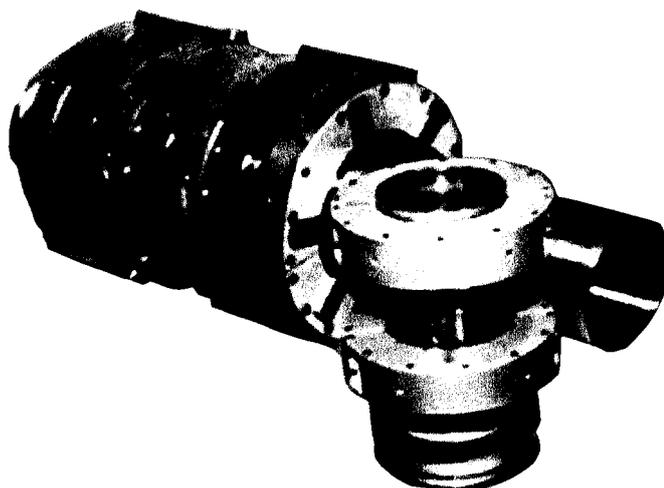




Радиотехнический факультет УлГТУ

Электронные приборы СВЧ и квантовые приборы



Методические указания

УЛЬЯНОВСК



2010

СОДЕРЖАНИЕ

ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	3
ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1	6
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2	23
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3	36
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4	49
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	67

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Ульяновский государственный технический университет»

Электронные приборы СВЧ и квантовые приборы

Методические указания
к лабораторным работам по курсу «Электроника»
раздел «Электронные приборы СВЧ и квантовые приборы»
для студентов дневной формы обучения специальности 21030265
«Радиотехника»

Учебное издание

Электронные приборы СВЧ и квантовые приборы
Методические указания

Составитель **ТАМАРОВ Павел Григорьевич**

Редактор Н.А. Евдокимова
Подписано в печать 30.03.2010. Формат 60x84/16.
Усл. печ. л, 3,95. Тираж 50 экз. Заказ 381
Ульяновский государственный технический университет,
432027, г.Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32.
Типография УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32.

Составитель П. Г. Тамаров

Ульяновск
2010

УДК 621.3(076)

ББК 32.85я7

Э45

Рецензент директор УО ИРЭ РАН, доктор техн. наук, доцент
В. А. Сергеев

Одобрено секцией методических пособий научно-методического совета
университета

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электронные и квантовые приборы СВЧ/Л. М. Андрушко, В. И. Бурнистенко. - М. : Связь, 1972.
2. Устройства генерирования и формирования радиосигналов/Л. А. Белов, В. М. Богачев, М. В. Благовещенский и др. - М.: Радио и связь, 1994,
3. Электронные и квантовые приборы СВЧ/В. Н. Васильев. - М. : Связь, 1972.
4. Электронные и квантовые приборы СВЧ/Н. В. Дулин, -М. : Энергия, 1972.
5. Техника и приборы СВЧ. Т. II/И. В. Лебедев. - М. : Высшая школа, 1972,

Электронные приборы СВЧ и квантовые приборы : методические
Э45 указания к лабораторным работам/сост. П. Г. Тамаров.- Ульяновск:
УлГТУ, 2010.- 68 с,

Составлены в соответствии с программой курса «Электронные приборы
СВЧ и квантовые приборы».

Вначале приводятся общие правила выполнения лабораторных работ, требования по технике безопасности, порядок оформления отчета. В описании каждой работа указывается цель работы, даются необходимые пояснения по схеме, формулируются задания на расчет и выполнение экспериментальных исследований,

В конце описаний приведены контрольные вопросы для самостоятельной проверки знаний студентами,

Предназначены для студентов дневной формы обучения специальности 21030265 «Радиотехника» при изучении курса «Электроника», раздел «Электронные приборы СВЧ и квантовые приборы»,

Работа подготовлена на кафедре «Радиотехника»,

УДК 621.3(076)

ББК32.85я7

© Тамаров П. Г., составление, 2010

© Оформление. УлГТУ, 2010

положение плунжера фиксировано. Измерение частоты колебаний производится как в п. 4,

6. По результатам измерений п. 5. определить диапазон электронной перестройки частоты и построить график.

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

8. Оформить отчет по работе в соответствии с общими требованиями.

ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.1. При подготовке к работе ознакомиться с описанием работы и установки (стенда), составить необходимые функциональные и принципиальные схемы, продумать назначение отдельных элементов стенда и порядок включения, выполнить предусмотренные описанием предварительные расчеты, ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения работы.

1.2. Перед выполнением работы каждый студент обязан представить преподавателю заготовленную форму отчета, содержащего необходимые расчеты, функциональные и принципиальные схемы, выполненные в соответствии с ЕСКД и исследуемые в данной работе.

1.3. Выполнение лабораторной работы рассчитано на 4 часа аудиторного времени и проводится в часы, предусмотренные расписанием.

1.4. Выполнению работы предшествует проверка готовности студента к работе. Проверка производится преподавателем в начале каждого занятия в следующем порядке:

- студент предъявляет все материалы согласно п. **1.2**;
- если предъявленный материал найден удовлетворительным, то студент получает контрольные вопросы по теме предстоящей работы;
- при удовлетворительных ответах на контрольные вопросы студент допускается к выполнению работы.

Если материалы, представленные студентом, или его ответы на вопросы признаны преподавателем неудовлетворительными, студент к работе не допускается.

1.5. Студенты, допущенные к работе, выполняют ее в соответствии с описанием. Работа считается законченной после утверждения полученных результатов преподавателем,

1.6. По окончании работы студент должен выключить все источники питания и приборы, отключить приборы и источники питания от сети, разобрать исследуемые схемы на стенде и привести рабочее место в порядок.

1.7. Отчет о работе составляется на стандартных листах писчей бумаги (формат А4) с оставлением полей 20 мм для подшивки и 40 мм для пометок. Используются обе стороны листа.

1.8. Титульный лист отчета оформляется по установленному образцу.

1.9. Графики вычерчиваются непосредственно на листах отчета или на миллиметровой бумаге (формат А4), листы которой включаются в отчет. Каждый график должен содержать порядковый номер и пояснительную

надпись (сокращения в надписях, кроме общепринятых, не допускаются).

1.10. Отчет должен содержать выводы о проделанной работе.

1.11. Студент получает зачет по работе после представления оформленного отчета.

1.12. Студент, не сдавший отчета о проделанной работе, к последующей работе не допускается.

1.13. На основании зачетов по всем выполненным работам преподаватель ставит зачет по всему курсу лабораторных работ.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ, РАБОТАЮЩИХ В РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРИЯХ

Несчастные случаи во время проведения лабораторных работ происходят чаще всего из-за несоблюдения правил техники безопасности. Поэтому студенты допускаются к лабораторным занятиям только после инструктажа по этим правилам, о чем должны свидетельствовать их личные подписи в специальном журнале. Необходимо иметь в виду, что неаккуратность, невнимательность, незнание аппаратуры, спешка и недостаточная подготовленность к работе могут повлечь за собой несчастный случай. Лица, не выполняющие правила техники безопасности или допустившие их нарушение, отстраняются от выполнения работ и привлекаются к ответственности. От студентов, работающих в лаборатории, требуется не нарушать самим и останавливать всех лиц, не выполняющих правила техники безопасности,

Следует помнить, что опасно все оборудование, находящееся под напряжением, причем напряжение выше 65 В является основным источником всех несчастных случаев со смертельным исходом. Если с кем-либо произошел несчастный случай, замечены неисправности или нарушения правил техники безопасности, то необходимо немедленно оказать помощь пострадавшему и сообщить об этом преподавателю или лаборанту,

СТРОГО ВОСПРЕЩАЕТСЯ:

2.1. Касаться руками проводников и неизолированных частей аппаратуры, находящихся под напряжением,

2.2. Включать под напряжение схему без предварительной проверки и разрешения преподавателя.

2.3. Производить переключения в схемах, находящихся под напряжением, и в отключенных схемах без предварительной разрядки конденсаторов.

плунжер полностью введен в резонатор, второе - полностью выведен). Перемещение плунжера происходит при вращении круглой гайки, расположенной с правого конца резонатора.

Увеличивая напряжение на диоде от 0 до 10 В с помощью ручек «Регулировка V», для каждого фиксированного значения напряжения производить отсчет по шкале миллиамперметра величины протекающего через диод тока. Полученные данные заносить в табл. 1.

Таблица 1

Плунжер	U,В	0,4	1,0	2,0	3,0	3,4	4,0	5,0	6,0
Введен									
Выведен									

Окончание таблицы 1

Плунжер	U,В	7,0	7,4	8,0	8,4	8,8	9,2	9,6	10,0
Введен									
Выведен									

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

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

4. Измерить частоту генерируемых колебаний для двух крайних положений плунжера (см. п. 3) при фиксированном напряжении на диоде $U=8,8$ В.

Измерение частоты колебаний производится с помощью волномера 35ИМ, который подключается с помощью кабеля к макету. При наличии генерации стрелка индикатора волномера отклонится на некоторый угол. Ручкой «Затухание», расположенной на передней панели, установить стрелку на середину шкалы, Затем вращением ручки микрометрического винта, расположенного с правой стороны, добиться резонанса, Настройка в резонанс регистрируется по резкому спаду показаний стрелки индикатора. Записать показания отсчетного устройства (в мм), соответствующие первому резонансу, Продолжая вращать ручку микровинта, добиться второго резонанса, а показания отсчетного устройства записать. Разность полученных значений равна половине длины волны генерируемых колебания (в мм). Вычислить частоту и определить по результатам выполнения пункта диапазон механической перестройки по частоте,

5. Измерить частоту колебаний при изменении напряжения на диоде от 8 В до 10 В через каждые 0,4 В. при выполнении настоящего пункта

Макет выполнен в виде металлического ящика, в котором размещен регулируемый источник постоянного напряжения и резонатор с диодом Ганна, расположенный на лицевой панели. Принципиальная схема макета показана на рис. 10.

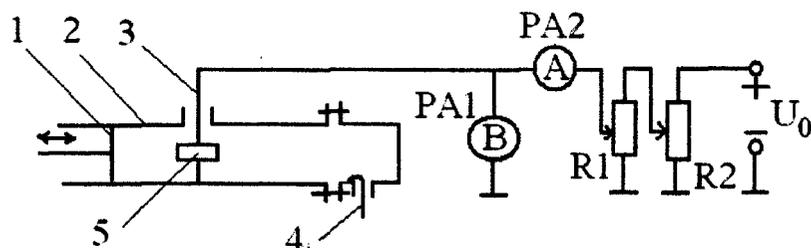


Рис. 10. Принципиальная схема макета:
 1 – подвижный поршень, 2 – резонатор, 3 – разъем,
 4 – петля связи, 5 – диод

Диод 5 помещен между широкими стенками резонатора 2. Напряжение смещения подводится к диоду с помощью разъема 3. Перестройка резонатора осуществляется с помощью подвижного поршня 1, закорачивающего волновод на одном из концов, другой конец используется для вывода энергии с помощью петли связи 4 к волномеру. Величина приложенного к диоду постоянного напряжения регулируется с помощью потенциометров R1 и R2. Напряжение на диоде и протекающий через него ток измеряются с помощью вольтметра и миллиамперметра PA1 и PA2 соответственно. Элементы регулировки и измерения указанных величин расположены на передней панели макета. С помощью волномера типа 35ИМ осуществляется измерение частоты генерируемых колебаний.

2.3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с описанием лабораторной установки. Установить ручки с надписью «Регулировка V» в крайнее левое положение (против часовой стрелки). Тумблер «Вкл» перевести в выключенное состояние (вниз).

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

3. Снять прямые вольт-амперные характеристики (ВАХ) диода Ганна для двух крайних положений плунжера в резонаторе (первое положение -

2.4. Оставлять без наблюдения схему, находящуюся под напряжением.

2.5. Подходить к главному щиту электрического питания.

2.6. Снимать или перевешивать предупреждающие и запрещающие плакаты.

2.7. Загромождать рабочее место одеждой, портфелями, книгами и другими вещами, не относящимися к выполняемой работе,

2.8. Ходить без дела по лаборатории и отвлекать товарищей разговорами.

Если произошел несчастный случай, то необходимо немедленно:

- отключить напряжение от схемы;
- сообщить преподавателю или лаборанту;
- оказать первую помощь пострадавшему;
- вызвать скорую помощь по телефону 03.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО КЛИСТРОНА

Цель работы: Изучение устройства и принципа действия отражательного клистрона, экспериментальное исследование его характеристик.

1. Устройство и принцип действия отражательного клистрона

Клистрон состоит из трех основных частей: катода с фокусирующим устройством, резонатора и отражателя (рис. 1).

Электронная пушка 1 ускоряет поток электронов за счет напряжения *Ер*. Электроны проходят через стенки резонатора и за счет флуктуации возбуждают электромагнитное поле в резонаторе. Резонатор выделяет электромагнитное поле на частоте используемого типа колебаний. На зазоре появляется переменное напряжение *u(t)*, которое периодически ускоряет и замедляет движение электронов.

После прохождения зазора поток электронов, модулированный по скорости, попадает в промежуток между резонатором и отражателем в область постоянного тормозящего поля, создаваемого напряжением *Ер + Еотр*. В пространстве между резонатором и отражателем происходит группирование электронов (модуляция потока электронов по плотности). Электроны останавливаются, а затем поворачиваются обратно и пронизывают резонатор в обратном направлении. Напряжения *Ер* и *Еотр* подбираются таким образом, чтобы в момент обратного прохождения зазора резонатора сгустки электронов попадали в максимальное по величине тормозящее поле и отдавали ему свою энергию. Процесс группирования поясняется пространственно-временной диаграммой движения электронов (рис.2). В положительный полупериод переменного напряжения на резонаторе *u(t)* начальная скорость электронов и соответствующий ей наклон кривой больше, чем в отсутствие напряжения, а в отрицательный полупериод, наоборот, меньше.

Электроны, ускоренные при прямом проходе зазора во время положительного полупериода напряжения, группируются с замедленными в следующем отрицательном полупериоде. При соответствующем различии начальных скоростей и соответствующем напряжении на отражателе сгустки электронов образуются как раз к моменту возвращения их к резонатору.

роль теплоотвода. кристалл GaAs, являющийся активным элементом диода, обычно изготавливается методом газотранспортной эпитаксии в виде полупроводниковой структуры типа P^+ - P . При этом анодный омический контакт осуществляется с высоколегированным слоем P^+ с помощью металлического контакта - припоя, в свою очередь припаянного к массивному теплопроводящему стержню.

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

В работе исследуется диод Ганна типа АА-703А. Его типовые параметры и параметры кристалла GaAs:

1. Омическое сопротивление диода при $U = 0,5В, 3+20Ом$
2. Рабочее напряжение питания, 8,5 В
3. Рабочий ток, 270 мА
4. Диапазон частот генерируемых колебаний $8,24+12,5 ГГц$
5. Непрерывная СВЧ мощность, 10 Вт
6. Длина образца $L, (1,0+1,2) \cdot 10^{-5} м$
7. Площадь катодного контакта $A, 1,13 \cdot 10^{-8} м^2$
8. Концентрация $n_0, 1,0+1,4 \cdot 10^{21} м^{-3}$
9. Подвижность в слабом поле $0,5+0,6 м/(В \cdot с)$
10. Диэлектрическая проницаемость $\epsilon 12,5$

2.2. Описание лабораторной установки

Структурная схема лабораторной установки показана на рис. 9, в ее состав входит макет 1 и волномер 2.

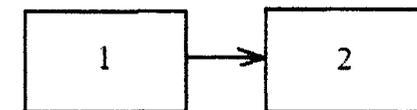


Рис. 9. Структурная схема лабораторной установки

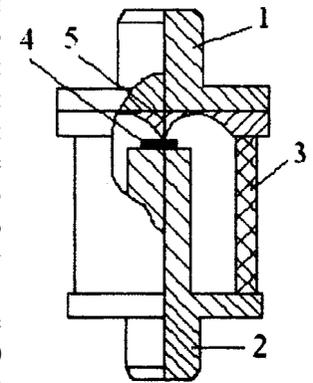


Рис. 8. Конструкция диодов Ганна:
1— катодный вывод.
2— анодный вывод.
3— керамическая трубка
4— кристалл GaAs.
5— токопроводящие катодные проволочки

$$G_{\text{рас}} = \frac{qn_0|\mu_+|Q_+}{\epsilon\omega} \quad (19)$$

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

$$\frac{n_0}{f} \leq \frac{2\pi\epsilon}{q|\mu_-|} \cdot \frac{G_{\text{н.мах}}}{2Q_-} \quad (20)$$

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

$$G_{\text{рас}} - G_{\text{нар}} = \delta \geq 0 \quad (21)$$

Если минимально допустимый коэффициент рассасывания принять равным $G_{\text{р.мин}}$, то из условия $G_{\text{р.мин}} < G_{\text{рас}}$ с учетом (19) получим:

$$\frac{n_0}{f} > \frac{2\pi\epsilon}{q|\mu_+|} \cdot \frac{G_{\text{р.мин}}}{2Q_+} \quad (22)$$

Неравенства (20), (21) и (22) можно использовать для нахождения возможных значений фазовых углов θ и θ , если заданы величины $\frac{n_0}{f}$, $G_{\text{р.мин}}$, $G_{\text{н.мах}}$, E_0 , E_1 и кусочно-линейная аппроксимация $V(E)$,

Значение $\frac{n_0}{f}$, соответствующие режиму ОНОЗ лежат в пределах

$$2 \cdot 10^4 < \frac{n_0}{f} < 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с} \quad (23)$$

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

2. Устройство диода Ганна и генератора на его основе

2.1. Устройство диода Ганна и его типовые параметры

Серийный диод Ганна состоит из герметически запаянного металлокерамического патрона с расположенным внутри него кристаллом арсенида галлия $GaAs$. Его типичное устройство схематически показано на рис.8. На этом рисунке 1 и 2 соответственно катодный и анодный выводы диода, 3 - керамическая трубка, 4 - кристалл $GaAs$, 5 - токоподводящие катодные проволочки. Анодный стержень 2 выполняет

Как видно из рис. 2, электроны группируются за время τ_0 - время движения среднего электрона, имеющего начальную скорость V_0 , так как он проходит зазор в момент времени, когда $u(t) = 0$.

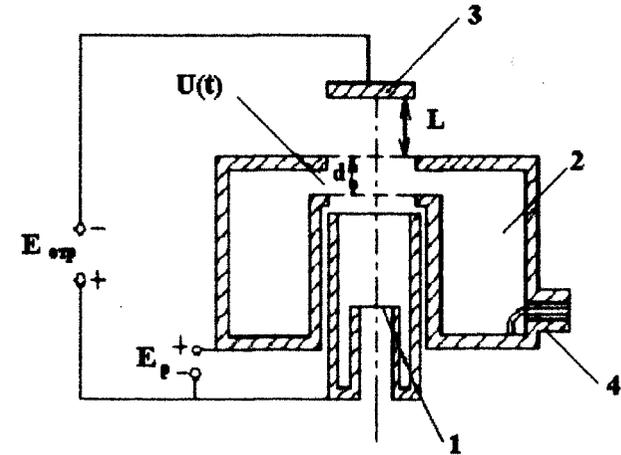


Рис. 1. Схематическое изображение отрагательного клистрона: 1 – катод с фокусирующим устройством, 2 – резонатор, 3 – отрагатель, 4 – устройство связи

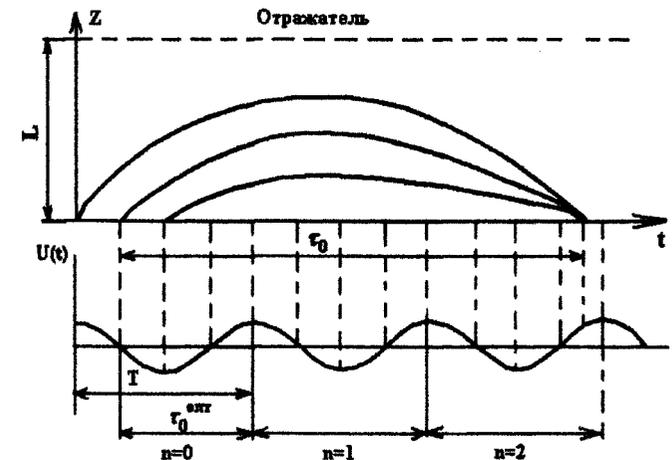


Рис. 2. Пространственно-временная диаграмма электронов в пространстве в промежутке резонатор-отрагатель

L - длина промежутка между верхней сеткой резонатора и отражателем,

τ_0^{opt} - оптимальное время пролета среднего электрона при $n=0$.

Оптимальным с точки зрения отдачи энергии электронным потоком полю резонатора будет такое значение τ_0^{opt} , при котором центр группы электронов возвращается в зазор в момент, когда для него $u(t)$ имеет максимальное тормозящее значение

$$\tau_0^{opt} = (n + 0,75)T \quad (1)$$

Число $n=0, 1, 2, \dots$ называется *номером зоны генерации отражательного клистрона*.

Выполнение условия (1), при котором мощность отдаваемая потоком электронов полю, максимальна, обеспечивается обычно выбором напряжения на отражателе. Соответствующие значения напряжения называются *оптимальными* $E_{отп}^{opt}$, и они различны для разных номеров зон n . С ростом n увеличивается время пролета τ_0 и, следовательно, должно уменьшаться по абсолютному значению $E_{отп}$, поскольку при этом электроны будут подходить ближе к отражателю, и путь их удлинится (при той же начальной средней скорости V_0). При $E_{отп} \approx E_{отп}^{opt}$ максимум конвекционного тока через зазор $i_k(t)$, представляющий собой возвращающийся поток электронов, совпадает с максимумом напряжения $u(t)$. Поэтому первые гармоники конвекционного тока и создаваемого им наведенного тока синфазны с $u(t)$.

Резонатор представляет собой активное сопротивление, что возможно при условии, если частота генерируемых колебаний совпадает с резонансной частотой резонатора. При уходе напряжения на отражателе от оптимального частота генератора будет изменяться. На рис. 3 показан случай, когда $E_{отп}$ незначительно превышает $E_{отп}^{opt}$, и группа электронов возвращается в резонатор несколько раньше момента максимального тормозящего поля.

При этом первая гармоника наведенного тока $i_{H1}(t)$ опережает напряжение $u(t)$ на время $\Delta\tau = \tau_0^{opt} - \tau_0$

Эквивалентная схема резонатора, отнесенная к его зазору, имеет вид параллельного колебательного контура. опережение тока происходит при условии емкостного характера проводимости резонатора, что соответствует частоте, превышающей резонансную частоту резонатора.

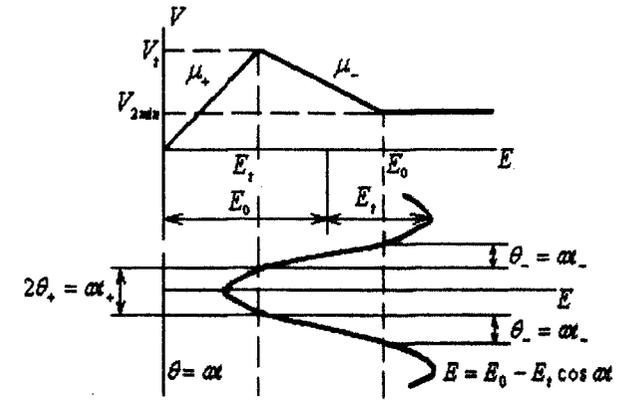


Рис. 7. Кусочно-линейная аппроксимация зависимости средней дрейфовой скорости от напряженности электрического поля $V(E)$ для GaAs

На рисунке 7 введены следующие условные обозначения:

$V_0 E t$ - дрейфовая скорость и соответствующая ей пороговая напряженность поля, определяемые по аппроксимирующей зависимости $V(E)$; μ_+, μ_- - положительная и отрицательная подвижности соответственно; V_{2min} - минимальная дрейфовая скорость вне домена; θ_-, θ_+ - фазовые углы, определяемые долями периода колебаний $t-$ и $t+$ в течение которых дифференциальная подвижность μ_d сохраняется соответственно отрицательной или положительной. Значение остальных величин ясно из рисунка 7.

Нарастание и рассасывание объемного заряда описывается экспоненциальной функцией, показатель степени которой в зависимости от знака μ_d называют *коэффициентом нарастания* $G_{нар}$, или *коэффициентом рассасывания* $G_{расс}$ объемного заряда

$$G_{нар/расс} = \int \frac{qn_0 |\mu_d| dt}{\epsilon} \quad (17)$$

Интегрируя (17) в пределах $t- t+$, а также переходя к фазовым углам, получим

$$G_{нар} = \frac{qn_0 |\mu_-| Q}{\epsilon \omega} \quad (18)$$

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

На рис. 5 это условие представлено пунктирной прямой, ограничивавшей сверху область 3. Учет времени разрушения домена дает минимальное критическое отношение $\frac{n_0}{f} = 10^4 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с.}$ КПД генератора, работающего в режиме с разрушением домена, может достигать 13%.

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

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

1.3.4. Режим ограниченного накопления объемного заряда (ОНОЗ)

В режиме ОНОЗ на диод подается определенное напряжение смещения и переменное напряжение достаточно высокой частоты и большой амплитуды. В случае генератора переменное напряжение создается автоматически его высокочастотной колебательной системой, При этом скорость изменения поля в образце обеспечивается достаточно большой; чтобы область значений отрицательной дифференциальной подвижности μ_d на ВАХ пробегалась за малое время и домен не успевал полностью сформироваться, В этом случае электрическое поле в образце остается в любой момент времени практически однородным, Напряжение на диоде просто равно EL , а ток $qn_0SV(E)$. Таким образом, ВАХ в режиме ОНОЗ должна иметь тот же вид, что и зависимость средней скорости дрейфа от напряженности поля. Сам диод в цепи переменного тока будет при этом играть роль нелинейной проводимости пропорциональной скорости $V(E)$ ДЛЯ данного двухдоменного полупроводника. Режим ОНОЗ реализуется соответствующим подбором напряжения, а также частоты и амплитуды переменного напряжения,

На рис, 7 представлена кусочно-линейная аппроксимация зависимости средней дрейфовой скорости от напряженности электрического поля $V(E)$ для $GaAs$.

Следовательно, с ростом напряжения на отражателе вблизи значения E_{omp}^{opt} растет частота генерируемых колебаний.

Очевидно, при уменьшении E_{omp} наведенный ток запаздывает по фазе относительно напряжения на зазоре, что возможно только при частоте колебаний, меньшей резонансной частоты резонатора.

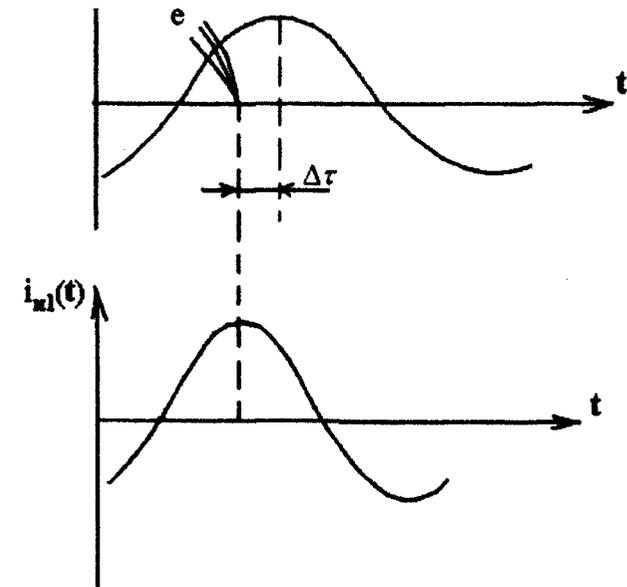


Рис. 3. Частотная расстройка генератора

Процесс изменения частоты генератора с помощью изменения напряжения на отражателе называется *электронной перестройкой частоты отражательного клистрона*. Электронная перестройка широко используется на практике. При отклонении E_{omp} от E_{omp}^{opt} , кроме расстройки частоты, происходит уменьшение электронной мощности, так как условия торможения сгруппированного потока электронов ухудшаются. Уменьшение амплитуды $u(t)$ в свою очередь ухудшает группирование потока. Вследствие этого генерация колебаний происходит только в некоторых сравнительно небольших областях значений

напряжения на отражателе вблизи $E_{отр}^{opt}$ для каждого номера n . Эти области и образуют зоны генерации отражательного клистрона (рис.4).

Перестройка частоты генератора на отражательном клистроне может производиться и с помощью изменения напряжения E_p при $E_{отр} = const$.

Однако, как правило, такой способ перестройки частоты не применяется, так как изменение E_p необходимо производить в цепи, через которую протекает весь ток катода.

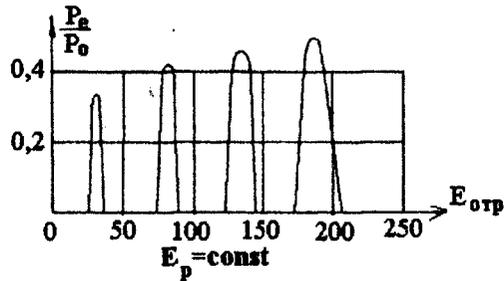


Рис. 4. Зоны генерации отражательного клистрона

2. Сведения из теории

2.1. Модуляция скорости электронов полем СВЧ в зазоре резонатора

В зазоре резонатора электроны находятся под воздействием высокочастотного сигнала $u(t) = U_m \cos \omega t$, который создает электрическое поле с напряженностью

$$E = -\frac{U_m \cos \omega t}{d}, \quad (2)$$

где d - длина зазора резонатора.

В зазор электроны входят со скоростью, определяемой напряжением на ускорявшем электроде электронной пушки

$$V_0 = \sqrt{\frac{2e}{m} E_p} = 5,93 \cdot 10^5 \sqrt{E_p} \text{ м/с}. \quad (3)$$

Пренебрегая силами расталкивания электронов, можно записать уравнение движения электронов в виде $m \frac{dV}{dt} = -eE_p$ или, учитывая (2),

соответствуют области 2, 3 и 4 на рис. 5, Их общей чертой является существование в образце в течение определенной части периода колебаний сформированного домена,

а) **Пролетный режим.** Название режима обусловлено тем, что частота колебаний определяется главным образом временем пролета полностью сформированного домена от катода до анода (область 2 на рис. 5). Механизм образования и движения домена в образце подробно рассмотрен в подразделе 1.1,

Для повышения эффективности работы генератора в пролетном режиме желательно иметь синусоидальную форму тока в цепи диода, Приблизиться к такой форме тока можно, либо уменьшив длину образца (что уменьшит период колебаний), либо увеличив ширину домена за счет снижения n^0 . В общем случае более синусоидальная форма тока получается при уменьшении произведения $n^0 L$. КПД в пролетном режиме максимален, когда произведение $n^0 L$ лежит в пределах от одной до нескольких единиц на 10^{12} см^{-2} , то есть домен занимает примерно половину длины образца. КПД для этого режима не превышает 10%.

Существование пролетного режима возможно лишь в узкой полосе частот и при перестройке внешнего колебательного контура он плавно переходит в другие режимы,

б) **Режим с разрушением (подавлением) домена,** Рассматриваемому режиму на рис. 5 соответствует область 3, лежащая выше ординаты $fL \approx 3 \cdot 10^7 \frac{\text{см}}{\text{с}}$. Частота генерируемых колебаний в таком режиме может

превышать пролетную в несколько раз. Работа генератора Ганна в этом случае возможна лишь тогда, когда амплитуда колебаний достаточно велика, чтобы снижение поля в отрицательный полупериод приводило к рассасыванию домена, то есть напряжение на образце становилось ниже порогового $U_{пер}$, В этом случае домен разрушается, не достигая анода. Наибольшая частота, при которой может быть реализован этот режим, определяется как временем формирования домена, так и временем его разрушения. Время формирования должно быть на порядок меньше, чем период колебаний. Так как скорость накопления пространственного

заряда определяется характерным временем $\tau_d = \frac{\epsilon}{qn_0 \mu_d}$,

то для $GaAs$ из условия $\tau_d < \frac{1}{10f}$ верхняя частотная граница определяется

характеризуются стабильным распределением поля и положительным дифференциальным сопротивлением на постоянном токе.

В динамическом случае, когда к диоду приложено не только постоянное смещение, но и некоторое малое переменное напряжение с частотой близкой к пролетной $\left(fL \approx 10^7 \frac{\text{см}}{\text{с}}\right)$, закон изменения поля внутри образца перестает быть стационарным, и в нем возникает ДОС. Мгновенная картина поля уже не представляет собой, как при постоянном напряжении, монотонную зависимость, а становится похожей на волну нарастающей амплитуды. На рис. 6 показана картина распределения электрического поля в образце, смещенном в область с ДОС,

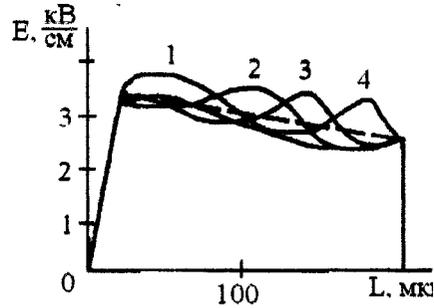


Рис. 6. Картина распределения электрического поля

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

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

1.3.3. Доменные режимы работы

Для доменных режимов работы диода Ганна характерно выполнение неравенства $n_0 L > 10^{12}$. Всего таких режимов различают три. Им

$$\frac{dV}{dt} = \frac{eU_m}{md} \cos \omega t. \quad (4)$$

Интегрируя это уравнение при начальном условии $V = V_0$ в момент $t = t_0$, где t_0 - время входа электрона в зазор,

$$V - V_0 = \frac{eU_m}{md} \int_0^t \cos \omega t \cdot dt = \frac{eU_m}{m\omega d} (\sin \omega t - \sin \omega t_0).$$

Заменяя отношение $\frac{e}{m}$ отношением $\frac{V_0^2}{2E_p}$ из (3) и учитывая, что

$\frac{\omega d}{V_0} \approx \theta_d$, где θ_d - угол пролета зазора без учета поля СВЧ (со скоростью V_0), получаем

$$V_k = V_0 \left[1 + \frac{U_m}{2E_p \theta_d} 2 \sin \frac{\omega(t_k - t_0)}{2} \cos \frac{\omega(t_k + t_0)}{2} \right]. \quad (5)$$

Учитывая, что $t_k - t_0 = \tau$ - время пролета электроном зазора в поле СВЧ, а $\frac{t_k + t_0}{2}$ - приблизительно время пролета электроном середины зазора, получим

$$V_k = V_0 \left[1 + \frac{U_m}{2E_p} M \cos \omega t \right], \quad (6)$$

где $M = \frac{\sin \frac{\theta_d}{2}}{\frac{\theta_d}{2}}$ коэффициент взаимодействия потока электронов с

полем СВЧ;

V_k - скорость электрона при выходе из зазора резонатора

Из (5) видно, что электроны, входящие в зазор с одной и той же скоростью V_0 , будут выходить из него с разными скоростями, зависящими от момента t^l прохода ими середины промежутка.

Коэффициент при $\cos \omega t$ характеризует глубину изменения скорости электронов (глубину модуляции скорости) и зависит от отношения амплитуды переменного напряжения U_m к ускоряющему напряжению E_p и от коэффициента взаимодействия потока и поля M .

2.2. Уравнения установившихся колебаний в отражательном клистроне

Процессы взаимодействия электронов и высокочастотного поля одинаковы в зазорах резонаторов пролетного и отражательного клистронов и различны в пространстве дрейфа пролетного клистрона и пространстве резонатор-отражатель отражательного. В пролетном клистроне происходит группировка электронов около электрона, вылетающего из зазора резонатора со скоростью V^0 при переходе $u(t)$ от тормозящего значения к ускоряющему, а в отражательном клистроне около электрона, вылетающего со скоростью V^0 при переходе $u(t)$ от ускоряющего значения к тормозящему.

Поэтому конвекционный ток в середине зазора резонатора отражательного клистрона будет находиться в противофазе к конвекционному току в середине зазора второго резонатора пролетного клистрона.

$$i_{k1} = 2I_0 J_1(x) \cdot \cos(\omega t - \theta_e - \theta_d + 1,5\pi), \quad (7)$$

где I_0 - ток луча, а $J_1(x)$ - функция Бесселя первого порядка.

Параметр группирования пропорционален не сумме, а разности углов пролета $\theta_e - \theta_d$.

$$X = \frac{U_m}{2E_p} (\theta_e - \theta_d) \cdot M\left(\frac{\theta_d}{2}\right). \quad (8)$$

Наведенный ток первой гармоники (его комплексная амплитуда)

$$\dot{I}_{H1} = 2MI_0 J_1(x) \cdot e^{-i(\theta_e + \theta_d - 1,5\pi)}. \quad (9)$$

Из выражения $\tau_0^{om} = (n + 0,75)T$ получаем, умножая его обе части на ω

$$\omega \tau_0^{om} = 2\pi(m + 0,75) = \theta_e^{om} + \theta_d. \quad (10)$$

Обозначая отклонение угла пролета от его оптимального значения, соответствующего центру зоны генерации через $\Delta\theta_e$, получаем

$$\theta_e + \theta_d - 1,5\pi = \theta_e^{om} + \Delta\theta_e + \theta_d - 1,5\pi = \Delta\theta_e + 2\pi. \quad (11)$$

Теперь с учетом (11) комплексная амплитуда наведенного тока первой гармоники

$$\dot{I}_{H1} = 2MI_0 J_1(x) \cdot e^{-i\Delta\theta_e}. \quad (12)$$

Зазор резонатора представляет собой для напряжения $u(t)$ некоторую нагрузку с проводимостью

Однако режим работы диода зависит не только от внешних, но и от внутренних факторов. Поэтому для разграничения возможных режимов работы диода Ганна, учитывая внутренние и внешние условия, определяющие образование и разрушение доменов, в качестве критериев используют произведения n^0L и fL . Если эти величины откладывать на плоскости вдоль осей прямоугольной системы координат (рис. 5), то каждому из возможных режимов на указанной плоскости будет соответствовать некоторая область.

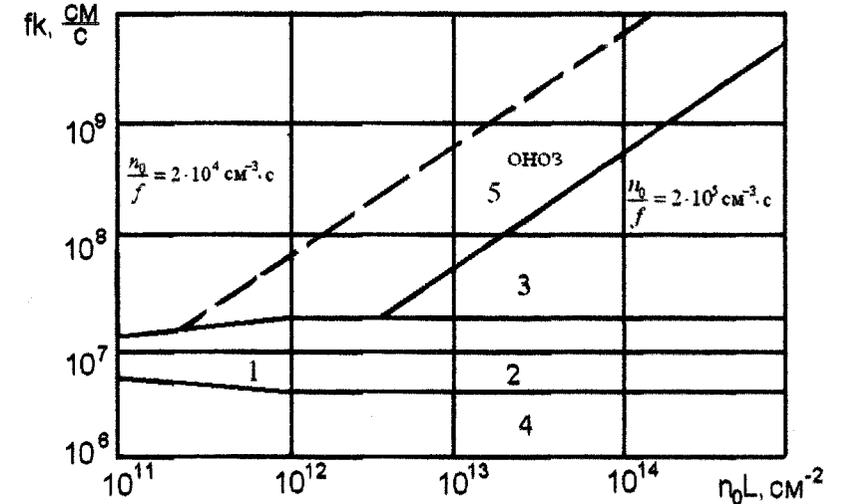


Рис. 5. Режимы работы диода Ганна:

- 1 – бездоменный режим устойчивого усиления,
- 2 – пролетный режим, 3 – режим с разрушением домена,
- 4 – режим с задержкой домена, 5 – режим ограниченного накопления объема заряда

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

1.3.2. Бездоменный режим устойчивого усиления

Этому режиму на рис. 5 соответствует область 1. Низколегированные или короткие образцы (у которых произведение $n_0L < 10^{12} \text{ см}^{-2}$)

является вольт-амперной характеристикой (ВАХ) прибора. Практически более важной характеристикой является зависимость тока от напряжения на образце. ВАХ прибора при $U^0 < U^{0n}$, где U^{0n} - пороговое напряжение на образце должно совпадать с зависимостью, показанной на рис. 2 при $E < E^n$. После возникновения домена $U^0 > U^{0n}$ из-за уменьшения поля вне его практически все напряжение приложено к домену (участок СД на рис. 3). При этом ток скачком переходит от J_{max} к J_{min} (8, 9). При дальнейшем увеличении U^0 ток практически остается неизменным, соответствующим J_{min} (рис 4). Уменьшение U^0 до U^{0n} должно соответствовать кривой ДЗВ. При U^{0n} домен не исчезает, а существует далее до напряжения исчезновения U^{0n} . Перед исчезновением домена скорости электронов и напряженность поля вне домена соответствуют точке Д. При этой $J \approx J_{min}$. Появление гистерезиса на ВАХ объясняется тем, что при снижении напряжения на образце происходит постепенное уменьшение напряженности поля в домене и его длины.

1.3. Режимы работы диода Ганна

1.3.1. Влияние внешней цепи на работу диода

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

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

$$\frac{T_0}{T} = \frac{Lf}{V_d}$$

$$Y_e = -\frac{\dot{I}_{H1}}{\dot{U}_m} \quad (13)$$

Из выражений (12) и (8) подставляем значения \dot{I}_{H1} и \dot{U}_m и получаем

$$Y_e = -Y_{e0} \frac{2J_1(x)}{x} e^{-i\Delta\theta} \quad (14)$$

Здесь

$$Y_e = M^2 \frac{I_0(x)}{2E_p} (\theta_e - \theta_d) \quad (15)$$

Величина Y_e определяется только параметрами клистрона и не зависит от U^m . Электронная проводимость Y_e характеризует собой нелинейный активный элемент подобно отрицательной дифференциальной проводимости в генераторах с падающей характеристикой.

Составим эквивалентную схему, включающую Y_e генератора и проводимость резонатора и нагрузки $Y_p = G_p + iB_p$; $Y_n = G_n + iB_n$, параллельное соединение которых образует проводимость нагрузки для этого генератора $Y = G + iB$ (рис.5),

Y_p - эквивалентная проводимость резонатора, отнесенная к зазору,

Y_n - эквивалентная проводимость внешней нагрузки клистрона, отнесенная к зазору.

Сумма падений напряжения равна сумме действующих ЭДС, поэтому $\dot{I}_{H1} \cdot Y_e + \dot{I}_{H1} \cdot Y = 0$ или $Y_e + Y = 0$.

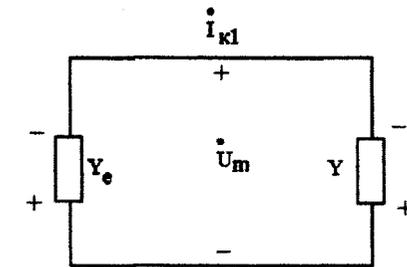


Рис. 5. Эквивалентная схема отражательного клистрона как генератора с внешней нагрузкой

Подставляя значения Y_e и Y , разбиваем уравнение на два, соответствующие действительным и мнимым частям

$$Y_{e_0} \frac{2J_1(x)}{x} \cos \Delta\theta_e = G, \quad (16)$$

$$Y_{e_0} \frac{2J_1(x)}{x} \cos \Delta\theta_e = B. \quad (17)$$

Уравнение (16) - уравнение баланса амплитуд, а (17) - уравнение баланса фаз

$$\frac{2J_1(x)}{x} = \frac{G}{Y_e \cos \Delta\theta_e}. \quad (18)$$

На рис. 6 приводится графическое решение уравнения (18).

Видно из рисунка, что при изменении величины A от нуля до единицы параметр группирования X изменяется от 0 до 3,83. Процесс самовозбуждения носит мягкий характер. Уравнение (17) - уравнение баланса фаз. В случае полезной активной нагрузки генератора $B'_H = 0$ и реактивная проводимость B представляется проводимостью параллельного контура.

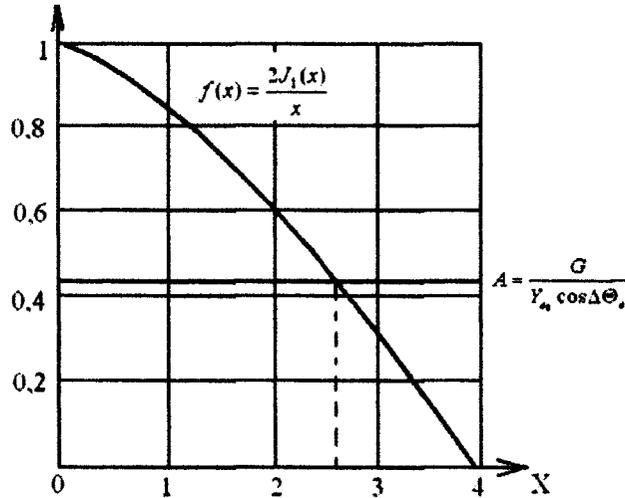


Рис. 6. Графическое решение уравнения баланса амплитуд

$$B_p \cong G Q_n \frac{2\Delta\omega}{\omega} = 2C\Delta\omega, \quad (19)$$

где $Q_n = \frac{\omega_p C}{G}$ - нагруженная добротность резонатора;

где L - длина образца;

ϵ - диэлектрическая проницаемость;

n_0 - равновесная концентрация электронов;

$|\mu_d|$ - абсолютное значение дифференциальной подвижности.

Обычно это условие записывается в виде

$$n_0 L > \frac{\epsilon \cdot V_d}{q|\mu_d|} = (n_0 L_1). \quad (12)$$

Неравенство (12) показывает, что необходимым условием образования домена является достаточная концентрация электронов n^0 при заданной длине образца. Если $n^0 L < (n^0 L_1)^1$ то домен не возникает при любой величине приложенного поля. Условием существования домена является выполнение неравенства

$$n_0 L \geq (n_0 L_1) = 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}. \quad (13)$$

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

$$f = \frac{1}{T_0} = \frac{V_d}{L} = f_{np} \quad (14)$$

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

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

$$u_d = \int_0^{L^d} (E - E_{en}) dx, \quad (15)$$

где L^d - протяженность домена.

В явной форме записи после интегрирования (15) можно получить

$$u_d = \frac{\epsilon}{2qn_0} (E_d - E_{en})^2. \quad (16)$$

Пока нет домена ($U_d = 0$), напряженность поля в образце $E = E_n$.

С появлением домена U_d растет, а поле вне домена падает. Ток через образец пропорционален полю вне домена, поэтому зависимость U_d от E_n

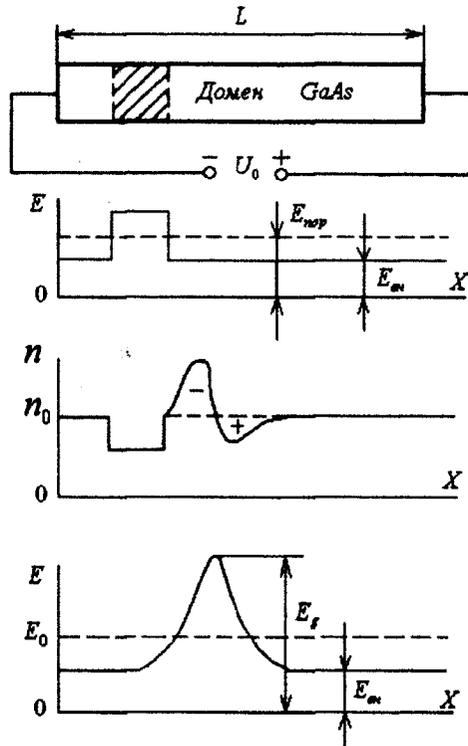


Рис. 3. Принцип работы диодов Ганна

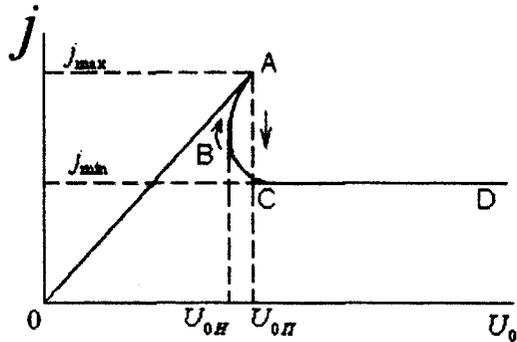


Рис. 4. Зависимость плотности тока от напряжения

ω_p - круговая резонансная частота;

C - емкость зазора резонатора.

Подставим B из (19) в (17)

$$Y_{e_0} \frac{2J_1(x)}{x} \sin \Delta\theta_e = GQ_n \frac{2\Delta\omega}{\omega_p} \quad (20)$$

Разделим уравнение (20) на (18) и получим

$$\frac{2\Delta\omega}{\omega_p} = \frac{2\Delta f}{f_p} = -\frac{1}{\theta_n} \operatorname{tg} \Delta\theta_e \quad (21)$$

Это уравнение баланса фаз определяет частоту генерируемых колебаний при активной нагрузке.

В центре зоны $\Delta\theta_e = 0$, и частота совпадает с резонансной частотой резонатора.

Чем больше значение Q_n , тем меньше уходы частоты при изменении $\Delta\theta_e$, то есть в пределах зоны генерации.

3. Характеристики и параметры отражательного клистрона

При использовании отражательного клистрона наибольший практический интерес представляет зависимости мощности и частоты колебаний от тока луча I^0 , напряжения на отражателе и проводимости нагрузки Y'_n .

3.1. Мощность в центрах зон генерации

Полная мощность, отдаваемая электронным потоком в центре зон генерации, определяется выражением

$$P_{\text{полн.з}} = I_0 E_p \frac{x J_1(x)}{\pi(n+0,75)} \quad (22)$$

Здесь

$$x = \frac{U_m}{2E_p} M \left(\frac{\theta_d}{2} \right) \cdot (\theta_e - \theta_d) \quad (23)$$

Так как $\Delta\theta_e$ и θ_d также зависят от E_p , то $P_{\text{полн}}$ является сложной функцией E_p .

Из выражения (22) видно, что при $E_p = \text{const}$ полная электронная

мощность в центрах зон генерации уменьшается при увеличении номера зоны.

3.2. Максимальный электронный КПД

Электронный КПД представляет собой отношение полной электронной мощности к мощности электронного луча.

В центрах зон генерации электронный КПД принимает максимальные значения

$$\eta_{\text{max},z} = \frac{0,398}{n+0,75} \text{ для } n = 1,2,3\dots \quad (24)$$

3.3. Условие оптимального самовозбуждения отражательного клистрона

При описании принципа работы отражательного клистрона условие максимальной отдачи мощности электронным потоком высокочастотному полю было записано в виде выражения (1). Преобразовывая выражение (1) так, чтобы оно включало напряжения питания клистрона и его геометрические размеры, получают условие оптимального самовозбуждения

$$\frac{506}{\lambda \sqrt{E_p}} \left(d + \frac{4lE_p}{E_p + E_{\text{отп}}} \right) = n + 0,75, \quad (25)$$

где λ - длина волны генерируемых колебания, см;

d - величина зазора между сетками резонатора, см;

l - расстояние между верхней сеткой резонатора и отражателем, см;

n - номер зоны генерации.

3.4. Ширина зоны генерации по уровням половинной и нулевой мощности

Ширина зоны генерации по уровню нулевой мощности определяется приближенным выражением из работы [2]

$$\Delta E(0) \cong (E_p + E_{\text{отп}}) \frac{0,28}{n+0,4}; \quad (26)$$

$$\Delta E(0,5) \cong 0,75 \Delta E(0). \quad (27)$$

Как видно из выражений (26) и (27), с увеличением номера зоны ширина зоны генерации уменьшается.

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

$$\mu_1 E_{\text{вн}} = \mu_2 E_{\text{д}}. \quad (7)$$

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

$$j_{\text{max}} = qn_1 V_{1\text{max}} = qn_0 V_{1\text{max}}. \quad (8)$$

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

$$j_{\text{min}} = qn_2 V_{\text{д}} = qn_0 V_{\text{д}}. \quad (9)$$

Этот ток остается неизменным до тех пор, пока домен не достигнет конца образца. При этом электроны из домена уходят во внешнюю цепь, домен начинает рассасываться, напряженность поля на нем падает, а напряженность поля в остальной части образца возрастает, Это приводит к росту плотности тока согласно (8), Таким образом, в образце движется только один домен, место возникновения которого определяется неоднородностью. Во внешней цепи появляются периодические колебания тока, с периодом примерно равным времени пролета домена в образце. Это явление впервые экспериментально обнаруженное Дж. Ганном, получило название *эффекта Ганна*. Прибор, работающий на рассмотренном принципе, получил название *диода Ганна*,

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

Домен в диоде Ганна успевает сформироваться, если время пролета его через образец T^0 значительно больше максимального времени максвелловской релаксации $\tau_{\text{ок}}$:

$$T_0 > \tau_{\text{gm}} \quad (10)$$

или

$$\frac{L}{V_{\text{д}}} > \frac{\varepsilon}{qn_0 |\mu_{\text{д}}|}, \quad (11)$$

$V = f(E)$ должна представляться участком ДВ прямой ОВ.

Таким образом, переходному участку СД соответствует отрицательная дифференциальная подвижность μ_d :

$$\mu_d = \frac{dV}{dE} < 0. \quad (6)$$

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

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

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

- энергетический зазор между долинами должен быть меньше, чем ширина запрещенной зоны полупроводника, чтобы лавинный пробой не наступал до перехода электронов в верхнюю долину, Исследования показывают, что переход электронов из нижней долины в верхнюю происходит не по всему образцу, а лишь в узкой области образца, где имеется неоднородность концентрации примеси или флуктуации электрического поля. Предположим, что на небольшом участке имеется меньшая концентрация донорной примеси, чем в остальной части образца, т. е. имеется участок с повышенным сопротивлением. Увеличение локального сопротивления приведет к росту падения напряжения на нем и, как следствие, росту напряженности поля E в пределах этого участка по сравнению с остальным образцом. Если на рассматриваемом участке $E > E^n$, а вне его $E < E^n$, то на этом участке начнется переход электронов из нижней долины в верхнюю, сопровождающийся снижением дрейфовой скорости. Оказавшиеся в верхней долине электроны начинают отставать от опережающих, так что в левой части локального участка наблюдается избыток электронов (отрицательный объемный заряд), а в правой недостаток, т. е. положительный объемный заряд донорных ионов. Образующийся при этом двойной электрический слой объемного заряда называется *электрическим доменом*, Графики, иллюстрирующие механизм образования электрического домена показаны на рис. 3. Образование домена означает увеличение напряженности поля на участке, занимаемым доменом. При постоянном внешнем напряжении на образце

3.5. Диапазон электронной перестройки по частоте

Уравнение баланса фаз при самовозбуждении отражательного клистрона, которое имеет вид (21)

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{\theta_n} \operatorname{tg} \Delta \theta_e. \quad (28)$$

Подставляя значения

$$\Delta \theta_e = \theta_e^{onm} \frac{\Delta E_{onm}}{E_p + E_{onm}^{onm}},$$

$$\theta_e^{onm} = 2\pi(n + 0,75) - \theta_d,$$

получаем
$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{2\theta_n} \operatorname{tg} \left[\frac{2\pi(n + 0,75) - \theta_d}{E_p + E_{onm}^{onm}} \right], \quad (29)$$

где $\theta_d = \frac{2\pi f d}{5,93 \cdot 10^3 \sqrt{E_0}}$ - угол пролета зазора резонатора;

Q_n - нагруженная добротность резонатора.

3.6. Крутизна электронной настройки в центре зоны

Этот параметр служит для численной оценки перестройки частоты

$$S_f = \frac{\Delta f}{\Delta E_{onm} |_{\Delta E_{onm} \rightarrow 0}} = \frac{f_p}{2\theta_n} \cdot \frac{2\pi(n + 0,75) - \theta_d}{E_p + E_{onm}^{onm}} \text{ Гц/В} \quad (30)$$

С ростом номера n в выражении (30) увеличивается числитель и уменьшается знаменатель (E_{onm}^{onm}). В результате с ростом n крутизна S_f быстро увеличивается.

4. Описание лабораторной установки

Структурная схема лабораторной установки для исследования отражательного клистрона показана на рис.7.

Установка состоит из клистрона, блока питания, волноводной части, включающей аттенюатор, коаксиальный волномер по параллельной схеме включения и детекторную секцию.

Блок питания имеет переднюю панель, на которой размещается тумблер «Сеть» для включения напряжения накала, тумблеры «Питание

резонатора», и «Питание отражателя», а также переключатель вольтметра, позволяющего поочередно замерять напряжения на резонаторе и отражателе,

На панели расположены: вольтметр для измерения напряжений на резонаторе и отражателе, миллиамперметр для контроля катодного тока, микроамперметр, предназначенный для контроля уровня мощности клистрона,

Показания микроамперметра пропорциональны генерируемой мощности, так как диод работает в квадратичном режиме при малом уровне сигнала, ограничиваемого аттенюатором.

Коаксиальный резонатор волномера с зазором включен параллельно в СВЧ тракт и при настройке в резонанс с генерируемым сигналом отсасывает часть мощности, поступающей на диод, при этом показания микроамперметра падают.

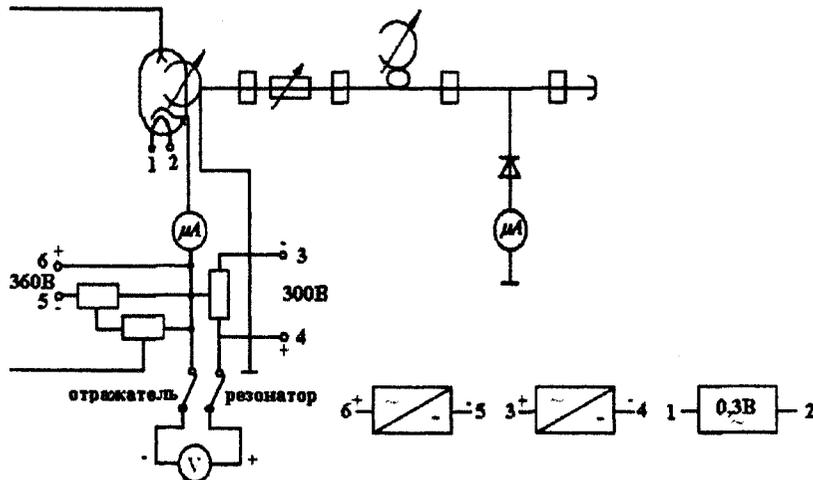


Рис. 7. Структурная схема установки для исследования отражательного клистрона

5. Методика определения зоны генерации и параметров электронной перестройки

Построение каждой из зон генерации возможно минимум по пяти измеренным значениям генерируемой мощности. Поэтому предлагается следующая методика измерений.

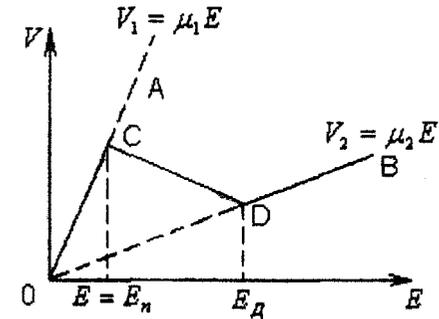


Рис. 2. Зависимость дрейфовой скорости от напряженности поля

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

$$\sigma = q\mu_2 n_2. \quad (4)$$

Так как переход электронов из нижней долины в верхнюю сопровождается уменьшением подвижности и дрейфовой скорости, то такой переход приводит к возникновению ДОС. Зависимость дрейфовой скорости от напряженности поля показана на рис. 2, Пунктирные прямые OA и OB соответствует формулам

$$V_1 = \mu_1 E,$$

$$V_2 = \mu_2 E.$$

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

$$V = f(E) \bar{V} = \frac{\mu_1 n_1 + \mu_2 n_2}{n_1 + n_2}. \quad (5)$$

Величина плотности тока при этом $j = qn_0 \bar{V}$.

После перехода всех электронов в верхнюю долину зависимость

n^2 соответственно, а полная концентрация носителей тока в образце $n_0 = n_1 + n_2$. Проводимость σ в стационарном состоянии записывается:

$$\sigma = q(\mu_1 n_1 + \mu_2 n_2), \quad (1)$$

где q - заряд электрона.

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

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

Поэтому соотношение концентраций электронов в долинах

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{N_2}{N_1} \exp\left(-\frac{\Delta\varepsilon}{kT}\right), \quad (2)$$

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

При комнатной температуре $\frac{N_2}{N_1} \approx 70$, следовательно, $\frac{n_2}{n_1} \approx 7 \cdot 10^{-8}$.

Таким образом, при отсутствии внешних воздействий и комнатной температуре проводимость

$$\sigma = q\mu_1 n_1. \quad (3)$$

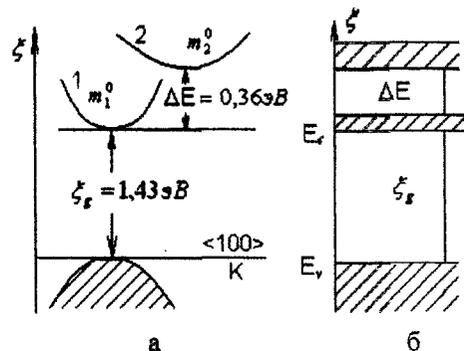


Рис. 1. Связь энергии электронов в валентной зоне, и зоне проводимости GaAs с волновым числом k

1. **Определение зоны генерации с минимальным значением n .** Изменяя значение напряжения на отражателе, можно найти зону с максимальным значением генерируемой мощности.

1. **Калибровка уровня относительной измеряемой мощности,**

2. **С помощью аттенюатора** выставляют при генерации клистрона в центре зоны с минимальным значением n значение мощности, соответствующее полной шкале микроамперметра.

3. **Измерение значений напряжений** на отражателе, соответствующих относительной мощности по уровням 0;1;0,5 для каждой из зон генерации.

Производится плавное изменение напряжения на отражателе. Фиксируются для каждой из зон значения мощности в центрах зон и соответствующие им напряжения на отражателе. Затем для каждой из зон производится отстройка до уровней 0,5 и 0 от максимального значения относительной мощности в центре каждой зоны и определяются соответствующие значения напряжений на отражателе.

При определении характеристики электронной перестройки следует повторить все три пункта, но в п. 3 производить измерения не только напряжения на отражателе, но и с помощью волномера, настраивая его по наибольшему спадаанию показания микроамперметра при значениях $P_{отн}$, равных 1; 0,5; и 0,1, определять частоту генерируемых клистроном колебаний.

ПРИМЕЧАНИЕ. Как видно из методики, можно совместить измерения и для определения зон генерации, и для определения характеристики электронной перестройки в случаях измерений по уровням 1 и 0,5 относительной мощности в каждой из зон генерации.

6. Порядок выполнения работы

1. Перед началом работы ознакомиться с рекомендованной литературой, методикой измерений и экспериментальной установкой (рис.7,8).

2. С разрешения преподавателя включить экспериментальную установку: тумблер «Сеть вкл.».

После прогрева катода в течение 2-3 мин подавать напряжения на отражатель и резонатор клистрона включением тумблеров «Пит. резонатора» и «Пит. отражателя».

3. При величине напряжения на резонаторе 260 В, изменяя $E_{отп}$ в

пределах от 0 до 250 В, определить зоны генерации клистрона. Отсчет номеров зон ведется со стороны больших значений $E_{отр}$.

4. Используя формулу (25), определить номера зон, Величину λ определить с помощью волномера, включенного в схему установки, Перемещая поршень, добиться уменьшения тока детектора I_D . При минимальном значении I_D отметить показания на шкале волномера и по графику или формуле $f(\text{ГГц}) = 8,5 + 0,07l(\text{мм})$ найти значение частоты.

Значение $E_{отр}$ определить по показаниям вольтметра.

5. Изменяя $E_{отр}$, найти центры зон, где I_D максимальный.

Установить с помощью аттенюатора, включенного в схему $I_D = 50$ дел.

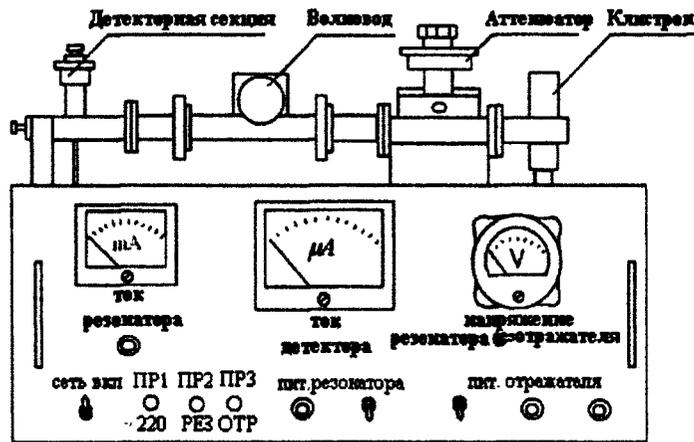


Рис. 8. Установка для исследования отражательного клистрона

6. Рассчитать ширину зон генерации между точками нулевой и половинной мощности, зная величину оптимального $E_{отр}$ для каждой из зон, по формулам:

$$\Delta E_{зоны}(0) \cong (E_p + |E_{отр}|) \cdot \frac{0,28}{n + 0,4},$$

$$\Delta E_{зоны}(0,5) \cong 0,75 \Delta E_{зоны}(0).$$

Построить зоны в координатах $P = f(E_{отр})$, где P - относительный уровень мощности. При расчете учесть асимметрию зон (сдвиг обоих

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИОДА ГАННА И ГЕНЕРАТОРА НА ЕГО ОСНОВЕ

Цель работы: Изучение устройства и принципа действия диода Ганна и генератора на его основе, а также экспериментальное исследование как самого диода, так и основных характеристик ганновского генератора, сопоставлении полученных результатов с выводами теории,

1. Принцип работы диода Ганна

1.1. Физические основы работы диода Ганна

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

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

На рис. 1.а показана связь энергии электронов в валентной зоне и зоне проводимости GaAs с волновым числом k . Зависимость энергии ϵ от k в зоне проводимости имеет два минимума (долины). Энергетический зазор между двумя долинами равен $\Delta\epsilon = 0,36 \text{ эВ}$. Наличие двух долин можно рассматривать как появление в зоне проводимости двух подзон, отличающихся подвижностью и эффективной массой электронов (рис. 1.б) Обозначим эффективную плотность состояний в нижнем минимуме через N_1 , эффективную массу электронов в этом минимуме m_1^* и подвижность μ_1 . Соответствующие величины для верхнего минимума обозначим через N_2, m_2^*, μ_2 .

Концентрация электронов в нижнем и верхнем минимумах равна n^1 и

7.4. Измерение расходимости луча ОКГ

Настроить резонатор ОКГ на основной тип колебаний излучения. Определить расходимость луча таким способом: измерить размер пятна излучения у зеркала, $a^0, 2a^0$ и a на расстоянии l . Тогда расходимость луча в двух плоскостях можно рассчитывать следующим образом:

$$\theta_x = \frac{2(a_x - a_{0x})}{l},$$

$$\theta_y = \frac{2(a_y - a_{0y})}{l}, \quad (8)$$

Отчет по работе оформляется в соответствии с требованиями, изложенными в работе [5],

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните устройство и принцип работы ОКГ.
2. Энергетическая диаграмма смеси He-Ne,
3. Поясните принцип действия оптического резонатора.
4. Поясните причины уширения естественной спектральной линии ОКГ.
5. Какие физические процессы влияют на степень монохроматичности и направленности излучения?
6. Поясните зависимость мощности излучения ОКГ от тока накачки.
7. Назовите области применения ОКГ.

краев зоны в сторону больших отрицательных напряжений).

Асимметрию приближенно можно подсчитать по формуле

$$\Delta = \frac{0,14}{n+0,4} \Delta E_{зоны}.$$

7. Изменяя напряжение на отражателе, определить ширину зон генерации между точками половинной мощности и нулевой мощности, а также найти оптимальные значения $E_{отп}$ зон. Данные записать в таблицу 1.

Таблица 1

$E_{отп}$ [В]					
$J_{отп}$ [дел]	max	0,5	0,1		

8. Рассчитать наименьшую и наибольшую длины волн, возможные при данном напряжении на резонаторе $E_p = 250$ В, $d = 0,25$ мм

$$\lambda_{\min} = \frac{750d}{\sqrt{E_p}}; \quad \lambda = \frac{2500d}{\sqrt{E_p}}.$$

9. При $E_p = 250$ В, для всех зон, изменяя напряжение на отражателе, определить с помощью волномера диапазон электронной перестройкой частоты для каждой зоны, Данные записать в таблицу 2,

Таблица 2

$E_{отп}$ [В]		
D [дел. волномера]		
f [ГГц]		

10. Построить по данным таблицы 1 и 2 графики: $f = F(E_{отп})$ и $J_{отп} = F(E_{отп})$.

11. Рассчитать диапазон электронной настройки клистрона для всех зон по формуле

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{2\theta_H} \operatorname{tg} \left[\frac{2\pi(n+0,75) - \theta_d}{E_p + E_{отп}^{ант}} \Delta E_{отп} \right],$$

$$Q_H = 200, \quad \theta_d = \frac{2\pi f d}{5,93 \cdot 10^8 \sqrt{E_0}}, \quad d = 0,25 \text{ мм}.$$

12. Рассчитать крутизну электронной настройки в центрах всех зон по формуле

$$S_f = \frac{f_p}{2Q_H} \cdot \frac{2\pi(n+0,75) - \theta_d}{E_p - E_{отп}^{отп}}$$

13. Теоретические и экспериментальные результаты проанализировать и сделать выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Устройство и назначение отражательного клистрона.
2. Принцип группирования электронов по скорости.
3. Области генерации клистрона.
4. Условия самовозбуждения отражательного клистрона.
5. Физический смысл коэффициента связи между электронным потоком и электромагнитным полем.
6. Поясните зависимость частоты колебаний от напряжения на резонаторе.
7. Поясните зависимость частоты колебаний от напряжения на отражателе.
8. Поясните зависимость мощности колебаний от напряжения на отражателе.
9. Диапазон электронной перестройки.
10. Крутизна электронной перестройки.
11. Баланс фаз в отражательном клистроне.
12. Способы перестройки частоты колебаний в отражательном клистроне.
13. Конструкции отражательных клистронов.

7.2. Исследование зависимости мощности от тока накачки

Для исследования зависимости мощности излучения ОКГ от тока накачки используются: **He-Ne** генератор, фотодиод, расположенный на оптической скамье, ламповый вольтметр. Для выполнения задания необходимо направить луч ОКГ на фотодиод. Установить ток накачки 35 мА (ток накачки устанавливается по шкале прибора, расположенного на блоке питания). Затем, уменьшая ток накачки через 3 мА, регистрировать показания лампового вольтметра. Ток накачки уменьшать до полного срыва генерации ОКГ, Данные занести в таблицу L.

Таблица 1

I, мА									
U, мВ									

По данным табл. 1 построить график зависимости $U = f(I)$ в относительных единицах, считая, что P пропорциональна U .

7.3. Измерение длины волны излучения

Для измерения длины волны необходимо на оптической скамье вместо экрана установить измерительную линейку, на которой установлена дифракционная решетка и движок со шкалой, Направить луч ОКГ через дифракционную решетку на шкалу движка, Тогда на шкале по обе стороны от центральной линии будут видны: симметричные дифракционные спектры относительно главного максимума излучения, Отсчитать по шкале движка расстояние d от середины шкалы до ближайшего дифракционного спектра, Затем по шкале измерительной линейки определить расстояние от движка до дифракционной решетки l . Величины d и l измерять в миллиметрах, Вычислить длину волны излучения по формуле

$$\lambda = \frac{d}{l} a, \quad (7)$$

где $a = 0,01$ мм.

Окончательный результат получить в ангстремах (А).

4. Повернуть без нажима ручку регулировки тока трубки «Рег.тока» против часовой стрелки до упора.

5. Включить тумблер, расположенный справа. По загоранию сигнальной лампочки над этим тумблером убедиться, что анодное напряжение подается на прибор.

6. Медленно поворачивая ручку «регулировка тока» по часовой стрелке и одновременно с этим нажимая и опуская кнопку «Поджиг», зажечь разряд в трубке, что будет видно по свечению в отверстиях кожуха и по появлению разрядного тока, который регистрируется миллиамперметром на передней панели блока питания. Возникновению газового разряда предшествует вспышка разряда, которая наблюдается при отпускании кнопки «Поджиг» в отверстиях прибора. Поворот ручки «Регулировка тока» дальше по часовой стрелке при нажатии и отпускании кнопки приводит к появлению разряда. Регулируя анодное напряжение, установить значение тока разряда 25 мА.

7. После выполнения всех операций появляется луч красного цвета, исходящий из торцов прибора.

8. В том случае, если ручка «Регулировка тока» повернута по часовой стрелке до упора, а нажатие и отпускание кнопки «Поджиг» не приводит к появлению разряда, следует снизить анодное напряжение, повернув ручку «Регулировка тока» против часовой стрелки до упора; выключить оба тумблера на передней панели блока питания и пригласить преподавателя.

7, Порядок выполнения работы

7.1. Исследование структуры поля ОКГ

Для исследования структуры поля ОКГ используются; ОКГ, линза и экран, установленные на оптической скамье.

Включить ОКГ в соответствии с требованиями п. 6. Направить луч ОКГ через линзу на экран, зарисовать с экрана контур полученного пятна в рабочую тетрадь, Вращением винтов, расположенных с левой стороны ОКГ, получить на экране различные по форме конфигурации пятен, зарисовывая их в рабочую тетрадь. Если при вращении микровинта в какую-либо сторону излучение ОКГ исчезает, необходимо вращением в обратную сторону добиться восстановления генерации. Получить 4÷5 картин распределения доля излучения ОКГ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ТИПА (ЛБВ) О

Цель работы: изучение устройства и принципа действия ЛБВ, экспериментальное исследование ее характеристик.

1. Устройство ЛБВ типа О

Устройство лампы бегущей волны типа О показано на рис.1. Электронная пушка, состоящая из катода 4, фокусирующего электрода 5 и двух анодов 6 и 7, создает тонкий пучок электронов, летящий вдоль оси лампы, скорость которого регулируется напряжением E_{cn} , а величина тока регулируется напряжениями E_k и E_a .

Пучок электронов проходит вдоль оси спирали (замедляющей системы) и попадает на коллектор 3.

Замедляющая система возбуждается СВЧ колебаниями, поступающими со входа лампы, колебания СВЧ распространяются вдоль спирали в виде замедленной волны и взаимодействуют с электронным пучком, проходящим вдоль оси спирали. Для стабилизации работы лампы вводится специальный поглотитель СВЧ энергии 10, который подавляет электромагнитные волны и, таким образом, осуществляет развязку входа и выхода ЛБВ-О.

С помощью магнитного поля соленоида или набора магнитных колец осуществляется фокусировка электронного пучка на протяжении всего его движения вдоль оси спирали.

2. Принцип действия ЛБВ типа О

В лампах бегущей волны используется принцип непрерывного взаимодействия электронов с полем электромагнитной волны, распространяющейся по волноводной системе со скоростью электронного потока.

В нашем случае волноводной системой служит спираль и внешний проводящий цилиндр. Фазовая скорость распространения электромагнитной волны, имеющей продольную составляющую вектора электрического поля вдоль оси системы, зависит от шага спирали и при воздушном диэлектрике замедлена по сравнению со скоростью света в число раз, примерно равное отношению длины витка к шагу спирали,

Коэффициент замедления m примерно равен отношению длины витка к шагу спирали

$$m = \frac{c}{V_\phi} = \frac{\lambda}{\Lambda} = \sqrt{\left(\frac{2\pi R}{L}\right)^2 + 1}, \quad (1)$$

где λ - длина волны при ее распространении вдоль провода спирали;
 Λ - длина волны при ее распространении вдоль оси спирали;
 R - радиус спирали;
 L - шаг спирали.

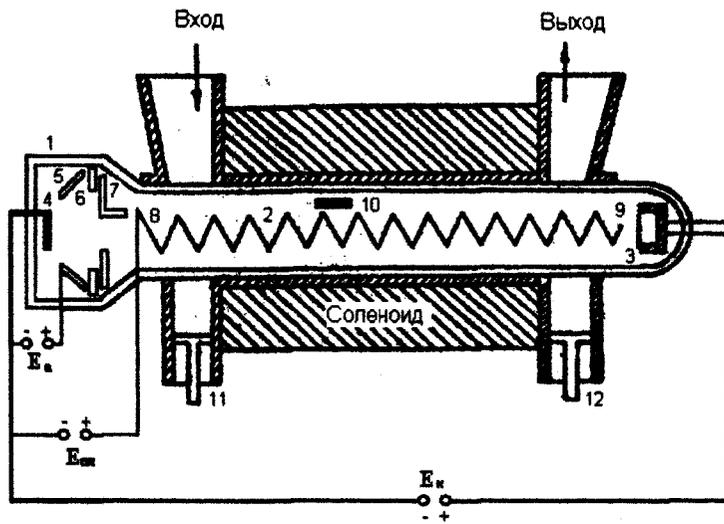


Рис. 1. Устройство ЛБВ-О:

- 1 – колба лампы, 2 – спираль, 3 – коллектор, 4 – катод,
 5 – управляющий (фокусирующий) электрод, 6 – первый анод,
 7 – второй анод, 8, 9 – элементы связи с волноводами,
 10 – поглотитель, 11, 12 – согласующие поршни

В ЛБВ типа О электронный поток движется под воздействием электрического поля, и при взаимодействии электронов с полем меняется кинетическая энергия электронов. Обратимся к пространственно-временной диаграмме на рис. 2.

Газоразрядная трубка посредством концевых зажимов крепится в кожухе. Кожух помещается в корпусе прибора. Крепление кожуха осуществляется в двух плоскостях с помощью четырех винтов в каждой плоскости. Посредством этих винтов кожух может быть установлен необходимым образом относительно корпуса. К торцам с помощью винтов крепятся насадки, к которым цапгами и пружинами прикрепляются зеркала.

Основные технические данные ОКГ:

- длина волны излучения	$\lambda = 6328 \text{ \AA}$
- выходная мощность	$P = 25 \text{ мВт}$
- рабочий ток разряд	$I = 20 - 40 \text{ мА}$
- напряжение анода (при горении)	$U_a = 1,5 + 1,7 \text{ кВ}$
- напряжение зажигания разряда	$U_{\text{заж.}} = 15 + 17 \text{ кВ}$
- плоский угол расходимости луча	не более 10 угл. мин.
- расстояние между зеркалами	$L = 1100 \text{ мм}$
- радиус кривизны сферического зеркала	$R = 2000 \text{ мм}$
- коэффициент пропускания плоского зеркала	$-(2 \pm 0,5)\%$
- коэффициент пропускания сферического зеркала	$-(0,1 \pm 0,05)$
- коэффициент усиления газоразрядной трубки за один проход	$-(7,7 \pm 0,8)\%$
- интервал рабочих температур окружающей среды	от -40 до $+70^\circ\text{C}$
- долговечность	- не менее 500 ч

Питание генератора производится от специального блока-стабилизатора напряжения. Основные данные блока: стабилизированное рабочее напряжение 0,8-1,7 кВ; мощность, потребляемая от сети переменного тока (220 В, 50 Гц), - не более 500 Вт; коэффициент пульсаций выходного напряжения - 0,01%.

6. Подготовка ОКГ к работе

1. Перед началом работы тщательно ознакомиться с описанием газового ОКГ.
2. Перед включение прибора убедиться внешним осмотром, что оба тумблера блока питания находятся в положении «Выключено».
3. Включить тумблер, расположенный слева на передней панели блока питания, по загоранию сигнальной лампочки над этим тумблером убедиться, что подается напряжение накала на катод прибора. Прогреть лампы стабилизатора напряжения и газоразрядную трубку ОКГ в течение 5 минут.

5. Устройство ОКГ на смеси He-Ne

В работе исследуется газовый ОКГ. Основными элементами прибора являются газоразрядная трубка, оптический резонатор, состоящий из сферического и плоского зеркал и блока питания.

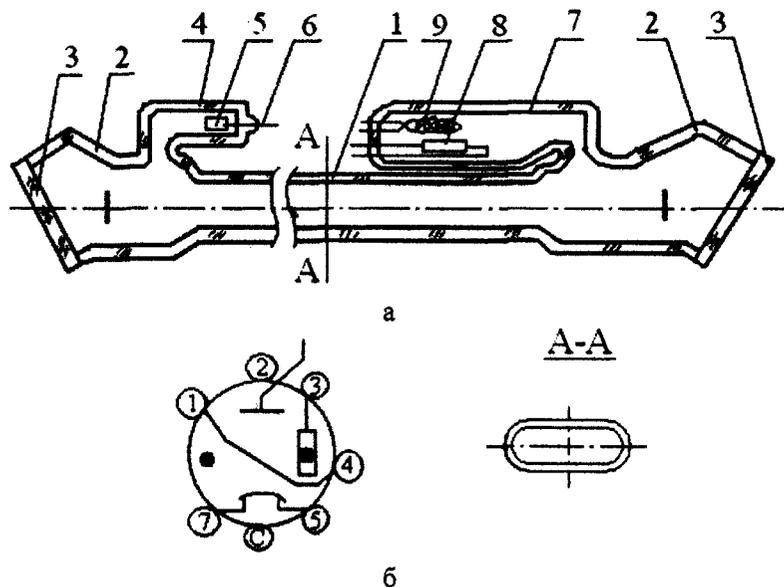


Рис. 5. Газоразрядная трубка газового ОКГ: а – схематическое изображение; б – схема соединения электродов:
1 – стеклянный капилляр, 2 – полусферы, 3 – выходные окна, 4, 7 – баллоны, 5 – анод, 6 – наружный выход, 8 – подогревный геттер, 9 – прямоканальный катод

Газоразрядная трубка (рис. 5) состоит из плоского стеклянного капилляра 1 и двух полусфер 2, на которых под углом Брюстера закреплены выходные окна 3. Выходные окна изготовлены из оптического стекла, отполированы с высокой степенью точности. Внутри трубки, вблизи одной из полусфер, расположен баллон 4, в котором находится анод 5 с наружным выходом 6. Около противоположной полусферы имеется баллон 7, в котором на обычной ее штырьковой ножке смонтированы подогревный геттер 8 и прямоканальный катод 9. Схема соединения электродов трубки с выводами приведена на рис. 5,б.

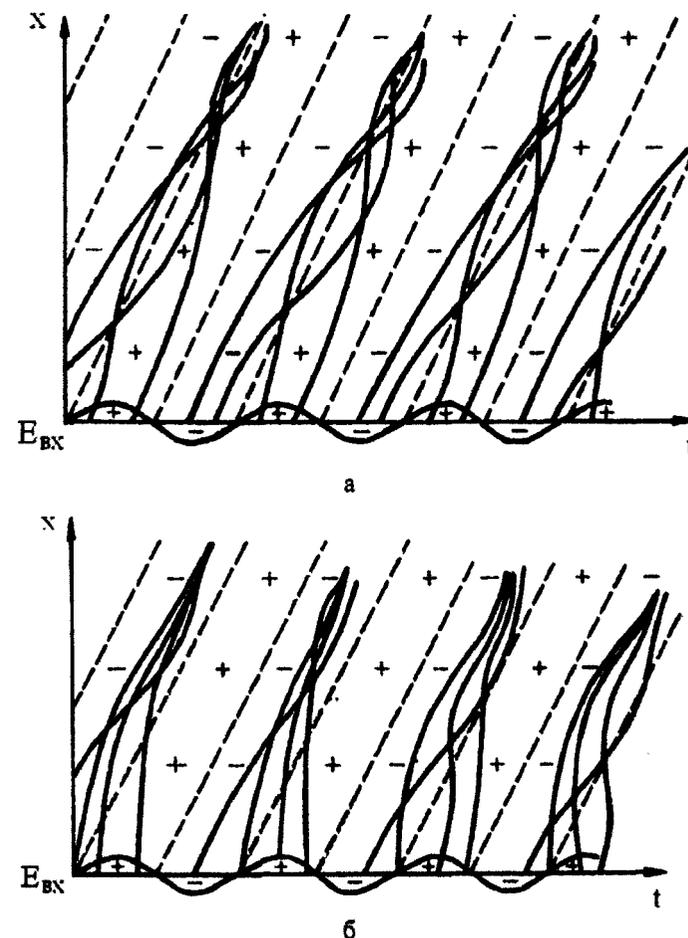


Рис. 2. Пространственно-временные диаграммы ЛВВ для $v_{гг} = v_{ф}$ (а) и $v_{гг} > v_{ф}$ (б)

Вдоль оси абсцисс откладывается время t , вдоль оси ординат – расстояние x от начала волноводной системы, где действует электромагнитное поле напряженностью $E_{вх}$, создаваемое входным сигналом. Напряженность электрического поля входной волны периодически меняется во времени. Положительные и отрицательные полупериоды напряженности электрического поля распространяются

вдоль замедляющей системы с фазовой скоростью v_ϕ . На плоскости пространственно-временных диаграмм образуются области ускоряющих (+) и тормозящих (-) участков, разграниченные на рис. 2 штриховыми линиями. Электроны движутся со скоростью $v_{эл}$. При $v_{эл} = v_\phi$ (рис. 2, а) электроны группируются вблизи границы, отделяющей тормозящее поле от ускоряющего. Поэтому в среднем обмен энергией между электронами и полем отсутствует, а усиление колебаний (как и ослабления) не происходит. При некотором превышении скорости электронов над скоростью поля ($v_{эл} > v_\phi$) большая часть электронов оказывается сгруппированной в областях тормозящего поля (рис. 2, б). Здесь они отдают энергию полю, и происходит усиление бегущей волны электромагнитного поля.

Если скорость электронов несколько ниже скорости электромагнитной волны, то большая часть электронов группируется в областях ускоряющего поля. Электроны, ускоряясь, отбирают энергию от поля, вызывая затухание волны по мере ее распространения. Наконец, если скорости электронов и поля значительно различаются, усиления также не происходит, поскольку электроны быстро переходят из одной области в другую, то отдавая, то приобретая энергию, в результате чего в среднем обмен энергией практически отсутствует.

Таким образом, усиление при взаимодействии электронного потока и поля бегущей волны возможно при относительно близких скоростях $v_{эл}$ и v_ϕ . Оптимальное значение начальной скорости электронов $v_{эл} = (1,1 \dots 1,2)v_\phi$. По мере передачи энергии электронами их скорость замедляется, и при равенстве скоростей усиление волны прекращается.

Одной из важнейших характеристик замедляющей системы является зависимость фазовой скорости от частоты $v_\phi(\omega)$, т. е. дисперсионная характеристика. В зависимости от типа системы и номера пространственной гармоники в рабочей полосе частот фазовая скорость может уменьшаться с ростом частоты (нормальная дисперсия) или увеличиваться (аномальная дисперсия). Дисперсия вызывает ограничения в полосе усиливаемых частот, поскольку с изменением фазовой скорости поля нарушается условие его оптимального взаимодействия с электронным потоком. Широкополосность ЛБВ зависит, кроме того, от условий согласования входного и выходного устройств с замедляющей системой. К тому же из-за неидеального согласования возникает обратная связь, существенно влияющая на частотные свойства ЛБВ.

прямой, проходящей через их центры кривизны, и удовлетворяют условию

$$0 \leq \left(1 - \frac{L}{R}\right) \leq 1, \quad (4)$$

где L - расстояние между зеркалами; R - радиус кривизны зеркал.

Радиус кривизны зеркал берется со знаком «+», если зеркало обращено вогнутостью к другому зеркалу, и со знаком «-», если

Дифракционные потери тем меньше, чем меньше $\left(1 - \frac{L}{R}\right)^2$, и

достигают минимума для конфокального резонатора, когда $L=R$. Когда активная среда создается внутри цилиндрической разрядной трубки, наилучшие условия для генерации будут при совпадении оси симметрии зеркал (проходящей через их центры кривизны) с осью разрядной трубки.

Из геометрического рассмотрения хода луча следует, что в случае, когда радиус кривизны зеркал больше расстояния между зеркалами ($R > L$), предельный угол поворота зеркал

$$\Delta\alpha = \frac{d}{2R}, \quad (5)$$

где d - внутренний диаметр разрядной трубки,

Чем меньше диаметр трубки и чем больше радиус кривизны зеркал, тем выше требуемая точность юстировки. Для плоских зеркал $R = \infty$ $\Delta\alpha \rightarrow 0$, то есть требуемая точность юстировки резко возрастает (для оценки ее уже не хватает одних геометрических соображений), Для случая $\frac{L}{2} \leq R \leq L$ предельный угол поворота зеркал

$$\Delta\alpha = \frac{d(2R - L)}{2RL}. \quad (6)$$

Таким образом, чем меньше $d(2R - L)$ по сравнению с RL , тем выше должна быть точность юстировки. В случае концентрической установки зеркал ($2R = L$) требования к точности юстировки (аналогично случаю плоских зеркал) резко возрастают. Например, для ЛГ-75: $d=10$ мм, $R_1=2000$ мм, $R_2=\infty$, $L=1100$ мм, получаем $\Delta\alpha = \frac{10}{2 \times 2000} = 8'$, то есть требуемая точность юстировки составляет несколько угловых минут.

обычно 5-6. При возбуждении в газовом генераторе нескольких поперечных типов колебаний, каждый из которых генерируется на 5-6 продольных частотах, спектр излучения становится сложным. Спектральная ширина линии излучения одной моды $\Delta\nu_{\text{лиом}}$ может иметь величину от нескольких килогерц до одного герца. Изменение структуры поля по мере увеличения мощности накачки можно наблюдать визуально на экране.

4. Оптический резонатор

Резонатор служит для увеличения напряженности электромагнитного поля (амплитуды световых колебаний), которое вызывает вынужденное излучение. Основной характеристикой резонатора является его добротность для данной длины волны. Добротность резонатора определяется отношением энергии электромагнитного поля, запасенной внутри резонатора, к потерям этой энергии за время, равное периоду колебаний. Таким образом, порог генерации, а также и мощность генератора зависят от добротности резонатора,

В идеальном лазере рассматривают два типа потерь; дифракционные и вследствие пропускания зеркал. В реальном лазере к этим потерям добавляется еще целый ряд: поглощение в зеркалах, потери на окошках разрядной трубки и поглощение в пространстве, не занятом активной средой (в лазерах с внешними зеркалами), и, наконец, потери, связанные с несовершенством поверхностей зеркал и неправильным их положением.

Чтобы добротность резонатора могла быть достаточно высокой, расположение и форма сферических зеркал должны удовлетворять следующему геометрическому условию: любой луч света, проходящий между зеркалами внутри некоторой области, ограниченной двумя зеркальными и так называемой оптической поверхностью, должен оставаться внутри этой области, сколько бы отражений он не испытывал от зеркал. Другими словами, луч света, испытывающий многократные отражения от двух зеркал, достигнув некоторых предельных значений угла с осью системы и удаления от нее, должен возвращаться опять к оси, никогда не выходя из некоторой области пространства вблизи оси. Не всякая система двух зеркал обладает такими свойствами. Так, например, два сферических зеркала, обращенные выпуклостью друг к другу, не обладают этими свойствами.

В теории резонаторов показывается, что два сферических зеркала будут обладать вышеуказанными свойствами, если они расположены на

3. Энергетические соотношения в ЛБВ типа О

В ЛБВ типа О (рис. 1) входной сигнал усиливается за счет взаимодействия электронов с полем основной пространственной гармоники. Анализ этого явления в простейшем случае возможен на базе линейной теории ЛБВ. Рассмотрим основные положения этой теории.

Предположим, что переменные составляющие токов, скоростей и напряжений малы по сравнению с продольной координатой x , отсчитываемой от начала замедляющей системы. Взаимодействие электронов с полем приводит к тому, что амплитуда первой гармоники конвекционного тока IK^1 зависит от амплитуды поля E^m , которая в свою очередь связана с током IK^1 . Составив уравнения $IK^1=f_1(E^m)$ и $E^m = f_2(IK^1)$ и решив их совместно, можно получить так называемое самосогласованное решение, учитывающее обе стороны процесса взаимодействия поля и электронного потока.

В результате такого рассмотрения оказывается, что усиление ЛБВ зависит от параметра $C = \sqrt{\frac{I_0 Z_0}{4E_{сп}}}$, где I_0 - ток луча; Z_0 - сопротивление

связи замедляющей системы с электронным потоком (зависит от конструкции ЛБВ), $E_{сп}$ - напряжение на замедляющей системе. Обычно $C=0,2, \dots, 0,3$. Если скорость электронов в $(1+C/2)$ раз больше скорости волны, то амплитуды напряженности поля E^m , а также первой гармоники тока IK^1 вдоль системы возрастают по экспоненциальному закону. При большой длине замедляющей системы в ЛБВ типа О возникает нелинейный режим: экспоненциальный закон нарушается, а E^m уменьшается по амплитуде из-за влияния пространственного заряда и взаимного расталкивания электронов.

Коэффициент усиления ЛБВ-0 $K_{л}$ можно вычислить на основе линейной теории как отношение амплитуд напряженности поля на выходе

и на входе лампы. В результате получается $K_{л} = \frac{1}{3} \exp\left[\frac{\sqrt{3}\omega C \ell}{2v_{эл}}\right]$, где ℓ -

геометрическая длина пространства взаимодействия электронов с полем.

Обычно $K_{л}$ выражают в децибелах: $K_{л}(дБ) = 20 \lg K_{л} = -9,54 + 47CN$, где

$N = \frac{\beta_{эл} \ell}{2\pi} = \frac{\ell}{\lambda}$ - электрическая длина пространства взаимодействия;

$$\beta_{эл} = \frac{\omega}{v_{эл}}$$

При увеличении амплитуды входного сигнала возникает нелинейный режим, при котором максимальная плотность конвекционного тока ограничена пространственным зарядом и коэффициент усиления падает. При значительной амплитуде сигнала выходная амплитуда уменьшается из-за перегруппировки электронов (рис. 3).

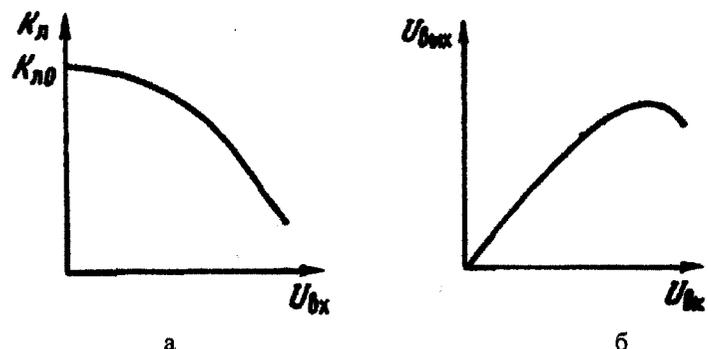


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления ЛБВ типа О (а) и амплитуды выходного сигнала (б) от амплитуды входного сигнала

Электронный КПД $\eta_s = \frac{P_1}{P_0}$ ЛБВ типа О определяется той долей

кинетической энергии электронов $\frac{mv_{эл}^2}{2}$, которую может передать электронный поток высокочастотному полю. Начальная скорость электронов при $C=0,2..0,3$ на 10... 15% больше фазовой скорости волны. При передаче энергии полю электроны тормозятся, и при равенстве скоростей усиление прекращается. Отсюда можно оценить КПД соотношением

$$\eta_s = \frac{mv_{эл}^2/2 - mv_{\phi}^2/2}{mv_{\phi}^2/2} \approx 2 \frac{v_{эл} - v_{\phi}}{v_{\phi}} \quad (2)$$

Из линейной теории ЛБВ следует, что $v_{эл} = v_{\phi} \left(1 + \frac{C}{2}\right)$. Учитывая, что

$C \ll 1$, получаем $\eta_s \approx C$.

Таким образом, теоретический КПД для ЛБВ-О не превышает 10... 15%, Реальный КПД еще ниже.

круглых зеркал (рис. 4). Каждому поперечному колебанию соответствует множество продольных типов, отличающееся числом полуволн q , укладываемых на длине резонатора, Индекс q называют *продольным* или *аксиальным*, а индексы m и n - *поперечными*. В оптическом диапазоне $q \gg m, n$. Поперечные колебания можно рассматривать как результат сложения плоских волн, распространяющихся под определенными углами к оси резонатора. Мода TEM_{00q} называется *основной*. Чем больше индексы m и n , тем более высоким считается тип колебаний.

Условие существования продольных типов колебаний имеет вид;

$$q = \frac{\lambda}{2n_1} = L, \quad (3)$$

где $q = 1, 2, 3, \dots$; λ - длина волны излучения; L - длина резонатора; n^1 -показатель преломления среды.

Из формулы (3) следует, что частотное расстояние между продольными типами колебаний составляет, например, при $L = 100 \text{ см}$, $\Delta \nu_{\text{люм}} = 150 \text{ МГц}$. Количество продольных типов колебаний, которые могут возбудиться в газовом ОКГ, определяется шириной линии люминесценции активного вещества, степенью инверсии населенностей (мощностью накачки) и потерями в резонаторе.

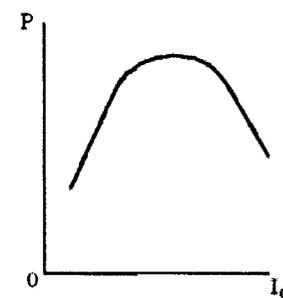


Рис. 3. Зависимость мощности излучения от тока накачки

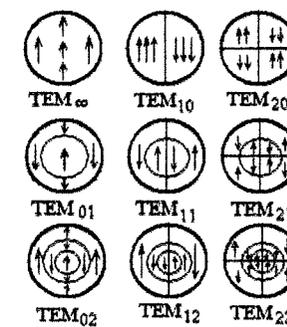


Рис. 4. Структура электрического поля простейших типов колебаний для круглых зеркал

В газовом генераторе ширина линии люминесценции неона составляет $\lambda = 0,68 \text{ мкм}$, $\Delta \nu_{\text{люм}} = 1000 \text{ МГц}$. Число продольных типов колебаний в таком генераторе с $L = 100 \text{ см}$ и хорошим усилением в среде

при токах 2-20 мА), возникает генерация. Дальнейшее увеличение тока приводит к возрастанию мощности генерации,

В условиях большого разрядного тока, когда концентрация электронов в плазме столба велика, начинают сказываться процессы ступенчатого электронного возбуждения нижних рабочих состояний $2P$ и $3P$ с метастабильного уровня IS . Скорость этого процесса приблизительно пропорциональна квадрату концентрации электронов, в то время, как скорость прямого возбуждения приблизительно линейно связана с концентрацией электронов. В результате дозаселения нижних рабочих состояний инверсия снижается, мощность генерации падает, и при токах порядка 30-40 мА генерация срывается.

3. Монохроматичность и направленность лазерного излучения

Излучение газового ОКГ обладает такими ценными качествами, как высокая монохроматичность и направленность. Диаграмма направленности газового лазера при определенных условиях может приближаться к дифракционному пределу, определяемому отношением длины волны излучения к диаметру выходной апертуры, В обычных же условиях расходимость излучения колеблется в пределах от нескольких единиц до десятков минут, Для газообразного активного вещества относительная величина ширины линии люминесценции составляет 10^{-6} . Уширение естественной спектральной линии происходит за счет давления излучающих частиц (эффект Доплера), за счет соударения частиц между собой и со стенками сосуда. Ширина спектральной линии $\Delta\nu_{\text{лин}}$ атома неона определяет область частот, в которой может иметь место генерация света при инверсии населенностей соответствующего перехода. Из этой относительно широкой спектральной линии оптический резонатор вырезает гораздо более узкие линии, соответствующие собственным частотам резонатора (рис. 2),

В ОКГ применяют резонаторы различных типов: с плоско-параллельными отражателями, сферическими и резонаторы, образованные плоским и сферическим зеркалами. В открытом резонаторе возбуждаются ТЕМ типы, или моды колебаний, которые характеризуются тремя целыми числами m, n и q . Поперечным типом колебаний называют такой, который характеризуется определенной структурой поля на поверхностях зеркал резонатора и фиксируется целыми числами m и n , определяющими число изменений знака поля в направлении двух сторон для прямоугольных зеркал и в направлениях по углу и вдоль радиуса для

4. Регулировочные характеристики усилителей на ЛБВ типа О

Полоса частот, в пределах которой изменение коэффициента усиления определяется в первую очередь, не превышает заданных значений, определяется в первую очередь качеством согласования замедляющей системы на входе и выходе, а также ее дисперсией. Остановимся на влиянии последнего фактора на полосу. Усиление в ЛБВ возможно, если фазовая скорость волны равна $(0,8... 1) v_{\text{эл}}$. При заданном напряжении $E_{\text{сп}}$ начальная скорость электронов $v_{\text{эл}} = \sqrt{\frac{2eE_{\text{сп}}}{m}}$. Поэтому при изменении $v_{\text{эл}}(\omega)$ в результате дисперсии условия взаимодействия электронов с полем нарушаются, и усиление падает, Кроме того, из-за влияния отражений внутри лампы или в тракте связи с нагрузкой на одних частотах обратная связь положительная, и K^L возрастает, а на других отрицательная, и K^L уменьшается..

Напряжение $E_{\text{сп}}$ задает скорость электронов $v_{\text{эл}}$, которая при фиксированной на заданной частоте фазовой скорости должна лежать в узких пределах $(1,3... 1,1) v_{\text{ф}}$. Поэтому усиление ЛБВ в зависимости от $E_{\text{сп}}$ имеет вид зоны (рис. 4, а), максимум которой соответствует такому $E_{\text{спопт}}$, при котором $v_{\text{спопт}} \approx 1,15v_{\text{ф}}$. Ширина зоны составляет 5... 10% от $E_{\text{спопт}}$. В результате взаимодействия электронов с полем фазовая скорость волны в замедляющей системе зависит от начальной скорости электронов и возрастает с увеличением последней, Поэтому фазовый сдвиг в усилителе на ЛБВ $\varphi = \varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}}$ уменьшается с ростом $E_{\text{сп}}$ (рис. 4, б). В обычных ЛБВ в пределах зоны усиление φ меняется на $(2...3) 2\pi$ рад, в специальных фазовращательных ЛБВ с малым K^L - на $(5...6) 2\pi$ рад, В нелинейном режиме фазовый сдвиг в ЛБВ зависит также от амплитуды входного сигнала.

Промышленностью выпускается ЛБВ-0 мощностью от долей милливатта до сотен киловатт в диапазоне частот от 0,5 до 20...40 ГГц. Полоса пропускания современных ЛБВ-0 от десятков процентов до нескольких октав. Коэффициент усиления достигает 30...60 дБ. Разработаны специальные маломощные ЛБВ с коэффициентом шума 1,2...5, а также умножительные, ограничительные, фазовращательные лампы бегущей волны.

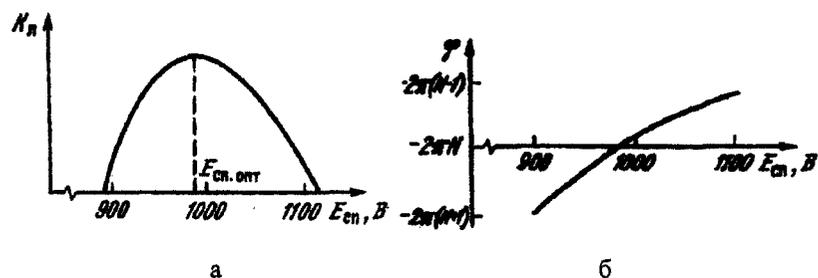


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления (а) и фазового сдвига в ЛБВ (б) от напряжения на замедляющей системе

5. Описание установки и методика измерений

Используемая в данной лабораторной работе установка предназначена для исследования зависимости коэффициента усиления ЛБВ от режимов её питания, длины волны и мощности входного сигнала.

Схема установки и блоки питания и управления приведены на рис.5, 6 и 7, Питание лампы осуществляется от специального стабилизированного выпрямителя, позволяющего регулировать напряжение спирали (ускоряющее) $E_{сп}$ и E_a - напряжение электронной пушки, управляющее током спирали. В блоке питания имеются измерительные приборы для контроля $E_{сп}$ и E_a , а в блоке управления имеется прибор для контроля I^3 - тока замедляющей системы.

Высокочастотный тракт установки состоит из отрезков волновода прямоугольного сечения 23x10 мм, двух электромагнитных волноводных переключателей, аттенюатора, детекторной секции.

резонаторе с металлическими зеркальными покрытиями. Этот вид генерации реализуется в наиболее широком диапазоне изменения параметров разряда.

Значительно труднее осуществить генерации на переходе $2S_2 \rightarrow 2P_4$ ($\lambda = 1,15$ мкм). Усиление на этом переходе незначительно (до 10-12% на 1 м) и необходимо применение диэлектрических зеркал. Наиболее «капризен» переход $3S_2 \rightarrow 2P_4$ ($\lambda = 0,63$ мкм): здесь наблюдается наименьшее усиление (4-5% на 1 м). В связи с тем, что длина волны излучения на этом переходе лежит в видимом диапазоне и соответствует области наибольшей чувствительности высокочастотных приемников излучения — фотокатодов, этот вид генерации в гелий-неоновой смеси получил наибольшее прикладное распространение.

В газовом разряде происходят и процессы, приводящие к ослаблению индуцированного излучения. Электроны в разряде обладают кинетической энергией, достаточной для возбуждения атомов неона из основного состояния в состояния $1S^1$, $2P^1$ и $3P^1$ состояния, а также имеет место процесс передачи возбуждения от атомов неона в состояниях $2S$ и $3S$ к невозбужденным атомам гелия. Для того, чтобы ослабить эти процессы, уменьшают концентрацию неона в рабочем объеме по сравнению с концентрацией гелия (для $\lambda = 0,63$ мкм составляют смесь, в которой $P_{He} = 1$ мм рт.ст. $P_{Ne} = 0,1$ мм рт.ст.).

Эффект создания инверсии и генерации в значительной степени зависит от условий разряда:

- 1) тока разряда,
- 2) общего давления смеси,
- 3) соотношения компонентов смеси,
- 4) диаметра разрядной трубки,
- 5) формы сечения разрядной трубки.

2. Зависимость мощности излучения ОКГ от тока накачки

При изменении разрядного тока меняется мощность генерации гелий-ионного ОКГ (рис. 3), Существенную роль играют процессы ступенчатого возбуждения Ne из состояния $1S$ в состояния $2P$ и $3P$. При небольших токах (до 100-200 мкА), когда процессами ступенчатого возбуждения можно пренебречь, возрастание населенности рабочих состояний $2S$ и $3S$ происходит примерно пропорционально току. Когда величина инверсии превысит пороговое значение (это происходит обычно

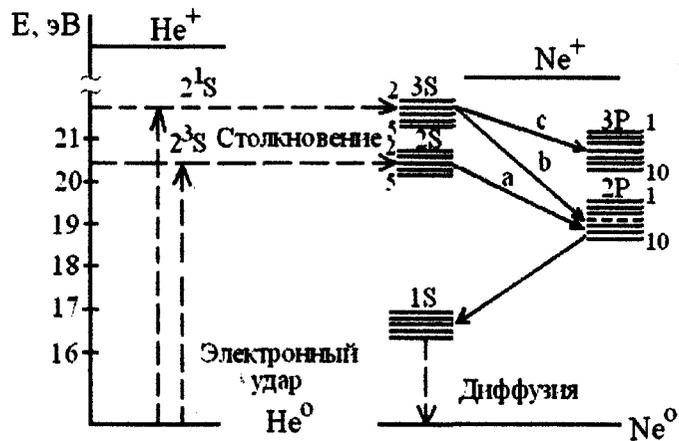


Рис. 1. Диаграмма энергетических уровней гелия и неона

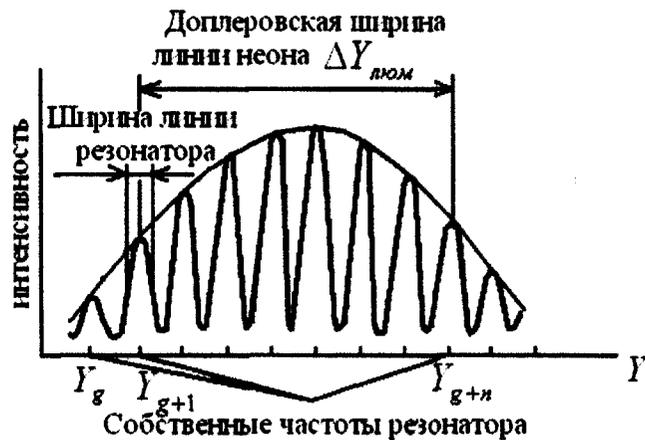


Рис. 2. Форма и ширина спектральных линий излучения газового ОКГ

Все три вида генерации наблюдаются примерно в одинаковых условиях разряда и характеризуются аналогичными зависимостями мощности генераций от параметров разряда, Генерация на одной из этих линий резко ослабляет одновременную генерацию на двух других линиях, так как она уменьшает инверсию населенностей между соответствующими уровнями двух других переходов, Наибольшее усиление, соответствующее переходу, $3S_2 \rightarrow 3P_4$ ($\lambda = 3,39$ мкм), достигает 20 дБ/м. Генерация на этом переходе возбуждается наиболее легко даже в

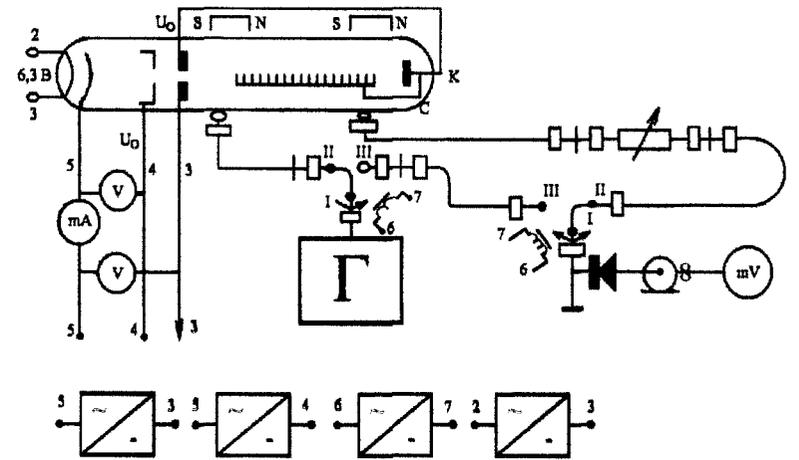


Рис. 5. Принципиальная схема установки для исследования ЛБВ-О

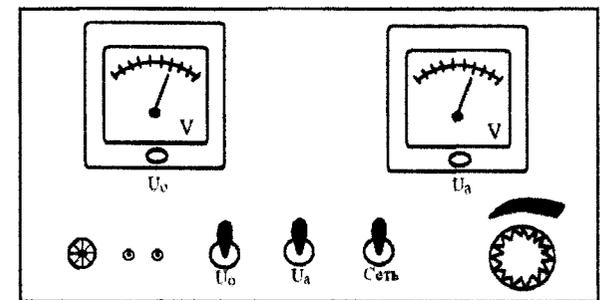


Рис. 6. Блок питания ЛБВ

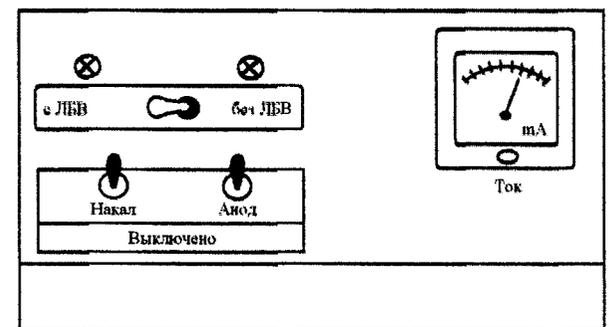


Рис. 7. Блок управления

Переключатели позволяют пропускать входной сигнал с генератора через ЛБВ либо направлять его непосредственно в выходную детекторную секцию, между выходом ЛБВ и детекторной секцией включен калиброванный аттенюатор.

Уравнивая с помощью этого аттенюатора мощности, поступающие на детекторную секцию со входа и выхода ЛБВ, можно по показаниям шкалы аттенюатора определить коэффициент усиления.

Так как в работе используется в качестве индикатора мощности на выходе детекторной секции прибор переменного тока (У2-4) или В3-13, то генератор СВЧ (ГЗ-14А, ГС-626 или Г4-32А) должен работать в режиме «Меандр»,

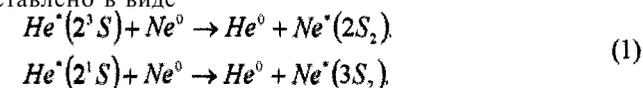
При исследовании зависимости коэффициента усиления ЛБВ от величины ускоряющего напряжения подбирается оптимальный режим работы ЛБВ на частоте 9375 МГц со значениями, при которых коэффициент усиления имеет максимальное E_{aopt} и E_{copt} значения, причем E_{copt} не должно превышать 1300 В, а E^a (-40 В). Изменяя значения $E_{cп}$ при $E^a = const$ снимают зависимость, следя за тем, чтобы $E_{cп}$ не превышало 1300 В.

Затем снимается зависимость $k = f(E^a)$, для чего снова устанавливается лампа в оптимальный режим, а затем изменяется E^a в пределах от -10 до -40 В, все время поддерживая $E_{cп} = E_{copt}$ и записывая значения E^a и I^3 .

Работа ЛБВ в диапазоне частот исследуется при работе лампы в оптимальном режиме путем перестройки частоты генератора в пределах 9275-9475 МГц через 50 МГц, При этом по индикатору, включенному на выходе детекторной секции устанавливается с помощью аттенюатора генератора одинаковый уровень входной мощности,

Зависимость уровня выходной мощности от входной снимается следующим образом. Генератор настраивается на частоту 9375 МГц. Лампа работает в оптимальном режиме. С помощью аттенюатора генератора выставляется начальный (минимальный) уровень входной мощности, При установленном в положение минимального затухания аттенюаторе волноводной части установки добиваются положения стрелки индикатора на выходе детекторной секции в середине шкалы, затем увеличивая значения входной мощности с помощью аттенюатора генератора и записывая его показания, добиваются с помощью аттенюатора волноводной части измерительной схемы первоначальных показаний индикатора и записывают показания последнего аттенюатора.

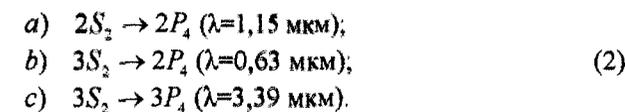
весьма близко друг к другу, поэтому между ними имеется сильное взаимодействие. Оно проявляется в том, что при столкновении возбужденных атомов гелия, находящихся в состояниях 2^3S и 2^1S , с атомами неона, находящимся в основном состоянии Ne^0 , энергия возбуждения передается атомам неона, которые заполняют энергетические уровни $2S^2$ и $3S^2$. Атомы гелия, отдав энергию возбуждения, возвращаются в основное состояние He^0 . В результате такого обменного взаимодействия уровней происходит своеобразная "перекачка" энергии возбуждения от гелия к неону, что может быть символически представлено в виде



Таким образом, неупругие столкновения атомов He и Ne приводят к существенному увеличению населенностей уровней $2S^2$ и $3S^2$ неона, В то же время для более низких уровней $1S$, $2P$ и $3P$ неона эффект взаимодействия с метастабильными уровнями гелия очень слаб.

Следовательно, при определенных условиях разряда можно создать инверсию населенностей между состоянием неона: $2S$ и $2P$, $3S$ и $2P$, что является необходимым условием генерации индуцированного излучения соответствующей частоты,

С уровней $2P$ и $3P$ атомы неона спонтанно переходят на метастабильный уровень $1S$, а с уровня $1S$ вследствие диффузии на стенки газоразрядной трубки - в основное состояние. Уровни $2S$ и $2P$, $3S$ и $3P$ атомов неона расщеплены и возможно множество переходов между этими уровнями, но наиболее интенсивны представленные на рисунке 1.



**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3
ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВОГО ОПТИЧЕСКОГО
КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА**

Цель работы: изучение устройства и принципа работы оптического квантового генератора (ОКГ) на газовой смеси гелий-неон (*He-Ne*). Экспериментальное исследование его параметров и характеристик.

1. Принцип работы ОКГ. Механизм создания инверсии населенности в ОКГ на смеси газов He-Ne

Газовыми ОКГ называются такие генераторы, в которых активная среда находится в газовой фазе. Для получения генерации необходимы активное вещество, источник, с помощью которого создается инверсия населенностей (в газовой смеси для этой цели используют электрический разряд) и резонатор. В оптическом диапазоне резонатор представляет пару зеркал с большим коэффициентом отражения, расположенных с двух сторон трубки, которая заполнена газовой смесью. Эти зеркала обеспечивают многократное прохождение электромагнитной волны через газовую среду. Генерация возникает в том случае, если коэффициент усиления за один проход превышает коэффициент потерь, которые имеются в системе (излучение, дифракция на зеркалах и т. д.),

Газовые ОКГ в отличие от генераторов на твердом теле обычно работают в непрерывном режиме и могут генерировать излучение очень высокой степени монохроматичности. К настоящему времени получено излучение от газовых генераторов более чем на сотнях длин волн в диапазоне от 0,5 до 100 мкм. В качестве активного вещества применяются такие газовые смеси, как гелий-неоновая смесь, неон-кислородная, аргоно-кислородная, все инертные газы, азот, бром, двуокись углерода

и т. д. Наиболее хорошо исследован генератор на гелиево-неоновой смеси, в которой возбуждается электрический разряд. Схема энергетических уровней гелия /He/ и неона /Ne/ представлена на рис. 1. Под действием возбуждающего электрического поля (накачки) часть атомов гелия и неона ионизируется, вследствие чего в разрядном объеме образуются положительные ионы и свободные электроны. Электроны, обладающие достаточной кинетической энергией, при столкновениях с атомами гелия возбуждают их, переводя из основного состояния He^0 в метастабильные $He\ 2^3S$ и $He\ 2^1S$ с временем жизни около 10^{-3} секунд.

Уровни 2^3S гелия и $2S_2$ неона, и 2^1S гелия и $3S_2$ неона расположены

6. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с установкой. Поставить attenuаторы в положение максимального затухания.

2. С разрешения преподавателя включить экспериментальную установку для чего:

а) включить генератор,

б) включить индикатор,

в) включить тумблер «Сеть» на блоке питания, через 2-3 минуты включить тумблеры $E_{сп}$ и E^a . Включить блок управления,

3. Включить тумблер «Накал» на блоке управления, через 2-3 минуты включить тумблер «Анод».

4. Проверить по приборам регулировку $E_{сп}$ от 0 до 1300 В, E^a от -10 до -40 В, I^3 от 0 до 3 мА.

ВНИМАНИЕ! Во время проведения всех исследований $E_{сп}$ не должно превышать 1300 В, $I^3 = -3$ мА.

5. Настроить генератор на частоту 9375 МГц. Подать на вход ЛБВ сигнал, который вызовет отклонение стрелки на индикаторе (при его максимальной чувствительности) до половины шкалы.

6. Пользуясь тумблером «Без ЛБВ» «С ЛБВ» и плавной регулировкой $E_{сп}$ и E^a , добиться работы лампы в оптимальном режиме. Записать значения $E_{сп}$, E^a , I^3 и к.

7. Исследовать зависимость коэффициента усиления от ускоряющего напряжения, изменяя значения $E_{сп}$ в пределах от 600 В до 1300 В через 50 В при $f^{ген} = 9375$ МГц. Измерить коэффициент усиления. Данные свести в таблицу 1.

Таблица 1

$E_{сп}$					
к [дел]					
к [дБ]					

8. Исследовать зависимость коэффициента усиления ЛБВ от управляющего напряжения E^a и тока I_3 . Установить $E_{сп} = E_{сп\ опт}$.

Исследование проводить при $E_{сп} = E_{сп\ опт}$ при $P_{ex} = const$, а E^a изменять в пределах от -10 до -50 В через 5 В,

Данные записать в таблицу 2.

Таблица 2

E_a [В]					
I_3 [мА]					
k [дел]					
k [дБ]					

9. Исследовать зависимость коэффициента усиления ЛБВ от частоты. Установить $E_{сп} = E_{спопт}$; $E_a = E_{аопт}$.

Изменяя значения $f = 9375$ МГц до 9475 МГц и поддерживая (контролируя по индикатору) постоянный уровень входного сигнала, измерить значение коэффициента усиления на всех частотах. Данные свести в таблицу 3.

Таблица 3

U_0				
k [дел]				
k [дБ]				

10. Исследовать зависимости коэффициента усиления и выходной мощности от входной мощности.

Установить $E_{сп} = E_{спопт}$; $E_a = E_{аопт}$, $f = 9375$ МГц, аттенюатор на выходе ЛБВ в положение «0» делений. Аттенюатором на генераторе добиться при максимальной чувствительности индикатора и положении тумблера «С ЛБВ» показаний в середине шкалы индикатора.

Изменяя P_a аттенюатором генератора в сторону увеличения входной мощности и записывая его показания, добиваться установленного ранее уровня показания индикатора с помощью аттенюатора на выходе ЛБВ, записывая его показания. Данные свести в таблицу 4.

Таблица 4

$\left(\frac{P_{вх}}{P_{вх мин}}\right)$ [дБ]	0	3	5	10	13	15	30	60
k [дел]								
$P_{вых}$ [дБ]								

7. Расчетное задание

1. Вычислить радиус спирали ЛБВ,

$$R \cong 4 \frac{\lambda}{m} = 4 \frac{\lambda \sqrt{E_{спопт}}}{505}; \quad m = \frac{505}{\sqrt{E_{спопт}}} \quad (9)$$

при $f = 9375$ МГц.

2. Определить шаг спирали

$$L \cong \frac{2\pi R}{m} = \frac{2\pi R \sqrt{E_{спопт}}}{505} \quad (10)$$

3. Определить коэффициент усиления ЛБВ в оптимальной режиме на частоте 9373 МГц, зная, что

$$l_{сн} = 18 \text{ см}; \quad Z_{св} = 80 \text{ Ом};$$

$$k_{опт} = 47,3 \text{ дБ} - 9,54 \text{ дБ},$$

$$C = \sqrt[3]{\frac{Z_{св} I_0}{4 E_{сн опт}}}; \quad N = \frac{l_{сн}}{L} \quad (11)$$

где I_0 - ток луча.

1. Поясните принцип работы ЛБВ-О,
2. Приведите пример конструкции ЛБВ-О.
3. Поясните характер зависимости $k = f(I_0)$.
4. Поясните характер зависимости $k = f(E_{сн})$.
5. Поясните характер зависимости $k = f(P_{вх})$.
6. Поясните характер зависимости $P_{вых} = f(P_{вх})$.
7. Поясните характер зависимости $k = F(f)$.
8. Что представляет собой дисперсия? Ее физический смысл.
9. Назовите применения ЛБВ-О.
10. Перечислите параметры и характеристики ЛБВ-0 и назовите примерные величины параметров,
11. Дайте характеристику ЛБВ-0 как усилителю,
12. Зачем в ЛБВ-0 применяется замедляющая система?
13. Что такое фазовый синхронизм?
14. При каких условиях справедлива линейная теория работы ЛБВ-О?
15. Каких значений достигает КПД ЛБВ-О?