МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

**«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**(ФГБОУ ВО «КубГУ»)**

**Физико-технический факультет**

**Кафедра радиофизики и нанотехнологий**

**КУРСОВОЙ ПРОЕКТ**

**ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ СВЧ**

Работу выполнил Вернидуб Александр Сергеевич

Курс 2

Направление 03.03.03 Радиофизика

Научный руководитель

д-р физ.-мат. наук, профессор \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Г. Ф. Копытов

Нормоконтролер

канд. физ.-мат. наук, доц. \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ М. А. Жужа

Краснодар 2018

**РЕФЕРАТ**

Курсовой проект 26 с., 11 рис., 2 таблицы, 15 источников.

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ СВЧ, ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ СВЧ, ПУТИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ СВЧ

Объектом исследования данной курсовой работы являлось литературное изучение устройства и принципа работы основных видов приборов СВЧ, сравнение КПД и электрических характеристик приборов СВЧ.

Целью работы было изучение путей развития электроники СВЧ.

В работе рассмотрены: электровакуумные СВЧ приборы (клистроны, электронные лампы, магнетрон, ЛБВО и ЛОВО, ЛБВМ и ЛОВМ), полупроводниковые СВЧ приборы (диоды Ганна, лавинно-пролетные диоды)

В ходе проделанной работы было сделано описание устройства и принципа работы электроники СВЧ, сравнение их КПД, и изучены пути развития СВЧ электроники.

**СОДЕРЖАНИЕ**

Введение4

1 Электровакуумные приборы СВЧ6

1.1 Электронные лампы СВЧ8

1.2 Клистроны10

1.3 Лампы бегущей и обратной волны типа О12

1.4 Лампы бегущей и обратной волны типа М16

2 Полупроводниковые приборы СВЧ18

2.1 Лавинно-пролетные диоды17

2.2 Диоды Ганна19

3 Пути развития СВЧ 22

Заключение24

Список использованных источников25

**ВВЕДЕНИЕ**

Данный проект посвящен электронным приборам СВЧ и явлениям, на которых базируется их работа.

Актуальность темы состоит в том, что электронные приборы СВЧ широко используются в современных типах техники в таких как радиолокационные станции, станции спутниковой связи, линейные ускорители, телевизионные передающие устройства. Электронные приборы СВЧ, предназначены для усиления или генерирования колебаний, с помощью электронного потока преобразуют энергию постоянного тока в энергию колебаний. В их основе лежит взаимодействие электромагнитной волны и электронного потока.

Такие электронные приборы как клистрон, лампа бегущей волны, основаны на использовании времени пролета электронов. В основе их работы лежит метод динамического управления электронным потоком. Главной особенностью динамического управления электронным потоком является изменение электронов по скорости, а также превращение этого изменения по скорости в изменение по плотности потока колебательной системы.

Целью данного исследования является рассмотрение путей развития СВЧ электроники.

Для достижения цели необходимо решить данные задачи:

- изучить основные виды электронных приборов СВЧ;

- сравнить КПД, основные характеристики электронных приборов СВЧ;

- рассмотреть пути развития электроники СВЧ.

В ходе проделанной работы было сделано описание устройства и принципа работы электроники СВЧ, сравнение их КПД, и изучены пути развития СВЧ электроники.

**1 Электровакуумные приборы СВЧ**

**1.1 Электронные лампы СВЧ**

Электронные лампы СВЧ конструируются так, чтобы межэлектродные емкости и индуктивности выводов и расстояния между электродами были малыми. Принимаются также меры к уменьшению потерь энергии, в частности для баллона используется специальное стекло с малыми диэлектрическими потерями, например керамика.

Для дециметровых и сантиметровых волн сконструированы лампы с дисковыми и цилиндрическими выводами. Примером таких ламп может служить металлостеклянный триод, в нем один из выводов подогревателя сделан общим с кольцевым выводом катода, изображен на рисунке 1 (а) [3]. Выводы электродов в виде цилиндров и дисков различного диаметра служат для соединения лампы с коаксиальными резонансными линиями или объемными резонаторами и являются частью этой колебательной системы. Этот триод работает в генераторах на частотах до 3600 МГц и дает полезную мощность не менее 0,1 Вт. Оригинальное устройство имеет «карандашный» триод рисунок 1(б), предназначенный для генерации колебаний мощностью до 5 Вт на частотах до 3000 МГц [1]. Это металлическая лампа с цилиндрическими выводами анода и катода и дисковым выводом сетки.

а) металлостеклянный; б) карандашный; в) металлокерамический

Рисунок 1 – Триоды для СВЧ

Существует также сверхминиатюрный триод с цилиндрическими выводами рисунок 1(в). Он предназначен для усилительных каскадов по схеме с общей сеткой, служащих входными каскадами в приемниках СВЧ [2]. На предельной частоте 3000 МГц этот триод дает усиление мощности в 12 раз. В дециметровом диапазоне волн могут также работать сверхминиатюрные металлокерамические лампы (нувисторы). Для более мощных генераторов и передатчиков, в частности для передатчиков, работающих с большой мощностью в импульсном режиме, применяются металлокерамические генераторные триоды, напоминающие по конструкции, рассмотренные приемно-усилительные лампы и также предназначенные для соединения с коаксиальными колебательными системами.

Внешний вид металлокерамической генераторной лампы и ее устройство показан на рисунке 2.

1 – штифт для навинчивания радиатора анода; 2 – анод; 3 – сетка; 4 – катод; 5 – подогреватель; 6 – вывод сетки; 7 – вывод катода и подогревателя; 8 – вывод подогревателя

Рисунок 2 – Внешний вид и устройство металлокерамического генераторного триода

Генераторная лампа предназначена для генерации электромагнитных колебаний.

Рабочие поверхности катода, сетки и анода этой лампы имеют форму дисков, расположенных очень близко друг к другу. Вывод от подогревающего оксидного катода сделан в виде цилиндра, причем он одновременно служит и выводом одного конца подогревателя. Второй конец подогревателя имеет вывод внутри этого цилиндра. Вывод от сетки сделан также в форме цилиндра и является частью баллона лампы.

Анод изготовлен в виде массивного, цилиндра, и его верхняя часть припаяна к керамическому цилиндру, служащему частью баллона. С другой стороны этот керамический цилиндр спаян с выводом сетки. Между выводами сетки и катода также располагается керамическое кольцо. Спаи металла с керамикой представляют собой особенность металлокерамических ламп. В этих лампах применяется специальный керамический материал, дающий малые потери энергии на СВЧ. Для охлаждения анода используется ребристый радиатор, который навинчивается на штифт анода.

Лампы более сложные, чем триоды, для дециметрового диапазона применяют редко, так как при большем числе сеток приходится увеличивать расстояние между анодом и катодом, но тогда возрастает время пролета электронов. В приемных лампах увеличение числа электродов приводит к усилению собственных шумов. Таким образом, и в генераторах и в усилителях дециметрового диапазона волн работают главным образом триоды. КПД данных триодов обычно не превышает 40 – 45 %.

**1.2 Клистроны**

Принцип работы пролётного клистрона основан на использовании инерции электронов прямолинейного электронного потока. ПК применяется как усилитель мощности, преобразователь сдвига частоты и умножитель частоты. Диапазон частот ПК от 200 МГц до 24 ГГц, выходная мощность от 1 Вт до 1 МВт в непрерывном режиме и до 100 МВт в импульсном режиме. ПК является самым мощным усилителем СВЧ [8]. Пролетный клистрон (рисунок 3).

 В клистроне имеются два объёмных резонатора с ёмкостными сеточными зазорами. Первый резонатор называют входным, или модулятором; второй – выходным. Пространство между ними называют пространством дрейфа или группирования. Продольное СВЧ поле периодически ускоряет и замедляет электроны, модулируя электронный поток по скорости. Двигаясь далее в пространстве дрейфа, электроны постепенно образуют сгустки за счёт того, что быстрые электроны догоняют медленные. Этот модулированный по плотности электронный поток попадает во второй резонатор и создает в нем наведённый ток той же частоты, что и частота входного модулирующего поля. В результате между сетками резонатора появляется высокочастотное электрическое поле, которое начинает взаимодействовать с потоком электронов. Электрическое поле второго резонатора тормозит сгустки электронной плотности и ускоряет её разрежение. Кинетическая энергия электронов преобразуется в энергию СВЧ колебаний электромагнитного поля второго резонатора, а электроны оседают на коллекторе, рассеивая оставшуюся часть кинетической энергии в виде тепла.

Рисунок 3 – Устройство пролетного клистрона

В многорезонаторных клистронах между входным и выходным резонаторами помещают дополнительные ненагруженные резонаторы. В качестве примера, рассмотрим пролётный трёх резонаторный клистрон. Предположим, что промежуточный резонатор точно настроен, на резонаторе электроны модулируются по скорости и далее группируются в первом пространстве дрейфа. Если на вход поступает слабый входной сигнал, то и модуляция электронного потока будет незначительной. При этом величина наведенного тока во втором резонаторе также будет малой. Однако, поскольку ненагруженный промежуточный резонатор является высокодобротной системой, то даже при малой амплитуде конвекционного тока напряжение будет большим, устройство многорезонаторного устройства такое же, как и у пролетного клистрона, но между 2 резонаторами начинают появляться новые. Суммарная активная проводимость второго резонатора определяется только потерями в самом резонаторе и электронной нагрузкой затвора [13].

В установившемся режиме ток и напряжение во втором резонаторе имеют ту же частоту, что и частота входного сигнала. Напряжение, наведенное на втором резонаторе, вызывает сильную модуляцию скорости электронов и сильную группировку электронного потока во втором пространстве дрейфа. В результате распределение электронов в сгустках их плотности будет определяться вторым резонатором и зависимость конвекционного тока в третьем резонаторе будет примерно такой же, как в двухрезонаторном клистроне, но при модулирующем напряжении гораздо большем, чем модулирующее напряжение первого резонатора.

Рисунок 4 – Устройство отражательного клистрона

 Отражательный клистрон (рисунок 4).

Отражательный клистрон имеет один резонатор, дважды пронизываемый электронным потоком, предназначен для генерации СВЧ колебаний малой мощности. Возвращение электронов осуществляется с помощью отражателя, находящегося под отрицательным постоянным потенциалом по отношению к катоду. Таким образом, резонатор играет роль сгруппирователя при первом прохождении электронов и роль выходного контура при втором прохождении. Промежуток между резонатором и отражателем играет роль пространства дрейфа, где модуляция электронного потока по скорости переходит в модуляцию по плотности. В таблице 1 приведены КПД некоторых клистронов.

|  |  |
| --- | --- |
| Тип клистрона | Максимальное расчётное КПД, % |
| Пролетный клистрон | 58 |
| Многорезонаторный клистрон | 75 |
| Отражательный клистрон | 5 |

Таблица 1 – КПД клистронов

Таким образом, многорезонаторный клистрон имеет самое большое КПД среди всех клистронов. Но при этом, наиболее мощным является пролетный клистрон. Для того чтобы клистрон мог генерировать СВЧ колебания, необходимо, чтобы сгустки электронного потока, сформированные при первом прохождении сквозь резонатор, проходили через резонатор при обратном движении в те моменты, когда в нём имеется тормозящее высокочастотное электрическое поле.

**1.3 Лампы бегущей и обратной волны типа О**

 Принцип действия ламп бегущей волны типа О (ЛБВО) основан на механизме длительного взаимодействия электронного потока с полем бегущей электромагнитной волны. Скорость электронов определяется ускоряющим напряжением. На рисунке 5 представлено устройство ЛБВО.

 Электронная пушка формирует электронный пучок с определенным сечением и интенсивностью. С помощью фокусирующей системы, создающей продольное магнитное поле, обеспечивается необходимое поперечное сечение пучка. В ЛБВ электронная пушка, спиральная замедляющая система и коллектор размещаются в металлостеклянном или металлическом баллоне, а фокусирующий соленоид располагается снаружи. Спираль крепится между диэлектрическими стержнями, которые должны обладать малыми потерями на СВЧ и хорошей теплопроводностью.

На входе и выходе замедляющей системы есть специальные устройства для согласования её с линиями передачи (волноводными или коаксиальными). На вход поступает СВЧ сигнал, который усиливается в приборе и с выхода передается в нагрузку.

Рисунок 5 – Устройство лампы бегущей волны типа О

Трудно получить хорошее согласование во всей полосе усиления лампы. Поэтому есть опасность возникновения внутренней обратной связи из-за отражения электромагнитной волны на концах замедляющей системы, при этом ЛБВ может перестать выполнять свои функции усилителя. Для устранения самовозбуждения вводится поглотитель, который может быть выполнен в виде стержня из поглощающей керамики или в виде поглощающих пленок.

ЛОВО. Электронная пушка создаёт пучок электронов, движущийся к коллектору. Заданное сечение пучка сохраняется постоянным при помощи фокусирующей системы. Предположим, что со стороны коллектора в замедляющую систему ЛОВ введён СВЧ сигнал, то есть вдоль замедляющей системы справа налево двигается волна с групповой скоростью Vgr.

Лампа обратной волны типа О, устройство рисунок 6.

 Если бы замедляющая система была однородной, и поле её бы не содержало пространственных неоднородностей, то фазовая скорость волны была бы направлена так же, как и групповая, то есть навстречу движению электронов. Обмен энергией между СВЧ-волной и пучком электронов должен был бы отсутствовать.

Рисунок 6 – Схема ЛОВО

Однако если замедляющая система имеет периодическую структуру, то электромагнитное поле в ней можно рассматривать как сумму бесконечного множества колебаний с разными частотами. Фазовые скорости этих мод могут быть направлены как в сторону движения энергии (прямые волны), так и в противоположную сторону (обратные волны). Можно подобрать ускоряющее напряжение – U для пучка электронов так, чтобы обеспечить синхронизм между электронами и одной из замедленных обратных волн:

(V*e* ≅ *Vf*) (1.1)

$Vf=√\frac{2e}{mU0} $, (1.2)

где Ve*–* скорость электронов, Vf – скорость волны, e – заряд электрона, m –масса электрона, U0 – начальная скорость электрона. Тогда электроны, поочерёдно проходя мимо неоднородностей, встречают тормозящее электрическое поле (фазу) высокочастотного колебания, что приводит к тому, что часть кинетической энергии пучка передаётся СВЧ-полю замедляющей системы. При этом электронный поток модулируется по скоростям электронов, что приводит к модуляции плотности объёмного заряда электронного потока (быстрые электроны догоняют медленные). Этот модулированный поток, двигаясь по направлению к коллектору, наводит на замедляющей системе высокочастотный ток. Но энергия волны, с которой взаимодействуют электроны, двигается навстречу электронному потоку. В результате на выходе замедляющей системы вблизи электронной пушки создаётся поле, превышающее первоначальный сигнал.

Таким образом, электронный пучок играет в ЛОВ двойную роль – как источник энергии и как звено, по которому осуществляется положительная обратная связь. Эта связь присуща самому принципу ЛОВ и принципиально неустранима, в отличие от других генераторов СВЧ.

При изменении частоты ЛОВ СВЧ-волна может отражаться от нагрузки и поступать обратно в замедляющую систему. Эта отраженная волна может взаимодействовать с электронным потоком, что будет приводить к изменению выходной мощности. Для устранения этих эффектов на конце замедляющей системы, обращенном к коллектору, включают самосогласованную нагрузку (поглотитель).

**1.4 Лампы бегущей и обратной волны типа М**

Отличия от О типа:

- наиболее благоприятное взаимодействие электронов с бегущей волной и передача энергии от электронов к полю происходят при точном равенстве средней скорости электронов и фазовой скорости волны. Напротив, для передачи энергии от электронов к полю в ЛБВ типа О требуется, чтобы электроны двигались чуть быстрее;

- в ЛБВМ кинетическая энергия электронов не меняется, а полю передается [потенциальная энергия](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F) электронов.

 В лампе две основные части: инжектирующее устройство и устройство взаимодействия. Инжектирующее устройство, состоящее из подогреваемого катода и электрода, обеспечивает создание ленточного электронного потока и ввод его в пространство взаимодействия. Устройство ЛБВМ (рисунок 7).

Пространство взаимодействия, состоящее из волноводного входа, поглотителя, замедляющей системы-анода, волноводного выхода, коллектора и холодного катода, обеспечивает взаимодействие электронов с СВЧ полем.

Рисунок 7 – Устройство ЛБВМ с инжектированным потоком

Параметры прибора выбирают таким образом, чтобы при появлении на входе замедляющей системы СВЧ сигнала на одной из его пространственных гармоник выполнялось условие фазового синхронизма приборов типа М:

 (V0 = Vf) , (1.3)

где V0 – начальная скорость потока на входе в пространство взаимодействия, Vf – скорость в фазе. В этом случае в тормозящих полупериодах электрического поля этой гармоники будет происходить увеличение энергии СВЧ сигнала за счет уменьшения потенциальной энергии электронов. Усиленный СВЧ сигнал поступает на выход замедляющей системы, а электроны оседают на коллекторе.

Лампа бегущей волны типа М, также, как и лампа бегущей волны типа О, является широкополосным усилителем, и поэтому в ней возможно [самовозбуждение](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B0%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B7%D0%B1%D1%83%D0%B6%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) за счет отражения усиливаемого сигнала от выхода замедляющей системы, поэтому здесь также используется поглотитель.

### Лампа обратной волны типа М, Отличие от ЛОВ типа О:

- в ЛОВ типа М кинетическая энергия электронов, не изменяется, а изменяется потенциальная энергия, преобразующаяся в энергию СВЧ поля;

- кроме того, в ЛОВ типа М наиболее благоприятное взаимодействие потока электронов и СВЧ поля происходит при точном равенстве средней скорости электронов и фазовой скорости волны.

Устройство ЛОВ типа М (рисунок 8).

 Инжектирующее устройство создаёт поток электронов, движущийся к коллектору. Электронный поток создает в замедляющей системе наведенный ток и электромагнитное поле пространственных гармоник. Если ток потока электронов достаточно велик, на одной из пространственных гармоник, для которой выполнено условие фазового синхронизма, начинается взаимодействие электронного потока с полем волны, при котором в тормозящих полупериодах электрического поля гармоники будет происходить увеличение её энергии за счет уменьшения потенциальной энергии электронов. Электронный поток в ЛОВ типа М взаимодействует с обратными пространственными гармониками, для которых направления фазовой и групповой скоростей противоположны, поэтому электроны движутся к коллектору, а энергия волны им навстречу – к волноводному выходу прибора [8]. В результате возникает положительная обратная связь между полем волны и электронным потоком, при которой волна, отдавая часть своей энергии на группировку электронов, приобретает большее её количество за счет уменьшения потенциальной энергии сгруппированных электронов. Так же как и в ЛОВО применяется поглотитель. ЛОВО применяются в широкодиапазонных сигнал генераторах и свип-генераторах для радиотехнических измерений и радиоспектроскопии, в основном для генерации излучения, в [гетеродинах](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B5%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD) быстро перестраиваемых приёмников, в задающих генераторах передатчиков с быстрой перестройкой частоты.

Рисунок 8 – Устройство ЛОВМ

Из ламп бегущей волны наиболее выгодным по КПД выглядит лампа типа М, а из ламп обратной также типа М. Характеристики и КПД ЛБВМ и ЛОВМ непрерывного действия таблица 2.

Таблица 2 – Характеристики и КПД ЛБВМ и ЛОВМ

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Тип лампы | Частота,ГГц | Выходная мощность, кВт | КПД, % | Напряжение, кВ | Ток пучка, А | Коэффициент усиления, дБ | Полоса пропускания, МГц |
| ЛБВМ | 1,2 | 0,5 | 45 | 3 | 0,20 | 15 | 210 |
| ЛОВМ | 2,7 | 0,34 | 25 | 2,5 | 0,4 |  |  |
| ЛБВО | 1,5 | 0,5 | 40 | 2,8 | 0,5 | 40 | 250 |
| ЛОВО | 2,5 | 0,4 | 3 | 2,7 | 0,4 |  |  |

**2 Полупроводниковые СВЧ приборы**

**2.1 Лавинно-пролетные диоды (ЛПД)**

 Лавинно-пролетный диод – это полупроводниковый СВЧ-диод, в котором для получения носителей заряда используется ударная ионизация в области электрического перехода и взаимодействие этих носителей с переменным полем в переходе в течение времени пролета [5].

 На рисунке 9показано несколько структур ЛПД и напряженность в них.

Рисунок 9 – Несколько структур ЛПД и распределение напряженности в них

При определенных условиях взаимодействие обеспечивает получение отрицательного дифференциального сопротивления, что позволяет использовать ЛПД для создания генераторов и усилителей. Первый полупроводниковый прибор с отрицательным дифференциальным сопротивлением («кристадин») был использован О.В. Лосевым в 1922 г. для генерации и усиления высокочастотных колебаний (до 20 МГц).

Для изготовления ЛПД используют кремний, германий и арсенид галлия требуемую структуру получают методами эпитаксиального наращивания, диффузии и ионного легирования. Для создания ЛПД миллиметрового диапазона применяют метод ионного легирования – получение необходимого закона распределения примесей бомбардировкой полупроводника ионами, ускоренными до высокой энергии (десятки—сотни килоэлектронвольт). Этот метод позволяет легко контролировать закон распределения и концентрацию примеси и создавать очень узкие переходы до десятых долей микрометра. При этом появляется возможность получения при очень узких переходах двух пролётных ЛПД миллиметрового диапазона (рис. 10,*г*). Одновременное использование эффекта пролета электронов и дырок, возникающих в общем слое умножения, приводит к росту выходной мощности и КПД примерно в два раза. Чем выше рабочая частота и теплоотвод там выше мощность и КПД генераторов. Алмаз как подложка увеличит теплоотвод в ЛПД. Мощность в пролетном режиме на частотах 4 – 12 ГГц порядка 5 Вт в непрерывном режиме. В непрерывном режиме с частотой 50 ГГц на однопролетных ЛПД получена мощность 0,5 Вт при КПД 10 %, а на двух пролётных – 1 Вт при КПД ~ 14 %. В двух пролётных ЛПД на частоте 92 ГГц достигнута мощность 0,18 Вт при КПД ~ 77 %. ЛПД работающие в пролетном режиме, используют также для усиления колебаний, однако из-за большого коэффициента шума (20 – 40 дБ) они не пригодны для входных устройств. Коэффициент усиления при каскадном включении достаточно велик (до 30 дБ и более). Схема для получения режима работы ЛПД с захваченной плазмой сложнее, чем в пролетном режиме, так как необходимо обеспечить условия запуска: усложняется колебательная система, требуется большая плотность тока. Как уже отмечалось ранее, преимущества режима с захваченной плазмой проявляются на более низких частотах. Наилучший результат по мощности **–** 1,2 кВт в импульсном режиме получен на пяти последовательно соединенных ЛПД на частоте 1,1 ГГц при КПД 25 %. В пролетном режиме работы ЛПД отрицательное сопротивление существует в широкой полосе рабочих частот. Следовательно, можно изменять частоту генерации в больших пределах (более октавы) механической перестройкой колебательной системы. Широко применяют также электрические способы перестройки частоты. Один из способов состоит в изменении собственной частоты колебательной системы (резонатора) с помощью варакторного СВЧ-диода. Диапазон перестройки в зависимости от схем включения варакторного диода доходит до 3 – 5 %. Применяют для перестройки также ферритовые элементы, помещенные в резонатор ГЛПД, при этом диапазон перестройки может достигать 10 %. Для перестройки частоты в небольших пределах используют зависимость частоты от постоянного тока (электронное смещение частоты). Величина электронного смещения частоты в сантиметровом диапазоне несколько мегагерц на миллиампер, а диапазон перестройки доли процента. Следует отметить, что большое значение для ГЛПД имеет температурная стабильность частоты генерации. Температурный коэффициент частоты конкретного генератора зависит не только от изменения параметров самого диода, но и от изменения параметров колебательной системы.

 **2.2 Диоды Ганна**

Полупроводниковый СВЧ-прибор с объемной неустойчивостью, изображенный на рисунке 10 (Диод Ганна) – это приборы, в которых генерация или усиление колебаний связаны с неустойчивостью объемного заряда в полупроводниковом материале из-за отрицательной дифференциальной подвижности носителей [7]. Для работы в непрерывном режиме на более низких частотах используют планарную конструкцию диода Ганна.

Рисунок 10 – Диод Ганна

Возможность получения отрицательно дифференциальной подвижности в полупроводниковом материале предсказывалась почти сразу после появления транзистора, а в 1963 г. была теоретически обоснована такая возможность для арсенида галлия (GaAs). Теория получила экспериментальное подтверждение в 1964 г. В результате открытия эффекта Ганна. Поэтому полупроводниковые приборы с объемной неустойчивостью называют диодами Ганна. Диоды Ганна изготавливают на основе монокристаллов или эпитаксиальных пленок арсенида галлия. В зависимости от выбираемого режима работы и параметров длина образцов составляет от 5 мкм до 1 мм, а площадь сечения 2,5∙10-5 – 10-2 см2. Необходим хороший омический контакт, обладающий линейной вольт-амперной характеристикой и малым сопротивлением по сравнению с сопротивлением объема образца. Для изготовления промышленных диодов обычно используют эпитаксиальный материал с концентрацией электронов, не зависящей от температуры. Однако изменение температуры влияет на подвижность электронов и, следовательно, на дрейфовую скорость. Уменьшение подвижности с ростом температуры приводит к изменению зависимости скорости от поля *v*(*Е*) и уменьшению выходной мощности и КПД. Экспериментально установлено, что диоды Ганна достаточно эффективно работают при температурах 200 – 250 °С. Перегрев диодов снижает максимальную мощность генераторов в непрерывном режиме и максимальную длительность импульсов в импульсном режиме. Другой причиной, которая также может ограничивать выходную мощность в пролетных режимах работы, является ударная ионизация.

Наибольшая мощность в непрерывном режиме 0,6 Вт в трехсантиметровом диапазоне получена при использовании подложки из алмаза. Частотный диапазон, перекрываемый генераторами Ганна, очень широк и составляет 100 МГц – 150 ГГц. На частотах от 1 до 150 ГГц диоды Ганна используют, в основном, для создания СВЧ генераторов. Диоды Ганна включают в линии передачи и резонаторы, перестраиваемые по частоте. Коротко замыкающие поршни необходимы для перестройки генератора по частоте и согласования диода с нагрузкой. Коэффициент полезного действия генераторов зависит от режима работы и составляет от 1 – 2 % до 20 %, а в некоторых может достигать и 30 %. Мощность в непрерывном режиме достигает 0,62 Вт на частоте 12,8  ГГц при КПД 3 – 4 %. В импульсном режиме на частоте 7,0 ГГц получена мощность 2,1 кВт при КПД 4 %, на частоте 100 ГГц около 100 мВт. Генераторы на диодах Ганна перестраиваются по частоте изменением либо параметров резонаторов, либо напряжения питания. Механическую перестройку можно производить в широких пределах при условии плавного перехода из одного режима работы в другой. Кроме того, возможна перестройка с помощью варакторов, ферритов, железоиттриевого граната и магнитного поля. Электронная перестройка частоты изменением напряжения питания в резонансных режимах работы мала и составляет 5 – 20 МГц/В. Эта перестройка связана с изменением емкости домена. Коаксиально-волноводная секция с диодом Ганна, включаемая в волноводный тракт, показана на рисунке 11.



Рисунок 11 – Планарная конструкция диода Ганна

 **3 Пути развития электроники СВЧ**

На данный момент существует два разных направления развития электроники СВЧ:

- первое направление основано на усовершенствовании уже существующих приборов или создание комбинированных приборов на их основе;

- второе направление подразумевает собой разработку новых приборов на абсолютно других принципах усиления и генерирования колебаний СВЧ, в первую очередь это касается миллиметровый и субмиллиметровый диапазон волн.

 Уже сейчас изучаются приборы, основанные на взаимодействии электронного потока и плазмы; взаимодействие электронного потока с дифракционными решетками; параметрическое взаимодействие электронного потока с СВЧ-полем; явление циклотронного резонанса в электронном потоке, находящемся в магнитном поле. Одной из проблем электронных приборов СВЧ является повышение надежности и миниатюризации [14]. Развитие полупроводниковой электроники СВЧ помогает найти решение этой проблемы.

Стоит также отметить совершенствование технологий создания и конструкций СВЧ транзисторов на основе гетероструктур традиционных полупроводниковых материалов: кремния и арсенида галлия с целью получения предельно достижимых электрических и эксплуатационных параметров. Необходимо исследовать новые технологии создания СВЧ транзисторов на основе широкозонных полупроводниковых материалов (алмаз, графен). Для перехода на коротковолновой диапазон нужно заменить традиционные конструкций вакуумных приборов СВЧ на новые типы. Например, вместо обычных приборов с цилиндрическим электронным лучом можно использовать приборы с ленточным лучом. При меньшем фокусирующем магнитном поле и компактной конструкции эти приборы обеспечивают более высокую эффективность взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем прибора. Главный элемент приборов основанных на ленточных лучах это специально разработанная электронная пушка с ленточным лучом размером 0,3×4 мм, дающая ток 3,5 – 4  А  при напряжении около 20  кВ. На её основе созданы 2 прибора:

- узкополосный трехрезонаторный клистрон с распределенным взаимодействием электронного потока с электромагнитным полем диапазона 94 ГГц мощностью 7,5 кВт и усилением в режиме насыщения 35 дБ;

- ЛБВ на системе связанных резонаторов с выходной импульсной мощностью 10 кВт на 34 ГГц, усилением 15 дБ и полосой 5 ГГц по уровню 3 дБ. Длина системы взаимодействия лампы – менее 5 см.

Разработана ЛБВ диапазона (33 – 50  ГГц) на  замедляющей системе типа "свернутый волновод". Максимальная мощность прибора составляет 200 Вт в полосе частот 43,5 – 45,5 ГГц. При использовании одноступенчатого коллектора КПД прибора превышает 25 %. Элементы лампы изготавливались с помощью таких современных технологий, как глубокое реактивно-ионное травление LIGA-технология, основные стадии которой – рентгеновская литография, гальванопластика, формовка и др. Современный этап развития полупроводниковой СВЧ-электроники – освоение технологии нитрид галлиевых приборов.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе выполнения работы:

- рассмотрены основные виды СВЧ приборов их конструкция и принцип действия;

- было проведено сравнение КПД и основных электрических параметров СВЧ приборов;

- изучены пути развития СВЧ электроники.

В результате выполнения курсового проекта сделано сравнение КПД и электрических характеристик СВЧ приборов, проведено исследование современных приборов СВЧ.

На основании полученных результатов сделаны выводы:

1 КПД основных электрических приборов зависит от режимов работы и их конструкции или параметров, в каждой категории можно выделить лучший режим и прибор, в клистронах это многорезонаторный, среди ламп бегущей и обратной волны соответственно ЛБВМ и ЛОВМ.

2 На данный момент существуют 2 основных вида развития электроники СВЧ, это усовершенствование или комбинирование уже созданных СВЧ приборов, либо разработка абсолютно новых СВЧ приборов на основе совершенно иных принципах работы.

3 Основные проблемы СВЧ проводников заключаются в миниатюризации и надежности. На данный момент только созданные на основе кремния и арсенида галлия СВЧ приборы могут дать предельно достижимые эксплуатационные и электрические параметры, а также созданные на основе широкозонных полупроводниковых материалов СВЧ транзисторы.

4 Также для перехода на коротковолновой диапазон можно использовать приборы с ленточным лучом, они обеспечивают более высокую эффективность взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем прибора.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1 Генерирование колебаний и формирование радиосигналов / В.Н. Кулешов, Н.Н. Удалов, В.М. Богачев и др*.* – М.: МЭИ, 2008. – 416 с.

2 Трубецков Д. И. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков / Д. И. Трубецков, А. Е. Храмов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 496 с.

3 Шангина Л.И. **Электронные приборы СВЧ и квантовые приборы**: [Учебное пособие] / Л.И. Шангина. – Томск: ТГУ систем управления и радиоэлектроники, 2001. – 162 с.

4 Васильев А.Г. СВЧ приборы и устройства на широкозонных полупроводниках / А.Г. Васильев, Ю.В. Колковский, Ю.А. Концевой. – M.: Техносфера, 2011. – 416 с.

5 Белоус А.И. Полупроводниковая силовая электроника / А.И. Белоус, С.А. Ефименко, А.С. Турцевич. – М.: Техносфера, 2018. – 216 c.

6 Тамаров П.Г. Электронные приборы СВЧ и квантовые приборы: [Лабораторный практикум] / П.Г. Тамаров. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 68 с.

7 Федоров Н. Д. Электронные приборы СВЧ и квантовые приборы: [Учебник для вузов] / Н. Д. Федоров. – М.: Атомиздат, 1979. – 288 с.

8 Шевчика В. Н. Электронные приборы сверхвысоких частот: [Учебное пособие] / В. Н. Шевчика, М. А. Григорьева. – Саратов: Издательство Саратовского университета, 1980. – 416 с.

9 Клюев Д.С. Приборы СВЧ и оптического диапазона. Конспект лекций /Д.С. Клюев, О.В. Осипов. – Самара: ФГОБУ ВПО ПГУТИ, 2014. – 209 с.

10 Дулин В.Н. Электронные и квантовые приборы СВЧ / В.Н. Дулин. – М.: Энергия, 1972. – 224 с.

11 Кирилло Л. Р. Круговые диаграммы: [Учебное пособие на тему Электроника СВЧ] / Л. Р. Кирилло, В. И. Лаврукович. – Минск: БГУ, 1976. – 60 c.

12 Агапов М. В. Генераторы и усилители СВЧ / М. В. Агапов. – М.: Радиотехника, 2005. – 351 с.

13 Бабинцев Д. В. Электронные устройства СВЧ / Д. В. Бабинцев – М.: Радиотехника, 2008. – 258 c.

14 Андронов Е. В. Теоретический аппарат измерений на СВЧ / Е. В. Андронов, Г. Н. Глазов. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2010. – 802 с.

15 Малорацкий Л.Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ / Л.Г. Малорацкий. – М.: Советское радио, 1976. – 216 с.