частота других видов, т.е. увеличилось разделение частот. Разделение может достигать 20 % и более. Применение связок, правильный выбор рабочего напряжения и его стабилизация позволяют подавить паразитные виды колебаний в магнетроне с непрерывным режимом работы.

Другой способ частотного разделения — это выполнение резонаторов разного размера (разнорезонаторные магнетроны); больший и меньший резонаторы чередуются.

5.4.2.4. Динамический режим работы магнетрона

Динамический режим заключается в самовозбуждении магнетрона, т.е. в возникновении и поддержании в нём СВЧ колебаний за счёт взаимодействия вращающегося электронного объёмного заряда, образованного совместным действием постоянных электрического и магнитного полей, с переменными электрическими СВЧ полями резонаторов.

Рассмотрим физические процессы, протекающие в магнетроне при генерировании колебаний π -вида. При включении анодного напряжения и установления $B > B_{кр}$ все электроны двигаются по эпициклоидам внутри пространства взаимодействия, образуя электронный поток («электронный ротор»), вращающийся вокруг катода и обладающий энергией. Под воздействием вращающихся электронов в резонаторах возбуждаются слабые хаотические колебания, которые вызовут скоростную модуляцию электронного потока и группирование электронов по плотности. В резонаторах начнёт запасаться энергия СВЧ колебаний, будет расти амплитуда напряженности электрического поля в щелях резонаторов, а это вызовет в свою очередь более глубокую модуляцию электронного потока. После нескольких десятков циклов вращения потока переходный процесс нарастания СВЧ колебаний за счёт энергии электронов заканчивается. Во всех резонаторах устанавливается одна частота колебаний. Электронный поток в установившемся режиме разбивается на сгустки в виде так называемых спиц, число которых при противофазном виде колебаний равно половине числа резонаторов, т.е. числу тормозящих полупериодов СВЧ поля. В спицах «полезные» электроны двигаются по эпициклоидам, постепенно приближаясь к аноду, а сами спицы вращаются с постоянной угловой скоростью в пространстве взаимодействия вокруг катода. «Отработавшие» электроны попадают на анод.

Описав петлю эпициклоиды, «полезный» электрон в некоторой точке прекращает приближение к катоду. Из этой точки начинается новая петля эпициклоиды, которую электрон совершает в тормозящем поле соседнего резонатора и т.д. до тех пор, пока не долетит до анода. Такое движение совершают «полезные» электроны только при выполнении условия синхронизма, которое в рассмотренном примере сводится к тому, что за время одного полупериода колебаний электрон совершает одну петлю эпициклоиды у одного резонатора. Каждый резонатор получает от электрона энергию $e\Delta U_a$, где ΔU_a — разность потенциалов начальной и конечной точек петли. В спице существует динамическое равновесие: в неё непрерывно входят электроны из катода и заменяют электроны, которые достигли анода.

Напряжение U_a , при котором начинается генерирование колебаний, называется пороговым, при этом появляется анодный ток магнетрона.

Для поддержания колебаний в магнетроне необходимо выполнение балансов амплитуд и фаз. Баланс амплитуд обеспечиваются выбором соответствующих значений анодного напряжения, магнитной индукции и высокой удельной плотности эмиссии электронов, достигающей $(10 \dots 30) \text{ A/cm}^2$.

Баланс фаз определяется условием синхронизма, т.е. равенством фазовой скорости $V_{\text{фм}}$ одной из пространственных гармоник СВЧ поля переносной скорости электронов $V_{\text{п}}$

$$V_{\text{п}} = V_{\text{фм}} \quad (5.30)$$

Для π -вида колебаний это условие выполняется, если электрон пролетает расстояние между соседними щелями за время, равное полупериоду СВЧ колебаний $T/2$.

Фазовое условие обеспечивает попадание электронных спиц в тормозящую фазу СВЧ поля и передачу ему электронами максимума энергии, полученной ими от источника анодного питания.

5.4.2.5. Параметры и характеристики многорезонаторных магнетронов

К основным параметрам магнетронов относятся параметры электрического режима и эксплуатационные параметры, характеризующие качество магнетрона.

К параметрам электрического режима относятся: напряжение $U_{\text{н}}$ и ток $I_{\text{н}}$ накала и их допустимые отклонения, не превышающие обычно $\pm 10 \%$; номинальное анодное напряжение U_a и допустимый верхний предел этой величины; номинальное и допустимое верхнее и нижнее значения анодного тока I_a ; напряженность H или индукция B магнитного поля; для магнетронов, работающих в импульсном режиме — номинальные и допустимые величины длительности импульсов анодного напряжения, их скважность и крутизна фронтов — величин, в значительной степени определяющих спектр генерируемых магнетроном колебаний.

К основным эксплуатационным параметрам относятся: выходная мощность $P_{\text{вых}}$; коэффициент полезного действия η ; рабочая частота колебаний и ее стабильность; длительность и частота следования выходных радиоимпульсов и др.

Мощность генерируемых СВЧ колебаний является важнейшим параметром магнетрона и определяется по формуле

$$P_{\text{вых}} = \eta I_a U_a, \quad (5.31)$$

где η — полный КПД магнетрона.

Выходная мощность магнетронов непрерывного действия составляет от долей ватта до нескольких десятков киловатт, а импульсного действия — от 10 Вт до 10 МВт.

Электроны, получая энергию от постоянного электрического поля, не полностью передают ее СВЧ полю резонаторов. Некоторые электроны вообще не участвуют в механизме передачи энергии, так как в самом начале, получив дополнительное ускорение, возвращаются обратно на катод и нагревают его, отдавая при соударении с его поверхностью оставшуюся энергию. Рабочие (полезные) электроны, образующие спицы и многократно взаимодействующие с СВЧ полем резонаторов, в большинстве случаев

достигают анода, с максимальной скоростью $V_e = 2E_a/B$ нагревая его при соударении. Таким образом, часть энергии, полученной электронами от постоянного электрического поля, расходуется бесполезно. Этот расход энергии называют электронными потерями. Отношение энергии, полученной СВЧ полем резонаторов от электронного потока, к полной энергии, сообщенной электронам постоянным электрическим полем, называется электронным КПД магнетрона $\eta_{эл}$.

$$\eta = 1 - (B_{кр}/B)^2 (U_a/U_{акр}) \quad (5.32)$$

Эта величина характеризует эффективность взаимодействия электронного потока с переменным электрическим полем.

Энергия СВЧ колебаний расходуется также и в самих резонаторах, в устройствах вывода энергии, в диэлектриках и т.п. Эти потери определяют КПД колебательной системы η_k . Коэффициент полезного действия магнетрона, таким образом, равен

$$\eta = \eta_{эл} \eta_k \quad (5.33)$$

Величина электронного КПД магнетрона существенным образом зависит от режима его работы. КПД колебательной системы магнетрона K_k зависит от рабочей частоты и лежит в пределах 0,9...0,95 для дециметровых волн и 0,6...0,65 для магнетронов миллиметрового диапазона волн. Электронный КПД магнетронов, как и других приборов типа «М», может превышать 70 %.

Рабочая частота колебаний определяется параметрами резонаторов и конструкцией анодного блока (в том числе количеством резонаторов), величинами B , U_a . Существует следующая зависимость между числом резонаторов N , магнитной индукцией B и частотой генерируемых колебаний f

$$NB = af, \quad (5.34)$$

где a — коэффициент, зависящий от конструкции.

Магнитная индукция связана с анодным напряжением формулой

$$B_{кр} = \sqrt{\frac{2mU_{акр}}{ed^2}}. \quad (6.35)$$

Для более высоких частот нужно иметь большее число резонаторов или увеличивать магнитную индукцию B и при этом увеличивать анодное напряжение.

Современные магнитные системы позволяют создать магнитную индукцию от 0,1 до 0,5 Тл.

Рабочими характеристиками магнетрона называют связь между анодным напряжением и током при постоянных мощности, КПД, частоте или индукции. Эти характеристики позволяют выбрать режим работы (U_a , I_a) при заданных мощности, КПД, частоте или индукции. Рабочие характеристики снимают при высокочастотной нагрузке, для которой $K_{СВН}=1,1$.

Связь U_a и I_a при $B=const$ называют вольт-амперной характеристикой магнетрона (кривой постоянной индукции).

Возбуждение колебаний начинается при пороговом напряжении. Дальнейшее повышение U_a приводит к быстрому возрастанию I_a . При переходе к другому значению индукции характеристика смещается, так как самовозбуждение начинается при большем U_a . В областях малых и больших токов наблюдается неустойчивая работа. При малых токах возможны «перескоки» с рабочего вида колебаний на другие (низковольт-

ные), при больших токах возникают искрения (пробои), которые могут привести к разрушению катода или к пропаданию (пропуску) отдельных импульсов в импульсных магнетронах. Вследствие указанных причин для каждого типа магнетрона существуют рабочие пределы изменений U_a и I_a . Другие параметры (B , η , $P_{\text{вых}}$) при выбранных значениях анодного напряжения и тока однозначно определяются рабочими характеристиками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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

ПРИЛОЖЕНИЕ А
ОБРАЗЕЦ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА

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

Кафедра радиотехники и телекоммуникаций

Контрольная работа
по дисциплине «Электронные и квантовые приборы СВЧ»
Вариант № ____

Выполнил студент гр. ____

_____ (Ф.И.О.)

ЗК № _____

Отметка о защите _____

Преподаватель _____
(Ф.И.О.)

Севастополь

20 ____

