

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»

Факультет вечернего и заочного обучения

Е.И. Бочаров, И.А. Кравцов, И.А. Кратиров

**ПРИБОРЫ СВЧ И ОПТИЧЕСКОГО
ДИАПАЗОНОВ**

**ПРОГРАММА, КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ
И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**
210404, 210405

СПбГУТ)))

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2010

УДК 37.1.39.029.64(076.5)
ББК 3840.4я73
Б86

Рецензент
кандидат технических наук, профессор кафедры РПВЭС СПбГУТ
В.М. Устименко

*Рекомендовано к печати
редакционно-издательским советом
СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича*

Бочаров, Е. И.
Приборы СВЧ и оптического диапазонов: программа, контрольное задание и методические указания / *Е. И. Бочаров, И. А. Кравцов, И. А. Кратиров.* – СПб. : Изд-во «Теледом» ГОУВПО СПбГУТ, 2010. – 43 с.

Содержат программу, контрольное задание и методические указания к его выполнению.

Предназначены для студентов заочного факультета, обучающихся по специальностям 210404 и 210405.

УДК 37.1.39.029.64(076.5)
ББК 3840.4я73

© Бочаров Е.И., Кравцов И.А., Кратиров И.А., 2010
© Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», 2010

ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

1. Цель дисциплины

Дисциплина «Приборы СВЧ и оптического диапазонов»: программа, контрольное задание и методические указания для студентов заочного факультета должна обеспечить базовую подготовку студентов, необходимую для успешного изучения специальных дисциплин и последующего решения производственных, проектных и исследовательских задач в соответствии с квалификационной характеристикой инженера специальностей 210404 и 210405. Изучение дисциплины должно подготовить студентов к решению задач, связанных с рациональным выбором электронных и квантовых приборов с учетом их параметров, характеристик, режимов работы в радиоэлектронных устройствах и телекоммуникациях, а также тенденций их развития.

2. Задачи изучения дисциплины

В результате изучения дисциплины студент должен:

- приобрести знания принципов действия, устройства, параметров, характеристик электронных и квантовых приборов, их моделей и эквивалентных схем, используемых при анализе и синтезе радиоэлектронных устройств;

- уметь использовать полученные знания для правильного выбора прибора, расчета его параметров и характеристик и оценки зависимости параметров от режимов работы прибора;

- приобрести навыки работы с электронными и квантовыми приборами и аппаратурой, используемой для исследования характеристик и измерения работы приборов.

3. Рекомендации по изучению дисциплины

Изучение настоящей дисциплины должно опираться на содержание следующих дисциплин:

«Математика» (решение дифференциальных уравнений первого и второго порядка и уравнений в частных производных);

«Физика» (электростатика, движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях, основы физики твердого тела, основы квантовой механики, элементы статистической физики);

«Теория линейных электрических цепей» (расчет простых цепей с генераторами напряжения и тока, векторные диаграммы);

«Теория нелинейных цепей» (основы теории автогенераторов);

«Техническая электродинамика» (волноводы, резонаторы, периодические замедляющие системы);

«Усилительные устройства» (параметры и характеристики усилителей);

«Вычислительная техника и программирование».

СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Введение

Шкалы частот и длин волн электромагнитных колебаний. Границы диапазона СВЧ и оптического диапазонов. Особенности электромагнитных колебаний СВЧ и оптического диапазонов. Важность и актуальность освоения этих диапазонов применительно к технике связи. Основные направления использования электромагнитных колебаний СВЧ и оптического диапазонов в телекоммуникациях.

Основные принципы усиления и генерации электромагнитных колебаний, используемые в электронных и квантовых приборах. Параметры и характеристики усилителей и генераторов СВЧ и оптического диапазонов. Классификация электронных приборов СВЧ и квантовых приборов СВЧ и оптического диапазонов.

Методические указания

1. Материал данного раздела изложен в [1, разд. 13.5, 20 и 22.5].
2. При изучении материала следует ознакомиться с важнейшими особенностями электромагнитных колебаний СВЧ и оптического диапазонов (большая информационная емкость СВЧ и оптических линий связи, высокая направленность излучения, высокая проникающая способность СВЧ излучения через ионосферу Земли, большие возможности в снижении массы и габаритов радиоэлектронной аппаратуры). Эти особенности объясняют важность освоения СВЧ и оптического диапазонов и определяют развитие таких видов связи, как радиорелейная, тропосферная, космическая, волоконно-оптическая, лазерная, обеспечивающих передачу больших потоков информации.
3. Следует уяснить, что в качестве активных элементов, обеспечивающих усиление и генерацию электромагнитных колебаний, в радиоэлектронной аппаратуре СВЧ и оптического диапазонов используются электронные и квантовые приборы. Принципы действия электронных приборов, работающих в СВЧ диапазоне, основаны на преобразовании кинетической энергии заряженных частиц в энергию электромагнитного поля. В квантовых приборах, работающих как в СВЧ, так и в оптических диапазонах, для усиления и генерации электромагнитных колебаний используется внутренняя энергия микрочастиц. Следует рассмотреть классификацию электронных и квантовых приборов и оценить уровень их параметров, достигнутый на различных участках СВЧ и оптического диапазонов.

Контрольные вопросы

1. Какие частоты и длины волн принято относить к диапазону СВЧ, а какие – к оптическому диапазону?
2. Чем определяется широкое применение в системах связи электромагнитных колебаний СВЧ и оптического диапазонов?

3. Чем отличаются принципы усиления и генерации электромагнитных колебаний, используемые в электронных и квантовых приборах?

4. Каковы основные направления классификации электронных и квантовых приборов. На каких участках СВЧ и оптических диапазонов работают эти приборы?

1. ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ СВЧ

Взаимодействие электронного потока с переменным электромагнитным полем в межэлектродном промежутке. Квазистатический и динамический режимы взаимодействия. Угол пролета электронов через промежуток и коэффициент электронного взаимодействия. Электростатический и динамический методы управления электронным потоком. Основные процессы в электровакуумных приборах: модуляция скорости электронов, группирование потока и его энергообмен с переменным электромагнитным полем. Токи в межэлектродном промежутке и во внешней цепи. Конвекционный и наведенный токи, токи смещения и емкостной и связь между ними. Теорема о наведенном токе. Эквивалентная схема промежутка и расчет на ее основе мощности взаимодействия электронного потока и переменного электромагнитного поля.

Особенности колебательных систем электронных приборов (ЭП) СВЧ диапазона. Объемные резонаторы, их параметры, характеристики и эквивалентные схемы.

Методические указания

1. Материал данного раздела изложен в [1, разд. 13.5; 15.1–15.3].
2. Следует иметь в виду, что в любых ЭП взаимодействие электронного потока с постоянными и переменными электрическими полями происходит в так называемых межэлектродных промежутках (зазорах), под которыми понимается некоторое пространство, ограниченное двумя электродами, например, пространство катод-сетка или сетка-анод триода, емкостной зазор объемного резонатора и т. п. Особенность ЭП СВЧ заключается в том, что в силу инерционности движения электронов время их пролета через промежуток, в котором происходит взаимодействие с переменным полем, оказывается сравнимым с периодом этого поля. В результате существенно снижается эффективность взаимодействия.
3. Влияние инерционности движения электронов на процессы в электронном промежутке отражает параметр, называемый углом пролета электронов. Угол пролета связывает между собой ширину промежутка, скорость движения электронов и частоту переменного поля, с которым взаимодействует поток, и показывает, на какой угол изменится фаза поля за время пролета электронами промежутка. Степень уменьшения эффективности взаимодействия потока с полем отражает параметр, называемый коэффициентом взаимодействия, который уменьшается с ростом угла пролета электронов.

4. Уменьшение эффективности взаимодействия электронного потока и переменного поля с ростом угла пролета электронов в промежутке объясняет тот факт, что на СВЧ весьма ограниченное применение находит используемый во всех низкочастотных ЭП электростатический метод управления электронным потоком. В приборах с электростатическим управлением в самом первом электронном промежутке катод – управляющая сетка переменное поле взаимодействует с электронами, вылетающими непосредственно с катода и имеющими незначительные скорости. В результате углы пролета электронов в промежутке оказываются большими, а эффективность взаимодействия – низкой. Эта тенденция усугубляется с ростом частоты, поэтому приборы с электростатическим управлением используют лишь в низкочастотной части СВЧ диапазона. В большинстве ЭП СВЧ используется принципиально иной – динамический метод управления потоком, при котором переменное поле взаимодействует с предварительно ускоренным до весьма значительной скорости электронным потоком, а катод, по существу, исключается из высокочастотной части прибора. Предварительное ускорение электронов позволяет резко уменьшить угол пролета и, соответственно, повысить эффективность взаимодействия потока с полем.

5. При анализе процессов в ЭП с динамическим управлением следует четко выделить три основных процесса – скоростную модуляцию потока (периодическое изменение скорости электронов под действием поля), его группировку (образование электронных сгустков) и энергообмен потока с полем (передачу энергии электронных сгустков тормозящему их полю). Рассматривая физическую природу составляющих полного тока, протекающего в электронном промежутке и в его внешней цепи, следует особое внимание уделить конвекционному и наведенному токам и их взаимосвязи.

6. При изучении особенностей колебательных систем, используемых в ЭП СВЧ, следует уяснить невозможность использования в СВЧ диапазоне традиционных открытых колебательных систем (контуров), связанную с увеличением потерь энергии и появлением паразитных связей между контурами. Поэтому в ЭП СВЧ используются закрытые колебательные системы – объемные резонаторы. В отличие от низкочастотных ЭП, в которых можно разделить сам прибор и колебательную систему, объемные резонаторы являются неотъемлемой конструктивной частью СВЧ приборов. Наибольшее распространение находят тороидальные и коаксиальные резонаторы. Взаимодействие потока с полем резонатора осуществляется в той его области, где максимальна напряженность электрического поля. Эта область резонатора является емкостным зазором. При анализе процессов в приборах широкого применения находят эквивалентные схемы, в которых объемные резонаторы моделируются колебательными контурами с сосредоточенными элементами.

Контрольные вопросы

1. Опишите основные типы объемных резонаторов. Чем вызвано их применение в ЭП СВЧ?
2. Чем отличаются статистический и динамический методы управления электронным потоком?
3. Как влияет инерционность движения электронов на эффективность взаимодействия потока с электромагнитным полем? Какими параметрами описывается это влияние?
4. Что такое угол пролета электронов в промежутке? В чем его физический смысл?
5. Что такое коэффициент взаимодействия? Как он связан с углом пролета электронов?
6. Какие физические процессы лежат в основе работы ЭП СВЧ с динамическим управлением потоком?
7. Что такое конвекционный и наведенный токи? Как они связаны между собой?

1.2. ЭП СВЧ с электростатическим управлением

Принцип действия и особенности триодов и тетродов СВЧ. Причины, ограничивающие их эффективность с ростом частоты. Параметры и конструкции сеточных ламп СВЧ диапазона. Применение триодов и тетродов СВЧ в технике связи.

Методические указания

1. Материал данного раздела изложен в [1, разд. 13.5; 2, разд. 2.1–2.3].
2. Анализ работы триода следует проводить с помощью пространственно-временной диаграммы движения электронов. Она позволяет наглядно проследить механизм образования сгустков и выявить причины их «расплывания» с ростом частоты, в результате которого уменьшается амплитуда первой гармоники тока, наведенного в анодной цепи и, соответственно, снижается мощность, отдаваемая потоком полю. Влияние этого недостатка в определенной степени удается снизить в тетродах СВЧ. Использование дополнительной экранирующей сетки, на которую подается достаточно высокий потенциал, позволяет существенно увеличить скорость электронов в промежутке «экранирующая сетка–анод» (уменьшить соответствующий угол пролета) и уменьшить за счет этого «расплывание» сгустков. В результате электронный КПД тетродов оказывается выше, чем у триодов.
3. Рассматривая конструкции триодов и тетродов, необходимо уяснить специфические требования, предъявляемые к ним на СВЧ, – уменьшение геометрических размеров межэлектродных промежутков, снижение межэлектродных емкостей, индуктивностей выводов, диэлектрических потерь в элементах лампы. Отвечающие этим требованиям конструкции приборов основаны на совмещении в едином конструктивно-технологическом

модуле собственно лампы и ее колебательной системы. Широкие возможности в этом плане открывает использование объемных (в частности, коаксиальных) резонаторов. Следует оценить типичные значения параметров современных СВЧ триодов и тетродов, их достоинства и недостатки, а также области применения в телекоммуникациях.

Контрольные вопросы

1. Рассмотрите механизм образования сгустков в триоде и поясните причины его «расплывания» с ростом частоты.
2. В чем состоит преимущество тетродов СВЧ по сравнению с триодами?
3. Каковы конструктивные особенности СВЧ триодов и тетродов?
4. Каковы основные области применения СВЧ триодов и тетродов в технике связи?

1.3. Клистроны

1.3.1. Двухрезонаторный пролетный клистрон

Устройство и принцип действия двухрезонаторного клистрона. Пространственно-временная диаграмма движения электронов. Скоростная модуляция, группировка и энергообмен потока с полем в клистроне. Основы кинематической теории клистрона. Параметры и характеристики усилительных клистронов. Генераторы на двухрезонаторных клистромах.

Методические указания

1. Материал данного раздела изложен в [1, разд.15.1–15.4].
2. Рассматривая принцип действия двухрезонаторного пролетного клистрона, следует иметь в виду, что клистроны, использующие динамический метод управления электронным потоком, относятся к приборам с кратковременным взаимодействием потока с электромагнитным полем. В таких приборах взаимодействие потока с СВЧ полем происходит в достаточно коротких электронных промежутках (зазорах объемных резонаторов), которые предварительно ускоренный поток пролетает за весьма короткое время. В результате углы пролета электронов в зазорах оказываются небольшими ($\theta_d < \frac{\pi}{2}$), а эффективность взаимодействия потока с полем – достаточно высокой. Наиболее наглядно процессы скоростной модуляции, группировки и энергообмена потока с полем в клистроне позволяет проследить пространственно-временная диаграмма движения электронов.
3. Изучая методы анализа процессов, протекающих в клистроне, в кинематическом приближении (т. е. без учета действия сил расталкивания между электронами) следует понять физический смысл и роль таких параметров, как коэффициент взаимодействия M и параметр группировки X , а

также их связь с геометрическими размерами и режимом работы прибора (ускоряющим напряжением и амплитудой напряжения на зазоре входного резонатора). Необходимо проследить изменение формы конвекционного тока в зависимости от величины параметра группировки. Эффективность группировки потока определяет величину амплитуды первой гармоники конвекционного тока $I_1 = 2 I_0 J_1(X)$, где $J_1(X)$ – функция Бесселя. Максимальное значение $I_1 = 1,16 I_0$ достигается при $X = 1,84$. Такой режим называется режимом оптимальной группировки. Для расчета мощности взаимодействия электронов и СВЧ поля в зазоре выходного резонатора используется эквивалентная схема, в которой эквивалентный резонатору колебательный контур питается током, представляющим собой первую гармонику наведенного в резонаторе тока. На основе этой схемы легко определить напряжение на зазоре выходного резонатора и электронную мощность, отдаваемую потоком полю в резонаторе.

4. Основные параметры усилительного двухрезонаторного клистрона – выходная мощность, коэффициент усиления мощности и электронный КПД – определяются на основе соотношений, описывающих процессы скоростной модуляции, группировки потока и его энергообмена с полем в зазоре выходного резонатора. Выходная мощность и электронный КПД достигают максимальных значений в режиме оптимальной группировки и при оптимальной величине амплитуды напряжения на зазоре выходного резонатора $U_{2\text{опт}} = M_2 U_0$, где U_0 – ускоряющее напряжение. Амплитуда U_2 не может превысить оптимальной величины, так как в этом случае поле, тормозящее электроны в выходном зазоре, будет слишком сильным, и не все электроны смогут его преодолеть. Соответственно, часть наиболее замедленных электронов будет возвращаться полем из зазора обратно в пространство дрейфа, что приведет к нарушению условий оптимальной работы прибора. Характерно, что в оптимальном режиме электронный КПД равен 58% (близок к 50%). Это обстоятельство связано с механизмом группировки – в двухрезонаторном клистроне в образовании каждого сгустка полезно участвуют примерно 50% электронов, проходящих через входной зазор за один период СВЧ напряжения.

5. При рассмотрении амплитудной характеристики клистрона необходимо учитывать, что вид этой характеристики в значительной мере определяется процессом группировки потока. Максимальное значение выходной мощности достигается при оптимальной мощности входного сигнала, соответствующей режиму оптимальной группировки. При большей мощности входного сигнала происходит «перегруппировка» потока и амплитуда первой гармоники конвекционного тока уменьшается ($X > 1,84$), вследствие чего выходная мощность падает. Следует отметить, что максимальный коэффициент усиления клистрона достигается в линейном режиме (при малой мощности входного сигнала).

Амплитудно-частотная характеристика клистрона определяется свойствами его резонаторов и имеет вид, подобный характеристике колебательного контура. Вследствие высокой добротности резонаторов относительно полоса пропускания усилительного двухрезонаторного клистрона, определяемая по уровню половинной мощности (-3 дБ), составляет порядка $(0,1-1)\%$.

Контрольные вопросы

1. Рассмотрите с помощью пространственно-временной диаграммы принцип действия двухрезонаторного пролетного клистрона.
2. Рассмотрите процесс скоростной модуляции электронного потока во входном резонаторе пролетного клистрона. Как зависит эффективность модуляции от угла пролета электронов через зазор?
3. Рассмотрите процесс группировки потока в пространстве дрейфа. Как изменяется вид временной зависимости конвекционного тока и амплитуда его первой гармоники при изменении параметра группировки?
4. Как возникает СВЧ напряжение на зазоре выходного резонатора? Зачем необходимо группировать электронный поток в сгустки?
5. Чему равен максимальный электронный КПД пролетного двухрезонаторного клистрона? С чем связано существование этого ограничения. При каких значениях параметра группировки и амплитуды СВЧ напряжения на зазоре выходного резонатора оно достигается?
6. Нарисуйте и поясните амплитудную характеристику пролетного усилительного клистрона. При каких мощностях входного сигнала достигаются режимы максимального усиления и максимальной выходной мощности.
7. Поясните возможность использования двухрезонаторного пролетного клистрона в качестве генератора СВЧ колебаний.

1.3.2. Многорезонаторный пролетный клистрон

Устройство и принцип действия многорезонаторного пролетного клистрона. Увеличение коэффициента усиления, электронного КПД и полосы пропускания по сравнению с двухрезонаторным клистроном. Режимы настройки промежуточных резонаторов. Параметры, характеристики и области применения многорезонаторных клистронов.

Методические указания

1. Материал данного раздела изложен в [1, разд. 15.5].
2. Устройство и принцип действия многорезонаторного клистрона следует рассмотреть на примере трехрезонаторного клистрона. Для понимания процессов, протекающих в нем, полезно с помощью пространственно-временной диаграммы рассмотреть работу клистрона в двух режимах – режиме синхронной настройки резонаторов и режиме с расстройкой промежуточного резонатора в сторону высоких частот. В первом случае достигается увеличение коэффициента усиления, а во втором – увеличение элек-

тронного КПД за счет повышения эффективности группировки потока. Кроме того, при расстройке промежуточных резонаторов относительно центральной частоты удается существенно увеличить полосу пропускания клистрона.

Контрольные вопросы

1. Рассмотрите устройство и принцип действия многорезонаторного пролетного клистрона. Поясните назначение промежуточных резонаторов.
2. С помощью пространственно-временной диаграммы рассмотрите процессы скоростной модуляции и группировки электронов в трехрезонаторном клистроне при синхронной настройке резонаторов и расстройке промежуточного резонатора.
3. Поясните, за счет чего в многорезонаторном клистроне достигаются большие по сравнению с двухрезонаторным клистроном значения коэффициента усиления, электронного КПД и полосы пропускания. Каким образом при этом выбирается настройка промежуточных резонаторов?
4. Укажите основные параметры и области применения современных многорезонаторных пролетных клистронов.

1.3.3. Отражательный клистрон

Устройство и принцип действия отражательного клистрона. Пространственно-временная диаграмма движения электронов в пространстве резонатор – отражатель. Зоны генерации, электронная перестройка частоты. Параметры и области применения отражательных клистронов.

Методические указания

1. Материал данного раздела изложен в [1, разд. 15.6].
2. Отражательный клистрон является автогенератором СВЧ колебаний. Он имеет один резонатор, зазор которого электронный поток пересекает дважды и, соответственно, дважды взаимодействует с полем резонатора. В первом случае поле модулирует поток по скорости, а во втором – отбирает энергию от сгруппированного потока. Такой характер взаимодействия потока с полем определяет наличие присущей отражательному клистроу внутренней положительной обратной связи. Группировка потока происходит в тормозящем поле в пространстве между резонатором и отражателем. Пространственно-временная диаграмма движения электронов позволяет проследить зонный характер генерации отражательного клистрона и оценить оптимальное значение угла пролета электронов в пространстве резонатор – отражатель. Важной особенностью отражательного клистрона является электронная перестройка частоты – безынерционная и не требующая потребления мощности перестройка частоты генерируемого колебания за счет изменения напряжения на отражателе.

Контрольные вопросы

1. Рассмотрите устройство и принцип действия отражательного клистрона.
2. С помощью пространственно-временной диаграммы рассмотрите процесс группировки электронного потока в тормозящем поле. Около каких электронов происходит группирование электронов в сгустки?
3. С помощью пространственно-временной диаграммы поясните механизм формирования зон генерации отражательного клистрона. Чему равен оптимальный угол пролета электронов в пространстве резонатор – отражатель?
4. С помощью пространственно-временной диаграммы покажите возможность электронной перестройки частоты генерируемого колебания за счет изменения напряжения на отражателе.
5. Укажите основные параметры и области применения отражательных клистронов.

1.4. ЭВП с длительным взаимодействием

Принцип длительного (распределенного) взаимодействия электронного потока с полем бегущей электромагнитной волны. Понятие о фазовой и групповой скорости волны. Условие синхронизма потока и волны. Пространственно-временная диаграмма движения электронов в поле бегущей волны. Процессы скоростной модуляции, группировки потока и его энергообмена с полем волны.

Замедляющие системы, их конструкции, параметры и характеристики. Коэффициент замедления, сопротивление связи, дисперсионная характеристика. Прямые и обратные пространственные гармоники (волны).

Устройство и принцип действия лампы бегущей волны (ЛБВ). Элементы линейной волновой теории ЛБВ. Постановка задачи и результаты решения дисперсионного уравнения. Коэффициент усиления в малосигнальном режиме.

Режим большого сигнала. Оценка электронного КПД, амплитудная характеристика ЛБВ. Способы увеличения КПД ЛБВ (изохронные ЛБВ, использование скачков потенциала, рекуперация энергии электронов). Широкополосные свойства ЛБВ. Сопоставление параметров усилителей на ЛБВ и клистронных усилителей. Параметры и области применения ЛБВ.

Лампа обратной волны (ЛОВ). Устройство и принцип действия. Электронная перестройка частоты генерации ЛОВ. Параметры и области применения ЛОВ.

Методические указания

1. Материал данного раздела изложен в [1, разд. 16].
2. Рассматривая принцип длительного взаимодействия электронов с полем бегущей волны, следует уяснить, что эффективное взаимодействие

потока с бегущей волной возможно лишь при условии приблизительного равенства скорости потока и фазовой скорости волны (скорости перемещения вдоль оси прибора точки, соответствующей постоянной фазе поля). Это условие называется условием фазового синхронизма. При длительном взаимодействии в отличие от клистронных приборов основные процессы – скоростная модуляция, группировка электронов и их энергообмен с полем – совмещены во времени и в пространстве. Это обстоятельство делает анализ приборов с длительным взаимодействием достаточно сложным.

3. Поскольку электронный поток невозможно ускорить до скорости света, для выполнения условия синхронизма необходимо уменьшить фазовую скорость волны. Для этой цели используются специальные волноводные системы, называемые замедляющими системами. Конструктивно замедляющие системы выполняются либо в виде линий передачи с периодическими неоднородностями (спираль, гребенка, встречные штыри), либо в виде цепочек связанных между собой резонаторов. Основными параметрами замедляющих систем являются коэффициент замедления, показывающий во сколько раз уменьшается фазовая скорость по сравнению со скоростью света, и сопротивление связи, связывающее между собой мощность распространяющейся в системе волны и продольную составляющую напряженности электрического поля. Важнейшим свойством волн, распространяющихся в замедляющих системах, является дисперсия – зависимость фазовой скорости от частоты.

Несинусоидальное в пространстве поле, распространяющееся в замедляющей системе, может быть представлено в виде суммы бесконечного числа синусоидальных бегущих волн, называемых пространственными гармониками, которые различаются фазовыми скоростями и имеют одинаковую частоту и групповую скорость (скорость распространения энергии волны). Пространственные гармоники, у которых направления фазовой и групповой скоростей совпадают, называются прямыми, а гармоники, у которых фазовая и групповая скорости направлены навстречу друг другу, называются обратными.

4. Изучая устройство и принцип действия ЛБВ, в которой электронный поток взаимодействует с прямой волной, следует уяснить, что при выполнении условия синхронизма каждый из электронов, поступающих в замедляющую систему с одинаковыми скоростями, движется в ней длительное время в поле постоянной фазы (ускоряющей либо тормозящей). В результате электроны модулируются по скорости и постепенно группируются в сгустки. Если начальная скорость потока несколько превышает фазовую скорость волны, то формирующиеся электронные сгустки движутся в тормозящем поле и отдают всю свою энергию, усиливая тем самым волну.

Рассматривая постановку задачи анализа ЛБВ, следует обратить внимание на то, что для адекватного описания взаимодействия потока с волной в замедляющей системе необходимо решение самосогласованной задачи.

Ее решение сравнительно легко может быть получено для случая малого входного сигнала. В этом случае задача сводится к решению дисперсного уравнения относительно комплексной постоянной распространения волны. В малосигнальном (линейном) режиме амплитуда волны возрастает вдоль замедляющей системы по экспоненциальному закону. Результатом линейного анализа является выражение для расчета коэффициента усиления мощности ЛБВ.

Для оценки энергетических показателей ЛБВ необходим анализ нелинейного режима (режима большого сигнала). Качественное рассмотрение процесса взаимодействия потока и волны показывает, что при большом входном сигнале модуляция и группировка потока происходит очень эффективно, и сгруппированные уже на начальном участке замедляющей системы сгустки эффективно отдают свою кинетическую энергию полю волны. При этом скорость движения электронов уменьшается и нарушается условие синхронизма (сгустки постепенно переходят из тормозящего полупериода волны в ускоряющий и начинают отбирать у нее энергию). В результате мощность волны на выходе замедляющей системы и, соответственно, электронный КПД падают.

5. Нарушение условий синхронизма является основной причиной насыщения амплитудной характеристики ЛБВ и того, что электронный КПД ЛБВ оказывается ниже, чем у пролетного клистрона. Среди способов повышения КПД ЛБВ наибольшее практическое значение имеют способы построения изохронной ЛБВ и рекуперации.

Широкополосные свойства ЛБВ определяются рядом факторов, в частности видом дисперсионной характеристики и согласованием замедляющей системы с входным и выходным трактами. Выбирая в качестве рабочего участок дисперсионной характеристики, на котором фазовая скорость волны очень слабо зависит от частоты, можно обеспечить выполнение условия синхронизма и, соответственно, эффективное усиление в достаточно широкой полосе частот (до 100% и выше). Поэтому по широкополосности ЛБВ значительно превосходит пролетные клистроны.

6. Изучая устройство и принцип действия лампы обратной волны, в которой электронный поток взаимодействует с одной из пространственных гармоник, направления фазовой и групповой скорости которой противоположны, следует обратить внимание на то, что при таком взаимодействии обеспечивается внутренняя положительная обратная связь. Достоинством СВЧ генератора на ЛОВ является широкий диапазон электронной перестройки частоты.

Контрольные вопросы

1. Какие приборы называются приборами с длительным взаимодействием? Укажите их отличительные особенности по сравнению с приборами клистронного типа.

2. Рассмотрите взаимодействие электронного потока с бегущей электромагнитной волной при различных соотношениях скорости потока и фазовой скорости волны. В чем заключается условие синхронизма электронного потока и электромагнитной волны?

3. Что такое замедляющая система, для чего она служит? Приведите примеры практических конструкций замедляющих систем. Что такое коэффициент замедления и сопротивления связи замедляющей системы?

4. Рассмотрите устройство и принцип действия лампы бегущей волны.

5. Рассмотрите зависимости изменения амплитуд продольной составляющей напряженности электрического поля и первой гармоники конвекционного тока вдоль оси замедляющей системы в ЛБВ. Напишите выражение для коэффициента усиления ЛБВ и поясните физический смысл входящих в него параметров.

6. Рассмотрите амплитудно-частотную характеристику ЛБВ. Какие факторы определяют рабочую полосу частот ЛБВ?

7. Рассмотрите амплитудную характеристику ЛБВ. Какие факторы определяют ее насыщение?

8. С чем связано основное ограничение КПД ЛБВ? Какие методы повышения КПД ЛБВ используются на практике?

9. Рассмотрите преимущества и недостатки приборов с длительным взаимодействием по сравнению с клистроном. Укажите основные области применения усилительных ЛБВ.

10. Рассмотрите устройство и принцип действия лампы обратной волны. Укажите достоинства и недостатки ЛОВ и области ее применения.

2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ СВЧ

2.1. СВЧ диоды и транзисторы

Основные типы полупроводниковых диодов, используемые в СВЧ диапазоне (диод с накоплением заряда, рпн-диод, диод с барьером Шоттки, варикап), их параметры и области применения.

Биполярные СВЧ транзисторы. Основные факторы, ограничивающие эффективность работы транзисторов с ростом частоты. Перспективы улучшения частотных свойств транзисторов. Параметры и области применения биполярных СВЧ транзисторов.

Полевые СВЧ транзисторы. Факторы, определяющие быстродействие полевых транзисторов. Полевой транзистор с барьером Шоттки (МЭП-транзистор). Параметры и области применения полевых СВЧ транзисторов.

Методические указания

1. Материал данного раздела изложен в [1, разд. 17].

2. Рассматривая работу полупроводниковых приборов в СВЧ диапазоне, следует иметь в виду, что основными факторами, снижающими их эффективность с ростом частоты, являются инерционность движения носи-

теля заряда (электронов и дырок) и конечное время перезаряда емкости p - n -переходов. Возможные пути снижения влияния указанных факторов приводят подчас к противоречивым результатам и имеют свои пределы. В частности, повышение граничной частоты биполярного транзистора сопровождается снижением его мощности и уменьшением напряжения пробоя коллекторного перехода. В этом плане полевые транзисторы, быстродействие которых в основном определяется временем пролета носителями канала, имеют преимущество по сравнению с биполярными транзисторами.

Контрольные вопросы

1. Какие факторы определяют быстродействие полупроводниковых приборов?
2. Рассмотрите основные типы полупроводниковых диодов, используемых в СВЧ диапазоне. Укажите их параметры и области применения.
3. Рассмотрите возможные пути повышения быстродействия биполярных транзисторов. Укажите параметры и области применения биполярных СВЧ транзисторов.
4. Рассмотрите устройство и принцип действия полевого СВЧ транзистора с барьером Шотки. Какими факторами определяется быстродействие полевых транзисторов? Укажите параметры и области применения полевых СВЧ транзисторов.

2.2. Лавинно-пролетный диод

Взаимодействие свободных носителей заряда с кристаллической решеткой полупроводника в сильном электрическом поле. Насыщение дрейфовой скорости носителя. Ударная ионизация атомов кристаллической решетки. Лавинное умножение носителей заряда. Лавинный пробой.

Структуры лавинно-пролетных диодов (ЛПД). Процессы в слоях умножения и дрейфа. Устройство и принцип действия генератора на ЛПД. Эквивалентные схемы диода и генератора. Усилитель на ЛПД. Конструкция. Параметры и области применения генераторов и усилителей на ЛПД.

Методические указания

1. Материал данного раздела изложен в [1, разд. 18; 2 разд. 2.4, 2.6].
2. Рассматривая процессы, протекающие в полупроводниках при характерных для обратносмещенного p - n -перехода в сильных электрических полях, следует выделить два важных эффекта. Первый из них заключается в том, что при сильных полях ($E > 3 \times 10^3$ В/см) из-за больших потерь энергии свободных носителей заряда при их соударениях с атомами кристаллической решетки прекращается увеличение дрейфовой скорости носителей с ростом напряженности поля. Этот эффект называется насыщением дрейфовой скорости. Вторым эффектом – ударная ионизация – состоит в том, что ускоренные полем до весьма значительных скоростей носители заряда при соударениях с атомами кристаллической решетки ионизируют атомы, вы-

бывая из них электроны. В очень сильных полях ($E > 10^5$ В/см) этот процесс приобретает лавинный характер и происходит лавинный пробой перехода.

3. Типичная структура лавинно-пролетного диода содержит резко несимметричный p^+ - n -переход, располагающийся практически целиком в n -области. Максимальная напряженность поля достигается в очень узком слое на границе с p^+ -областью, называемом слоем умножения. В этом слое происходят ударная ионизация и лавинное умножение носителей заряда. Остальная часть n -области называется слоем дрейфа, в нем электроны движутся под действием поля с постоянной дрейфовой скоростью, равной скорости насыщения.

При наличии переменной составляющей напряжения на диоде ток лавины становится периодическим, он приобретает форму очень коротких импульсов, создаваемых сгустками электронов. В силу инерционности процесса образования лавины импульс тока лавины отстает по фазе на четверть периода от напряжения на диоде. Пространственно-временная диаграмма движения электронов в слое дрейфа наглядно показывает, что в нем электроны движутся в тормозящем поле и отдают свою кинетическую энергию. Следует иметь в виду, что при этом уменьшается лишь мгновенная скорость электронов между соударениями с атомами, а дрейфовая скорость, устанавливающаяся в результате этих соударений, не меняется и остается равной скорости насыщения. В этом случае уменьшается частота соударений и снижается рассеяние энергии в кристалле.

4. Передача электронами энергии переменному полю отражается на эквивалентной схеме ЛПД отрицательным высокочастотным сопротивлением, которое определяется как отношение комплексных амплитуд напряжения и наведенного тока. Если поместить ЛПД в объемный резонатор, то отрицательное высокочастотное сопротивление может скомпенсировать потери в резонаторе, и возникнет генерация СВЧ колебаний. В случае, когда отрицательное сопротивление ЛПД меньше сопротивления потерь резонатора, генерация не возникает, но может иметь место регенеративное усиление СВЧ колебаний.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается эффект насыщения дрейфовой скорости носителей заряда в полупроводниках?
2. В чем заключается эффект ударной ионизации? При каких условиях он возникает?
3. Рассмотрите структуру ЛПД и поясните физические процессы, протекающие в ее областях.
4. Рассмотрите устройства и принцип действия СВЧ генератора на ЛПД.

5. С помощью пространственно-временной диаграммы рассмотрите процесс энергообмена электронов с СВЧ полем в генераторе на ЛПД.

6. Поясните возможность использования ЛПД для усиления СВЧ колебаний.

7. Рассмотрите параметры и области применения генераторов и усилителей на ЛПД.

2.3. Диод Ганна

Физические основы эффекта Ганна. Особенности многодолинных полупроводников. Поле-скоростная и вольт-амперная характеристики. Отрицательная дифференциальная проводимость. Доменная неустойчивость тока в многодолинных полупроводниках.

Устройство, принцип действия и эквивалентная схема генератора на диоде Ганна. Режимы работы генератора на диоде Ганна (доменные режимы, режим ограниченного накопления объемного заряда, гибридный режим). Усилитель на диоде Ганна. Конструкции, параметры и области применения генераторов и усилителей на диодах Ганна.

Методические указания

1. Материал данного раздела изложен в [1, разд. 19].

2. Физические основы эффекта Ганна целесообразно рассмотреть на примере двухдолинного полупроводника, энергетическая диаграмма которого характеризуется наличием в зоне проводимости двух разрешенных подзон (долин), в которых могут находиться свободные электроны. Находящиеся в этих долинах электроны различаются своей эффективной массой и подвижностью. Электроны, находящиеся в нижней (центральной) долине, имеют меньшую эффективную массу и, соответственно, большую подвижность по сравнению с электронами, находящимися в верхней (боковой) долине. В слабом электрическом поле все свободные электроны находятся в нижней долине и дрейфовая скорость линейно растет с ростом напряженности поля. При достаточно сильном поле ($E > 3 \times 10^3$ В/см) электроны переходят в верхнюю долину, их подвижность уменьшается, в результате чего дрейфовая скорость падет. Наличие падающего участка поле-скоростной характеристики образца двухдолинного проводника определяет наличие падающего участка его вольт-амперной характеристики, характеризующегося отрицательной дифференциальной проводимостью. В сильном электрическом поле в образце вблизи его катодного конца возникает двойной электрический слой, называемый доменным сильным поля, который движется под действием поля от катода к аноду и рассасывается на аноде. В результате ток, протекающий через образец, приобретает характер импульсов, период следования которых равен времени пролета домена через образец. Это явление доменной неустойчивости тока, называемое эффектом Ганна, лежит в основе работы диода Ганна, который в отличие от других

полупроводниковых диодов не содержит *p-n*-переходы, а представляет собой однородный образец многодолинного полупроводника.

3. Использование диода Ганна для генерации СВЧ колебаний основано на компенсации его отрицательной дифференциальной проводимостью проводимости потерь резонатора, в которой помещается диод. Рассматривая режимы работы генератора на диоде Ганна, следует уяснить, что выбор режима определяется параметрами самого диода, параметрами резонатора и величиной питающего напряжения. Существуют доменные режимы работы (пролетный, с задержкой образования домена и с гашением домена), характеризующиеся наличием в диоде домена, режим ограниченного накопления объемного заряда (ОНОЗ), в котором домен не успевает сформироваться за период колебаний, а также гибридный режим. Указанные режимы различаются энергетическими показателями и частотными свойствами. В регенеративных усилителях на диоде Ганна используется бездоменный режим со стабильной отрицательной дифференциальной проводимостью.

Контрольные вопросы

1. Что такое многодолинный полупроводник? Рассмотрите особенности энергетической диаграммы и поле-скоростной характеристики двухдолинного проводника.

2. Рассмотрите вольт-амперную характеристику образца двухдолинного проводника. Поясните механизм возникновения его отрицательной дифференциальной проводимости.

3. Что такое домен сильного поля? При каких условиях он образуется?

4. В чем заключается эффект Ганна? В чем состоит особенность структуры диода Ганна по сравнению с другими полупроводниковыми диодами?

5. С помощью динамической вольт-амперной характеристики диода рассмотрите доменные режимы генератора на диоде Ганна.

6. Рассмотрите особенности режима ОНОЗ и гибридного режима.

7. Рассмотрите параметры и области применения СВЧ генераторов и усилителей на диодах Ганна.

3. КВАНТОВЫЕ ПРИБОРЫ СВЧ И ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНОВ

3.1. Физические основы квантовой электроники

Квантовые переходы и их классификация. Когерентность поля вынужденного излучения. Ширина спектральной линии излучения и причины ее уширения. Распределение квантовых частиц по энергиям в состоянии термодинамического равновесия и механизмы релаксации. Инверсия населенности энергетических уровней и возможности использования вынужденного излучения для усиления и генерации электромагнитного поля.

Методические указания

1. Материал данного раздела изложен в [1, разд. 20].

2. При изучении физических основ квантовой электроники следует обратить внимание на принципиальное отличие процессов взаимодействия между электромагнитным полем и частицами в электровакуумных и полупроводниковых приборах, с одной стороны, и квантовых приборах – с другой. В первом случае источники питания сообщают свободным электронам, движущимся в вакууме или твердом теле, определенный запас кинетической энергии, которая затем при торможении электронов СВЧ полем передается этому полю.

В квантовых приборах для усиления и генерации электромагнитного поля используется внутренняя энергия частиц (атомов и молекул), которая не связана непосредственно с поступательным движением этих частиц и которая высвобождается или поглощается в результате изменения энергии движения электронов внутри атомов, движения атомов внутри молекул, а также вращательного движения молекул. Существенно также то, что внутренняя энергия частиц может принимать только дискретные значения. Поэтому ее изменение, в отличие от изменения кинетической энергии, также может происходить только вполне определенными порциями – квантами.

3. Изменение внутренней энергии частиц может быть как связано, так и не связано с электромагнитным полем. В первом случае переходя с одного энергетического уровня на другой частица поглощает или излучает квант электромагнитной энергии, частота которого определяется согласно постулату Бора разностью уровней энергии. Такие переходы называют излучательными. К излучательным переходам относятся спонтанные и вынужденные переходы. Во втором случае внутренняя энергия частицы преобразуется в тепло, такие переходы называются безызлучательными.

Рассматривая свойства излучательных переходов, следует иметь в виду, что спонтанные переходы происходят самопроизвольно и только с верхнего уровня на нижний. Спонтанное излучение является хаотическим и поэтому не обладает когерентностью. Вынужденные переходы происходят под действием внешнего (вынуждающего) электромагнитного поля и носят резонансный характер, т. е. могут происходить только при условии равенства частоты внешнего поля и частоты перехода. Переход частицы с нижнего уровня на верхний сопровождается поглощением кванта энергии внешнего поля. При переходе частицы с верхнего уровня на нижний излучается квант энергии электромагнитного поля, имеющего с вынуждающим полем одинаковую частоту, фазу, поляризацию и направление излучения, т. е. излучаемое и вынуждающее поля оказываются когерентными. Важно подчеркнуть, что при этом квант энергии вынуждающего внешнего поля не поглощается, а оно продолжает свое движение, вызывая новые переходы.

Эти свойства вынужденного излучения лежат в основе усиления и генерации электромагнитного поля в квантовых приборах.

4. Рассматривая понятия равновесного и неравновесного состояния квантовой системы, следует понять, что в состоянии термодинамического равновесия населенность энергетических уровней подчиняется экспоненциальному распределению Больцмана, согласно которому населенность нижних уровней превосходит населенность верхних. Любое другое распределение, отличное от больцмановского, является неравновесным. Переход возбужденной системы в равновесное состояние (релаксация) происходит за счет спонтанных и безызлучательных переходов за конечное время (время жизни или время релаксации). Из-за конечного времени пребывания частицы в возбужденном состоянии в соответствии с соотношением неопределенностей Гейзенберга спектральная линия излучения имеет конечную ширину, которая тем уже, чем больше время жизни частицы в возбужденном состоянии.

5. Оценивая условия усиления и генерации электромагнитного поля в квантовых системах, необходимо усвоить, что для того, чтобы усиление или генерация были возможны, необходимо, чтобы количество вынужденных переходов с верхнего уровня на нижний (с выделением энергии) превосходило количество переходов с нижнего уровня на верхний (с поглощением энергии). Но это может быть лишь в том случае, если населенность верхнего уровня превышает населенность нижнего. Такое состояние называется состоянием с инверсией населенности уровней. Для его создания в квантовых приборах используются различные методы и различные источники энергии, роль которых, по существу, аналогична той роли, которую играют источники ускоряющего напряжения в электронных приборах.

Контрольные вопросы

1. Чем различаются принципы взаимодействия электромагнитного поля с частицами, используемые в электронных и квантовых приборах?
2. Какие переходы в системе микрочастиц называют спонтанными? Что такое время жизни частиц и как оно связано с вероятностью спонтанных переходов?
3. Какие переходы в системе микрочастиц называются вынужденными? Как связаны между собой вероятности вынужденных переходов с верхних энергетических уровней на нижние и с нижних на верхние?
4. Какое состояние системы микрочастиц называется состоянием термодинамического равновесия? Как связаны между собой населенности уровней системы микрочастиц, находящейся в состоянии термодинамического равновесия?
5. Какие процессы, происходящие в системе микрочастиц, называют релаксационными?

6. В чем заключаются отличительные особенности вынужденных переходов по сравнению со спонтанными и релаксационными? Каковы основные свойства вынужденного излучения?

7. Что такое инверсия населенностей уровней? Для чего необходимо ее создание?

8. Что такое ширина спектральной линии излучения и какими факторами она определяется?

3.2. Квантовые приборы СВЧ диапазона

Энергетические уровни парамагнитных веществ и их расщепление в магнитном поле. Создание инверсии населенностей в парамагнитных веществах. Устройство и принцип действия квантового парамагнитного усилителя. Разновидности квантовых парамагнитных усилителей, их параметры и области применения.

Использование спектральных линий атомов и молекул для создания квантовых стандартов частоты в СВЧ диапазоне. Создание инверсии населенностей методом пространственной сортировки (селекции). Устройство и принцип действия активных и пассивных квантовых стандартов частоты. Параметры и области применения квантовых стандартов частоты.

Методические указания

1. Материал данного раздела изложен в [1, разд. 21].

2. Изучая особенности энергетических уровней парамагнитных веществ, следует иметь в виду, что парамагнитными называют вещества, атомы и молекулы которых имеют нескомпенсированный (отличный от нуля) магнитный момент. В отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты атомов направлены хаотично, а внутренняя энергия атома не зависит от ориентации его магнитного момента. В этом случае на одном энергетическом уровне могут находиться атомы с различно направленными магнитными моментами. Такие уровни называются вырожденными. В магнитном поле магнитные моменты атомов ориентируются по полю или против поля, при этом внутренняя энергия атомов с разной ориентацией магнитных моментов оказывается различной. Таким образом, в магнитном поле вырождение энергетических уровней исчезает («снимается») и они расщепляются на несколько подуровней, между которыми могут происходить квантовые переходы. Это явление называется эффектом Зеемана. Важно подчеркнуть, что разность энергии между магнитными подуровнями и, соответственно, частота перехода между ними увеличивается с ростом напряженности магнитного поля.

3. Эффект расщепления энергетических уровней парамагнетиков в магнитном поле используется в квантовых парамагнитных усилителях (КПУ) СВЧ диапазона. Для создания инверсии населенностей уровней в кристалле парамагнетика используется метод накачки по трехуровневой

схеме. При этом методе под воздействием вспомогательного СВЧ излучения насыщается переход между первым и третьим уровнями, в результате чего инверсия населенностей достигается между третьим и вторым или между вторым и первым уровнями. Конструктивно КПУ подразделяются на резонаторные, в которых взаимодействие СВЧ поля с активным веществом происходит в объемном резонаторе, и КПУ с бегущей волной, в которых взаимодействие происходит в замедляющей системе. Последние имеют более широкую полосу пропускания по сравнению с резонаторными КПУ. Достоинством квантовых парамагнитных усилителей является исключительно низкий уровень собственных шумов и связанная с ним высокая чувствительность.

4. Рассматривая физические основы работы квантовых стандартов частоты СВЧ диапазона, следует изучить метод создания инверсии населенностей в двухуровневой системе, основанный на пространственной сортировке (селекции) частиц, находящихся на различных энергетических уровнях. Этот метод используется в активном квантовом стандарте частоты – водородном генераторе, в котором пучок атомов водорода, имеющих нескомпенсированный магнитный момент, пропускается через сортирующую систему с сильно неоднородным магнитным полем. При этом атомы с различными магнитными моментами сортируются в пространстве: атомы, находящиеся на верхнем энергетическом уровне, прижимаются к оси системы и поступают в объемный резонатор, а атомы, находящиеся на нижнем уровне, рассеиваются в стороны и не участвуют в работе генератора. Благодаря высокой стабильности частоты квантовые стандарты частоты находят применение в службе единого времени, радиоастрономии, радионавигации (особенно в космической радионавигации), геодезии и других областях науки и техники.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит особенность энергетических уровней парамагнитных веществ? Что с ними происходит в магнитном поле?
2. Каким образом создается инверсия населенностей в кристалле парамагнитного вещества?
3. Рассмотрите устройство и принцип действия резонаторного КПУ. Почему резонатор и рабочее вещество помещаются в криостат?
4. Рассмотрите устройство и принцип действия КПУ с бегущей волной и сравните его параметры с параметрами резонаторного КПУ.
5. Чем определяется исключительно низкий уровень собственных шумов КПУ?
6. В чем заключается метод пространственной сортировки частиц, используемый для создания инверсии населенностей в двухуровневой системе?
7. Рассмотрите устройство и принцип действия водородного генератора. Какова стабильность его частоты?

3.3. Лазеры (квантовые генераторы оптического диапазона)

Обобщенная схема и принцип действия лазера. Оптические резонаторы, их устройство и параметры. Условия самовозбуждения и мощность генерации лазера. Спектр лазерного излучения и проблема селекции мод колебаний.

Газовые лазеры. Устройство и принцип действия гелий-неонового лазера. Лазер на углекислом газе. Параметры и области применения газовых лазеров.

Твердотельные лазеры. Устройство и принцип действия лазера на рубине. Особенности создания инверсии населенностей в полупроводниках. Устройство и принцип действия полупроводникового инжекционного лазера. Инжекционные лазеры на основе гетеропереходов. Параметры и области применения полупроводниковых лазеров.

Методические указания

1. Материал данного раздела изложен в [1, разд. 22].

2. Рассматривая обобщенную схему лазера, необходимо выделить три основных элемента: активную среду (вещество, в котором с помощью накачки создана инверсия населенностей энергетических уровней), колебательную систему и систему накачки. В зависимости от агрегатного состояния рабочего вещества различают газовые, жидкостные и твердотельные лазеры. В качестве колебательной системы в лазерах используются оптические резонаторы, представляющие собой систему, состоящую из двух обращенных друг к другу зеркал, между которыми могут возникать электромагнитные колебания оптического диапазона. Отражаясь от зеркал, электромагнитное излучение может многократно проходить через помещенную в резонатор активную среду, способную за счет вынужденных квантовых переходов усиливать проходящее через нее излучение. Таким образом с помощью оптического резонатора обеспечивается положительная обратная связь. Следует заметить, что конструкции резонаторов и системы накачки существенно различаются в зависимости от вида рабочего вещества лазера.

3. Оценивая параметры оптических резонаторов и их влияние на характеристики лазерного излучения, следует иметь в виду, что, с одной стороны, соотношение между размерами оптического резонатора и длиной волны излучения таково, что между стенками резонатора укладывается большое число длин волн. Поэтому дифракционные потери оказываются малыми и удается использовать открытые резонаторы. В свою очередь, отсутствие боковых стенок и малые дифракционные потери позволяют получить очень большие добротности резонатора. С другой стороны, вследствие того, что между зеркалами резонатора укладывается большое число длин волн, соседние частоты резонатора расположены очень близко друг к другу. Это приводит к необходимости селекции колебаний близких частот.

Следует также обратить внимание на способ вывода электромагнитной энергии из резонатора, который обеспечивает не только связь лазера с «потребителем» энергии, но и высокую направленность его излучения.

4. Изучая основные типы лазеров, особое внимание следует уделить полупроводниковым инжекционным лазерам, в которых инверсия населенностей создается инжекцией носителей через $p-n$ -переход. Наиболее перспективными являются инжекционные лазеры на основе гетеропереходов (гетеролазеры), в которых используются полупроводниковые материалы с разной шириной запрещенной зоны. Благодаря малым габаритам, высокому КПД, удобству возбуждения гетеролазеры находят широкое применение в волоконно-оптических линиях связи, а также для записи и считывания цифровой информации в приводах CD, DVD проигрывателей и компьютеров.

Контрольные вопросы

1. Рассмотрите обобщенную схему лазера. Поясните назначение ее элементов.

2. Как устроен оптический резонатор, для чего он служит? Как влияют его параметры на свойства лазерного излучения?

3. Как формируется спектр лазерного излучения? Что такое мода колебаний?

4. Рассмотрите условия баланса амплитуд и фаз в лазере. Как определяется амплитуда стационарных колебаний в лазере?

5. Рассмотрите устройство и принцип действия газового лазера на смеси гелия и неона. Каким образом в нем создается инверсия населенностей?

6. Рассмотрите устройство и принцип действия твердотельного лазера на рубине. Каким образом в нем создается инверсия населенностей?

7. Рассмотрите устройство и принцип действия полупроводникового инжекционного лазера. Каким образом в нем создается инверсия населенностей?

8. Почему для создания инжекционного лазера могут быть использованы только вырожденные полупроводники?

9. Сравните параметра лазеров различных типов и укажите области их применения.

4. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ СВЧ И КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Сравнение параметров электровакуумных и полупроводниковых приборов, их конкуренция. Интегральная СВЧ электроника. Освоение миллиметрового и субмиллиметрового диапазона волн. Лазеры в телекоммуникациях и системах обработки информации.

Материал данного раздела изложен в [1 разд. 12, 16.6, 17.4, 22.5].

ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Усилитель на лампе бегущей волны.
2. Усилитель на полевом транзисторе.
3. Генератор на лавинно-пролетном диоде.
4. Генератор на диоде Ганна.
5. Полупроводниковый инжекционный лазер.

КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Контрольное задание состоит из четырех задач и имеет 30 вариантов, различающихся исходными данными к задачам. Номер выполняемого варианта задания определяется суммой всех цифр номера студенческого билета. В случае, когда сумма цифр не превышает 30, номер варианта равен этой сумме. В противном случае для определения номера варианта из указанной суммы следует вычесть 30.

Рекомендации к выполнению задания

Контрольное задание должно быть оформлено аккуратно в отдельной тонкой тетради. В начале задания приводятся номер студенческого билета и номер варианта задания. Выполнение каждой задачи следует начинать с новой страницы. В тексте необходимо оставлять поля для замечаний рецензента.

Каждая задача состоит из двух частей. В первой (теоретической) части необходимо привести упрощенную схему рассчитываемого прибора и кратко (в пределах 1–2 страниц) описать его принцип действия. Во второй (расчетной) части следует перечислить исходные величины и величины, которые требуется определить, и привести подробный расчет указанных величин.

Прежде чем приступить к решению каждой задачи, необходимо изучить приводимые ниже методические указания и указанную в них литературу. Следует иметь в виду, что методические указания предназначены для того, чтобы дать общий подход к решению задачи и пояснить вопросы, недостаточно подробно рассмотренные в учебной литературе. Поэтому приводимые в них расчетные соотношения не охватывают всех рассчитываемых величин. В этой связи необходимо самостоятельно составить алгоритм решения задачи, т. е. последовательность формул для расчета всех требуемых величин. При этом некоторые формулы следует взять из учебных пособий, а в отдельных случаях расчетные формулы могут быть получены путем несложных преобразований выражений, приведенных в методических указаниях и рекомендованной литературе.

Решение каждой задачи должно сопровождаться подробными комментариями. При оформлении расчета какой-либо величины необходимо вначале указать цель данного расчета, затем привести формулу для определения искомой величины с указанием литературного источника, из которо-

го взята формула. В случае необходимости следует привести преобразования известных выражений, с помощью которых получена формула. Далее следует подставить в формулу числовые значения соответствующих величин, привести результаты промежуточных вычислений и конечный результат с указанием единиц его измерения. В конце решения каждой задачи следует отдельным списком привести полученные в результате расчета значения величин, перечисленных в условии задачи.

Все результаты расчетов должны округляться до третьей значащей цифры. Результаты, имеющие величину большую 1000 и меньшую 0,001, следует представлять в форме с плавающей запятой, т. е. используя множитель 10^n , где n – показатель степени. Все расчетные величины следует выражать в единицах «СИ», используя в случае необходимости соответствующие десятичные приставки (милли, микро, кило, мега и т. п.). Для удобства ниже приведены необходимые для расчета физические константы.

Проверенное преподавателем контрольное задание представляется к защите, которая проводится в ходе сдачи теоретического зачета. Студент допускается к теоретическому зачету по курсу при наличии выполненных лабораторных работ и проверенного преподавателем и допущенного к защите контрольного задания.

ВНИМАНИЕ! Контрольные задания, выполненные с нарушением указанных рекомендаций, а также задания, в которых исходные данные не соответствуют рассчитанному номеру варианта или номер варианта рассчитан неверно, не рецензируются и подлежат переделке!

Физические константы, необходимые для расчета

$$e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ Кл} \quad \text{– заряд электрона;}$$

$$m = 9,109 \times 10^{-31} \text{ кг} \quad \text{– масса электрона;}$$

$$c = 2,998 \times 10^8 \text{ м/с} \quad \text{– скорость света;}$$

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Дж с} \quad \text{– постоянная Планка.}$$

ЗАДАЧА 1. РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЯ НА ДВУХРЕЗОНАТОРНОМ ПРОЛЕТНОМ КЛИСТРОНЕ

Исходные данные

Основные параметры клистрона – ускоряющее напряжение U_0 , ток луча I_0 , расстояние между входным и выходным резонаторами (длина пространства дрейфа) L , ширина зазоров d и проводимость G_{II} резонаторов, а также частота входного сигнала f приведены в табл. 1.

Требуется

1. Нарисовать устройство и описать принцип действия двухрезонаторного пролетного клистрона.

2. Для оптимального режима работы, соответствующего максимальной выходной мощности, определить основные параметры усилителя – оптимальную мощность входного сигнала $P_{вх\ опт}$, максимальное значение электронной мощности $P_{эл\ макс}$, выходной мощности $P_{вых\ макс}$, электронного КПД $\eta_{эл\ макс}$ и полного КПД $\eta_{макс}$, а также величины контурного КПД η_k и коэффициента усиления клистрона K_p .

Методические указания

1. Предварительно изучить устройство, принцип действия и основы кинематической теории двухрезонаторного пролетного клистрона [1, разд. 15.1–15.4].

2. Режим максимальной выходной мощности (мощности, выделяемой в нагрузку) в пролетном клистроне реализуется при выполнении двух условий – оптимальной группировки потока в зазоре выходного резонатора и максимального отбора энергии потока в выходном резонаторе. При заданной структуре прибора оптимальная группировка обеспечивается соответствующим выбором амплитуды модулирующего напряжения на входном резонаторе U_1 (мощности входного сигнала $P_{вх}$), а максимальный энергоотбор достигается подбором оптимальной нагрузки выходного резонатора.

Прежде чем приступить к расчету основных параметров усилителя, необходимо определить вспомогательные величины, такие как скорость невозмущенного потока на влете во входной резонатор V_0 , углы пролета электронов в зазорах входного и выходного резонаторов θ_d и в пространстве дрейфа θ_{12} , а также коэффициент взаимодействия потока с полем в зазорах M [1]. Оптимальное значение амплитуды напряжения $U_{1\ опт}$ определяется из условия оптимальной группировки (параметр группировки $X = 1,84$) [1]. Мощность входного сигнала $P_{вх}$ связана с амплитудой напряжения U_1 соотношением:

$$P_{вх} = \frac{1}{2} U_1^2 G_{II}. \quad (1)$$

Таблица 1

Номер варианта	U_0 , кВ	I_0 , А	L , см	d , мм	$G_{II} \cdot \frac{1}{\text{Ом}} \cdot 10^{-5}$	f , ГГц
1	5,0	1,0	3,0	3,0	5,0	4,0
2	5,0	1,5	1,5	1,0	18,0	8,0
3	9,0	2,0	3,0	3,0	7,0	5,0
4	10,0	2,5	3,5	2,0	10,0	7,0
5	7,0	3,0	3,0	2,0	14,5	6,0
6	8,0	2,5	1,5	1,5	9,5	10,0
7	2,0	3,0	1,0	1,0	25,0	6,5
8	4,5	1,5	1,5	1,5	9,0	8,0
9	1,5	2,0	1,5	2,0	15,5	3,0
10	8,0	1,5	3,5	2,0	8,0	6,0
11	4,5	2,0	1,5	1,5	15,0	8,0
12	6,5	2,5	1,0	1,0	10,0	8,5
13	4,0	3,0	1,5	1,5	15,0	7,5
14	3,0	2,5	1,5	1,5	20,0	6,0
15	9,5	1,5	3,0	2,0	6,5	7,5
16	5,5	2,0	2,0	2,5	6,5	5,5
17	4,5	1,5	2,0	2,0	7,0	6,0
18	2,0	2,0	1,5	1,5	14,5	3,5
19	8,0	3,5	2,5	2,0	9,0	6,5
20	5,5	2,0	1,5	1,5	7,0	9,0
21	2,5	2,5	1,5	1,5	13,0	4,0
22	6,0	1,0	2,0	1,5	6,5	6,0
23	4,5	2,0	2,0	2,0	9,0	5,5
24	10,0	1,5	2,5	1,5	6,0	9,0
25	7,0	3,0	2,5	2,5	14,5	6,0
26	4,5	1,5	1,5	1,0	11,5	10,0
27	5,5	1,5	2,0	2,0	9,5	4,5
28	8,5	2,0	2,0	2,0	8,0	5,0
29	7,5	2,0	1,5	1,0	9,0	8,5
30	4,0	3,5	2,0	1,5	25,0	6,5

При определении оптимальной нагрузки выходного резонатора следует иметь в виду следующее. Мощность $P_{эл}$, отдаваемая потоком полю в выходном резонаторе, пропорциональна амплитуде напряжения U_2 , создаваемого на его зазоре потоком

$$U_2 = I_2 R_{0e}, \quad (2)$$

где I_2 – амплитуда наведенного тока в выходном резонаторе, R_{0e} – эквивалентное сопротивление выходного резонатора. Амплитуда наведенного тока I_2 ограничена и в первом приближении не зависит от напряжения в выходном резонаторе. Она определяется амплитудой конвекционного тока, которая в режиме оптимальной группировки максимальна, и коэффициентом взаимодействия M [1]. При относительно малых величинах эквивалентного сопротивления R_{0e} с его ростом растет амплитуда напряжения U_2 , т. е. возрастает поле, тормозящее электронные сгустки, и увеличивается мощность $P_{эл}$, отдаваемая потоком полю. Однако, при достаточно большой величине R_{0e} амплитуда U_2 оказывается соизмеримой с величиной ускоряющего напряжения U_0 . В этом случае тормозящее поле становится столь сильным, что наиболее замедленные электроны сгустков не смогут его преодолеть и будут возвращаться полем из зазора обратно в пространство дрейфа. Естественно, при этом амплитуда наведенного тока I_2 начнет уменьшаться, и рост амплитуды напряжения U_2 и мощности $P_{эл}$ прекратится. При дальнейшем увеличении R_{0e} мощность $P_{эл}$ падает. Иными словами, имеется оптимальное значение $R_{0e\text{ опт}}$, при котором мощность $P_{эл}$ оказывается максимальной. Оптимальное значение $R_{0e\text{ опт}}$ может быть получено из (2) с учетом условия начала режима возврата электронов

$$MU_{2\text{ макс}} = U_0, \quad (3)$$

где $U_{2\text{ макс}}$ – амплитуда напряжения, при которой начинается возврат электронов. Реализуется оптимальное эквивалентное сопротивление $R_{0e\text{ опт}}$ соответствующим выбором проводимости нагрузки выходного резонатора G_n

$$\frac{1}{R_{0e\text{ опт}}} = G_n + G_{n\text{ опт}}, \quad (4)$$

где $G_{n\text{ опт}}$ – оптимальная проводимость нагрузки.

Мощность $P_{эл}$ связана с амплитудой напряжения U_2 и эквивалентным сопротивлением резонатора R_{0e} следующим соотношением

$$P_{эл} = \frac{1}{2} \frac{U_2^2}{R_{0e}}. \quad (5)$$

Следует иметь в виду, что не вся мощность, отдаваемая потоком полю в выходном резонаторе, отводится в нагрузку. Часть ее рассеивается на проводимости собственных потерь резонатора G_n . Этот эффект учитывает-

ся контурным КПД η_k , отражающим, какую часть мощности $P_{эл}$ составляет мощность $P_{вых}$, выделяемая в нагрузку,

$$\eta_k = \frac{G_n}{G_n + G_{n\text{ опт}}}. \quad (6)$$

Коэффициент усиления клистрона, выраженный в децибелах (дБ), определяется по формуле

$$K_p = 10 \times \lg \frac{P_{вых}}{P_{вх}}. \quad (7)$$

ЗАДАЧА 2. РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЯ НА ЛАМПЕ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Исходные данные

Основные параметры ЛБВ – ток луча I_0 , сопротивление связи замедляющей системы $R_{св}$, электрическая длина замедляющей системы N , фазовая скорость бегущей волны V_ϕ , затухание волны в поглотителе A , а также частота f и мощность входного сигнала $P_{вх}$ приведены в табл. 2.

Требуется

1. Нарисовать устройство ЛБВ, пояснить назначение ее элементов и привести краткое описание принципа действия ЛБВ, обратив особое внимание на факторы, определяющие широкую полосу пропускания ЛБВ.

2. Определить коэффициент замедления замедляющей системы $K_{зам}$ и ускоряющее напряжение U_0 , при котором обеспечивается условие синхронизма электронного потока с электромагнитной волной. Рассчитать распределение амплитуды напряженности поля электромагнитной волны E_{nz} вдоль оси замедляющей системы и построить график зависимости E_{nz} от продольной координаты z . Определить основные параметры усилителя – коэффициент усиления K_p , выходную мощность $P_{вых}$ и полный КПД усилителя η . Оценить максимальное значение электронного КПД $\eta_{эл\text{ макс}}$.

Методические указания

1. Предварительно изучить устройство, принцип действия и основы линейной теории ЛБВ [1, разд. 16].

2. Фазовая скорость электромагнитной волны V_ϕ связана со скоростью потока условием синхронизма

$$V_\phi = \frac{V_0}{1+C}, \quad (8)$$

где $C = 3 \sqrt{\frac{I_0}{4U_0} R_{св}}$ – параметр усиления [1], V_0 – скорость невозмущенного потока, определяемая величиной ускоряющего напряжения U_0 . При опре-

деления величины U_0 , учитывая $C \ll 1$, можно исходить из приближенного равенства V_Φ и V_0 .

Таблица 2

Номер варианта	I_0 , мА	$R_{св}$, Ом	N	$V_\Phi \cdot 10^6$, м/с	A , дБ	f , ГГц	$P_{вх}$, мкВт
1	1,0	120	35	20	12	4,0	40
2	0,7	140	30	17	7	9,0	20
3	1,5	70	30	16	20	3,0	40
4	0,9	230	25	19	11	5,0	50
5	2,0	90	30	22	8	4,0	60
6	1,4	70	40	21	15	5,5	60
7	1,3	190	30	26	6	7,0	30
8	1,2	150	25	19	10	6,0	75
9	0,8	200	30	23	6	4,5	50
10	1,0	120	30	18	9	3,0	30
11	1,1	100	35	22	9	5,0	35
12	0,8	120	30	18	6	9,5	25
13	1,6	60	35	18	10	4,0	30
14	1,0	210	30	21	11	6,0	45
15	2,1	80	35	24	10	5,0	55
16	1,5	70	40	23	12	6,5	60
17	1,1	170	30	20	11	8,0	35
18	1,0	130	35	21	11	7,0	40
19	1,9	180	30	25	5	5,5	55
20	1,1	100	30	19	7	4,0	35
21	0,9	140	35	18	17	3,5	45
22	0,6	160	30	15	11	8,0	25
23	1,4	60	30	14	11	3,0	45
24	0,8	150	25	17	8	4,5	55
25	1,9	110	30	20	12	4,0	65
26	1,3	90	30	19	10	5,0	65
27	1,2	210	30	24	9	6,5	35
28	1,1	100	25	17	7	5,5	65
29	0,7	220	30	21	8	4,0	55
30	0,9	140	30	16	13	3,5	35

Амплитуда напряженности поля электромагнитной волны E_{mz} связана с продольной координатой z и амплитудой поля на входе замедляющей системы $E_{m \text{ вх}}$ следующим соотношением:

$$E_{mz} = \frac{1}{3} E_{m \text{ вх}} e^{\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\omega}{V_0} Cz}, \quad (9)$$

где

$$E_{m \text{ вх}} = \sqrt{2 \left(\frac{\omega}{V_0} \right)^2 P_{\text{вх}} R_{\text{св}}}, \quad (10)$$

ω – круговая частота. Координата z изменяется в пределах $0 < z < L_{\text{зс}}$, где $L_{\text{зс}}$ – длина замедляющей системы, определяемая выражением

$$L_{\text{зс}} = \lambda_{\text{зам}} N. \quad (11)$$

где $\lambda_{\text{зам}}$ – длина замедленной электромагнитной волны, равная

$$\lambda_{\text{зам}} = \frac{V_\Phi}{f}. \quad (12)$$

Коэффициент усиления ЛБВ по мощности, выраженный в децибелах (дБ), определяется по формуле

$$K_P = 10 \lg \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = -9,54 + 47,3CN - A. \quad (13)$$

Оценку максимального электронного КПД $\eta_{\text{эл макс}}$ рекомендуется проводить на основе качественных соображений. Как известно [1], средняя скорость электронов V_e не остается постоянной вдоль замедляющей системы, а постепенно уменьшается в процессе торможения электронных сгустков полем бегущей волны. Вместе с тем средняя скорость электронов не может уменьшиться очень сильно, так как если она станет меньше фазовой скорости волны, то электронные сгустки перейдут из тормозящей фазы поля в ускоряющую и, следовательно, будут отбирать энергию у бегущей волны. На основании вышесказанного можно принять, что при оптимальном взаимодействии средняя скорость электронов на выходе из замедляющей системы $V_{e \text{ вых}}$ будет примерно равна фазовой скорости волны ($V_{e \text{ вых}} = V_\Phi$). Поскольку электронный поток отдает полю энергию, равную разности его кинетической энергии на входе и выходе замедляющей системы

$$\Delta W_e = \frac{mV_0^2}{2} - \frac{mV_{\text{вых}}^2}{2}, \quad (14)$$

максимальный электронный КПД может быть вычислен по формуле

$$\eta_{\text{эл макс}} = \frac{\frac{mV_0^2}{2} - \frac{mV_{\Phi}^2}{2}}{\frac{mV_0^2}{2}} = 1 - \frac{V_{\Phi}^2}{V_0^2}. \quad (15)$$

Разумеется, при расчете $\eta_{\text{эл макс}}$ необходимо использовать (8), связывающее начальную скорость электронов V_0 и фазовую скорость бегущей волны V_{Φ} .

ЗАДАЧА 3. РАСЧЕТ ГЕНЕРАТОРА НА ЛАВИННО-ПРОЛЕТНОМ ДИОДЕ

Исходные данные

Основные параметры диода – емкость слоя дрейфа $C_{\text{д}}$, длина слоя дрейфа $L_{\text{д}}$, скорость электронов в слое дрейфа (скорость насыщения) $V_{\text{н}}$, лавинная частота $f_{\text{л}}$, а также постоянные напряжение на диоде U_0 и ток I_0 , протекающий через диод, сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$, сопротивление потерь в резонаторе и диоде $R_{\text{п}}$ и частота генерируемого колебания f приведены в табл. 3.

Требуется

1. Нарисовать структуру и эквивалентную схему ЛПД и описать физические процессы, протекающие в диоде, особое внимание уделив механизму возникновения отрицательного высокочастотного сопротивления диода. Нарисовать конструкцию генератора на ЛПД и пояснить назначение ее элементов.

2. Определить основные параметры генератора – электронную мощность $P_{\text{эл}}$, выходную мощность $P_{\text{вых}}$, электронный КПД $\eta_{\text{эл}}$ и полный КПД η .

Методические указания

1. Предварительно изучить физические процессы, протекающие в структурах ЛПД, конструкцию, принцип действия и основные параметры генераторы на ЛПД, а также основы его нелинейной теории [1, разд. 18; 2, разд. 2.1 – 2.5].

2. Эквивалентная схема генератора на ЛПД представлена на рис. 1.

Для определения параметров генератора необходимо воспользоваться условием баланса амплитуд:

$$R_{\text{с}} + R_{\text{н}} + R_{\text{п}} = 0. \quad (16)$$

Таблица 3

Номер варианта	$C_{\text{д}}$, пФ	$L_{\text{д}}$, мкм	$V_{\text{н}}$, см/с·10 ⁶	$f_{\text{л}}$, ГГц	U_0 , В	I_0 , мА	$R_{\text{н}}$, Ом	$R_{\text{п}}$, Ом	f , ГГц
1	0,50	2,0	5,0	7,0	50	60	5,0	5,0	9,0
2	0,50	2,0	5,0	7,9	45	120	6,0	4,0	10,0
3	0,50	2,0	5,0	8,7	60	100	5,0	3,0	11,0
4	0,50	2,0	5,0	7,0	50	90	6,0	6,0	9,0
5	0,50	2,0	5,0	8,0	45	70	8,0	4,0	10,0
6	0,50	2,0	5,0	9,0	45	110	7,0	4,0	11,0
7	0,50	2,0	5,0	4,8	50	80	4,0	2,5	9,0
8	0,50	2,0	5,0	5,3	45	100	3,5	2,0	10,0
9	0,50	2,0	5,0	5,8	40	120	4,0	1,5	11,0
10	0,50	2,0	5,0	6,3	45	90	5,0	3,0	10,0
11	0,40	2,2	5,5	7,0	50	60	5,0	5,0	9,0
12	0,40	2,2	5,5	7,9	45	120	7,0	4,5	10,0
13	0,40	2,2	5,5	8,7	60	100	5,0	3,0	11,0
14	0,40	2,2	5,5	7,0	50	90	6,0	6,0	9,0
15	0,40	2,2	5,5	8,0	45	70	8,0	4,0	10,0
16	0,40	2,2	5,5	9,0	45	110	7,0	5,0	11,0
17	0,40	2,2	5,5	4,8	50	80	5,0	2,5	9,0
18	0,40	2,2	5,5	5,3	45	100	4,5	3,0	10,0
19	0,40	2,2	5,5	5,8	40	120	4,0	2,5	11,0
20	0,40	2,2	5,5	6,3	45	90	5,0	3,0	10,0
21	0,45	2,4	6,0	7,0	50	60	5,0	5,0	9,0
22	0,45	2,4	6,0	7,9	45	120	7,0	4,5	10,0
23	0,45	2,4	6,0	8,7	60	100	5,0	3,0	11,0
24	0,45	2,4	6,0	7,0	50	90	6,0	6,0	9,0
25	0,45	2,4	6,0	8,0	45	70	8,0	4,0	10,0
26	0,45	2,4	6,0	9,0	45	110	7,0	5,0	11,0
27	0,45	2,4	6,0	4,8	50	80	5,0	2,5	9,0
28	0,45	2,4	6,0	5,3	45	100	4,5	3,0	10,0
29	0,45	2,4	6,0	5,8	40	120	4,0	2,5	11,0
30	0,45	2,4	6,0	6,3	45	90	5,0	3,0	10,0

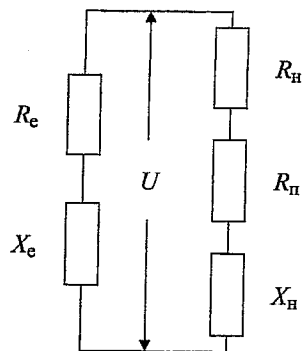


Рис. 1. Эквивалентная схема генератора на ЛПД: R_e и X_e – активная и реактивная составляющие эквивалентного высокочастотного сопротивления ЛПД, R_H и X_H – активная и реактивная составляющие сопротивления нагрузки, R_H – сопротивление, отражающее потери в резонаторе и диоде

В [2] на основании анализа работы ЛПД для генераторов в режиме больших амплитуд получено выражение для отрицательного высокочастотного сопротивления диода R_e ,

$$R_e = -\frac{\gamma\beta\Phi(B)}{1-\beta\Phi(B)} \quad (17)$$

где $\gamma = \frac{1 - \cos\theta_d}{\omega C_d \theta_d}$, $\beta = \frac{\omega_d^2}{\omega^2}$, θ_d – угол пролета электронов в слое дрейфа,

C_d – емкость слоя дрейфа, ω – частота генерируемого колебания, ω_d – лавинная частота, B – нормированная амплитуда напряжения на слое умножения, $\Phi(B)$ – функция, значения которой приведены в табл. 4.

Таблица 4

B	0	1	2	3	4	5	6
$\Phi(B)$	1,00	0,88	0,70	0,54	0,43	0,36	0,30

Используя (16) и (17), необходимо определить значение $\Phi(B)$ и графически, предварительно построив график функции $\Phi(B)$, найти величину B , соответствующую условию баланса амплитуд (16).

Амплитуду первой гармоники ток I_1 , протекающего в эквивалентной схеме генератора (рис. 1), можно определить по формуле

$$I_1 = \frac{I_0 B}{\beta} [1 - \beta\Phi(B)], \quad (18)$$

где I_0 – постоянный ток через диод.

Мощность, отдаваемая электронами полю в резонаторе, определяется выражением:

$$P_e = -\frac{1}{2} I_1^2 R_e. \quad (19)$$

Для расчета выходной мощности $P_{\text{вых}}$ следует определить контурный КПД генератора η_k , который для схемы, приведенной на рис. 1, определяется по формуле

$$\eta_k = \frac{R_H}{R_H + R_H}. \quad (20)$$

ЗАДАЧА 4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА

Исходные данные

Полупроводниковый лазер на двойной гетероструктуре (ДГС) имеет следующие параметры: ширину запрещенной зоны узкозонного полупроводника $E_{a2} = 1,4 \text{ эВ} = 2,24 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, внутреннюю квантовую эффективность $\eta_{\text{вн}} = 0,8$. Остальные параметры лазера приведены в табл. 5. Коэффициенты отражения зеркал Γ_1 и Γ_2 принять одинаковыми (равными Γ) и пренебречь дифракционными потерями.

Требуется

1. Нарисовать структуру ДГС-лазера и рассмотреть процессы в узкозонной части кристалла, приводящие к формированию лазерного излучения.
2. Рассчитать силу порогового тока $I_{\text{пор}}$.
3. Рассчитать мощность генерации $P_{\text{ген}}$ и КПД η при силе тока равной $I = 5 \times I_{\text{пор}}$ ($I_{\text{пор}}$ – сила порогового тока) и напряжении $U = 1,6 \text{ В}$.
4. Оценить частоту ν и длину волны излучения лазера λ .

Методические указания

1. Изучить литературу [1, разд. 22.1, 22.4.]
2. Ознакомиться с принципом действия лазеров и обратить внимание на конструктивные особенности полупроводниковых ДГС-лазеров, а так же на процессы в узкозонной части кристалла лазера.

Принцип действия полупроводниковых лазеров аналогичен принципу действия лазеров других типов (усиление электромагнитной волны активной средой вследствие вынужденных переходов и процесс возникновения автоколебаний в оптическом резонаторе лазера при выполнении условий генерации). Особенности работы полупроводниковых лазеров объясняются следующими факторами:

- 1) роль вынужденных переходов в полупроводниковых лазерах играют процессы рекомбинации электронно-дырочных пар под действием квантов света и излучение квантов света, когерентных с вынуждающим электромагнитным полем. При этом происходит как усиление электромаг-

нитного поля, так и процесс генерации электронно-дырочных пар под действием квантов света с поглощением их энергии;

Таблица 5

Номер варианта	β , см ² /А	J_0 , кА/см ²	$\alpha_{ав}$, см ⁻¹	L , мм	d , мкм	Γ
1	5×10^{-7}	1,2	15	0,5	0,1	0,4
2	5×10^{-7}	1,0	14	0,4	0,1	0,4
3	5×10^{-7}	1,2	14	0,45	0,1	0,4
4	5×10^{-7}	1,2	15	0,6	0,1	0,4
5	5×10^{-7}	1,2	15	0,6	0,15	0,4
6	4×10^{-7}	0,9	13	0,6	0,12	0,4
7	4×10^{-7}	0,9	12	0,5	0,12	0,4
8	4×10^{-7}	0,9	13	0,5	0,12	0,4
9	4×10^{-7}	0,9	12	0,4	0,12	0,4
10	4×10^{-7}	0,8	10	0,5	0,12	0,4
11	$4,5 \times 10^{-7}$	1,3	11	0,4	0,1	0,35
12	$4,5 \times 10^{-7}$	1,3	12	0,4	0,11	0,35
13	$4,5 \times 10^{-7}$	1,3	13	0,45	0,12	0,35
14	$4,5 \times 10^{-7}$	1,2	14	0,5	0,12	0,35
15	$4,5 \times 10^{-7}$	1,1	15	0,55	0,1	0,35
16	5×10^{-7}	1,0	14	0,5	0,15	0,38
17	5×10^{-7}	1,1	13	0,5	0,15	0,38
18	5×10^{-7}	1,1	13,5	0,5	0,15	0,38
19	5×10^{-7}	0,9	13,5	0,45	0,15	0,38
20	5×10^{-7}	0,9	14	0,45	0,15	0,38
21	$4,7 \times 10^{-7}$	0,95	10	0,35	0,12	0,35
22	$4,7 \times 10^{-7}$	0,95	11	0,35	0,12	0,35
23	$4,7 \times 10^{-7}$	0,96	8	0,35	0,12	0,35
24	$4,7 \times 10^{-7}$	0,96	9	0,35	0,12	0,37
25	$4,7 \times 10^{-7}$	0,96	12	0,35	0,13	0,35
26	$5,5 \times 10^{-7}$	0,9	10	0,25	0,1	0,4
27	$5,5 \times 10^{-7}$	0,85	15	0,3	0,1	0,5
28	$5,5 \times 10^{-7}$	0,9	13	0,25	0,12	0,45
29	$5,5 \times 10^{-7}$	0,85	12	0,3	0,11	0,4
30	$5,5 \times 10^{-7}$	0,9	10	0,3	0,11	0,4

2) для усиления электромагнитного поля необходимо, чтобы процесс вынужденной рекомбинации электронно-дырочных пар происходил бы более эффективно, чем процессы их вынужденной генерации с ослаблением поля;

3) эффективность процесса вынужденной рекомбинации электронно-дырочных пар достигается при введении в рабочую часть лазера свободных электронов и дырок за счет протекания электрического тока (инжекционные лазеры).

Структура кристалла, в котором реализуется этот принцип, приведена на рис. 2.

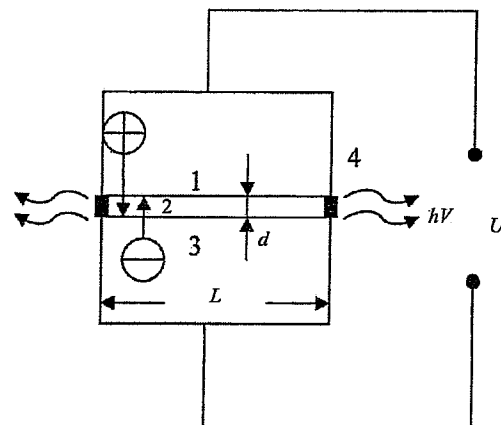


Рис. 2. Схема лазера на ДГС: 1 – дырочный широкозонный полупроводник; 2 – электронный узкозонный полупроводник; 3 – электронный широкозонный полупроводник; 4 – зеркала оптического резонатора; d , L , b – линейные размеры активной зоны лазера (значения d , L различаются по вариантам и приведены в табл. 5; значение толщины активной зоны лазера b принять равным 10 мкм)

На границах активной зоны образуются два гетероперехода, один из которых при прямом напряжении пропускает только электроны и не пропускает дырки, а второй, наоборот, пропускает дырки и задерживает электроны. Таким образом, при протекании прямого тока в активной зоне повышаются концентрации электронов и дырок, что при достаточной силе тока может обеспечить условия генерации. Значение силы тока $I_{пор}$, при которой обеспечиваются условия генерации, но излучение через зеркала отсутствует, называется пусковым или пороговым током.

Плотность порогового тока $J_{пор}$ определяется двумя основными факторами. Во-первых, плотность порогового тока должна обеспечить равенство скоростей, вынужденных генерации и рекомбинации (режим насыщения). Соответствующие этому условию значения плотности тока J_0 приведены в табл. 5.

Во-вторых, плотность порогового тока должна быть больше чем J_0 на величину, обеспечивающую покрытие потерь в кристалле при прохождении электромагнитной волны через узкозонную область лазера и потерь в зеркалах.

Расчет пороговой плотности тока определяется соотношением

$$J_{\text{пор}} = J_0 + \frac{d}{\beta \eta_{\text{вн}}} \left[\alpha_a - \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{\Gamma_1 \Gamma_2} \right], \quad (21)$$

где β – константа, определяющая параметр усиления активной среды; $\eta_{\text{вн}}$ – квантовая эффективность активной среды, зависящая от скоростей излучательной и безызлучательной рекомбинаций; α_a – коэффициент потерь в материале активной среды.

Сила порогового тока $I_{\text{пор}} = J_{\text{пор}} \times S$, где $S = Lb$ – площадь поверхности кристалла, через которую протекает ток I .

Мощность генерации определяется превышением силы тока лазера над пороговой и является частью мощности излучения в активной зоне, проходящей через зеркала,

$$P_{\text{ген}} = \frac{I - I_{\text{пор}}}{e} \eta_{\text{вн}} h\nu \frac{-\ln(\Gamma_1 \Gamma_2)}{2\alpha_2 L - \ln(\Gamma_1 \Gamma_2)}, \quad (22)$$

где h – постоянная Планка; ν – частота генерации; e – заряд электрона.

КПД и частота генерации лазера могут быть оценены исходя из условия, что энергия кванта света при рекомбинации электрона и дырки приблизительно равна энергии ширины запрещенной зоны узкозонного полупроводника E_{a2} . В этом случае КПД можно оценить как отношение энергии кванта света к энергии, которая затрачивается на введение одного электро-

на в активную зону $\frac{eU}{\eta_{\text{вн}}}$:

$$\eta = \eta_{\text{вн}} \frac{E_{a2}}{eU}. \quad (23)$$

Частота генерации оценивается по энергии кванта света $h\nu = E_{a2}$

$$\nu = \frac{E_{a2}}{h}. \quad (24)$$

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Бобровский, Ю.Л. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника: учеб. пособ. / Ю.Л. Бобровский, С.А. Корнилов, И.А. Кратиров и др.; под ред. Н.Д. Федорова. – М.: Радио и связь, 2002.

2. Корнилов, С.А. Полупроводниковые приборы на горячих электродах и их применение в технике связи: учеб. пособ. / С.А. Корнилов, К.Д. Овчинников, В.Е. Широков, А.П. Штагер; ЛЭИС. – Л., 1988.

Дополнительная

3. Бобровский, Ю.Л. Современные ЭВП СВЧ с длительным взаимодействием, тенденции развития и применение в технике связи: учеб. пособ. / Ю.Л. Бобровский; ЛЭИС. – Л., 1986.

4. Кукарин, С.В. Электронные СВЧ приборы. Характеристики, применение, тенденции развития / С.В. Кукарин. – М.: Радио и связь, 1981.

5. Рябов, С.Г. Приборы квантовой электроники. Характеристики, применение, тенденции развития / С.Г. Рябов, Г.Н. Торопкин, Н.Ф. Усольцев. – М.: Сов. радио, 1976.

6. Карлов, Н.В. Лекции по квантовой электронике / Н.В. Карлов. – М.: Наука, 1988.

7. Хансен, Г. Лазерная светодинамика / Г. Хансен. – М.: Наука, 1988.

8. Квантовая электроника. Маленькая энциклопедия / Под ред. М.Е. Жаботинского. – М.: Сов. энциклопедия, 1969.

СОДЕРЖАНИЕ

Программа дисциплины	3
Содержание дисциплины	4
1. Электровакуумные приборы СВЧ	5
1.2. ЭВП СВЧ с электростатическим управлением	7
1.3. Клистроны	8
1.3.1. Двухрезонаторный пролетный клистрон	8
1.3.2. Многорезонаторный пролетный клистрон	10
1.3.3. Отражательный клистрон	11
1.4. ЭВП с длительным взаимодействием	12
2. Полупроводниковые приборы СВЧ	15
2.1. СВЧ диоды и транзисторы	15
2.2. Лавинно-пролетный диод	16
2.3. Диод Ганна	18
3. Квантовые приборы СВЧ и оптического диапазонов	19
3.1. Физические основы квантовой электроники	19
3.2. Квантовые приборы СВЧ диапазона	22
3.3. Лазеры (квантовые генераторы оптического диапазона)	24
4. Состояние и перспективы развития электроники СВЧ и квантовой электроники	25
Контрольное задание	26
Задача 1. Расчет усилителя на двухрезонаторном пролетном клистроне	28
Задача 2. Расчет усилителя на лампе бегущей волны	31
Задача 3. Расчет генератора на лавинно-пролетном диоде	34
Задача 4. Расчет параметров полупроводникового лазера	37
Литература	41

**Евгений Иванович Бочаров
Игорь Александрович Кравцов
Игорь Алексеевич Кратиров**

**ПРИБОРЫ СВЧ И ОПТИЧЕСКОГО
ДИАПАЗОНОВ**

Программа, контрольное задание
и методические указания
210404, 210405

Ответственный редактор *Е.И. Бочаров*

Редактор *Е. Ю. Пономарева*
Компьютерная верстка *М. Ю. Кусовой*

План изданий 2010 г., п. 42

Подписано к печати 28.12.2010
Объем 2,75 усл.-печ. л. Тираж 100 экз. Зак. 116

Издательство «Теледом» ГОУВПО СПбГУТ. СПб., наб. р. Мойки, 61
Отпечатано в ГОУВПО СПбГУТ