

Министерство образования и науки Российской Федерации
Сибирский федеральный университет

ЭЛЕКТРОННЫЕ И КВАНТОВЫЕ ПРИБОРЫ СВЧ

Лабораторный практикум

Красноярск
СФУ
2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО КЛИСТРОНА	5
1.1 Краткие теоретические сведения	5
1.2 Контрольные вопросы	14
1.3 Описание лабораторной установки	15
1.4 Порядок выполнения работы	15
1.5 Содержание отчета	17
Библиографический список	17
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАМПЫ ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ ТИПА «О»	18
2.1 Краткие теоретические сведения	18
2.2 Контрольные вопросы	28
2.3 Описание лабораторной установки	29
2.4 Порядок выполнения работы	29
2.5 Содержание отчета	31
Библиографический список	31
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОРЕЗОНАТОРНОГО МАГНЕТРОНА	32
3.1 Краткие теоретические сведения	32
3.2 Контрольные вопросы	42
3.3 Описание лабораторной установки	42
3.4 Порядок выполнения работы	43
3.5 Содержание отчета	44
Библиографический список	44
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА НА ДИОДЕ ГАННА	46
1.1 Краткие теоретические сведения	46
1.2 Контрольные вопросы	52
1.3 Описание лабораторной установки	53
1.4 Порядок выполнения работы	53

1.5 Содержание отчета	54
Библиографический список	54
ПРИЛОЖЕНИЕ: РАБОТА С ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ПРИБОРАМИ	55
П.1 Источники питания	55
П.2 Измеритель мощности МЗ-51	58
П.3 Частотомер ЧЗ-68	60

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Перед выполнением лабораторной работы необходимо изучить соответствующий теоретический материал, ознакомиться с настоящими указаниями и инструкцией по технике безопасности.

Для допуска к выполнению лабораторных работ необходимо ответить на список контрольных вопросов, представленных после кратких теоретических сведений по теме работы. В соответствии с методическими указаниями подготовить необходимые таблицы для внесения результатов измерений.

Включать приборы и оборудование можно только с разрешения преподавателя! Оставляя рабочее место (даже на самое короткое время), следует выключать все питающие напряжения.

Работы выполняются подгруппами из 2-3 человек. Результаты экспериментальных исследований (протокол измерений) следует показать преподавателю. В протоколе измерений необходимо перечислить фамилии всех студентов, непосредственно принимавших участие в исследовании.

Отчет о проделанной работе представляется преподавателю один на подгруппу. В нем должно быть отражено краткое содержание работы, структурные схемы экспериментальных установок, таблицы результатов измерений и вычислений, графики, а также выводы по результатам исследований. К отчету прилагается подписанный преподавателем протокол измерений, а также черновики выполненных работ и проведенных расчетов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО КЛИСТРОНА

Цель работы: Исследование рабочих характеристик и ознакомление с устройством отражательного клистрона.

Содержание работы:

1. Руководствуясь допустимыми режимами питания прибора, экспериментально установить число возбуждаемых зон генерации. Определить напряжение на отражателе, соответствующие центру и краям зон генерации.
2. Исследовать зависимость выходной мощности и частоты генерации от напряжения на отражателе в пределах 0-500В (не менее 10 измерений для каждой зоны генерации).
3. Определить выходную мощность и частоту генерации клистрона в центре каждой зоны генерации.
4. По экспериментальным данным рассчитать параметры отражательного клистрона.

1.1 Краткие теоретические сведения

Отражательный клистрон относится к приборам с кратковременным взаимодействием электронного потока с СВЧ-полем в резонансных колебательных системах. В таких приборах используется принцип динамического управления электронным потоком, основанный на скоростной модуляции потока и группировании электронов в плотные сгустки, взаимодействующие с СВЧ-полем. Отражательный клистрон является маломощным генератором гетеродинного класса и применяется в новейших разработках в области частот от 0.8 до 600-800 ГГц. Основными достоинствами отражательного клистрона являются простота изготовления, высокая надежность и стабильность характеристик и параметров. К достоинствам такого СВЧ-генератора следует отнести возможность простой реализации механической и электрической перестройки частоты.

Колебательная система (объемный резонатор) отражательного клистрона отличается от резонансных систем, используемых в диапазоне длинных и средних волн (рис. 1). Для объяснения работы такого резонатора на рисунке 1 (а) показан качественный переход от открытого колебательного LC -контура с сосредоточенными параметрами к замкнутой системе – полюму резонатору. Для получения возможно более коротких волн конденсатор выполняется из двух небольших параллельных пластин, а контурная катушка заменяется одним витком, соединяющим пластины. В целях еще большего уменьшения индуктивности параллельно данному витку включаются другие витки. Чем больше витков, тем меньше результирующая индуктивность контура, так как при параллельном соединении индуктивностей результирующая индуктивность уменьшается. В

пределе образуется объемный резонатор (рис. 1б), электромагнитное поле которого полностью заключено в его внутреннем пространстве.

Благодаря отсутствию потерь на излучение, крепящих изоляторов и большой поверхности резонаторов их добротность достигает нескольких тысяч. Чтобы электронный поток мог проходить сквозь резонатор, его центральная часть выполняется не сплошной, а в виде двух сеток (рис. 1б). А поскольку размер ячеек сеток много меньше длины волны СВЧ-колебаний, происходящих в резонаторе, сетки практически полностью экранируют электромагнитное поле внутри объема резонатора. Как следствие потери на излучение пренебрежимо малы.

Для связи резонатора с внешней нагрузкой используется виток связи или емкостной штырь (рис. 1в). В первом случае преобладает индуктивная связь. В витке, плоскость которого располагают перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, индуцируется э.д.с. Виток связи помещают в пучность тока. Регулировка степени связи производится поворотом витка относительно его оси. Во втором случае связь – емкостная. Штырь вводят в пучность напряжения и регулируют связь, изменяя зазор между штырем и стенкой резонатора.

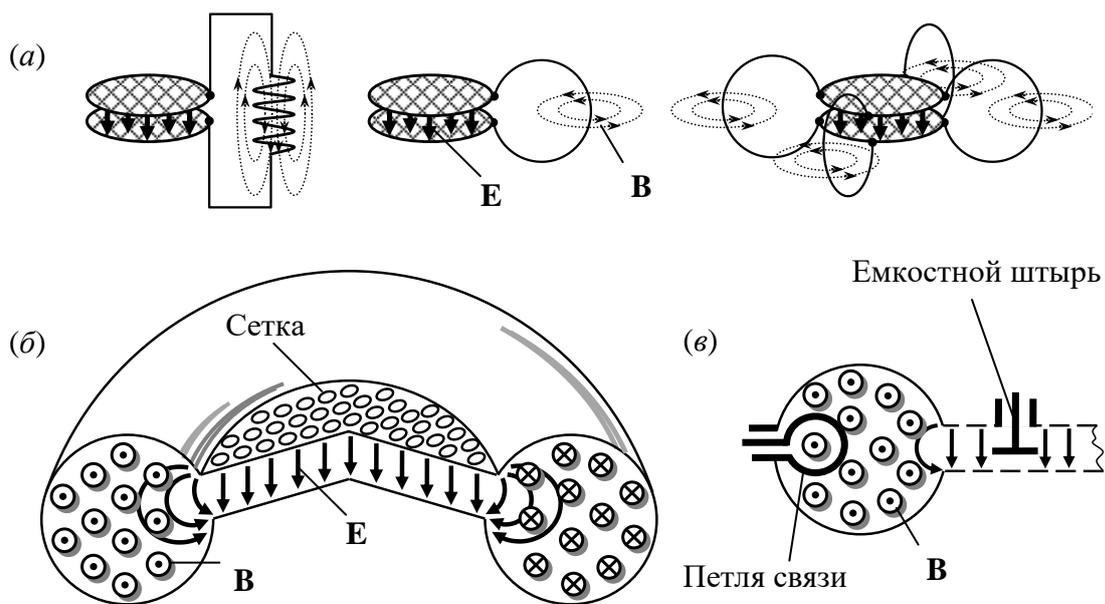


Рис. 1. Объемный резонатор. (а) – переход от открытого колебательного контура с сосредоточенными параметрами к торроидальному полному резонатору; (б) – общий вид и структура электрического и магнитного полей внутри полого резонатора; (в) – устройства связи линии с резонатором

Важнейшим преимуществом отражательного клистрона (рис. 2а) являются простота схемы питания и устройства, наличие электронной перестройки и широкий диапазон механической перестройки генерируемой частоты. Отражательный клистрон отличается стабильностью высокочастотных характеристик и

параметров.

В вакуумном баллоне отражательного клистрона располагаются подогреваемый катод, ускоряющий электрод, объемный резонатор, сетки которого пронизывает электронный поток. На некотором расстоянии расположен отражатель, на который подается отрицательное напряжение порядка $U_{отр} \approx -(100 \div 400)$ В. На рисунке 2 (б) в соответствии со схемой питания представлена потенциальная диаграмма отражательного клистрона, т.е. диаграмма распределение потенциала поля в пространстве между катодом и отражателем.

Принцип действия

Поток электронов, эмитируемых разогретым катодом, разгоняются полем ускоряющего электрода до скорости $v_0 = \sqrt{2eU_0/m}$ (формула легко получается из равенства кинетической энергии и потенциальной, затрачиваемой на разгон электронов $mv_0^2/2 = eU_0$, где e - заряд электрона, m – его масса, U_0 – напряжение на ускоряющем электроде). Далее движение электронов между ускоряющим электродом и резонатором происходит равномерно со скоростью v_0 , так как потенциал электрического поля постоянен (см. рис. 2б). Проходя через сетки резонатора, непрерывный поток электронов наводит в нем слабые колебания. Эти начальные колебания возникают из-за неравномерной плотности электронного пучка, вызванной флуктуациями термоэлектронной эмиссии катода. Под действием этих колебаний электронный поток модулируется по скорости, т.е. происходит уменьшение или увеличение скорости электронов в зависимости от фазы колебаний в резонаторе. При этом средняя скорость электронов v_0 остается постоянной.

Пролетев сетки резонатора в одном направлении, электроны тормозятся полем отражателя. Очевидно, что для невозмущенных (резонатором) электронов, двигающихся со скоростью v_0 , точка, в которой они полностью остановятся и начнут движение в обратном направлении, соответствует точке с нулевым потенциалом (точка А на рис. 2б). Из-за разности скоростей электронов, с которыми они вылетают из резонатора, в пространстве между резонатором и отражателем (называемым пространством группирования) происходит модуляция электронного потока по плотности. Электроны возвращаются назад в виде сгустков и передают свою энергию высокочастотному полю резонатора, поддерживая возникшие колебания, амплитуда которых вскоре достигает стационарной величины. Рассмотрим более подробно процессы, происходящие в отражательном клистроне: процесс модуляции по скорости, процесс модуляции по плотности и процесс преобразования кинетической энергии электронных сгустков в энергию высокочастотных колебаний.

Эти процессы удобно пояснить с помощью пространственно-временной диаграммы (зависимости координаты или местоположения электронов от времени), представленной на рис. 2в. Здесь по координате z отложены расстояния

между электродами от катода до отражателя, а по оси абсцисс время t . На этой пространственно-временной диаграмме представлены траектории только для трех «характерных» электронов, эмитированных с катода через промежутки времени, равные четверти периода высокочастотных колебаний в резонаторе. Видно, что на участке от катода до ускоряющего электрода скорость (определяемая наклоном траектории на диаграмме) нарастает линейно, а на участке между ускоряющим электродом и резонатором остается постоянной (наклон траектории не изменяется) равной v_0 .

При прохождении электронов промежутка между сетками резонатора в установившемся режиме колебаний на электроны действует электрическое переменное поле E резонатора (нижняя часть рис. 2в, а также рис. 3), которое будет в зависимости от знака потенциала дополнительно ускорять (1-й электрон в момент времени t_1) или тормозить (3-й электрон в момент времени t_3) электроны. Для электронов, прошедших середину зазора в моменты нулевого переменного поля, скорость движения не изменится (2-й электрон в момент времени t_2). Поэтому при выходе из резонатора электронный поток оказывается модулированным по скорости: одни электроны двигаются со скоростями, большими среднего значения v_0 , а другие – с меньшими.

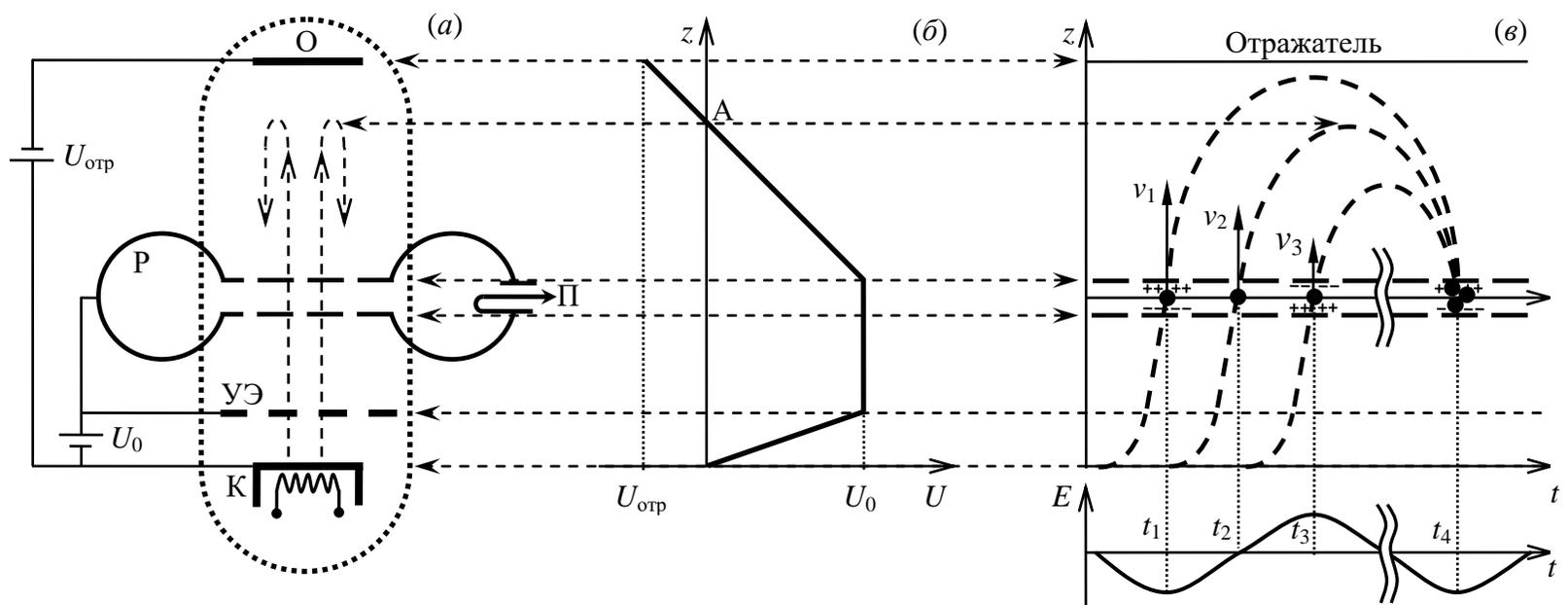


Рис. 2. Принципиальная схема и принцип работы отражательного клистрона. (а) – устройство отражательного клистрона; (б) – потенциальная диаграмма; (в) – пространственно-временная диаграмма К – катод; УЭ– ускоряющий электрод; Р – резонатор; П – петля вывода; О – отражатель

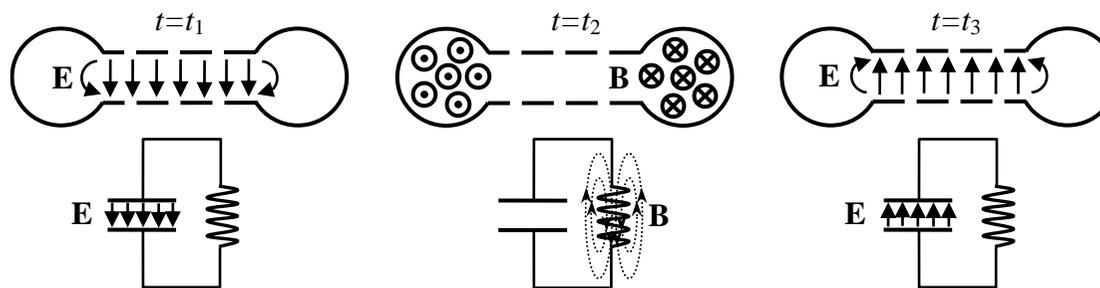


Рис. 3. Структура электрического и магнитного полей объемного резонатора (сверху) и эквивалентного LC-контура (снизу) для различных моментов времени

Процесс модуляции электронов по скорости сопряжен с взаимным обменом энергии между электронами и СВЧ-колебаниями в резонаторе. Ускоряя электроны, энергия колебаний уменьшается, преобразуясь в кинетическую энергию электронов. Торможение электронов высокочастотным полем приводит к обратному энергообмену. Так как число электронов при их непрерывном потоке, попадающих в ускоряющий полупериод, равно числу электронов, попадающих в тормозящий, СВЧ-поле теряет и приобретает равные порции энергии, и следовательно, в среднем по времени энергия СВЧ-колебаний не изменяется. Поэтому, для того чтобы энергетический баланс был положительным, т.е. чтобы энергия электрического поля пополнялась, необходимо получить прерывистый поток электронов, при котором число электронов, попадающих в тормозящий полупериод, было бы больше (сгустки), чем электронов, попадающих в ускоряющий (разряды).

Процесс формирования неоднородной электронной плотности называется процессом группирования. В отражательном клистроне группирование электронов (или модуляция по плотности) является следствием модуляции по скорости. Принцип группирования электронов легко понять из пространственно-временной диаграммы на рисунке 2в.

Группирование происходит относительно невозмущенных электронов, пролетевших через резонатор в момент времени t_2 , когда в нем отсутствовало поле $E=0$. При этом скорость их движения не изменилась ($v_2 = v_0$). Электрон, вышедший раньше в момент времени t_1 и имеющий большую скорость ($v_1 > v_0$), проникает в тормозящее поле отражателя глубже, следовательно, летит дольше невозмущенного и может вернуться в зазор резонатора почти одновременно с ним. Электрон, вышедший позже невозмущенного в момент времени t_3 и имеющий меньшую скорость ($v_3 < v_0$), проникает в тормозящее поле отражателя на меньшее расстояние, при этом время пролета в пространстве группирования затрачивает меньше, и велика вероятность, что он вернется в резонатор вместе с невозмущенным электроном.

Этот процесс можно описать на примере простой механической аналогии. Если подбросить вверх один камень с большей скоростью, немного погодя второй камень с меньшей скоростью, то они могут упасть на землю одновременно.

При непрерывном потоке электронов через резонатор, электронные сгустки будут вновь и вновь формироваться, когда фаза высокочастотных колебаний будет меняться с ускоряющего полупериода на тормозящий. При этом период следования образующихся сгустков будет определяться периодом модулирующего высокочастотного поля. Для того чтобы сгустки поддерживали колебания в резонаторе, необходимо, чтобы в момент возвращения их в зазор резонатора (t_4 на рисунке 2в) там существовало для них тормозящее поле. В этом случае электроны будут отдавать свою энергию СВЧ-полю резонатора.

Этого условия можно добиться изменением напряжения либо на отражателе $U_{отр}$, либо на резонаторе U_0 . И в первом, и во втором случае меняется время пролета электронов, за которое фаза высокочастотных колебаний может принять необходимое для нас значение. В силу того, что вектор скорости

возвращающихся электронов противоположен вектору скорости электронов, движущихся от катода, поле в зазоре будет тормозить сгусток, когда СВЧ-потенциал второй сетки по отношению к первой будет положительным (момент времени t_4 на рисунке 2в).

Условие самовозбуждения. Зоны генерации

Очевидно, что изменение напряжения на отражателе (или резонаторе, что на практике применяется реже) также будет влиять на генерируемую мощность вплоть до прекращения генерации, т.к. будет происходить изменение условий прихода сгустков электронов в тормозящую фазу поля. Из диаграммы на рис. 4 видно, что минимальное оптимальное время, необходимое для возвращения в тормозящую фазу поля СВЧ, равно $t_{\text{пр опт}} = 3/4T$ (T – период колебаний). В этом случае тормозящее поле максимально, как и энергия, отдаваемая сгустками.

Очевидно, что изменение в небольших пределах напряжения $U_{\text{отр}}$, при котором время пролета будет отличаться от оптимального времени $t_{\text{пр опт}}$ менее чем на четверть периода $T/4$ (заштрихованная область на рис. 4), не будет срывать генерацию, поскольку энергетический баланс будет оставаться положительным. Однако мощность генерации при этом будет падать. Такой диапазон изменения напряжения на отражателе определяет зону генерации отражательного клистрона. Напряжение $U_{\text{отр}}$ для работы в таком режиме должно быть достаточно большим.

При его уменьшении возможен возврат электронных сгустков в “ускоряющую” фазу, когда энергия СВЧ-поля будет забираться электронами. Ясно, что при таких напряжениях на отражателе генерации в клистроне не будет. При дальнейшем уменьшении по модулю $U_{\text{отр}}$ может возобновиться генерация при времени пролета $t_{\text{пр опт}} = 3/4T + T$. При последующем уменьшении $U_{\text{отр}}$ ситуация будет повторяться. Таким образом, отражательный клистрон проявляет зонный характер генерации, т.е. при одних значениях напряжения на отражателе генерация будет происходить, при других нет (рис. 5а). Фазовое условие самовозбуждения можно записать в виде:

$$t_{\text{пр опт}} = 3/4T + nT = (n + 3/4)T, \quad (1)$$

где $n=0,1,2,3\dots$; $t_{\text{пр опт}}$ – оптимальное время пролета в пространстве группирования от центра зазора и обратно.

Таким образом, время пролета в каждой из соседних зон генерации отличается на T , а число n определяет номер зоны генерации (определенные значения $U_{\text{отр}}$ при $U_0 = \text{const}$) и одновременно означает число полных периодов СВЧ-колебаний, успевающих происходить в резонаторе, за время пролета электронов в пространстве группирования.

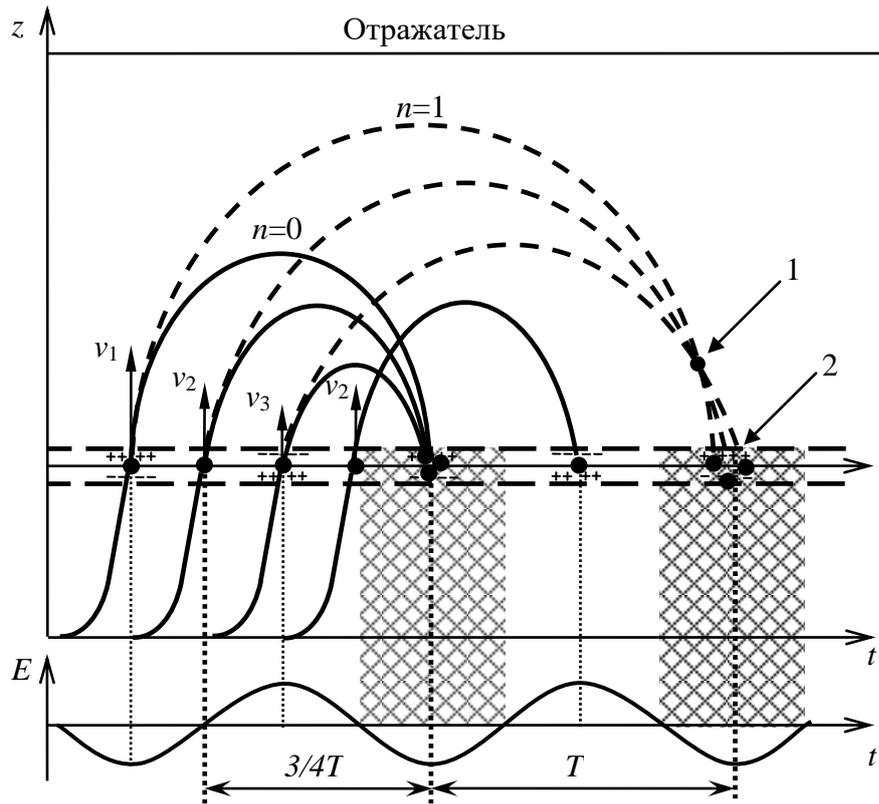


Рис. 4. Пространственно-временная диаграмма траекторий движения электронов в отражательном клистроне для различных зон генерации

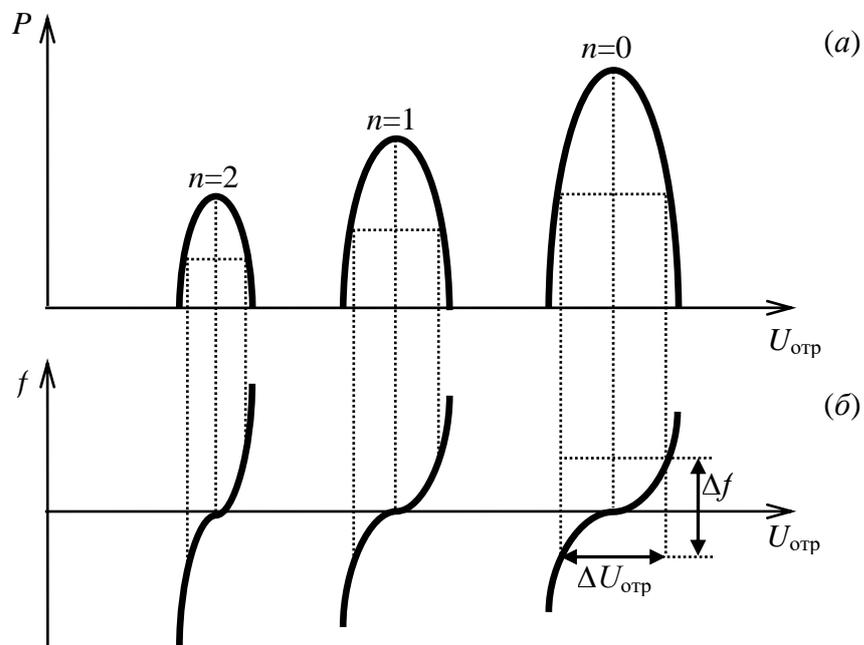


Рис. 5. Зоны генерации отражательного клистрона. Зависимость генерируемой мощности - (а) и частоты генерации - (б) от напряжения на отражателе

Выполнение фазового условия самовозбуждения (при выполнении амплитудного условия, когда вносимая энергия со стороны сгустков превышает

энергию, теряемую в резонаторе и внешней нагрузке) приводит к самовозбуждению клистрона.

На рис. 5 (а) представлена зависимость выходной мощности от напряжения на отражателе $U_{отр}$ при постоянном значении U_0 для различных зон генерации. Физическая сущность падения мощности с ростом номера зоны генерации объясняется следующим образом. Поскольку в режиме установившихся колебаний процесс модуляции по скорости не зависит от напряжения на отражателе, то время, необходимое для формирования сгустков (время за которое быстрые и медленные электроны “догонят” друг друга), будет неизменным. Уменьшение (по модулю) напряжения на отражателе с увеличением номера зоны генерации приводит к увеличению времени пролета электронов в пространстве между резонатором и отражателем. Поэтому до прихода в резонатор электроны будут успевать собираться в сгустки (точка 1 на рис. 4) и, из-за разности скоростей, будут успевать опять разгруппировываться (точка 2 на рис. 4). Поэтому в зазор между сетками резонатора они будут поступать не плотными, а размазанными сгустками. Часть электронов уже не будет попадать в максимум тормозящего поля и, следовательно, эффективно отдавать энергию. А часть может и вовсе попадать в ускоряющий полупериод, забирая при этом энергию.

Другая причина уменьшения мощности при увеличении времени пролета электронов связана с электростатическими силами расталкивания одноименных зарядов. Длительное взаимодействие электронов в сгустках также приводит к уменьшению электронной плотности и, как следствие, уменьшению выделяемой мощности.

Электронная перестройка частоты

Весьма ценным свойством отражательного клистрона является зависимость частоты генерируемых колебаний от напряжений на электродах прибора. Пределы изменения частоты невелики (около 1% от средней рабочей частоты f_0 , определяемой собственной резонансной частотой объемного резонатора), но даже такая возможность электронного управления частотой колебаний позволяет с успехом использовать отражательный клистрон в приемниках СВЧ-диапазона в качестве гетеродина, частота которого автоматически подстраивается под частоту сигнала. Обычно в отражательных клистропах изменяют частоту путем регулировки напряжения на отражателе, так как в цепи питания этого электрода не течет ток и, как следствие, затрачиваемая мощность на электронную перестройку равна нулю.

На рис. 5 (б) изображены кривые изменения частоты генерации в пределах каждой зоны. При значениях напряжения на отражателе, соответствующем оптимальному времени пролета, электронные сгустки попадают в максимум тормозящего поля, а их частота следования (или, что то же самое - частота импульсов наведенного тока в сетках резонатора) равна частоте СВЧ-колебаний или собственной частоте резонатора f_0 . Другими словами, частота вынужденных колебаний совпадает с собственной резонансной частотой объемного резонатора, что отвечает условию резонанса колебательной

системы. Очевидно, что увеличение отрицательного напряжения на отражателе в зоне генерации заставляет электронные сгустки несколько раньше возвращаться в зазор, что равносильно увеличению частоты вынуждающей силы (импульсов наведенного тока), частоты вынужденных колебаний и уменьшению амплитуды колебаний, в соответствии с амплитудно-частотной характеристикой колебательной системы. Аналогично, уменьшение напряжения на отражателе приводит к уменьшению частоты и амплитуды вынужденных колебаний (частоты и мощности генерации).

Сгустки электронов должны приходить в резонатор в той части периода колебаний, когда переменное поле обладает достаточным тормозящим действием. В противном случае электронный КПД будет крайне мал и может привести к срыву колебаний. Допустимые пределы изменения частоты Δf , называемые *диапазоном электронной перестройки*, принято ограничивать значениями напряжения на отражателе, при которых мощность колебаний уменьшается не более чем в два раза по сравнению с ее максимальным значением в центре зоны (рис. 5б).

Важным параметром отражательного клистрона также является *крутизна электронной перестройки* на участке линейного изменения частоты вблизи зоны генерации. Под крутизной электронной перестройки понимают изменение частоты генерируемых колебаний при изменении напряжения на отражателе на 1В:

$$S = \partial f / \partial U_{\text{отр}} \approx \Delta f / \Delta U_{\text{отр}}. \quad (2)$$

Для обеспечения генерации СВЧ-колебаний в широкой полосе частот применяют механическую перестройку частоты отражательного клистрона путем изменения размеров резонатора. Обычно используют перестройку частоты путем изменения ширины зазора резонатора, в котором сосредоточено СВЧ-электрическое поле. Ширину зазора изменяют с помощью гибкой мембраны, при этом увеличение ширины зазора приводит к уменьшению эффективной емкости резонатора и, соответственно, к увеличению частоты генерации.

1.2 Контрольные вопросы

1. Как устроен отражательный клистрон? Объяснить принцип действия этого прибора.
2. Какова потенциальная диаграмма отражательного клистрона? Как она изменится при изменении напряжений на резонаторе и отражателе?
3. Какова пространственно-временная диаграмма (ПВД) отражательного клистрона? Объясните принципы работы прибора с помощью ПВД.
4. Чем обусловлен зонный характер генерации отражательного клистрона? Объяснить с помощью ПВД.

5. Как осуществляются механическая и электронная перестройка частоты в отражательном клистроне? Что называется диапазоном и крутизной электронной перестройки?
6. Почему электронная перестройка частоты производится изменением напряжения на отражателе, а не на резонаторе?
7. Укажите величины выходной мощности и КПД отражательных клистронов. Где применяются отражательные клистроны?

1.3 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из отражательного клистрона, частотомера, измерителя мощности, и источников питания. Структурная схема установки для исследования характеристик отражательного клистрона показана на рис. 6.

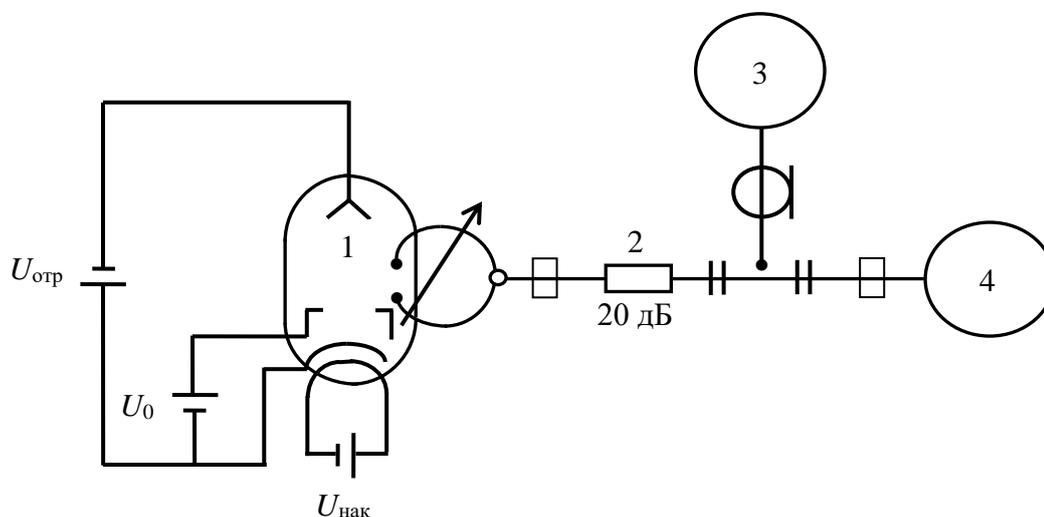


Рис. 6. Структурная схема лабораторной установки для исследования характеристик отражательного клистрона: 1 – отражательный клистрон; 2 – аттенюатор 20 дБ; 3 – частотомер; 4 – измеритель мощности

На нить накала катода от источника питания подается постоянное напряжение $U_{\text{нак}}$ равное 6.3 В. На резонатор подается постоянное напряжение $U_0 = 300$ В, а на отражатель – постоянное напряжение $U_{\text{отр}}$, регулируемое в пределах от 0 до 500 В. Напряжение на отражателе, а также напряжение и ток резонатора измеряются встроенными в переднюю панель соответствующих источников питания вольтметром и амперметром.

Сигнал, генерируемый отражательным клистроном, через аттенюатор 20 дБ поступает на вход измерителя мощности и через коаксиально-волноводный тройник на вход частотомера.

1.4 Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию и принцип действия отражательного клистрона.

2. Ознакомиться с лабораторной установкой.
3. Включить питание частотомера и измерителя мощности.
4. Через 15 минут прогрева откалибровать измеритель мощности.
5. Включить источник питания накала (GPS-1830D) и установить $U_{\text{нак}} = 6.3 \text{ В}$.
Во избежание перегрева и перегорания нити накала строго запрещается подавать напряжение выше 6.3 В!
6. Включить источник питания резонатора, установить напряжение $U_0 = 300 \text{ В}$. Переключателем на передней панели источника питания подать напряжение на резонатор.
7. Включить источник питания отражателя, установить и подать необходимое напряжение $U_{\text{отр}}$ в пределах от 0 до 500 В.
8. Изменяя напряжение на отражателе от 0 до 500 В, добиться появления показаний индикатора измерителя мощности. Измерить выходную мощность и напряжение на отражателе, соответствующие центру и краям всех экспериментально обнаруженных зон генерации. В центре каждой зоны генерации дополнительно измерить частоту колебаний f_0 .
9. Измерить зависимость мощности P и частоты f колебаний от напряжений на отражателе в пределах всех экспериментально обнаруженных зон генерации (не менее 10 измерений для каждой зоны генерации).
10. Рассчитать:
 - номера зон генерации n , используя следующее соотношение

$$n = \frac{0.0167 f_0}{\sqrt{U_0}} \frac{4l U_0}{U_0 + |U_{\text{отр}}|} - 3/4 \quad (3)$$

где $l = 0.2 \text{ см}$ – расстояние от резонатора до отражателя (см), f_0 – частота, соответствующая центру зоны генерации (МГц), $U_{\text{отр}}$ – напряжение на отражателе, соответствующее центру зоны генерации (В). Необходимо округлить вычисленные значения n до ближайшего целого числа и указать полученные номера зон на экспериментальных зависимостях $P(|U_{\text{отр}}|)$;

- для каждой зоны генерации оптимальный угол пролета

$$\vartheta_n = 2\pi (n + 3/4); \quad (4)$$

- электронный КПД

$$\eta_s = X J_1(X) / [\pi (n + 3/4)], \quad (5)$$

где X – параметр группирования; $J_1(X)$ – функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка. Максимум соответствует оптимальному параметру группирования $X = 2.41$, при этом $J_1(X) \approx 0.52$.

11. Построить зависимости выходной мощности $P(|U_{\text{отр}}|)$ и частоты генерации $f(|U_{\text{отр}}|)$ от напряжения на отражателе для всех зон с указанием номеров n .

12. Сделать вывод по выполненной работе и написать отчет. В выводе по работе необходимо сравнить полученные характеристики отражательного клистрона с предсказываемыми теорией, в случае расхождений объяснить их причину.

1.5 Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Структурная схема лабораторной установки.
4. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
5. Графики экспериментальных зависимостей.
6. Вывод.

Библиографический список

1. Н.Д. Федоров. Электронные приборы СВЧ и квантовые. - М.: Атомиздат, 1979. - С.45-62.
2. В.Н. Дулин. Электронные и квантовые приборы СВЧ. - М.: Энергия, 1972. - С.45-58.
3. В.М. Березин, В.С. Буряк, Э.М. Гутцайт, В.П. Марин. Электронные приборы СВЧ. - М.: Высшая школа, 1985. - С.65-77.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАМПЫ ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ ТИПА «О»

Цель работы: Изучение устройства и принцип работы генератора на лампе обратной волны (ЛОВ) типа «О» и исследование рабочих характеристик генератора на ЛОВ, ознакомление с его устройством.

Содержание работы:

Исследовать зависимости выходной мощности и частоты генератора на ЛОВ от напряжения на замедляющей системе.

2.1 Краткие теоретические сведения

Генератор на лампе обратной волны является широкодиапазонным генератором СВЧ, обладающим электронной перестройкой частоты в пределах 50% и более. Перестройка частоты генерируемых колебаний ЛОВ осуществляется изменением напряжения на замедляющей системе. Безинерционность перестройки частоты ЛОВ позволяет на их базе конструировать различные схемы автоматизированных измерений СВЧ, схемы радиозащиты и радиопомех.

Используемый в ЛОВ типа «О» (ЛОВО) принцип работы оказался очень эффективным для освоения огромного диапазона частот от 1 до 630 ГГц. Выходные мощности ЛОВО в непрерывном режиме находятся в пределах от 10 мВт до 10 Вт, в импульсном режиме максимальные значения достигают величины в несколько сотен мегаватт. Коэффициент полезного действия генераторных ЛОВ сравнительно невелик и составляет не более 20 %.

Принцип работы приборов типа «О» с длительным взаимодействием

Первыми лампами, предназначенными для усиления и генерации колебаний СВЧ, в которой удалось сильно ослабить вредное влияние времени пролета электронов, стали клистроны. Эти лампы относятся к приборам типа «О» с кратковременным взаимодействием, в которых кинетическая энергия электронов преобразуется в энергию СВЧ-колебаний в небольшой области взаимодействия между сетками объемного резонатора. Основным недостатком таких приборов является их принципиальная узкополосность: наличие в клистроне объемного резонатора, обладающего резко выраженными резонансными свойствами, наблюдающимися в узкой полосе частот, ограничивает область частот, в которой происходит усиление. Для решения этой проблемы в конструкциях лампы пришлось отказаться от резонатора и перейти к широкополосным волноведущим структурам, в которых обеспечивалось длительное взаимодействие электрона с полем электромагнитной волны.

Под электронными приборами с длительным взаимодействием подразумеваются такие электронные СВЧ-приборы, действие которых основано на

взаимодействии потока электронов с полем бегущей прямой или бегущей обратной электромагнитной волны СВЧ. К приборам этого рода относится целый ряд электронных СВЧ-приборов и в первую очередь лампы бегущей волны (ЛБВ) и лампы обратной волны (ЛОВ) типа «О», в которых усиление или генерация СВЧ-колебаний происходит за счет кинетической энергии электронов.

В приборах с длительным взаимодействием, так же как и в клистронах, имеется модуляция скорости электронов и плотности электронного потока. Длительное взаимодействие электронов с полем бегущей волны позволяет получить необходимое группирование электронов при сравнительно слабом входном сигнале. Очевидно, что обмен энергией между электронами и полем происходит в результате взаимодействия электронов с составляющей напряженности поля, совпадающей по направлению со скоростью электронов. Рассмотрим основные принципы такого взаимодействия.

Пусть по некоторой волноведущей линии вдоль оси z распространяется бегущая волна с продольной составляющей электрического поля E_z и фазовой скоростью v_ϕ (рис. 7). Далее предположим, что параллельно той же линии, в непосредственной близости от ее продольной оси, проходит сфокусированный в тонкий луч поток электронов со средней скоростью v_0 , эмитированный электронной пушкой (рис. 7а).

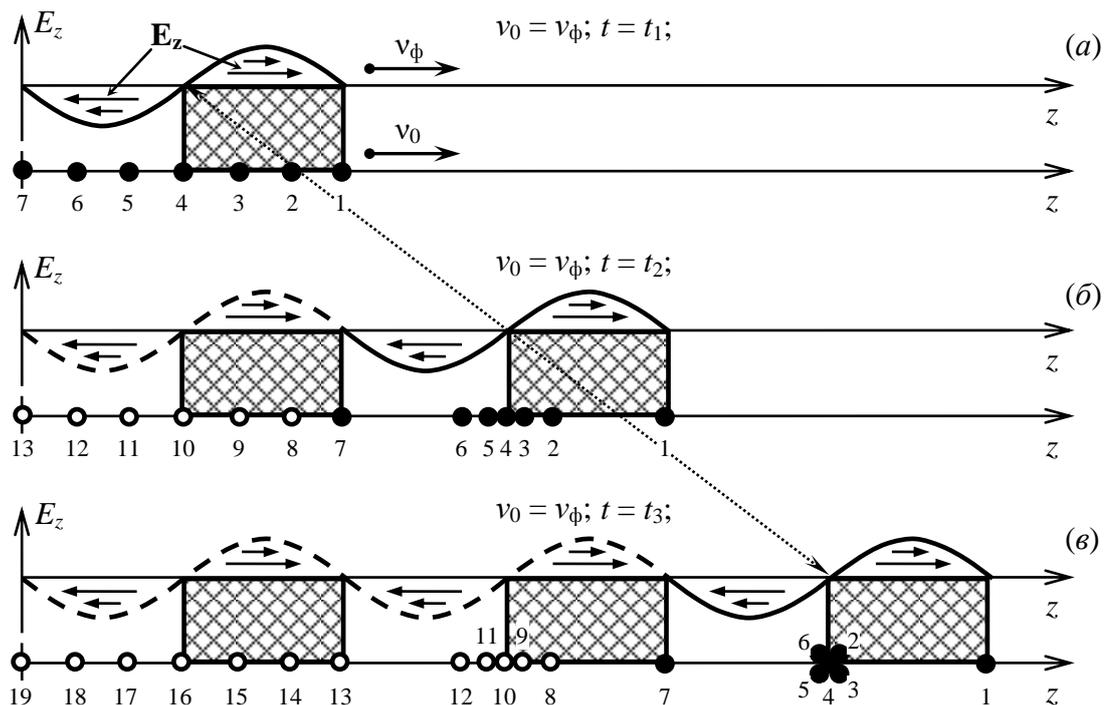


Рис. 7. Принцип взаимодействия потока электронов с продольной составляющей электрического поля бегущей волны при условии $v_0 = v_\phi$. Распределение волны (вверху) и электронов (внизу) вдоль направления распространения для различных моментов времени (а) - $t = t_1$, (б) - $t = t_2$, (в) - $t = t_3$

Так как поле бегущей волны через каждую половину длины последней изменяет свою полярность, то в каждый данный момент времени часть электронов потока ускоряется полем при $E_z(z, t) < 0$, частично поглощая при этом

энергию волны, часть тормозится при $E_z(z, t) > 0$ (заштрихованная область на рис. 7), усиливая высокочастотные колебания, а часть электронов, из-за отсутствия взаимодействия с волной $E_z(z, t) = 0$, не изменяет свою скорость.

Очевидно, что ускорение и торможение электронов электрическим полем волны приведет к процессу группирования электронов (модуляции по плотности). Интенсивность процесса группирования электронов и характер взаимодействия последних с волной зависит от соотношения скоростей потока электронов v_0 и волны v_ϕ , причем здесь принципиально возможны три случая:

1. Средняя скорость потока электронов v_0 равна фазовой скорости перемещения волны:

$$v_0 = v_\phi.$$

В данном случае в некоторый начальный момент времени t_1 (рис. 7а) электроны 5 и 6, находящиеся в поле отрицательной полуволны, будут ускоряться, а электроны 2 и 3, находящиеся в тот же момент времени t_1 в поле положительной полуволны - тормозиться.

Вследствие взаимодействия с СВЧ-полем, через некоторое время в момент t_3 электроны окажутся сгруппированными в «сгусток» (рис. 7б). Этот «сгусток» будет образовываться около «нулевого» электрона 4. Аналогичными центрами формирования «сгустков» станут вылетевшие позже с катода «нулевые» электроны 10 и 16 (рис. 7в). Но так как в каждый отдельный момент времени тормозится и ускоряется одинаковое число электронов (при равномерной эмиссии электронов с катода), то «сгустки» электронов в этом случае ($v_0 = v_\phi$) и не отдают своей энергии СВЧ-полю, но, в тоже время, и не отбирают энергии от последнего. Сгруппированные электроны двигаются синхронно с электромагнитной волной, а поэтому в среднем обмена энергией между ними и волной не будет.

2. Скорость потока электронов меньше фазовой скорости волны:

$$v_0 < v_\phi.$$

В данном случае центры группирующихся «сгустков» электронов (это те же «нулевые» электроны 4, 10 и 16) располагаются преимущественно в областях ускоряющего поля (рис. 8а) и бегущая волна обгоняет сгустки. Большая часть электронов (электронные «сгустки»), испытывая ускоряющее действие со стороны СВЧ-поля, отбирает энергию от последнего. В то же время «нулевые» электроны 1, 7, 13 и 19, являющиеся центрами разряжения будут частично усиливать волну, но в целом, баланс энергии будет все же отрицательным. В данном режиме ни эффекта усиления, ни автоколебаний СВЧ иметь места не будет.

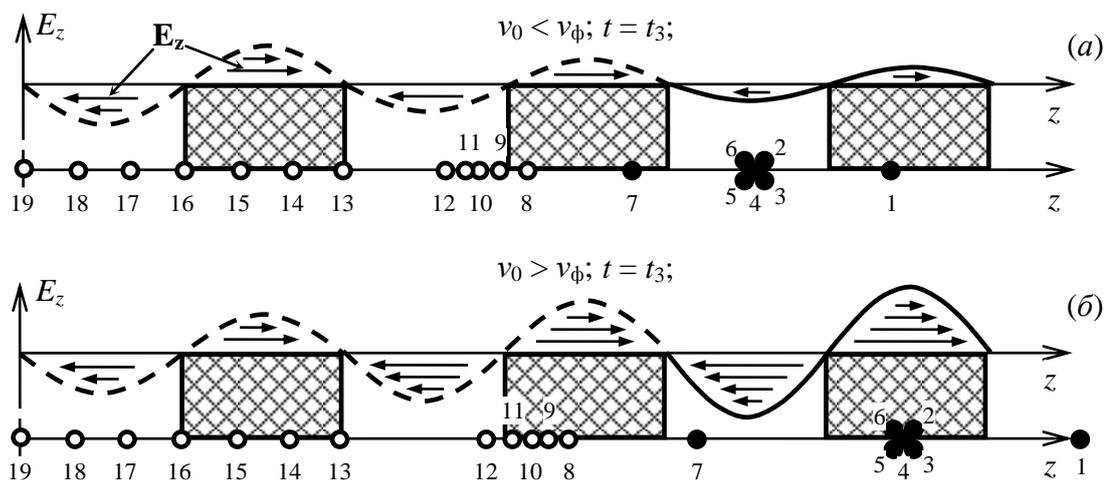


Рис. 8. Принцип взаимодействия потока электронов с продольной составляющей электрического поля бегущей волны в случае $v_0 < v_\phi$ - (а) и $v_0 > v_\phi$ - (б)

3. Скорость потока электронов несколько больше фазовой скорости волны, т. е.

$$v_0 > v_\phi.$$

В данном случае центры группирующихся «сгустков» электронов (центрами «сгустков» по-прежнему являются «нулевые» электроны 4, 10 и 16), опережающих волну, преимущественно располагаются в тормозящих полупериодах поля волны (заштрихованная область, рис. 8б). В результате тормозящего действия поля волны в положительный полупериод (рис. 8б), «сгустки» электронов будут замедлять свое движение. Следствием этого будет передача части энергии этих сгустков СВЧ-полю волны и эффект усиления СВЧ-сигнала.

Замедляющие системы

При рассмотрении процесса взаимодействий потока электронов с полем бегущей электромагнитной волны в ЛБВ и ЛОВ необходимо помнить, что практическая величина скорости потока электронов v_0 всегда много меньше фазовой скорости распространения электромагнитной волны в неограниченном вакууме $v_0 \ll v_\phi = c$, где $c = 3 \times 10^{10}$ см/сек. Поэтому для выполнения условия $v_0 > v_\phi$ необходимо фазовую скорость бегущей волны v_ϕ искусственно понизить. Для этой цели в приборах типа ЛБВ и ЛОВ используются так называемые замедляющие системы - своеобразные волноведущие структуры, где достигается понижение фазовой скорости электромагнитной волны.

В качестве примера на рис. 9 представлены некоторые типы замедляющих систем. Чаще всего одна из линий замедляющей структуры имеет гладкую поверхность, а другая — характеризуется рядом периодически повторяющихся ячеек. Иногда (рис. 9г) обе линии имеют периодическую структуру. Гладкую линию называют обычно основанием или холодным ка-

тодом. Расстояние между соседними идентичными элементами замедляющей системы называется периодом структуры (величина d на рис. 9).

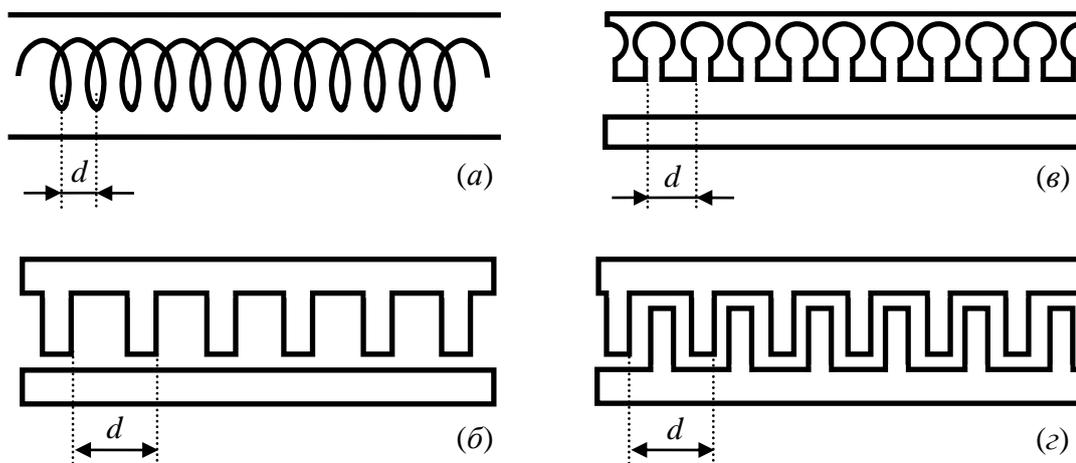


Рис. 9. Замедляющие системы: коаксиальная линия со спиральным внутренним проводником - (а); гребенчатая - (б); цепочка резонаторов щель-отверстие - (в); две гребенки - (г)

Основное назначение замедляющей системы - уменьшить скорость распространения электромагнитной волны. При реально допустимых ускоряющих напряжениях, порядка сотен или тысяч вольт, скорость v_0 движения электронов не превышает сотых или десятых долей от величины c - скорости света. Таким образом, фазовая скорость v_ϕ волны должна быть в несколько единиц или десятков раз меньше скорости c . Отношение c/v_ϕ называют коэффициентом замедления системы. В реальных приборах $c/v_\phi \approx (3 \div 50)$.

Замедляющие системы можно разделить на однородные и неоднородные. В первых период d много меньше длины волны, и распределение продольной компоненты поля близко к синусоидальному. В неоднородных системах период сравним с длиной волны. В маломощных ЛБВ наиболее широко используется спиральная замедляющая система (см. рис. 9а), относящаяся к однородным системам. Замедление волн в спиральной линии объясняется наглядно. Благодаря тому, что центральная жила коаксиальной линии свивается в спираль, фазовая скорость распространения электромагнитной волны вдоль оси значительно уменьшается. Это явление можно объяснить тем, что скручивание провода линии увеличивает ее погонную индуктивность и емкость, а это приводит к уменьшению фазовой скорости распространения электромагнитных волн вдоль нее. Грубо это же можно объяснить как результат увеличения пути для электромагнитной волны, оббегающей провод, свитый в спираль. Электромагнитные волны по-прежнему будут бежать по проволоке, но, очевидно, за время пробега одного витка по оси спирали волна продвинется всего лишь на величину шага спирали. В результате вдоль оси спирали движение получится замедленным во столько раз, во сколько длина витка спирали больше ее шага d .

При распространении бегущей волны вдоль спиральной замедляющей системы между отдельными участками соседних витков провода создается

переменная разность потенциалов. Упрощенная картина силовых линий сверхвысокочастотного электрического поля \mathbf{E} в такой замедляющей системе показана на рис. 10 (а). На рис. 10 (б) также представлена зависимость ее продольной (осевой) составляющей E_z от координаты z . Если теперь внутри такой спирали вдоль ее оси пропустить электронный поток, подобрать ускоряющее напряжение и создать условия для торможения электронов в искусственно замедленной волне, мы получим новый усилительный прибор, в котором имеются условия для длительного взаимодействия электронов и волны.

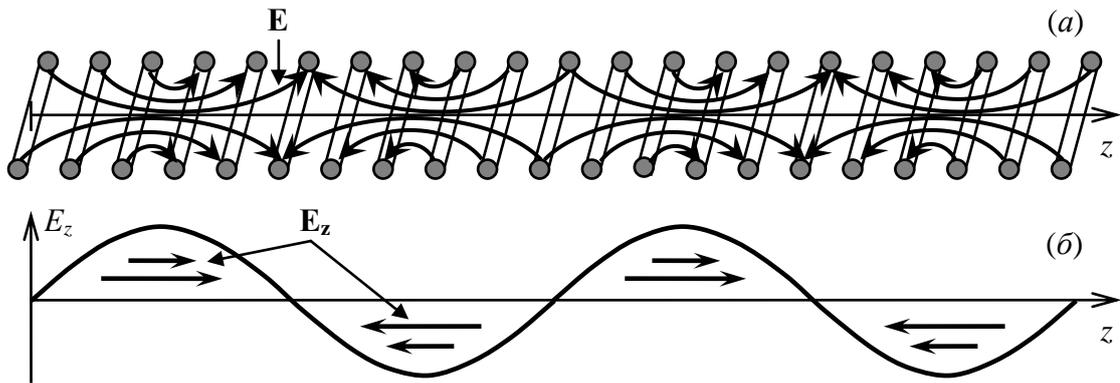


Рис. 10. Картина высокочастотного электрического поля \mathbf{E} в спиральной замедляющей системе - (а) и зависимость ее продольной (осевой) составляющей E_z от координаты z - (б)

В ЛБВ существует оптимальное соотношение параметров спирали, ее диаметра и шага с рабочей длиной волны, причем с повышением частоты усиливаемых колебаний диаметр спирали приходится уменьшать, что при использовании не слишком больших скоростей электронов приводит также к уменьшению шага. При этом возникают большие трудности при изготовлении проволочной спирали, она становится очень тонкой и трудновыполнимой. Так, например, удобная для лампы на 3 000 МГц спираль имеет уже диаметр, равный 3 - 4 мм. Кроме того, при попытках применить спираль для мощных ламп возникает основная и непреодолимая трудность — невозможность рассеять в ней большое количество тепла, а также осуществить необходимое охлаждение. На миллиметровых волнах, где размеры лампы малы, а к.п.д. их падает, также очень острой является проблема отвода тепла.

Все эти трудности заставили искать новых путей обеспечения длительного взаимодействия электронного пучка и электромагнитной волны. Был предложен оригинальный способ «прерывистого» взаимодействия электронного пучка с пространственной гармоникой. Достигается это с использованием замедляющих систем типа «связанных резонаторов» (рис. 9б-г), относящихся к неоднородным системам.

На рис. 11 (а) представлена картина силовых линий электрического поля на отрезке замедляющей системы типа «связанных резонаторов» для некоторого момента времени t . Картина силовых линий во всех ячейках, определяемых пространственным периодом d , подобна, но напряженность поля в них неодинакова, как во всякой бегущей волне. На рис. 11 (а) рост напряженности

поля отмечен увеличением числа силовых линий между выступами. Видно, что электрическое поле сосредоточено вблизи щелей резонаторов. Поэтому зависимость продольной составляющей поля E_z от координаты z (рис. 11 б) представляет собой серию импульсов с синусоидальной огибающей.

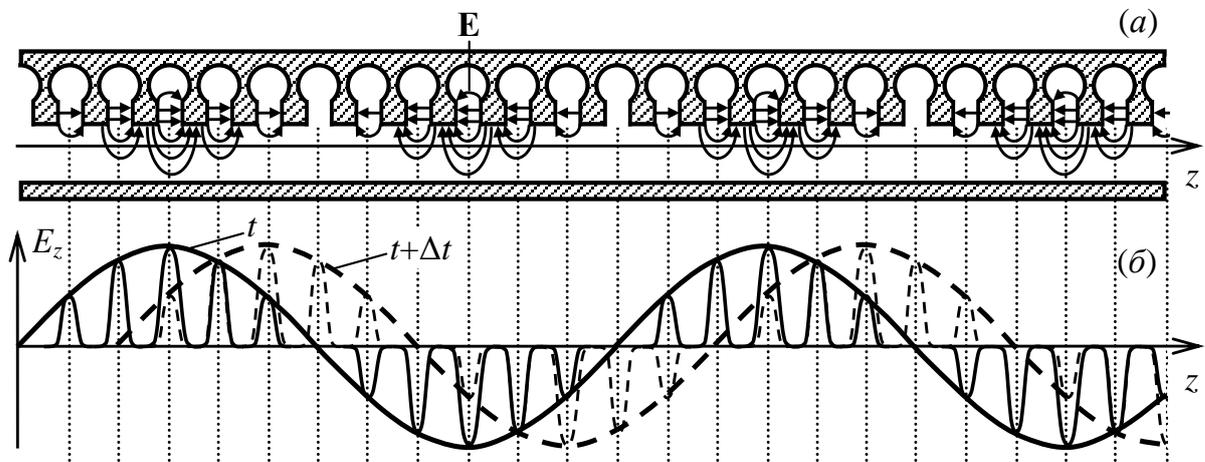


Рис. 11. Картина высокочастотного электрического поля E в замедляющей системе типа «связанных резонаторов» - (а), и зависимость ее продольной (осевой) составляющей E_z от координаты z - (б)

Через некоторый интервал времени Δt волна переместится на величину Δz и максимальная величина продольной составляющей поля окажется вблизи одного из следующих резонаторов (пунктирная огибающая). По истечении половины периода фаза колебаний в каждом из резонаторов изменится на противоположную. Таким образом, величина поля E_z вблизи каждого резонатора будет меняться в такт с частотой ω колебаний генератора, питающего линию, проходя все значения от наибольшего положительного (вектор z совпадает по направлению с осью z) до наиболее отрицательного.

Необходимо подчеркнуть отличие замедляющих систем от обычных линий передачи, используемых в СВЧ технике (например, от коаксиальных или полых металлических волноводов). Главным отличием является наличие в замедляющих системах периодического изменения геометрических параметров вдоль оси волноведущей структуры, в то время как обычные линии передачи вдоль направления распространения волны однородны. Именно благодаря периодичности и появляется эффект замедления волны, который более строго можно описать с помощью понятия пространственных гармоник.

Пространственные гармоники

Характерным для неоднородной замедляющей системы является несинусоидальное периодическое пространственное распределение продольной составляющей поля. Это поле может быть представлено разложением в тригонометрический ряд по продольной координате, подобно тому как несинусоидальный периодический во времени сигнал может быть представлен разложением на гармонические составляющие по временной координате. Каж-

дый из членов этого ряда носит название пространственной гармоники и представляет собой волну, имеющую свою фазовую скорость и амплитуду.

Разложение поля в замедляющей системе по пространственным гармоникам можно представить как

$$E(z) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} E_p \exp\left(-j \frac{\varphi + 2\pi p}{L} z\right), \quad (6)$$

где p – номер пространственной гармоники, E_p – амплитуда p -й пространственной гармоники, L – период замедляющей системы, φ – сдвиг фазы на период. Из этой формулы следует, что постоянные распространения пространственных гармоник выражаются формулой

$$\beta_p = \frac{\varphi + 2\pi p}{L} = \beta_0 + \frac{2\pi p}{L}, \quad (7)$$

где $p=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ – номер гармоники, $\varphi/L = \beta_0$ – постоянная распространения нулевой пространственной гармоники. Таким образом, поле в периодической структуре представляет собой сумму бесконечного числа волн, называемых пространственными гармониками и отличающихся друг от друга амплитудой E_p и фазовой скоростью $v_{\phi(p)} = \frac{\omega}{\beta_p} = \frac{2\pi f}{\beta_p}$. Заметим, что все эти волны имеют

одновременно одинаковые частоту f и групповую скорость $v_{\text{гр}(p)}$, определяемую соотношением

$$v_{\text{гр}(p)} = \frac{\partial \omega}{\partial \beta_p} = L \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} = v_{\text{гр}}. \quad (8)$$

Положительные значения p соответствуют прямым пространственным гармоникам, отрицательные – обратным. Действительно, можно показать, что в полосе пропускания замедляющей системы всегда выполняется условие $0 \leq \varphi \leq \pi$, и поэтому при $p < 0$ соответствующая постоянная распространения $\beta_p < 0$, а это означает встречное направление фазовой и групповой скоростей, так как $v_{\text{гр}} > 0$.

Из сказанного следует, что говорить о пространственных гармониках имеет смысл лишь в случае неоднородной замедляющей системы, то есть когда распределение продольного поля заметно отличается от синусоидального. В случае же однородной замедляющей системы мы будем иметь лишь одну гармонику – нулевую, соответствующую $p=0$, а амплитуды всех высших гармоник для $p \neq 0$ будут исчезающе малы. Таким образом, применение неоднородной системы является непременным условием построения ЛОВ, поскольку лишь в неоднородной системе могут существовать обратные волны, характеризующиеся взаимно противоположным направлением групповой и фазовой скоростей.

Подбором ускоряющего напряжения пучка и направления движения электронов в принципе можно добиться синхронизма между электронами и любой из замедленных волн, то есть $v_0 = v_{\phi(p)}$ при $p < 0$. Именно такой вариант синхронизма и реализуется в лампе обратной волны.

Введение в рассмотрение пространственных гармоник позволяет взаимодействие электронного пучка с полем замедляющей системы рассматривать как взаимодействие с одной пространственной гармоникой. Влияние других пространственных гармоник, как правило, можно не учитывать, так как при фиксированной скорости электронов условие синхронизма выполняется лишь для одной гармоники, и обычно амплитуды пространственных гармоник быстро убывают с ростом их номера. Учет взаимодействия лишь с одной пространственной гармоникой является лишь удобным математическим приемом описания взаимодействия электронов с реальным полем замедляющей системы, имеющем сложное пространственное распределение. Пренебрежение взаимодействием с остальными пространственными гармониками не означает, что усиливается лишь одна гармоника, а остальные при этом не меняют своей амплитуды. На самом деле все пространственные гармоники будут одновременно и пропорционально увеличивать свою амплитуду, поскольку только в сумме они образуют поле, которое может реально существовать в замедляющей системе. Иными словами, нельзя возбудить в замедляющей системе одну пространственную гармонику, не возбудив всех остальных.

Устройство и принцип действия генератора на ЛОВ

Устройство генератора на лампе обратной волны показано на рис. 12. Для создания электронного пучка, который проходил бы внутри замедляющей системы, используется электронная пушка, состоящая из подогревного катода, цилиндрического анода с узким отверстием, в ряде случаев еще некоторых дополнительных фокусирующих электродов. Однако для получения достаточно большой мощности пучок должен иметь высокую плотность, но тогда силы электростатического расталкивания в нем будут весьма значительными, что при большом пути приведет к неизбежной расфокусировке луча. Поэтому требуется создание дополнительного фокусирующего устройства. Им служит цилиндрический соленоид, обтекаемый постоянным током, который располагается вокруг замедляющей системы.

Магнитное поле соленоида направлено вдоль оси системы. В том случае, если под действием сил расталкивания или под действием поперечной составляющей бегущей волны электрон начнет двигаться от оси системы, на него начнет действовать отклоняющая сила, направленная по правилу «правой руки». Она изменит направление его движения. Если проследить последовательно изменение направления движения электрона и действие на него поля катушки, то окажется, что он по сложной винтообразной траектории будет приближаться к оси системы. Иными словами, катушка будет фокусировать электронный поток в виде узкого луча.

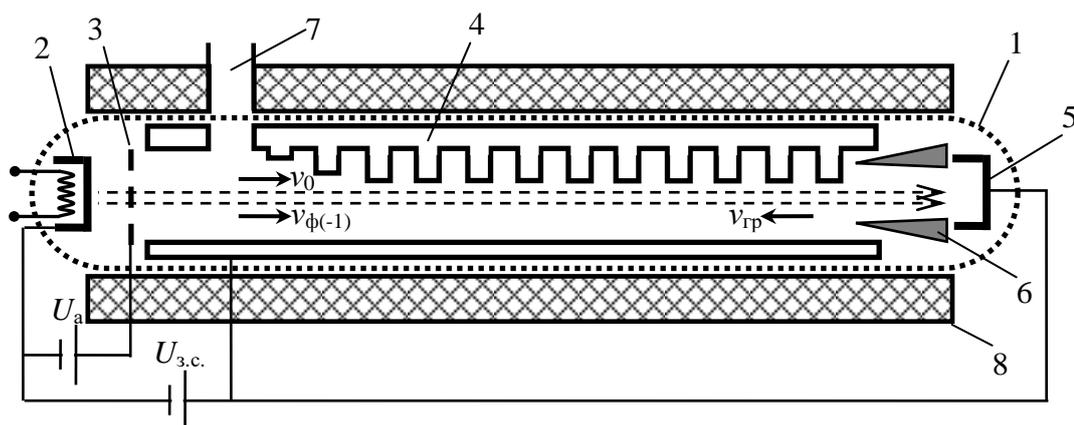


Рис. 12. Устройство генератора на ЛОВ.

1 - баллон; 2 - катод; 3 – анодная сетка; 4 - замедляющая система; 5 - коллектор, 6 - поглотитель; 7 - вывод энергии; 8 - магнитная фокусирующая система

В отличие от усилителя на ЛБВ арматура генератора на ЛОВ снабжена лишь устройством вывода высокочастотной энергии, который расположен вблизи электронной пушки. Поглощающее устройство располагается вблизи коллектора. В результате флуктуации электронного потока в замедляющей системе могут быть наведены слабые колебания. Возникнет электромагнитная волна, которая может быть представлена суммой пространственных гармоник. Фазовая скорость одной из этих гармоник может удовлетворять условию синхронизма: $v_0 \approx v_{\phi(p)}$. В лампе обратной волны это условие выполняется, как правило, для первой обратной гармоники, что обеспечивается выбором структуры замедляющей системы и ее параметров, а также необходимым электронным режимом.

Взаимодействуя с полем обратной гармоники, электроны начнут группироваться в сгустки и отдавать свою энергию полю волны. Амплитуда волны будет нарастать, эффект группирования электронов и передача энергии волне увеличатся еще более и т. д. В результате, как и в любом автогенераторе, при условии выполнения баланса фаз и мощности установятся колебания стационарной амплитуды.

Физические процессы взаимодействия электронов с волной: модуляции скорости, процесс группирования, передача кинетической энергии полю и др. в лампе обратной волны протекают так же, как и в ЛБВ. Отличие заключается лишь в том, что в ЛОВ электронный поток взаимодействует с обратной пространственной гармоникой $p = -1$. Поэтому векторы скорости электронов и фазовой скорости обратной гармоники, взаимодействующей с электронами, противоположны по направлению вектору групповой скорости волны (рис. 12). Это отличие, кажущееся на первый взгляд незначительным, имеет принципиальное значение. Использование электронного потока, движущегося навстречу потоку электромагнитной энергии, и обеспечивает ту положительную обратную связь, без которой невозможна работа автогенератора. Условным входом генератора на ЛОВ можно считать коллекторный конец ее замедляющей системы, ибо электромагнитная энергия переносится волной, от

коллектора к выходу, расположенному у электронной пушки. Электронный поток, движущийся от выхода ко входу, служит, таким образом, не только носителем энергии, но и представляет собой своеобразную цепь обратной связи.

Поясним назначение поглотителя в генераторной ЛОВ. Предположим, что нагрузка, подключенная к замедляющей системе около электронной пушки, не согласована с системой. Реальная волна, которая движется к нагрузке, через обратную пространственную гармонику взаимодействует с электронным потоком и после первого отражения от нагрузки идет по замедляющей системе к коллекторному концу, но уже не взаимодействуя с электронами. При отсутствии поглотителя у коллекторного конца пришедшая волна снова отражается и опять движется к нагрузке, взаимодействуя с электронным потоком. Таким образом, распределение поля – это результат наложения первичной волны и дважды отраженной. Если их фазы совпадают, то выходная мощность возрастает, если противоположны, – то уменьшается. Так как сдвиг фазы при данной длине ЛОВ зависит от частоты, то должны наблюдаться колебания выходной мощности по рабочему диапазону частот. Можно сказать, что поглотитель устраняет паразитную обратную связь, которая возникает при неполном согласовании с нагрузкой. При идеальном согласовании системы с нагрузкой поглотитель вблизи коллектора был бы не нужен. Введение поглотителя, хорошо согласованного с замедляющей системой в рабочем диапазоне частот, устраняет также и возможность генерации колебаний в ЛОВ на прямых пространственных гармониках.

2.2 Контрольные вопросы

1. Объяснить принцип работы приборов типа «О» с длительным взаимодействием.
2. Что такое замедляющие системы и в чем их назначение? Какова зависимость осевой составляющей электрического поля замедляющей системы от координаты z в ЛОВ? (Ось z направлена вдоль замедляющей системы).
3. Что такое фазовая и групповая скорости электромагнитной волны?
4. Чем отличаются друг от друга электромагнитные волны, распространяющиеся в коаксиальной линии передачи, прямоугольном волноводе, замедляющей системе типа связанных резонаторов? Объяснить с использованием дисперсионных диаграмм.
5. Что такое пространственные гармоники? С какими пространственными гармониками взаимодействует электронный поток в ЛОВ?
6. Как устроен и работает генератор на лампе обратной волны типа «О»?
7. В каком направлении по отношению к электронному потоку распространяется энергия СВЧ-поля в ЛОВ и почему?
8. Каким образом ЛОВ может использоваться в режиме усиления?
9. В чем причина нелинейности характеристики электронной перестройки частоты генератора на ЛОВ?

10. Какой вид имеет зависимость выходной мощности ЛОВ от напряжения на коллекторе и какова причина ее «изрезанности»?
11. Укажите величины выходной мощности и КПД ЛОВ. Где применяются ЛОВ?

2.3 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из пакетированной ЛОВ, которая используется в качестве автогенератора, перестраиваемого в широком диапазоне частот, измерителя мощности, частотомера и источников питания. Структурная схема установки для исследования характеристик генератора на ЛОВ приведена на рис. 13.

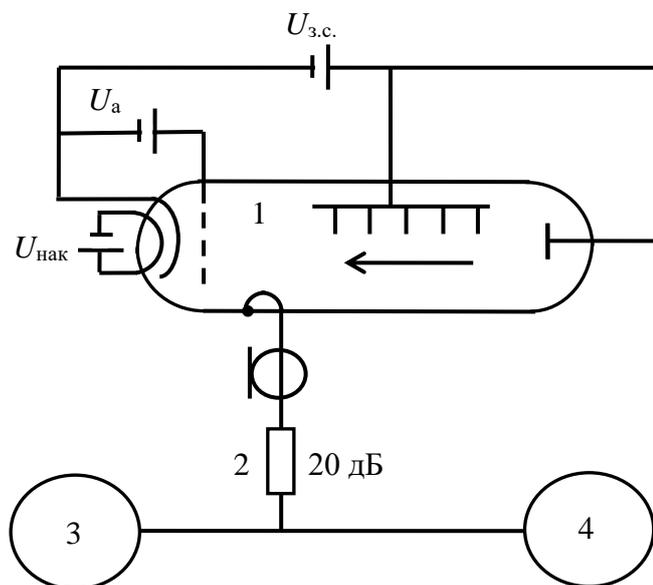


Рис. 13. Структурная схема лабораторной установки для исследования генератора на ЛОВ: 1 – ЛОВ; 2 – аттенюатор 20 дБ; 3 – частотомер; 4 – измеритель мощности

На нить накала катода от источника питания подается постоянное напряжение $U_{\text{нак}}$ равное 5 В. На анод ЛОВ подается регулируемое напряжение $U_a = 0-200$ В, на замедляющую систему и коллектор – $U_{\text{з.с.}} = 200-600$ В. При токе пучка в большей величине пускового тока в ЛОВ возникает генерация. Выходная мощность, генерируемая ЛОВ, через аттенюатор 20 дБ поступает на вход измерителя мощности и через коаксиально-волноводный тройник на вход частотомера.

2.4 Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию и принцип действия генератора на ЛОВ.
2. Ознакомиться с лабораторной установкой.
3. Включить питание частотомера и измерителя мощности.
4. Через 15 минут прогрева откалибровать измеритель мощности.

5. Включить источник питания накала (GPS-1830D) и установить $U_{\text{нак}} = 5 \text{ В}$.
Во избежание перегрева и перегорания нити накала строго запрещается подавать напряжение выше 5 В!

Для питания ЛОВ используется высокое напряжение, поэтому при работе с установкой необходимо соблюдать предельную осторожность.

ЗАПРЕЩАЕТСЯ:

- подавать анодное напряжение при значениях напряжения на замедляющей системе менее 200 В;
- превышать допустимое значение токов анода и замедляющей системы;
- подносить к прибору ферромагнитные материалы на расстояние менее 15 см.

6. Убедиться, что ручки регулировки напряжения на источнике питания анода находятся в крайнем левом положении. Включить (но не подавать напряжение на электроды) источники питания анода и замедляющей системы.
7. Через 2-3 минуты после подачи напряжения на нить накала катода подать высокое напряжение на электроды ЛОВ. Рекомендуется следующий порядок включения:
- а) после прогрева ручками регулировки напряжения на источнике питания замедляющей системы и коллектора лампы установить и подать напряжение 600 В;
 - б) подать анодное напряжение и увеличивая его в пределах от 0 до 200 В, установить ток в цепи замедляющей системы и коллектора равный 15 мА. Убедиться в наличии высокочастотной мощности на измерителе.
8. Поддерживая ток замедляющей системы постоянным (равным 15 мА) исследовать зависимость выходной мощности и частоты колебаний от напряжения на замедляющей системе:
- а) установить на замедляющей системе напряжение 600 В;
 - б) измерить выходную мощность и частоту колебаний при значении напряжения на замедляющей системе: от 600 В до 200 В через каждые 10 В. **Во избежание перегрева и перегорания анодной сетки запрещается подавать напряжение на замедляющей системе менее 200 В.**
9. Построить график зависимости выходной мощности $P(U_{\text{зс}})$ и частоты генерации $f(U_{\text{зс}})$ от напряжения на замедляющей системе.
10. Используя график зависимости частоты генерации от напряжения на замедляющей системе рассчитать графически крутизну электронной перестройки в каждой экспериментальной точке по формуле:

$$S = \frac{df}{dU_{zc}} = \lim_{\Delta U_{zc} \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{\Delta U_{zc}}. \quad (9)$$

При больших осцилляциях зависимости $f(U_{zc})$ ее необходимо усреднить.

11. Построить зависимость крутизны электронной перестройки от напряжения на замедляющей системе $S(U_{zc})$ (в МГц/В). Определить диапазон электронной перестройки δ .
12. Сделать вывод о проделанной работе и написать отчет. В выводе по работе необходимо сравнить полученные характеристики лампы обратной волны с предсказываемыми теорией, в случае расхождений объяснить их причину.

2.5 Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Структурная схема экспериментальной установки.
4. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
5. Графики зависимостей.
6. Выводы.

Библиографический список

1. Н.Д. Федоров. Электронные приборы СВЧ и квантовые приборы. - М.: Атомиздат, 1979. - С.89-95, 115.
2. В.Н. Дулин. Электронные и квантовые приборы СВЧ. - М.: Энергия, 1972. - С.71-79.
3. В.М. Березин, В.С. Буряк, Э.М. Гутцайт, В.П. Марин. Электронные приборы СВЧ - М.: Высшая школа, 1985. - С.146-150.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОРЕЗОНАТОРНОГО МАГНЕТРОНА

Цель работы: Исследование рабочих характеристик и ознакомление с устройством многорезонаторного магнетрона.

Содержание работы:

Исследовать зависимости выходной мощности, частоты генерации и анодного напряжения от анодного тока.

Исследовать зависимости выходной мощности и частоты генерации от положения короткозамыкающего поршня стабилизирующего контура.

3.1 Краткие теоретические сведения

Многорезонаторный магнетрон – электронный прибор типа М, предназначенный для генерации СВЧ-колебаний. Приборами типа М называют приборы, в которых в энергию СВЧ-поля непосредственно преобразуется потенциальная энергия электронов, а не кинетическая энергия, как в приборах типа О. Такое взаимодействие электронов и СВЧ-поля обеспечивается при использовании взаимно перпендикулярных (скрещенных) электрического и магнитного полей. Перед тем как ознакомиться с работой магнетрона, необходимо вспомнить физические основы взаимодействия электронов с электрическими и магнитными полями.

Движение электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях

В ЭВП СВЧ со скрещенными полями применяется два типа расположения электродов: с плоской и цилиндрической (коаксиальной) конструкцией электродов (рис. 14). Рассмотрим движение электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях в отсутствие высокочастотных колебаний. В таких скрещенных полях электроны подвергаются воздействию сил электрического и магнитного полей и движутся по сложным траекториям.

Пусть электрон вылетает из плоского катода с очень маленькой (практически нулевой) скоростью и начинает двигаться к плоскому аноду (рис. 14). В отсутствие магнитного поля под действием силы Кулона F_c электрон будет двигаться прямолинейно с постоянным ускорением и через некоторое время достигнет анода (кривая 1 на рис. 14). Если перпендикулярно плоскости рисунка добавить небольшое магнитное поле B , то на движущийся электрон

помимо силы Кулона будет действовать сила Лоренца F_M^1 . Пока электрон пролетел мало и скорость его v_e мала (сила, действующая на электрон со стороны электрического поля постоянна и равна eE_0 , где e - заряд электрона, а E_0 - напряженность поля), сила F_M , действующая со стороны магнитного поля, тоже мала, и электрон летит почти по прямой. По мере «падения» на анод скорость электрона растет, сила Лоренца, пропорциональная скорости $F_M = ev_e B$, увеличивается, а траектория изгибается (кривая 2 на рис. 14).

При малой индукции магнитного поля B электрон отклоняется от прямой, но анода все же достигает. При увеличении индукции B траектория будет искривляться все больше и больше, и при некотором значении $B=B_{кр}$, называемым критическим, траектория электрона будет лишь едва касаться анода и затем возвращаться к катоду (кривая 3). В этом случае анодный ток в цепи катод - анод прекращается.

При больших значениях индукции $B > B_{кр}$ электрон также не будет доходить до анода (кривая 4). В этом случае, когда скорость v_e становится горизонтальной, электрон начинает возвращаться обратно к катоду. Он движется против электрического поля, и при этом скорость его уменьшается. Наконец, подлетев к катоду, скорость электрона уменьшается до нуля. И все начинает повторяться сначала.

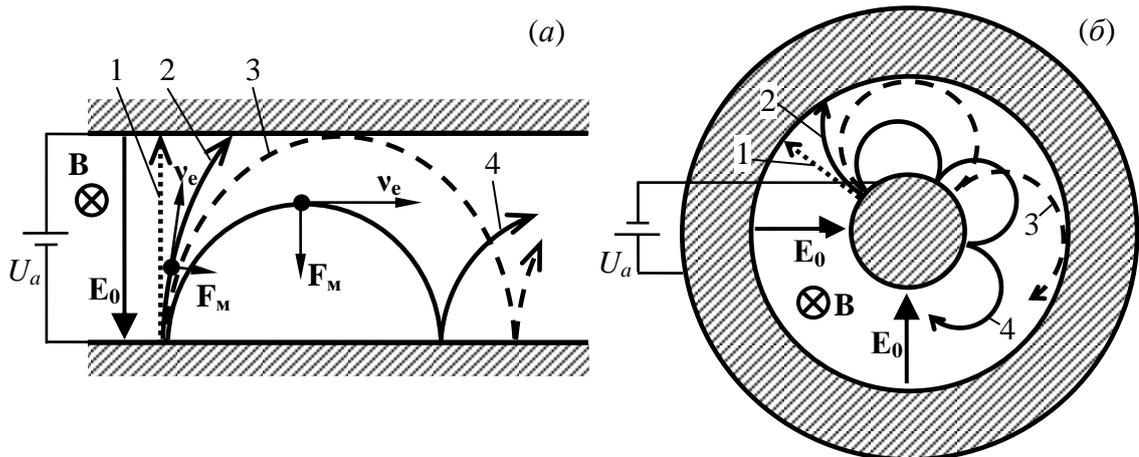


Рис. 14. Движение электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях с плоской - (а) и цилиндрической - (б) конструкцией электродов

Впервые такую возможность управления движением электронов между коаксиальными цилиндрами с помощью постоянного магнитного поля (регулируемого извне), перпендикулярного к постоянному электрическому полю между цилиндрами, показал в 1921 году американский физик Хэлл. Главным в

¹ Сила Лоренца перпендикулярна векторам \mathbf{B} и \mathbf{v}_e , и её направление определяется с помощью правила левой руки: если левую руку расположить так, чтобы составляющая магнитной индукции \mathbf{B} , перпендикулярная скорости заряда, входила в ладонь, а четыре пальца были направлены по направлению движения положительного заряда (в противоположном направлении в случае электронов), то отогнутый на 90 градусов большой палец покажет направление действующей на заряд силы Лоренца F_M .

его экспериментах было открытие докритического ($B < B_{кр}$), критического ($B = B_{кр}$) и закритического ($B > B_{кр}$) статических режимов в магнетроне (рис. 15 а). Стало понятно, что и в двухэлектродной лампе можно управлять электронами, отклоняя их магнитным полем (до этого было известно лишь управляющее и отпирающее действие сетки в триоде).

Естественно, что с повышением анодного напряжения U_a растет и $B_{кр}$, так как отклоняющее действие магнитного поля скажется меньше при большей напряженности электрического поля $E_0 \approx U_a/h$ (h – расстояние между катодом и анодом), заставляющей электроны двигаться прямолинейно в сторону анода. Соотношение между анодным напряжением и индукцией магнитного поля, при котором электроны перестают достигать анода и возвращаются на катод, называют критическим и изображается в осях $U_a - B$ в виде кривой - параболы критического режима (рис. 15 б). Заштрихованная область, расположенная выше параболы, соответствует режиму, когда анодный ток отличен от нуля $I_a \neq 0$ (т.е. все электроны достигают анода). Ниже параболы токопрохождение в статическом режиме² отсутствует $I_a = 0$.

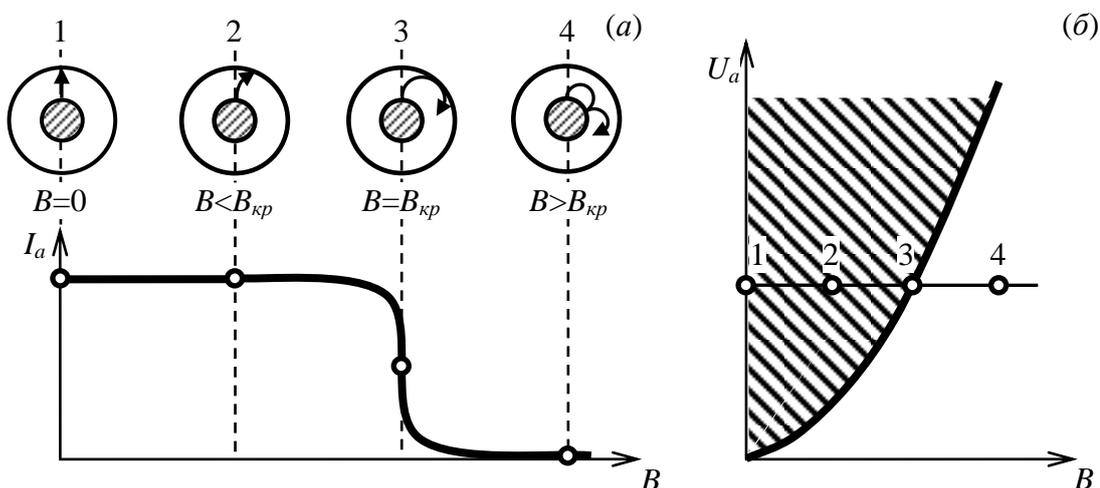


Рис. 15. Зависимость анодного тока, проходящего через магнетрон в статическом режиме, при постоянном анодном напряжении от индукции магнитного поля - (а).

Парабола критического режима магнетрона - (б)

Поскольку всегда существует некоторый разброс в начальных скоростях электронов, эта граница для всего тока магнетрона оказывается несколько сглаженной, что хорошо видно из характеристики магнетрона, приведенной на рис. 15 (а).

Вид траектории движения электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях сильно зависит от их начальной скорости. Решение этой за-

² В отличие от динамического режима работы магнетрона, при котором помимо постоянного электрического и магнитного поля присутствует высокочастотное переменное поле. В этом случае анодный ток в закритическом режиме работы магнетрона обусловлен электронами, которые передают свою потенциальную энергию в энергию высокочастотного поля.

дачи показывает, что движение электрона можно представить как равномерное поступательное движение со скоростью $v_{\text{п}} = E_0/B$ и вращательное с постоянной угловой скоростью равной циклотронной частоте $\omega_{\text{ц}} = eB/m$ (e, m - заряд и масса электрона), по окружности с радиусом R .

С учетом этого траекторию электрона в скрещенных полях можно заменить траекторией точки, находящейся на расстоянии R от центра диска радиусом r , который без скольжения катится вдоль оси z , так что скорость его центра остается постоянной и равной $v_{\text{п}}$ (рис. 16), частота вращательного движения относительно точки касания равна $\omega_{\text{ц}}$, а радиус диска определяется соотношением $r = v_{\text{п}}/\omega_{\text{ц}}$.

Скорость центра $v_{\text{п}}$ называют скоростью *переносного движения*, или *переносной скоростью*. Необходимо отметить, что величина и направление скорости $v_{\text{п}}$ и циклотронная частота $\omega_{\text{ц}}$, которая соответствует угловой частоте вращения диска, и, следовательно, радиус диска, не зависят от начальной скорости электрона. Однако величина R , определяющая расстояние от центра катящегося диска до точки, «прочерчивающей» траекторию электрона, зависит от величины и направления начальной скорости. Для простоты будем считать, что в начальный момент времени электрон влетает в пространство между электродами параллельно оси z (т.е. отсутствует поперечная составляющая скорости). Рассмотрим несколько частных случаев.

а) Начальная скорость электрона равна нулю ($v_{0z} = 0$). В этом случае $R = r$ и траектория электрона образуется точкой, находящейся на ободке катящегося диска. Траектория оказывается обычной циклоидой (кривая 1 на рис. 16). Максимальная скорость соответствует вершине циклоиды и равна двойной скорости переноса: $v_{\text{макс}} = 2v_{\text{п}}$.

б) Начальная скорость электрона положительна ($v_{0z} > 0$). В этом случае величина R становится меньше r , и траектория движения соответствует укороченной циклоиде (кривая 2 на рис. 16).

в) Начальная скорость электрона положительна, но равна переносной скорости ($v_{0z} = v_{\text{п}}$). В этом случае $R = 0$, т.е. траектория электрона – это прямая линия 3, соответствующая смещению центра круга на рис. 16. Скорость движения электрона остается постоянной и равной $v_{\text{п}}$. Прямолинейное и равномерное движение электрона – это результат равенства электрической и магнитной сил $F_{\text{э}} = F_{\text{м}}$, т.е. происходит взаимная компенсация противоположно направленных сил, и электрон движется по инерции равномерно.

г) Начальная скорость электрона отрицательна ($v_{0z} < 0$). В данном случае $R > r$, и электрон движется по удлинённой циклоиде (кривая 4 на рис. 16).

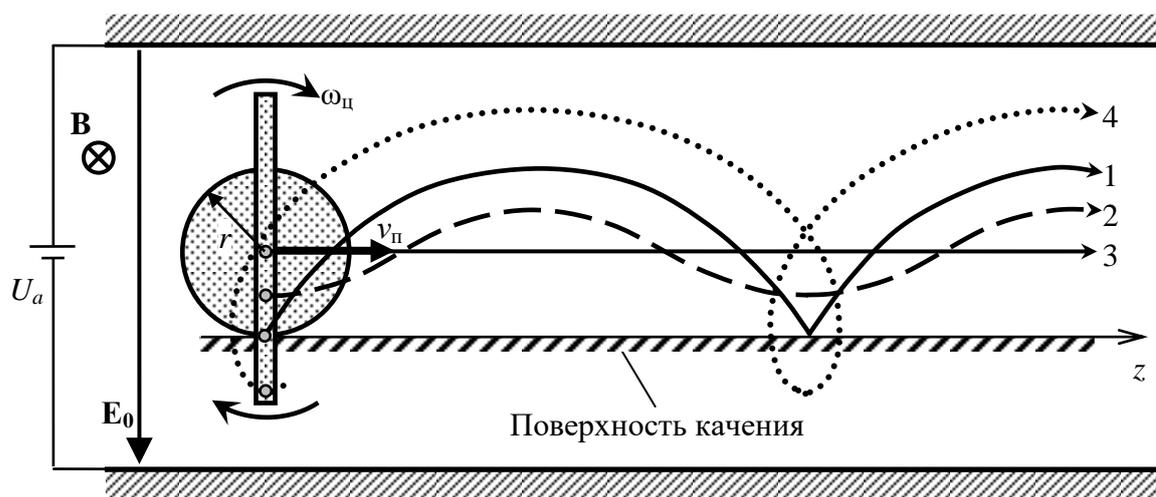


Рис. 16. Траектории движения электронов в плоском магнетроне при различных начальных скоростях: кривая 1 - $v_{0z} = 0$; кривая 2 - $v_{0z} > 0$ и $v_{0z} < v_{п}$; кривая 3 - $v_{0z} = v_{п}$; кривая 4 - $v_{0z} < 0$

Важно пояснить физический смысл скорости $v_{п}$. Поскольку скорость электрона, связанная с вращательным движением колеса в среднем за период равна нулю, то средняя скорость движения электрона (независимо по какой траектории он движется) равна поступательной скорости центра колеса, т.е. скорости переноса $v_{п}$:

$$v_{cp} = v_{п} = E_0/B.$$

Другими словами, средняя скорость электрона не зависит от начальной скорости и траектории движения, а зависит только от отношения напряженностей электрического и магнитного полей.

Взаимодействие электронов с высокочастотным электрическим полем

В предыдущем разделе мы рассмотрели движение электронов в статическом режиме работы магнетрона, т.е. движение во взаимно перпендикулярных статических электрическом и магнитном полях. В динамическом режиме работы, когда в пространстве взаимодействия (в пространстве катод - анод) дополнительно присутствует и неоднородное высокочастотное электрическое поле волны характер движения электронов изменится.

Предположим, что система плоских электродов, рассмотренных в предыдущем параграфе, представляет собой некоторую замедляющую систему, в которой существует бегущая электромагнитная волна. Электрическое поле создается за счет постоянной $U_a = E_0 h$ (h – расстояние между катодом и анодом) и переменной U_{ω} разности потенциалов, а вектор магнитной индукции перпендикулярен плоскости чертежа (рис. 17а).

Допустим, что между электродами системы, от ее начала к концу движется поток электронов (рис. 17а). Наиболее значительного взаимодействия электронов с полем можно ожидать лишь при условии, что электрон длительное время находится в одной и той же фазе по отношению к высокоча-

стотному электрическому полю. При этом следует учесть, что в плоском магнетроне электрон совершает два движения - равномерное поступательное движение вдоль поверхности катода, характеризующееся перемещением центра катящегося круга и вращательное движение, происходящее с циклотронной частотой. С другой стороны, высокочастотное поле в пространстве взаимодействия может быть представлено в виде волн, бегущих между катодом и анодом магнетрона (см. разд. «Пространственные гармоники» лабораторной работы №2). Поэтому условие постоянства фазы высокочастотного поля относительно электрона можно считать как условие равенства фазовой скорости одной из волн $v_{\phi(p)}$ и средней скорости $v_{cp} = v_{п}$, с которой перемещается центр катящегося круга. Соотношение

$$v_{п} = v_{\phi(p)}$$

называют *условием синхронизма* для приборов типа «М». Действие других волн, если у них фазовые скорости сильно отличаются от средней скорости электронов, можно не учитывать.

Рассмотрим поведение типичных электронов, находящихся в разных участках пространства взаимодействия. На рис. 17а изображены силовые линии постоянного электрического поля \mathbf{E}_0 (сплошная стрелка), которое имеет одинаковое значение во всем пространстве взаимодействия, а также силовые линии высокочастотного электрического поля резонаторов (пунктирные стрелки), соответствующие фиксированному моменту времени. В каждой точке пространства высокочастотное электрическое поле \mathbf{E}_\sim имеет поперечную (ортогонально катоду) – \mathbf{E}_y и продольную \mathbf{E}_z составляющие, которые периодически изменяются по периметру анода. Тогда суммарное электрическое поле $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_\sim$ в различных точках пространства взаимодействия имеет различную величину и направление. Действие же суммарного электрического поля на электрон сводится к изменению его скорости и направления движения. Рассмотрим результирующее электрическое поле \mathbf{E} , действующее на электроны типов 1, 2, 3 и 4 (рис. 17).

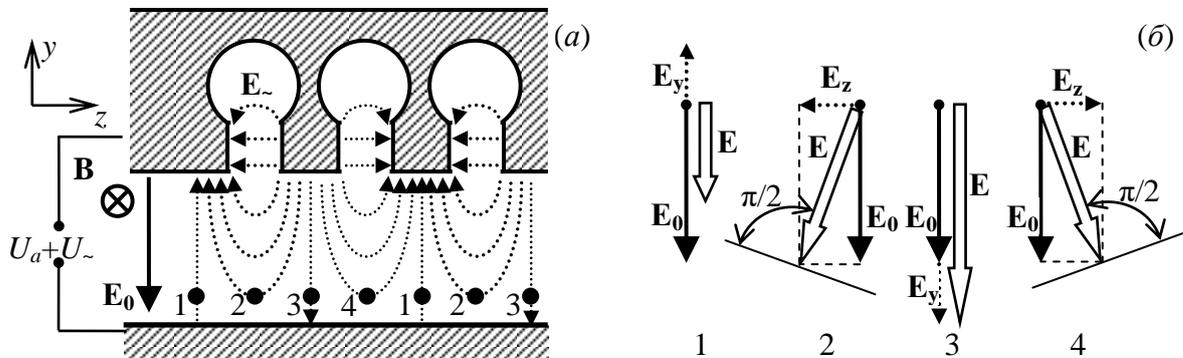


Рис. 17. Взаимодействие электронов с неоднородным электрическим полем – (а). Результирующее электрическое поле, действующее на электроны типов 1, 2, 3 и 4 – (б)

Результирующее электрическое поле \mathbf{E} , действующее на электрон типа 1, не изменяет своего направления, но уменьшается по абсолютной величине на величину E_y (рис. 17б). Скорость центра катящегося круга, определяющего траекторию электрона относительно неподвижной системы координат, равна теперь $v_{\text{п}} = E/B$ и уменьшается по сравнению со скоростью в статическом режиме, равной E_0/B . В результате электрон типа 1 начинает отставать от бегущей волны и постепенно смещается по направлению к электрону типа 4. Похожее изменение происходит и с электроном типа 3, для которого результирующее электрическое поле несколько увеличивается на величину E_y по сравнению со статическим режимом. Поэтому электрон типа 3 движется быстрее волны и постепенно приближается к электрону типа 4. Таким образом, под влиянием поперечной составляющей вектора напряженности переменного электрического поля электроны, движущиеся в скрещенных постоянных электрическом и магнитом полях, группируются в сгустки.

Электрон типа 4 движется в поле \mathbf{E} , мало отличающемся по абсолютной величине от статического электрического поля \mathbf{E}_0 , но имеющем некоторый наклон. Наклон поля означает, что круг, определяющий циклоидальную траекторию, катится по плоскости, перпендикулярной вектору \mathbf{E} , то есть наклоненной в сторону анода. На рис. 18 показана соответствующая траектория электрона типа 4. Электрон, оставаясь в синхронизме с волной, постепенно движется по направлению анода.

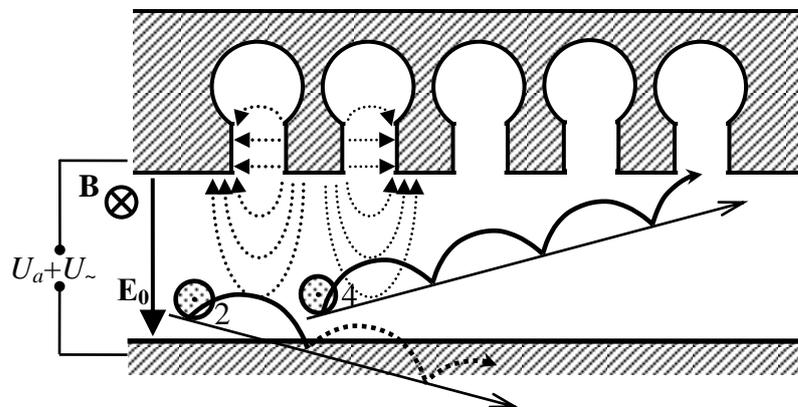


Рис. 18. Траектории электронов типов 2 и 4 при наличии синхронизма с бегущей волной

Таким образом, электрон типа 4 длительное время находится в области максимального тормозящего тангенциального поля. При каждом циклоидальном колебании электрон теряет часть потенциальной энергии и поднимается все ближе к аноду. Это изменение энергии вызвано взаимодействием электронов с переменным полем. Следовательно, потенциальная энергия электронов передается полю волны. Заметим, что при этом средняя скорость $v_{\text{п}}$ и соответственно средняя кинетическая энергия электрона $W_k = mv_{\text{п}}^2/2$ остаются примерно постоянными³.

³ Кинетическая энергия, теряемая электроном в тормозящем поле волны, передается СВЧ полю, но эта потеря восполняется за счет уменьшения потенциальной энергии электрона при его смещении вверх под действием

С физической точки зрения электрон типа 4, находящийся в максимуме тормозящего поля, является наиболее «благоприятным» для усиления и поддержания автоколебаний в магнетроне. Электроны типа 1 и 3 постепенно «улучшают» свою форму относительно СВЧ-поля, и, попадая в тормозящее продольное поле, также становятся «благоприятными» для генерации.

Рассмотрим теперь движение электрона типа 2 (см. рис. 18). Влетая в пространство взаимодействия, он подвергается действию ускоряющего продольного поля. Плоскость, по которой происходит качение круга, наклоняется в сторону катода. В конце первого циклоидального колебания электрон, поглотив часть энергии от поля, ударяется о катод и прекращает дальнейшее существование в пространстве взаимодействия, как показано на рис. 18. Электрон типа 2 является «неблагоприятным» для усиления колебаний.

Таким образом, происходит сортировка электронов на «благоприятные» и «неблагоприятные», в результате которой образуются сгустки электронов относительно тех электронов, которые начали свое движение в максимуме тормозящего продольного поля. Модуляция электронного потока по плотности происходит автоматически, без участия какого-либо специально созданного внешнего управляющего устройства. Основную роль в группировке (фазовой фокусировке) в магнетроне играет поперечная составляющая. Под влиянием поперечной составляющей вектора напряженности переменного электрического поля электроны, движущиеся в скрещенных постоянных электрическом и магнитном полях, группируются в сгустки. Роль продольной составляющей сводится к отбору потенциальной энергии от электронов.

Устройство и принцип действия

Многорезонаторными магнетронами называют электронные приборы, в которых образование электронного потока и его взаимодействие с переменными электрическими полями ряда колебательных контуров-резонаторов происходит в стационарных скрещенных электрическом и магнитном полях. Магнетроны служат генераторами незатухающих колебаний в диапазоне от миллиметровых до метровых волн.

Различные по назначению магнетроны перекрывают диапазон частот от 300 МГц до 300 ГГц. Выходная мощность магнетронов непрерывного действия составляет от долей ватта до нескольких десятков киловатт, а магнетронов импульсного действия – от 10 Вт до 10 МВт. Электронный КПД магнетронов может превышать 70%. Магнетроны используют в мощных передающих устройствах, например в передатчиках радиолокационных станций. Магнетроны применяют также в ускорителях заряженных частиц и в установках для высокочастотного нагрева.

Устройство типичного многорезонаторного магнетрона показано на рис. 19. Анодный блок многорезонаторного магнетрона представляет собой

E_0 . Поэтому говорят, что в приборах типа «М» в энергию СВЧ поля преобразуется потенциальная энергия электронов. Кинетическая энергия участвует в процессе взаимодействия, но она служит лишь посредником, так как ее значение периодически восстанавливается.

невысокий медный цилиндр с рядом отверстий, параллельных оси цилиндра. Вместе со щелями, соединяющими эти отверстия с центральным, они образуют объемные резонаторы. Таким образом, анодный блок представляет собой систему связанных контуров. Часть анодного блока, заключенная между двумя соседними щелями, называется сегментом. В центральном отверстии расположен катод в виде цилиндра, боковая поверхность которого покрыта оксидным слоем. Пространство между катодом и анодным блоком называется пространством взаимодействия. Здесь поток электронов, движущихся от катода к аноду, взаимодействует с переменными электрическими полями, сконцентрированными вблизи щелей колебательных систем. В одном из резонаторов имеется петля связи, с помощью которой энергия высокочастотных колебаний отводится из магнетрона. Как правило, анодный блок магнетрона заземляется, а катоду сообщается достаточно высокий отрицательный потенциал.

Магнетрон помещается в постоянное магнитное поле, образуемое постоянным магнитом, полюсы которого находятся вблизи торцевых поверхностей анодного блока. Поэтому движение электронов в пространстве взаимодействия подобно движению электронов в системе цилиндрических электродов, помещенной в осевое магнитное поле (рис. 15а). Однако траектории электронов в магнетроне более сложные, так как, помимо постоянных электрического и магнитного полей, в пространстве взаимодействия имеется переменное электрическое поле, влияющее на движение электронов.

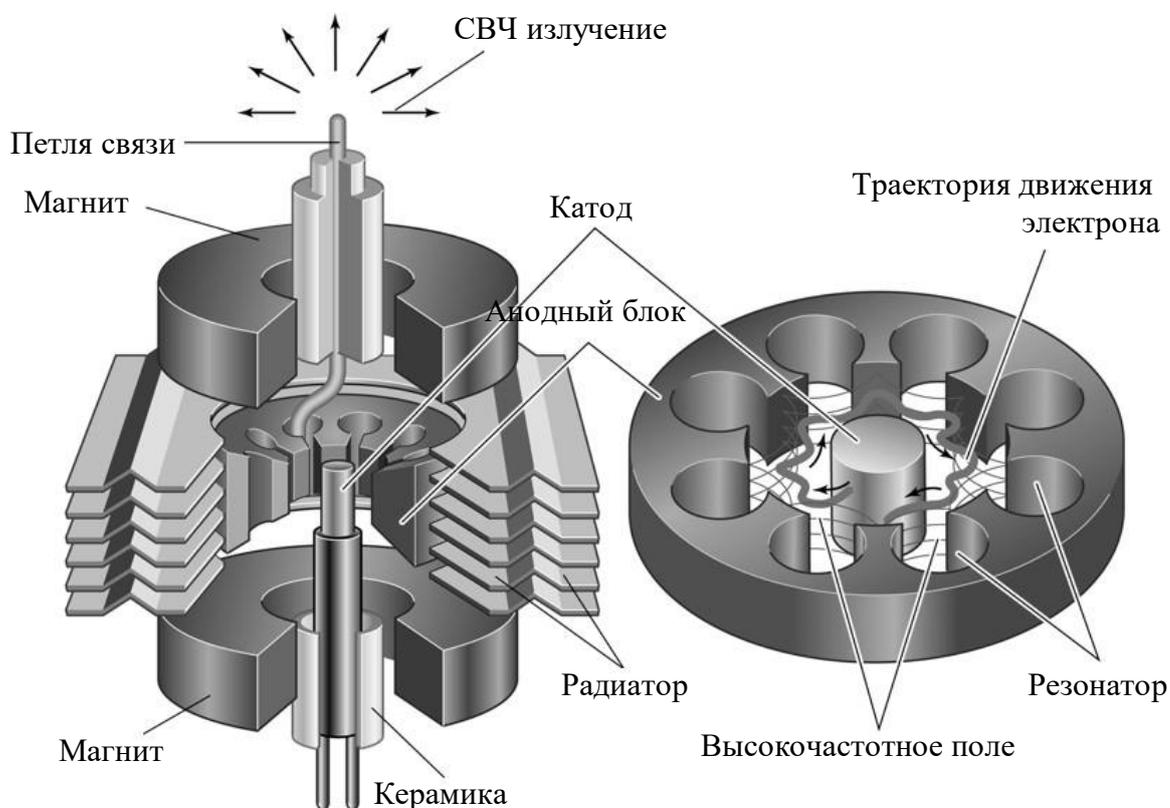


Рис. 19. Устройство многорезонаторного магнетрона

Механизм возникновения незатухающих колебаний в магнетроне такой же, как и в любом автогенераторе. Начальные колебания в резонаторах магнетрона возникают в результате флуктуаций электронного потока. Частота этих колебаний в общем случае несколько отличается от собственной резонансной частоты колебательных систем, так как анодный блок магнетрона образует систему сложно связанных контуров. Колебания поддерживаются за счет энергии источника постоянного напряжения анод - катод, которая с помощью электронного потока, ускоряемого постоянным электрическим полем и взаимодействующего с переменным электрическим полем вблизи щелей резонаторов, передается полю волны. Такую направленную передачу энергии можно осуществить, как известно, если электронный поток взаимодействует с переменным электрическим полем определенной фазы. Для этого электронный поток должен быть сгруппирован в сгустки, время прохождения которых вблизи щели резонатора совпадало бы со временем существования там поля в нужной фазе. Движение электронов от катода к аноду в магнетроне происходит не во всех азимутальных направлениях равномерно. Потоки электронов к аноду создаются лишь в некоторых областях пространства взаимодействия, образуя так называемые электронные спицы (рис. 20). Число спиц зависит от характера высокочастотных колебаний и в наиболее употребительном режиме работы магнетрона равно половине числа резонаторов. Электроны в спицах перемещаются к аноду по сложным петлеобразным траекториям, так как характер их движения определяется суммарным воздействием постоянного и переменного электрических полей и постоянного магнитного поля.

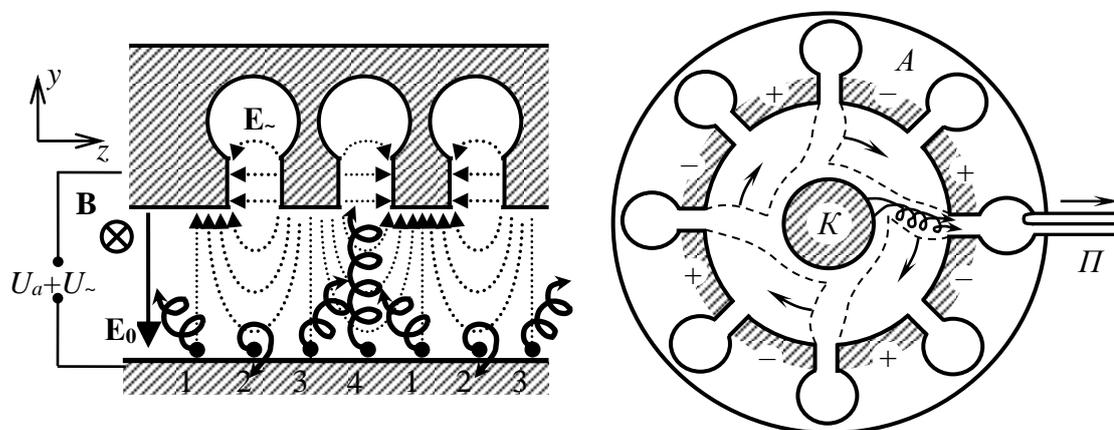


Рис. 20. Электронные спицы в магнетроне

Спицы образуются вблизи участков катода, лежащих напротив максимального значения тормозящего поля. Спицы как бы вращаются в пространстве взаимодействия со скоростью, зависящей от частоты колебаний и фазовых соотношений для полей двух соседних резонаторов.

Скорость вращения спиц такова, что моменты прохождения электронов вблизи щелей резонаторов всегда совпадают с моментами существования там нужной фазы поля. Иначе говоря, вращение спиц синхронизируется с изменением фазы высокочастотных колебаний.

При сложном движении в спице от катода к аноду электроны на каждом витке теряют часть своей потенциальной энергии, которая и передается полю. Электроны, отдавшие свою энергию полю, непрерывно уходят на анод, а спицы пополняются новыми электронами, эмиттированными катодом. Таков в общих чертах принцип работы многорезонаторного магнетрона.

3.2 Контрольные вопросы

1. Какие электронные приборы называются приборами типа «М»?
2. Как определить потенциальную энергию электрона, находящегося во внешнем электрическом поле? Как определить его кинетическую энергию?
3. Изобразите траектории движения электронов в плоском магнетроне при различных значениях индукции магнитного поля. Объясните причину «изогнутости» траекторий.
4. Что называется критической индукцией магнитного поля и параболой критического режима? Предложите методику эксперимента для построения параболы критического режима.
5. Изобразите траектории движения электронов в плоском магнетроне при разных начальных скоростях. Что такое скорость переноса? Чему равна средняя скорость движения электронов?
6. Объясните сущность процесса группирования (фазовой фокусировки) в динамическом режиме. Как происходит преобразование потенциальной энергии электрона в энергию высокочастотного поля?
7. Как устроен и работает магнетрон?
8. При каком значении индукции магнитного поля в магнетроне могут возникнуть колебания? Что понимают под напряжением синхронизации?
9. Чем различаются виды колебаний в магнетроне? Что такое колебания π -вида?
10. Что такое «связки» в магнетроне, для чего они служат?
11. Изобразите семейство рабочих характеристик магнетрона.
12. Укажите величины выходной мощности и КПД многорезонаторных магнетронов. Где применяются магнетроны?

3.3 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из многорезонаторного магнетрона, частотомера, измерителя мощности, источников питания и элементов волновоодно-измерительного тракта. Структурная схема установки приведена на рис. 21. Для канализации СВЧ-энергии в установке используются волноводы сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$.

Исследуется магнетрон непрерывного режима с постоянным магнитным полем и стабилизирующим контуром, включенным в один из резонаторов анодного блока. Стабилизирующий контур (отрезок измерительного волновода с короткозамкнутым поршнем) позволяет не только стабилизировать частоту колебаний магнетрона, но и производить ее механическую настройку.

Расстояние от плоскости фланца измерительного волновода короткозамыкающего поршня проградуировано через 0.01 мм.

В любом из режимов магнетрон генерирует сигнал с выходной мощностью не менее 12 Вт. Эта величина значительно превышает допустимые уровни входных сигналов измерительных приборов. Для передачи приемлемых уровней мощности в измерительный канал установки используется 14 дБ направленный ответвитель и 30 дБ резистивный аттенюатор. Основная мощность поступает на согласованную нагрузку, в качестве которой используется отрезок волновода с помещенным внутрь поглотителем.

Частота колебаний в данной работе измеряется частотомером, а мощность – ваттметром, верхний предел измерений которого не превышает 10 мВт.

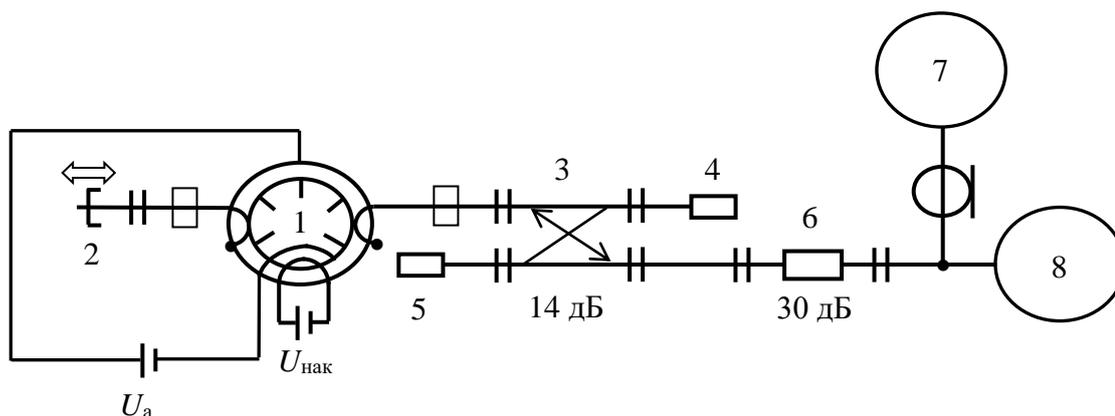


Рис. 21. Структурная схема лабораторной установки для исследования многорезонаторного магнетрона: 1 – многорезонаторный магнетрон; 2 – стабилизирующий контур; 3 – 14 дБ направленный ответвитель; 4, 5 – поглощающая нагрузка; 6 – 30 дБ аттенюатор; 7 – частотомер; 8 – измеритель мощности

3.4 Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию и принцип действия многорезонаторного магнетрона.
2. Ознакомиться с лабораторной установкой.
3. Включить питание частотомера и измерителя мощности.
4. Через 15 минут прогрева откалибровать измеритель мощности.
5. Включить источник питания накала (GPS-1830D) и установить $U_{\text{нак}} = 6.3$ В.
Во избежание перегрева и перегорания нити накала строго запрещается подавать напряжение выше 6.3 В!
6. После 8-10 минутного прогрева катода включить и установить анодное напряжение U_a порядка 575-630 В, при котором ток анода магнетрона I_a будет равен 80 мА; Через две, три минуты уменьшить накальное напряжение $U_{\text{нак}}$ до 4.5 В, поддерживая при этом регулировкой анодного напряжения ток $I_a = 80$ мА.

ПОМНИТЕ ЧТО:

- магнетрон работает при высоком напряжении;
- **недопустимо** превышение анодного тока более 85 мА во избежание выхода магнетрона из строя.

7. Установить положение стабилизирующего контура равным нулевому значению. Измерить зависимости выходной мощности $P(I_a)$, частоты генерации $f(I_a)$ и анодного напряжения $U_a(I_a)$ от анодного тока I_a следующим образом:
 - а) установить $I_a = 80$ мА;
 - б) плавно уменьшая I_a , через каждые 5 мА производить измерения до срыва генерации колебаний в магнетроне.
8. Установить $I_a = 70$ мА и, изменяя настройку стабилизирующего контура в пределах от 0 до 20 мм, измерить мощность P , частоту генерации f и анодное напряжение U_a через каждые 2 мм смещения короткозамыкающего поршня. При измерениях необходимо следить, чтобы анодный ток оставался равным 70 мА.
9. Рассчитать КПД магнетрона в зависимости от анодного тока и положения поршня.
10. Построить графики зависимостей:
 - а) выходной мощности, частоты, анодного напряжения и КПД от анодного тока;
 - б) выходной мощности, частоты, анодного напряжения и КПД от положения поршня.
11. Сделать вывод по проделанной работе и написать отчет. В выводе по работе необходимо сравнить полученные характеристики магнетрона с предсказываемыми теорией, в случае расхождений объяснить их причину.

3.5 Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Структурная схема лабораторной установки.
4. Таблица экспериментальных и расчетных данных.
5. Графики зависимостей.
6. Вывод.

Библиографический список

1. Н.Д. Федоров. Электронные приборы СВЧ и квантовые приборы. - М.: Атомиздат, 1979. - С.115-130.
2. В.Н. Дулин. Электронные и квантовые приборы СВЧ. - М.: Энергия, 1972. - С.88-93.

3. В.М. Березин, В.С. Буряк, Э.М. Гутцайт, В.П. Марин. Электронные приборы СВЧ. - М.: Высшая школа, 1985. - С.78-123.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА НА ДИОДЕ ГАННА

Цель работы: Исследование рабочих характеристик и ознакомление с устройством генератора на диоде Ганна.

1.1 Краткие теоретические сведения

В 1963 г. сотрудник фирмы IBM Джон Ганн, занимавшийся явлениями, связанными с возбужденными носителями заряда в полупроводниках, обнаружил, что в легированных образцах арсенида галлия (n-GaAs) и фосфида индия (n-InP) в сильных электрических полях возникают электрические колебания с частотой в несколько ГГц при превышении электрическим полем некоторой пороговой величины (2-4 кВ/см). Частота колебаний определялась длиной образца, не зависела от параметров внешней цепи, удельного сопротивления и кристаллографической ориентации исследованных образцов и была близка к обратной величине от времени пролета электронов через образец. Позже физик Герберт Кремер показал, что обнаруженный эффект, получивший название эффекта Ганна, связан с явлениями междолинного переноса носителей заряда и возникновением в связи с этим неустойчивости объемного заряда в некоторых полупроводниках. На этом эффекте были созданы полупроводниковые приборы для генерации СВЧ колебаний – диоды Ганна (ДГ).

Структура и вольт-амперная характеристика диодов Ганна

Диод Ганна – это полупроводниковый прибор СВЧ, обладающий отрицательной дифференциальной проводимостью. Диод Ганна представляет собой полупроводниковую структуру из однородного полупроводника, обычно арсенида галлия n-типа (n-GaAs), не содержащую p-n-переходов (рис. 22).

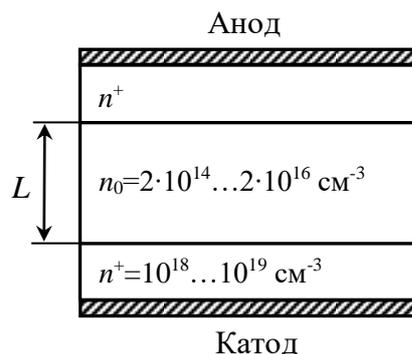


Рис. 22. Структура диода Ганна

Размеры структуры выбираются исходя из условий режима их работы и требуемых параметров. Площадь полупроводниковой структуры обычно составляет $2 \cdot 10^{-3} \dots 1 \text{ мм}^2$, толщина изменяется в пределах $5 \cdot 10^{-2} \dots 1 \text{ мм}$. Для защиты от внешних воздействий и удобства включения в СВЧ-цепь диод Ганна помещают в специальный корпус.

Отрицательная дифференциальная проводимость в ДГ возникает из-за эффекта междолинного переноса электронов, характерного для ряда полупроводников, зона проводимости которых имеет многодолинную структуру. Рассмотрим для примера зонную диаграмму арсенида галлия, в зоне проводимости которого имеется две долины – верхняя и нижняя (рис. 23). Электроны, находящиеся в нижней долине, имеют эффективную массу m_1^* , подвижность μ_1 и концентрацию n_1 . Электроны, находящиеся в верхней долине, имеют, соответственно, эффективную массу m_2^* , подвижность μ_2 и концентрацию n_2 . Эффективная масса электрона в кристаллической решетке отличается от массы покоя свободного электрона m_0 вследствие взаимодействия электронов с решеткой, причем для арсенида галлия $m_1^*=0.07m_0$, а $m_2^*=1.2m_0$, то есть в верхней долине электроны «тяжелее», чем в нижней. Поэтому подвижность μ_2 и скорость $v_2=\mu_2 E$ электронов верхней долины ниже, чем подвижность μ_1 и скорость $v_1=\mu_1 E$ электронов нижней долины.

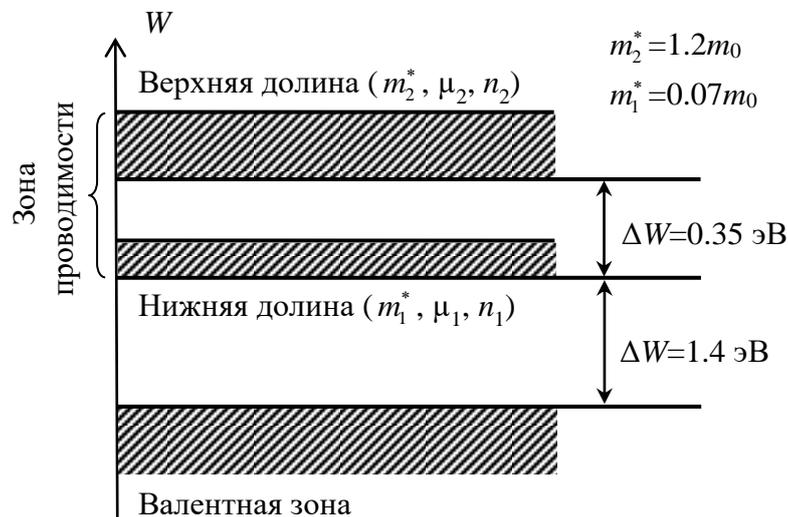


Рис. 23. Зонная диаграмма для n-GaAs

В отсутствие внешнего поля, при комнатной температуре $n_1 \gg n_2$, т.е. практически все электроны зоны проводимости будут находиться в нижней долине. С увеличением напряжения U , прикладываемого к диоду, возрастают напряженность поля $E = U/L$ (L – длина диода) и энергия электронов проводимости, в результате чего все больше электронов переходит из нижней долины в верхнюю (n_2 – возрастает, а n_1 – уменьшается).

График зависимости средней дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля $v(E)$ приведен на рис. 24. На начальном участке зависимости в полупроводнике преобладают «быстрые» электроны из нижней энергетической долины, поэтому скорость меняется по закону $v=\mu_1 E$. С увеличением напряженности поля из-за перехода все большего числа электронов в верхнюю долину происходит замедление роста средней дрейфовой скорости электронов, затем скорость достигает максимума и начинает уменьшаться из-за того, что в полупроводнике начинают преобладать «мед-

ленные» электроны из верхней долины. Напряженность поля, при которой скорость электронов максимальна, называют пороговой (или критической). Для GaAs n-типа $E_{\text{пор}} \approx 3.5$ кВ/см. При значениях поля значительно выше $E_{\text{пор}}$ все электроны в основном находятся в верхней долине, поэтому средняя дрейфовая скорость электронов должна зависеть от напряженности поля как $v = \mu_2 E$, однако на практике наблюдается насыщение скорости из-за взаимодействия электронов с кристаллической решеткой.

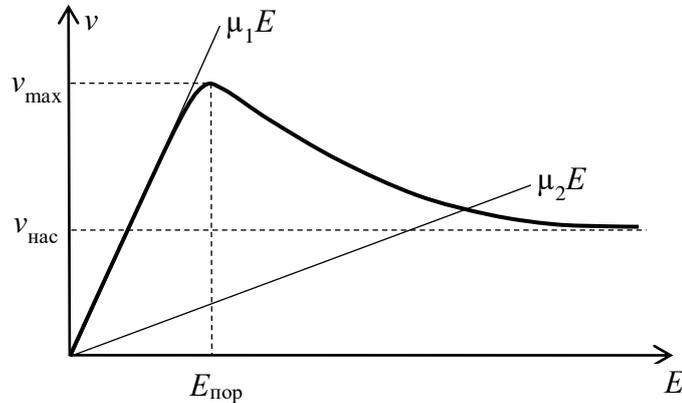


Рис. 24. Зависимость средней дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля для n-GaAs

Следует отметить, что для однородного полупроводника напряженность поля пропорциональна приложенному напряжению, а плотность тока пропорциональна средней дрейфовой скорости электронов, поэтому вольт-амперная характеристика идеально однородного образца $I(U)$ повторяет приведённую на рис. 24 зависимость $v(E)$. Именно наличие падающего участка на вольт-амперной характеристике прибора (участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением) обуславливает усилительные и генераторные свойства диода Ганна.

Домены сильного поля

Рассмотренная выше зависимость $v(E)$ справедлива только для идеально однородного образца полупроводника. В реальных образцах при напряжении, соответствующем падающему участку зависимости $v(E)$, происходят процессы образования, движения и исчезновения доменов сильного электрического поля, в результате чего возникают спонтанные колебания электрического тока через диод. При этом вид вольт-амперной характеристики диода будет зависеть от режима работы, который в свою очередь определяется внешней цепью, в которую включен диод.

Доменами сильного поля называются области высоких значений электрического поля в образце полупроводника. Они образуются следующим образом. Если при напряженности поля в образце выше $E_{\text{пор}}$ в какой-то области структуры ДГ (заштрихованная область на рис. 25а) электрическое поле по какой-то причине (например, вследствие флуктуации в распределении ионизированных атомов примеси) оказалось немного больше среднего, средняя дрейфовая скорость электронов в этой области несколько упадет (см. зави-

симость на рис. 24). К замедлившимся в этой области электронам, догоняя их, будут притекать носители, находящиеся ближе к катоду, и одновременно от них начнут «убегать» электроны, находящиеся ближе к аноду. В результате этого образуются и вырастут области отрицательного и положительного зарядов, и одновременно с этим вырастет и напряженность электрического поля в области флуктуации. С ростом напряженности поля движение электронов в области флуктуации еще более замедлится, процесс образования слоев объемного заряда усилится и т. д. При этом, если напряжение на диоде поддерживается постоянным, поле (а, следовательно, и дрейфовая скорость носителей) вне флуктуации будет падать. Равновесие в такой приближенной модели наступит тогда, когда скорость движения образовавшегося электрического слоя окажется равной дрейфовой скорости электронов вне его. Устанавливающееся при этом распределение зарядов и электрического поля показано на рис. 25 (б,в). Внутри домена сильного поля (область x_1-x_2 на рис. 25в) находятся «медленные» электроны в поле выше порогового, а вне домена «быстрые» электроны в поле ниже порогового. Максимальное поле в домене достигает величин 40...100 кВ/см, тогда как поле вне домена равно примерно 1...2 кВ/см.

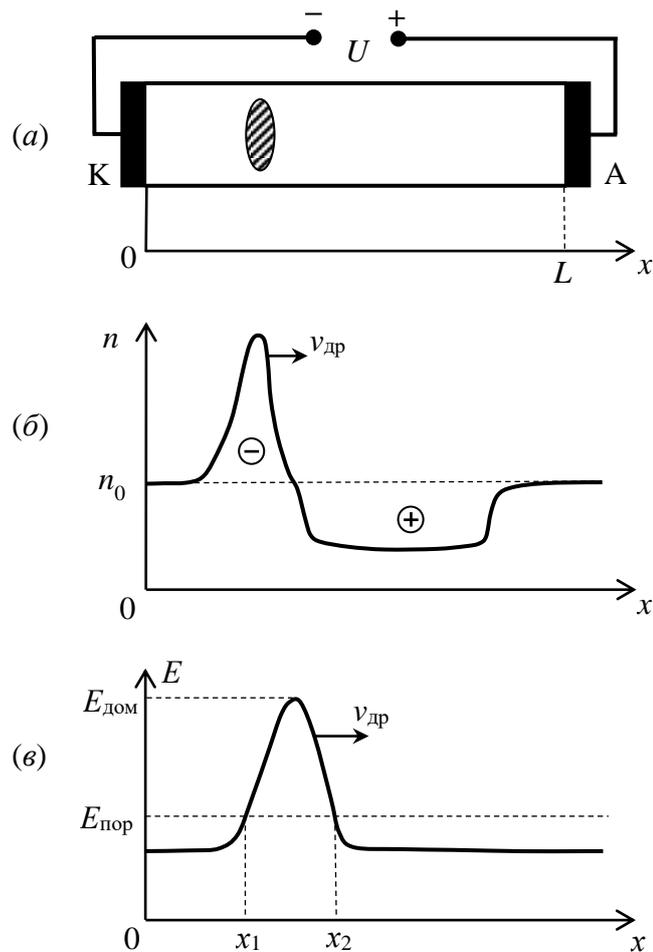


Рис. 25. Структура диода Ганна (а), распределение концентрации электронов (б) и напряженности электрического поля (в) при образовании домена

Обычно в образце полупроводника возникает всего один домен сильного поля. Действительно, часть напряжения, приложенного к образцу, падает на домене, и вне домена напряженность электрического поля оказывается ниже порогового значения. Домен образуется в диодах Ганна как правило в непосредственной близости от катода и, пройдя через кристалл со скоростью порядка 10^7 см/с (примерно равной дрейфовой скорости носителей вне домена), подойдя к аноду, исчезает. После этого у катода образуется новый домен, и цикл повторяется.

Так как средняя дрейфовая скорость электронов при наличии в образце домена ниже чем без него, образование домена вызывает спадание тока через диод до минимального значения, которое будет сохраняться в течение всего времени пролета домена от катода к аноду (рис. 26). Частота колебаний тока

при этом определяется временем пролета домена $f_{np} = \frac{1}{T_{np}} = \frac{v_{др}}{L}$.

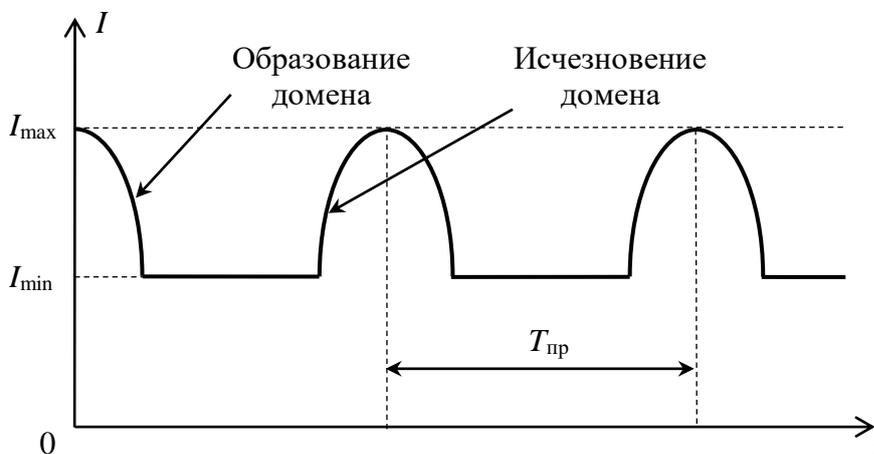


Рис. 26. Зависимость тока через диод Ганна от времени

Режимы работы диода Ганна

Простейшим генератором СВЧ могла бы быть цепь, в которой последовательно включены ДГ, нагрузочное сопротивление и источник постоянного напряжения. В этом случае ДГ работает в рассмотренном ранее режиме, который называется пролетным. На практике такой режим не получил распространения из-за низкого КПД и невозможности управления частотой.

Обычно генератор на ДГ представляет собой объемный резонатор, в который помещается диод Ганна. В этом случае на постоянное напряжение источника питания накладывается СВЧ-напряжение резонатора, которое оказывает влияние на процессы образования и исчезновения доменов.

В зависимости от частоты и амплитуды переменного напряжения резонатора, а также питающего напряжения и параметров образца полупроводника, возможны процессы задержки образования доменов, гашения доменов, а также режимы, когда домены вообще не успевают образовываться либо образуются частично. Поэтому генератор на диоде Ганна может работать в одном из нескольких существенно отличающихся режимов:

- доменные режимы:
 - пролетный,
 - с задержкой образования доменов,
 - с гашением доменов;
- режим ограниченного накопления объемного заряда;
- гибридные режимы.

Для *доменных режимов* характерно существование сформировавшегося дипольного домена в течение значительной части периода колебаний. Изменяя сопротивление нагрузки генератора, можно получить три различных доменных режима: пролетный, с задержкой домена, с гашением домена. Доменные режимы реализуемы, как правило, только на достаточно низких частотах ($f \approx 1 \dots 5$ ГГц). При повышении частоты в диоде начинают сказываться некоторые не упоминавшиеся ранее физические процессы. В частности, время формирования домена для арсенида галлия при типовом уровне легирования составляет порядка $0.5 \cdot 10^{-10}$ с. Поскольку уже при частоте порядка 10 ГГц это время превышает половину периода колебаний, в генераторах на диодах Ганна сантиметровых и миллиметровых волн используются другие режимы.

Режим ограниченного накопления объемного заряда (ОНОЗ) основан на предотвращении формирования домена путем использования инерционности данного процесса. Для его получения рабочая частота, напряжение питания и амплитуда колебаний выбираются настолько большими, чтобы напряжение на диоде Ганна проходило всю область отрицательной дифференциальной проводимости за время, малое по сравнению со временем формирования домена. В результате поле внутри диода равномерно распределяется вдоль длины его активной части, а динамическая вольт-амперная характеристика диода полностью совпадает по форме с зависимостью скорости дрейфа от напряженности поля. В режиме ОНОЗ диод Ганна может работать на частотах, многократно превышающих пролетную частоту.

Гибридными режимами называют все режимы промежуточные между ОНОЗ и чисто доменными. От режима ОНОЗ гибридные режимы отличает существование в течение части периода колебания достаточно большого неравновесного пространственного заряда, обычно имеющего вид одного или нескольких дипольных доменов. Однако время формирования пространственного заряда в этом режиме достаточно велико по сравнению с периодом колебаний, и он начинает оказывать существенное влияние на протекающий через прибор ток только тогда, когда мгновенное напряжение на нем, превысив пороговое значение, пройдет основную часть падающего участка ВАХ.

Конструкции и параметры генераторов на диодах Ганна

Для получения генераторов диоды Ганна включают в состав полосковых, коаксиальных или волноводных резонаторов. Конструкция генератора на диоде Ганна определяется в основном диапазоном рабочих частот. На рис. 27 приведена одна из возможных конструкций генератора волноводного типа, которая применяется в верхней части сантиметрового и в миллиметровом диапазонах длин волн.

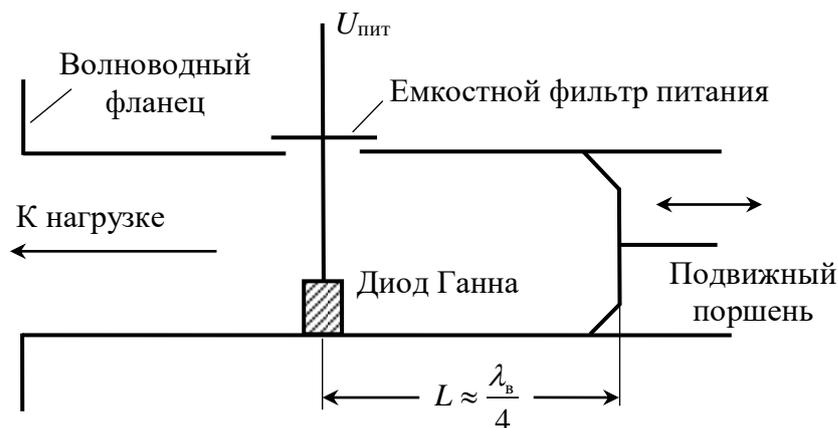


Рис. 27. Устройство генератора волноводного типа на диоде Ганна

Колебательная система генератора образована короткозамкнутым отрезком волновода. Расстояние между диодом и короткозамкнутой стенкой волновода определяет частоту колебаний генератора и может регулироваться с помощью специального поршня. Питательное напряжение подается через емкостной фильтр, предотвращающий попадание СВЧ-колебаний в цепь питания. Выходной волноводный фланец генератора подсоединяется к волноводной нагрузке. Корпус генератора одновременно выполняет роль радиатора охлаждения для диода.

Генераторы на ДГ широко используются в качестве гетеродинов приемников, возбуждателей передатчиков и источников накачки параметрических усилителей. Они обеспечивают получение мощностей в широком диапазоне частот (5...100 ГГц), их выходная мощность в непрерывном режиме достигает единиц ватт, КПД не превышает 20%. Диапазон механической перестройки частоты достигает 1.5:1. Электронная перестройка мала – типичная величина крутизны перестройки составляет 5...90 МГц/В.

1.2 Контрольные вопросы

1. Объяснить сущность эффекта Ганна, используя двухдолинную модель энергетических уровней полупроводника.
2. Как распределены электроны и какова напряженность электрического поля в образце полупроводника при наличии в нем домена сильного поля?
3. Какие существуют режимы работы генераторов на диодах Ганна? В чем их различие?
4. Как устроен диод Ганна и генератор на его основе?
5. Используя вольт-амперную характеристику диода Ганна постройте зависимость тока диода от времени в одном из режимов генерации.
6. Каковы области применения диодов Ганна? В чем заключаются достоинства и недостатки генераторов на диодах Ганна?

1.3 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из волноводного генератора на диоде Ганна, частотомера, измерителя мощности, и источника питания. Структурная схема установки для исследования характеристик генератора на диоде Ганна показана на рис. 28.

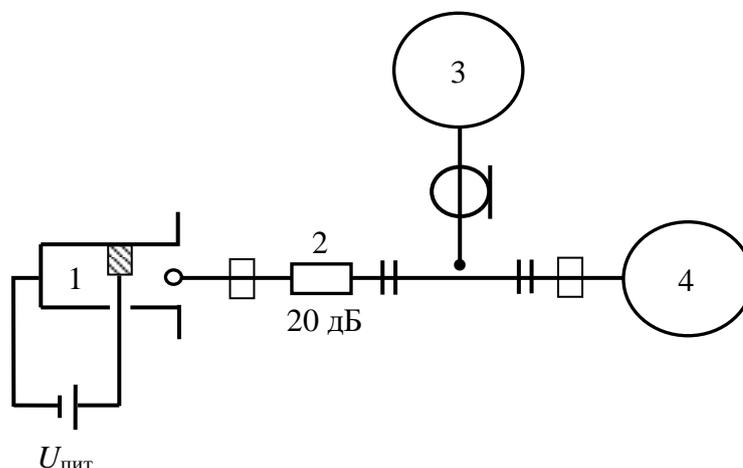


Рис. 28. Структурная схема лабораторной установки для исследования характеристик генератора на диоде Ганна: 1 – генератор на диоде Ганна; 2 – аттенюатор 20 дБ; 3 – частотомер; 4 – измеритель мощности

На диод, входящий в состав генератора, подается от источника питания постоянное регулируемое напряжение $U_{\text{пит}}$ от 0 до 10 В. Напряжение и ток через диод измеряются встроенными в переднюю панель источника питания вольтметром и амперметром.

Выходная мощность, генерируемая генератором на диоде Ганна, через аттенюатор 20 дБ поступает на вход измерителя мощности и через коаксиально-волноводный тройник на вход частотомера.

1.4 Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию и принцип действия генератора на диоде Ганна.
2. Ознакомиться с лабораторной установкой.
3. Включить питание измерителя мощности.
4. Через 15 минут прогрева откалибровать измеритель мощности.
5. Включить источник питания генератора (перед включением вывернуть ручку регулировки напряжения в крайнее левое положение).
6. Изменяя напряжение питания источника от 0 до 10 В с шагом 0.2 В, измерить для каждого значения напряжения силу тока I , проходящего через диод, генерируемую мощность P и частоту f .
7. Рассчитать КПД генератора для каждого значения напряжения источника питания.

8. Рассчитать зависимости статического $R_c=U/I$ и дифференциального $R_d=dU/dI$ сопротивлений диода для каждого значения напряжения источника питания.
9. Построить вольт-амперную характеристику диода $I(U_{\text{пит}})$, зависимости выходной мощности P и КПД от напряжения питания $U_{\text{пит}}$, а также зависимости $R_c(U_{\text{пит}})$ и $R_d(U_{\text{пит}})$.
10. Сделать вывод по выполненной работе и написать отчет. В выводе по работе необходимо сравнить полученные характеристики генератора на диоде Ганна с предсказываемыми теорией, в случае расхождений объяснить их причину.

1.5 Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Структурная схема лабораторной установки.
4. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
5. Графики экспериментальных зависимостей.
6. Вывод.

Библиографический список

1. Н.Д. Федоров. Электронные приборы СВЧ и квантовые приборы. - М.: Атомиздат, 1979. - С.45-62.
2. В.Н. Дулин. Электронные и квантовые приборы СВЧ. - М.: Энергия, 1972. - С.45-58.
3. В.М. Березин, В.С. Буряк, Э.М. Гутцайт, В.П. Марин. Электронные приборы СВЧ. - М.: Высшая школа, 1985. - С.65-77.

ПРИЛОЖЕНИЕ: РАБОТА С ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ПРИБОРАМИ

П.1 Источники питания

В настоящих лабораторных работах используются следующие источники питания:

Источник постоянного напряжения GPS-1830D

Предельные значения выходных параметров: напряжение 18 В, сила тока 3 А. На рис. П1 представлен внешний вид источника питания GPS 1830D.

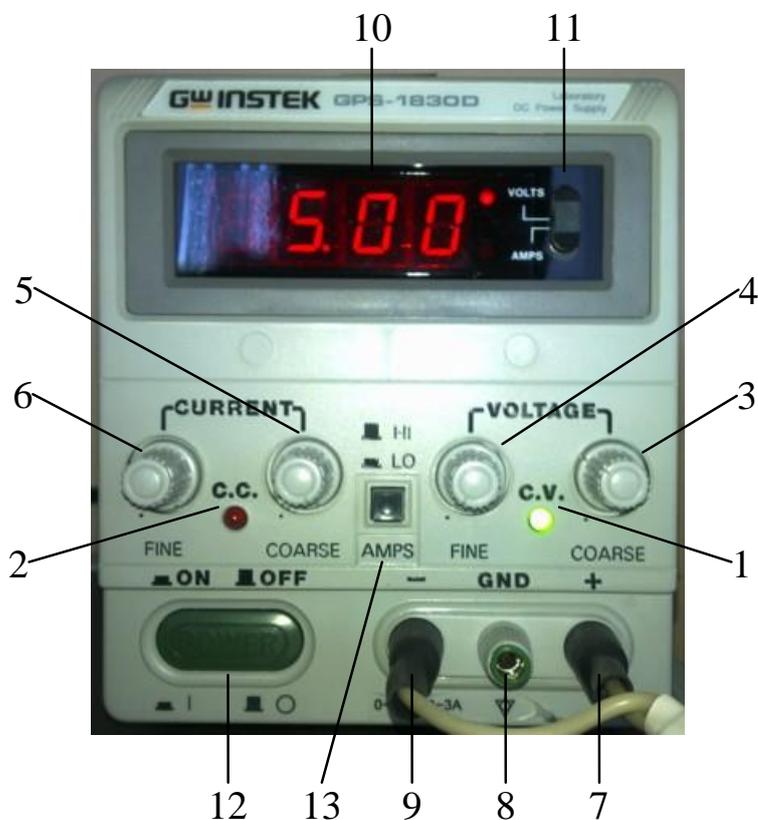


Рис. П1. Передняя панель источника питания GPS-1830D

Органы управления и индикации (рис. П1):

№	Наименование	Назначение
1	Индикатор C.V.	Горит при включении питания и работе в режиме стабилизации выходного напряжения.
2	Индикатор C.C.	Горит при работе в режиме стабилизации выходного тока.
3	VOLTAGE COARSE	Ручка грубой регулировки выходного напряжения.

4	VOLTAGE FINE	Ручка точной регулировки выходного напряжения.
5	CURRENT COARSE	Ручка грубой регулировки выходного тока.
6	CURRENT FINE	Ручка точной регулировки выходного тока
7,9	«+», «-»	Выходная клемма положительной (красная) и отрицательной (черная) полярности.
8	GND	Клемма заземления корпуса прибора (зеленая).
10	Цифровой индикатор	Индикация выходного напряжения или тока.
11	VOLTS/AMPS	Переключатель выбора режима измерения выходной величины (напряжение/ток).
12	POWER	Клавиша включения/выключения питания
13	HI/LO	Кнопка ограничения выходного тока: HI = 3А, LO = 1.8А. В положении LO дискретность установки выходного тока 1 мА.

Порядок работы

1. Установить переключатель POWER в положение OFF.
2. Вставить вилку шнура питания в розетку.
3. Проверить полярность подключения.
4. Установить переключатель POWER в положение ON.
5. Включить переключатель VOLTS/AMPS в положение VOLTS.
6. Регуляторами VOLTAGE установить требуемое значение выходного напряжения (**Во избежание перегрева и перегорания нити накала строго запрещается подавать напряжение выше заданных в лабораторных работах значений!**).
7. В случае если при выполнении пункта 6 загорится индикатор С.С., необходимо увеличить допустимый ток с помощью регулятора CURRENT и продолжить выполнение пункта 6.
8. По окончании работы установить переключатель POWER в положение OFF.

Источник постоянного напряжения GPR-50H15/ GPR-60H15

Предельные значения выходных параметров GPR-50H15 - напряжение 500 В, сила тока 1.5 А, GPR-60H15 - напряжение 600 В, сила тока 1.5 А. На рис. П2 представлен внешний вид источника питания GPR-60H15, который внешне не отличается от GPR-50H15.



Рис. П2. Передняя панель источника питания GPR-60H15

Органы управления и индикации (рис. П2):

№	Наименование	Назначение
1	Индикатор C.V.	Индикатор горит при включении питания и при работе прибора в режиме стабилизации выходного напряжения.
2	Индикатор C.C.	Индикатор горит при работе прибора в режиме стабилизации выходного тока.
3	VOLTAGE	Ручка регулировки выходного напряжения с механическим фиксатором.
4	CURRENT	Ручка регулировки выходного тока с механическим фиксатором.
5	«+»	Выходная клемма положительной полярности (красная).
6	GND	Клемма заземления корпуса прибора (зеленая).
7	«-»	Выходная клемма отрицательной полярности (черная).
8	V	Цифровой вольтметр для индикации выходного напряжения.
9	A	Цифровой амперметр для индикации выходного тока.
10	POWER	Тумблер включения/выключения питания. Безинерционное исполнительное устройство схемы защиты от перенапряжения и перегрузки.
11	CURRENT LIMIT	Кнопка включения амперметра в режиме установки предела по току.

12	O.V.P.	Кнопка включения вольтметра в режиме установки порогового напряжения.
13	O.V.P.	Потенциометр для установки порогового значения напряжения.
14	OUTPUT ON	Кнопка включения/выключения выходного напряжения.
15	OUTPUT ON	Индикатор горит при включении выходного напряжения.

Порядок работы

1. Установить переключатель POWER в положение OFF.
2. Проверить соответствие напряжения сети питания и номинального значения напряжения питания прибора.
3. Вставить вилку шнура питания в розетку.
4. Установить переключатель POWER в положение ON.
5. Выход прибора должен быть отключен (светодиод OUTPUT ON выключен). В противном случае, используя кнопку OUTPUT ON, отключить выход прибора.
6. Проверить полярность подключения нагрузки.
7. Регулятором VOLTAGE установить требуемое значение выходного напряжения (**Во избежание выхода приборов из строя запрещается подавать напряжение выше заданных в лабораторных работах значений!**).
8. Используя кнопку OUTPUT ON, подать напряжение на выход (светодиод OUTPUT ON должен светиться).
9. В случае если при выполнении пунктов 7,8 загорится индикатор С.С., необходимо увеличить допустимый ток с помощью регулятора CURRENT до значения, не превышающего установленным лабораторной работой.
10. По окончании работы выключить кнопку OUTPUT ON и установить переключатель POWER в положение OFF.

П.2 Измеритель мощности МЗ-51

Ваттметр поглощаемой мощности МЗ-51 предназначен для измерения мощности синусоидальных СВЧ-сигналов и среднего значения мощности импульсно-модулированных СВЧ-сигналов в коаксиальных трактах 7×3. Диапазон частот: 0.02-17.85 ГГц. Пределы измерений мощности синусоидальных СВЧ-сигналов и среднего значения мощности импульсно-модулированных сигналов при импульсной мощности до 1 Вт, длительности импульсов до 10 мкс 10^{-6} - 10^{-2} Вт. Конечные значения пределов: 0.3 - 10 мВт.

Ваттметр состоит из измерительного блока Я2М-66 и измерительного термоэлектрического преобразователя 4.681.471. Внешний вид измерительного блока Я2М-66 показан на рис. ПЗ.



Рис. ПЗ. Передняя панель измерительного блока Я2М-66

В основу работы ваттметра положен принцип преобразования мощности СВЧ в тепловой вид энергии и измерения образуемой на выходе измерительного преобразователя термо-ЭДС, которая пропорциональна подведенной к нему мощности СВЧ.

Органы управления и индикации (рис. ПЗ):

№	Наименование	Назначение
1	СЕТЬ ВКЛ	Тумблер включения прибора.
2,3	ГРУБО ►◄ ТОЧНО	Потенциометры для грубой и точной установки нуля.
4	▼	Потенциометр для регулировки усиления в процессе калибровки.
5	ВХОД	Разъем для присоединения измерительного термоэлектрического преобразователя.
6	РЕЖИМ РАБОТЫ	Переключатель для переключения режимов работы.
7	800 mW	Разъем для присоединения измерительных калориметрических преобразователей среднего и большого уровней мощности при калибровке ваттметра на постоянном токе.
8	Цифровой дисплей.	Цифровой индикатор уровня СВЧ-мощности.
9	μW, mW, W	Единица измерения индикатора уровня мощности - мкВт, мВт, Вт.

Порядок работы

1. Тумблер СЕТЬ ВКЛ на измерительном блоке переводят в верхнее положение. При этом должны загореться цифры на табло и лампочка подсвета условного обозначения единицы измерений.

2. До проведения измерений ваттметр прогревают в течение 30 мин.

3. После прогрева устанавливают нуль на пределе РУЧ 1, поворачивая, вправо (влево) ручки установки нуля ГРУБО и ТОЧНО.

4. Производят опробование ваттметра. При отсутствии на входе преобразователя мощности и нормальной работе измерительного блока с помощью ручек установки нуля ГРУБО и ТОЧНО на табло должно устанавливаться показание

000,0 μW на пределе РУЧ 1;

0000 μW на пределе РУЧ 2;

00,00 mW на пределе РУЧ 3.

5. Осуществляют калибровку ваттметра. Для этого следует:

- перевести переключатель РЕЖИМ РАБОТЫ в положение 800 μW и, поворачивая ручку потенциометра \blacktriangledown , установить на табло показание 800 мкВт;
- перевести переключатель РЕЖИМ РАБОТЫ в положение АВТ.

6. Ваттметр обеспечивает измерение мощности в следующих режимах:

- ручное переключение пределов измерений (положение переключателя РЕЖИМ РАБОТЫ - РУЧ 1, РУЧ 2, РУЧ 3); соответственно конечные значения пределов: 300 мкВт - 3 мВт - 10 мВт;
- автоматическое переключение пределов (положение переключателя РЕЖИМ РАБОТЫ - АВТ);
- дистанционное управление (положение переключателя РЕЖИМ РАБОТЫ - ДИСТ).

Примечание. Во избежание вывода измерительного преобразователя из строя при измерении средней мощности импульсно-модулированных сигналов оператору следует помнить, что импульсная мощность не должна превышать 1 Вт при средней мощности не более 10 мВт.

П.3 Частотомер ЧЗ-68

Частотомер электронно-счетный ЧЗ-68 предназначен для измерения частоты непрерывных синусоидальных (НГ) и несущей частоты импульсно-модулированных (ИМ) сигналов и выдачи сигнала опорной частоты. Диапазон измеряемых частот по входу А 10 кГц–100 МГц, по входу Б 0.1 ГГц–12 ГГц.

Внешний вид частотомера ЧЗ-68 показан на рис. П4.



Рис. П4. Передняя панель частотомера ЧЗ-68

Принцип действия прибора в диапазоне 0.1 ГГц–12 ГГц основан на стробоскопическом преобразовании частоты, при котором происходит сравнение частоты измеряемого сигнала с частотой гармоник сигнала гетеродина. Номер гармоники N вычисляется по двум настройкам $f_{\text{гет}1}$, $f_{\text{гет}2}$ с последующим автоматическим вычислением N встроенным микропроцессорным контроллером и рассчитывается по следующей формуле

$$N = f_{\text{гет}1} / |f_{\text{гет}1} - f_{\text{гет}2}|,$$

где

$f_{\text{гет}1}$ – значение частоты гетеродина при первой настройке гармоники сигнала гетеродина на частоту измеряемого сигнала;

$f_{\text{гет}2}$ – значение частоты гетеродина при настройке соседней гармоники сигнала гетеродина на частоту измеряемого сигнала.

Значение измеряемой частоты определяется по формуле $f_x = N \times f_{\text{гет}2}$.

Органы управления и индикации (рис. П4):

№	Наименование	Назначение
1	СЕТЬ	Тумблер включения прибора.
2	А (10 kHz–100 MHz)	Предназначен для подачи входного измеряемого сигнала с частотой 10 кГц–100 МГц.
3	Б (0.1 GHz–12 GHz)	Предназначен для подачи входного измеряемого сигнала с частотой 0.1 ГГц–12 ГГц.
4	КОНТР ИНД.	Кнопка предназначена для контроля работоспособности цифровых, точечных и шкального индикаторов.
5	▲ (КОНТРОЛЬ)	Кнопка предназначена для включения режима самоконтроля (во включенном состоянии - подсвечивается).

6	× (СБРОС)	Кнопка предназначена для осуществления ручного сброс-пуска прибора, в режиме Б подготавливает его к новому вычислению N.
7	A	Кнопка предназначена для включения прибора в режим измерения по каналу A (во включенном состоянии — подсвечивается).
8	Б	Кнопка предназначена для включения прибора в режим измерения по каналу Б (во включенном состоянии — подсвечивается).
9	⌘ (ПАМЯТЬ)	Кнопка предназначена для записи значения частоты гетеродина в память микропроцессорного контроллера (во включенном состоянии — подсвечивается).
10	N	Кнопка предназначена для отображения номера гармоники.
11	Ручка	Ручка предназначена для установки в нуль шкального индикатора.
12	Ручка	Ручка предназначена для изменения коэффициента усиления усилителя постоянного тока (УПТ).
13	Ручка	Ручка предназначена для перестройки частоты гетеродина ГРУБО.
14	Ручка	Ручка предназначена для подстройки частоты гетеродина ПЛАВНО.
15	Кнопка II – I	Кнопка предназначена для переключения поддиапазонов гетеродина.
16	Кнопка	Кнопка предназначена для переключения грубой и точной шкал шкального индикатора.
17	НГ и ИМ	Индикаторы индицируют непрерывный и импульсный режим работы соответственно.
18	Цифровое табло	Цифровое табло, состоящее из сети цифровых семисегментных индикаторов.
19	MHz, GHz, kHz	Индикаторы индицируют размерность измеряемой величины.
20	000 (СЧЕТ)	Индикатор засвечивается во время счета прибора.
21	Шкальный индикатор	Шкальный индикатор предназначен для индицирования синхронизации гармоники частоты гетеродина на измеряемый сигнал.
22	-□□-	Индикатор засвечивается при появлении нулевых биений на выходе УПТ.
23	АТТЕН 1:10	индикатор индицирует включение аттенюатора в режиме работы прибора по каналу А.

Порядок работы

1. Подготовка к проведению измерений.

1.1. Для подготовки прибора к проведению измерений произведите следующие операции:

- при работе с внутренним кварцевым генератором переключатель ВНЕШН-ВНУТР (на боковой панели) установите в положение ВНУТР;
- при работе от внешнего опорного сигнала частотой 5 МГц установите этот переключатель в положение ВНЕШН и подключите источник внешнего опорного сигнала к разъему 5 МНz;
- включите питание прибора;
- для проведения измерений при работе от внешнего опорного сигнала прогрейте прибор в течение 15 мин.

1.2. Произведите проверку работоспособности прибора в режиме ▲ (КОНТРОЛЬ) следующим образом:

- нажмите кнопку ▲ на передней панели прибора, при этом прибор измеряет собственный опорный сигнал частотой 5 МГц. Результаты измерений могут отличаться от 5.000 000 МГц не более чем на ± 1 последнего разряда;
- нажмите кнопку КОНТР ИНД, при этом на световом табло должны засветиться:
 - а) цифра 8 на всех цифровых индикаторах и пять старших запятых;
 - б) индикаторы GHz, МНz, kHz, НГ, ИМ, |000|, , все кнопки и шкальный индикатор кроме кнопки × и КОНТР ИНД.

1.3. Проверьте диапазон перестройки частоты гетеродина. Для этого ручку  установите в среднее положение, а ручку  установите в крайнее правое положение. При этом при нажатой кнопке II – I на табло будет индцироваться нижняя граница перестройки, при отжатой - верхняя, которые должны быть не более 69.9 МГц и не менее 140.1 МГц соответственно.

2. Измерение частоты непрерывных синусоидальных сигналов по каналу Б.

2.1. Выполните требования раздела 1.

2.2. Нажмите кнопку Б, при этом должен засветиться индикатор НГ на световом табло. Если засветился индикатор ИМ, необходимо еще раз нажать кнопку Б.

2.3. Подключите источник измеряемого сигнала ко входу Б (0.1 GHz – 12 GHz).

2.4. Ручку  десятиоборотного потенциометра точной подстройки гетеродина установите в среднее положение.

2.5. Ручку  установите в крайнее правое положение (максимум усиления УПТ).

2.6. Кнопку   отожмите.

2.7. Ручкой   установите шкальный индикатор на нуль. При вращении ручки   значение частоты сигнала гетеродина на цифровом табло прибора будет изменяться.

2.8. Ручкой  плавно перестраивайте частоту гетеродина, при этом на цифровом табло прибора будет индцироваться ее значение. При достижении

потенциометром крайнего левого положения кнопкой II - I переключите поддиапазон гетеродина.

2.9. При настройке ($N \pm 1$) гармоники сигнала гетеродина на частоту измеряемого сигнала возникает сигнал рассогласования в кольце фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), величина которого в относительных единицах отображается на шкальном индикаторе. При подходе к режиму синхронизации системы ФАПЧ возникают нулевые биения, наличие которых индицируется индикатором \square . При наличии шумовой дорожки на сигнале рассогласования системы ФАПЧ индикатор \square также может светиться.

2.10. Убедитесь, что отклонение шкального индикатора вызвано сигналом рассогласования кольца ФАПЧ. При уходе нуля вращение ручки \square не вызовет заметных изменений на шкальном индикаторе. Уход нуля скомпенсируйте ручкой $\blacktriangleright 0 \blacktriangleleft$ и вновь плавно перестраивайте частоту гетеродина ручкой \blacktriangledown .

В режиме же синхронизации вращение ручки \square вправо и влево будет отслеживаться шкальным индикатором, а частота гетеродина на цифровом табло прибора будет синхронизирована измеряемым сигналом. При срыве синхронизации отклонение шкального индикатора уменьшается скачком. Максимальные отклонения шкального индикатора в режиме синхронизации на соседних гармониках примерно одинаковы и превышают $1/2$ шкалы.

2.11. В режиме синхронизации нажмите кнопку $\#$ (ПАМЯТЬ). При этом значение частоты сигнала гетеродина запишется в памяти МПК как $f_{\text{гет}}$ и засветится кнопка $\#$.

2.12. Затем вновь ручкой \blacktriangledown плавно перестройте частоту гетеродина и аналогичным образом настройтесь на соседнюю гармонику сигнала гетеродина.

2.13. Вторично нажмите на кнопку $\#$, при этом значение частоты сигнала гетеродина запишется в памяти МПК, как $f_{\text{гет}2}$.

На цифровом табло прибора проиндицируется номер гармоники гетеродина N , на который осуществлена синхронизация. После этого на табло прибора будет индицироваться семиразрядное значение $N \times f_{\text{гет}2}$, что соответствует частоте измеряемого сигнала в режиме синхронизации.

2.14. По окончании работы выключите прибор.