

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра общей физики

**«Исследование СВЧ-генератора на диоде Ганна»**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

Студентки 4 курса 431 группы

Направления 03.03.02 «Физика»

**Пигачева Владислава Дмитриевича**

Научный руководитель,

д.т.н., профессор

\_\_\_\_\_ А. Л. Хвалин

Зав. кафедрой общей физики,  
д. ф.-м. н., профессор



А. А. Игнатъев

Саратов 2020

## **Введение**

Радиотехнические системы СВЧ диапазона имеют необычайно широкую область применения.

Радикальные перемены, произошедшие в элементной базе радиоэлектронных устройств, в последнее десятилетия коснулись и СВЧ устройств. На смену традиционным электровакуумным приборам пришли полупроводниковые приборы. По существу, радиопередатчики повышенной мощности остались единственными радиотехническими устройствами, в которых находят применение как электровакуумные, так и полупроводниковые приборы.

Целью работы является создание конструкции и исследование основных характеристик генератора. Для достижения цели была поставлена задача, которая заключается в сборке макета генератора и установки, в том числе и проведение измерений.

Актуальность выпускной работы связана с широким применением автогенераторов СВЧ. Область применения таких полупроводниковых приборов - радиотехнические системы СВЧ различного назначения, а именно радиопередатчики наземных и спутниковых систем связи, радиолокационные системы, радионавигационные приборы СВЧ, самолетные и корабельные системы радиосвязи, радиомаяки, измерительная радиоаппаратура и гетеродины радиоприемных устройств.

Применение полупроводниковых приборов позволят воспользоваться методами микроэлектроники при изготовлении различных устройств и элементов, входящих в генераторный и усилительные системы СВЧ, тем самым позволяют существенно уменьшить массу и габаритные размеры радиотехнических систем СВЧ.

## Физические основы работы генераторов СВЧ на диодах Ганна

### Устройство и принцип действия диода Ганна

Диод Ганна представляет собой пластинку полупроводникового материала длиной 10 – 12 мм с омическими контактами на двух противоположных плоскостях. Для изготовления диодов Ганна применяют полупроводниковые материалы с электронной электропроводностью, для которых характерно наличие двух подзон в зоне проводимости, причём подвижность электронов в нижней подзоне выше, чем в верхней.

Диоды Ганна изготавливаются как из монокристаллических полупроводников, так и на основе эпитаксиальных пленок с использованием планарной технологии (рис. 1).

Активная часть диода Ганна обычно имеет длину  $l = 1 - 100$  мкм и концентрацию легирующих донорных примесей  $n^- = 2 \times 10^{14} - 2 \times 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Слои полупроводника с повышенной концентрацией примесей  $n^{++}$  и  $n^+ = 10^{18} - 10^{19}$  см<sup>-3</sup> служат для создания омических контактов.

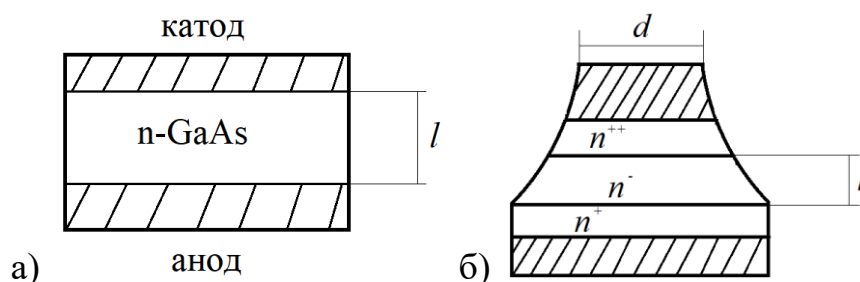


Рис. 1. а) монокристаллический диод, б) мезодиод на основе эпитаксиальной пленки.

### Физические основы работы диода Ганна

Объёмный эффект в диоде Ганна обусловлен не какими-то специальными конструктивными решениями, а физическими свойствами исходного полупроводника, имеющего 2 подзоны в зоне проводимости с различной подвижностью носителей заряда в них. Эта особенность позволяет при определённой напряженности электрического поля получать отрицательную динамическую подвижность носителей заряда, т. е. обеспечить условия генерации колебаний.

На рисунке 2 приведена структура энергетических зон в зависимости дрейфовой скорости.

Энергетический зазор между верхним уровнем нижней подзоны и нижним уровнем верхней подзоны для GaAs составляет  $\Delta W = 0,36$  эВ. Подвижность носителей в верхней подзоне  $\mu_2$  для GaAs примерно в 50 раз меньше, чем в нижней  $\mu_1$ .

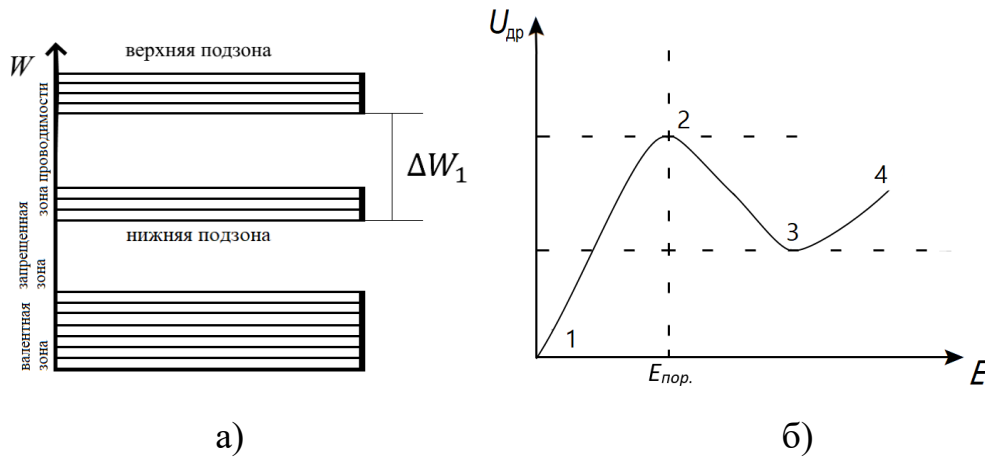


Рис. 2. а – энергетические зоны GaAs; б – зависимость дрейфовой скорости от напряженности электрического поля.

Участок 2 – 3 на рис. 2(б) соответствует отрицательной проводимости. При дальнейшем увеличении напряженности поля дрейфовая скорость растет незначительно (участок 3 – 4) оставаясь примерно равной  $10^7$  см/с. Достигается насыщение дрейфовой скорости.

### Параметры диода Ганна

К основным параметрам диода Ганна относятся:

- концентрация примесей в активной области –  $n_0$
- подвижность электронов в слабом электрическом поле -  $\mu_n$  (то есть, при напряжении на диоде меньше порогового),
- длина активной области -  $l$
- площадь контакта -  $A = \pi d^2/4$
- пороговое напряжение -  $U_{пор}$
- пороговый ток -  $i_{пор}$

- сопротивление в слабом поле -  $R_0 = U_{\text{пор}}/i_{\text{пор}}$

- статическая емкость диода -  $C_0 = \epsilon A/l$

Электрические параметры диода Ганна  $U_{\text{пор}}$ ,  $i_{\text{пор}}$ ,  $R_0$  определяются по статической вольт-амперной характеристике (рис. 3).

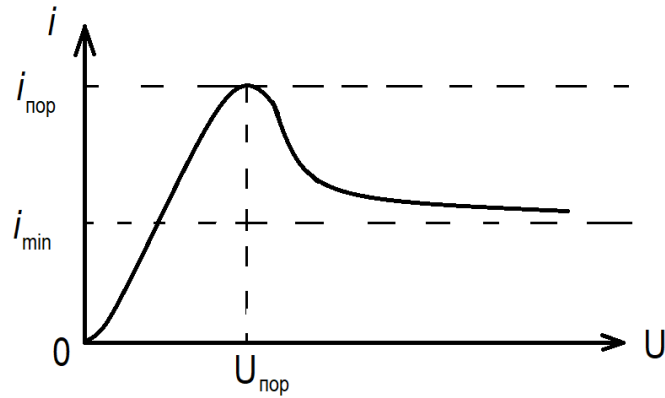


Рис. 3. Статическая вольт-амперная характеристика диода Ганна

## СВЧ - автогенераторы на диодах Ганна

### Конструкция диодных автогенераторов

В конструкциях, приведенных на рис. 4 (а, г) в качестве резонатора используется закороченные на одном конце отрезки волновода прямоугольного сечения.

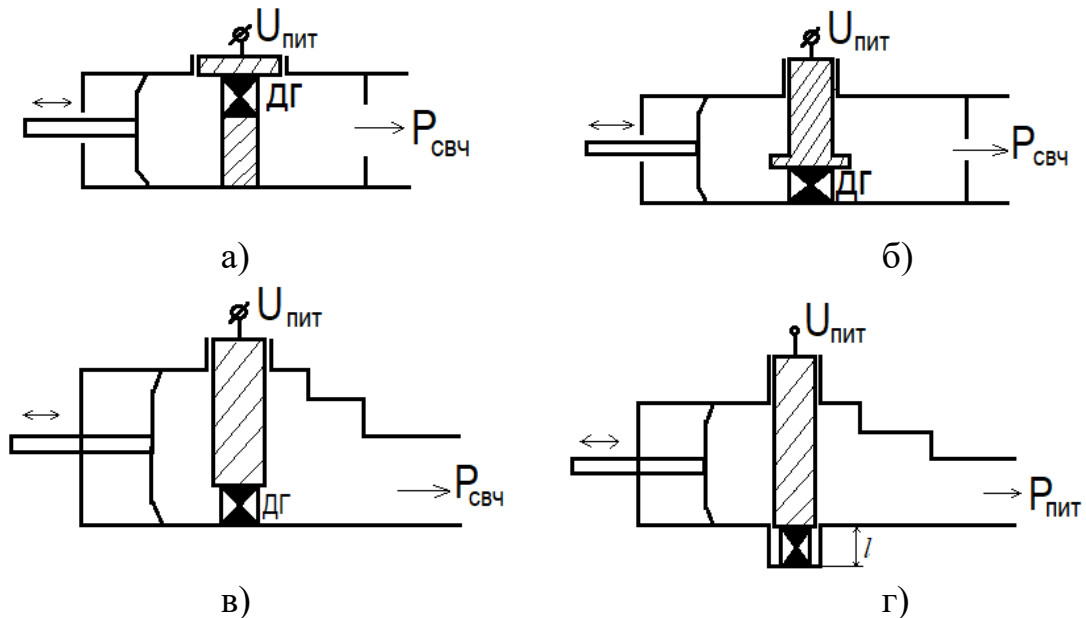


Рис. 4. Конструктивные варианты волноводных автогенераторов: а, б, в, г.

При проектировании автогенератора наиболее сложным является согласование сравнительно низкоомного диода с линиями передачи,

имеющими волновое сопротивление, порядка десятков и сотен ом. В конструкциях волноводного типа эта задача решается с помощью внутриволноводных объемных и открытых резонаторов, выполняемых в виде дисков (рис. 5 (а, б)), или размещения диода в толстой ёмкостной диафрагме рис. 5 (а, в).

Эскиз конструкции автогенератора с диодами Гана волноводного типа приведен на рисунке 6. Из него следует, что автогенератор включает следующие элементы: резонатор, в основном определяющий частоту автоколебаний, устройство механической перестройки резонансной частоты, согласующая элементы диода с резонатором, устройство связи с нагрузкой, фильтрующие и развязывающие элементы.

В качестве элементов перестройки частоты используют короткозамыкающие плунжеры и специальные винты, вводимые в полость резонатора. Связь с нагрузкой осуществляется с помощью ступенчатого трансформатора или специальной диафрагмы, устанавливаемые в волноводе (рис. 5 (а, б, в, г)).

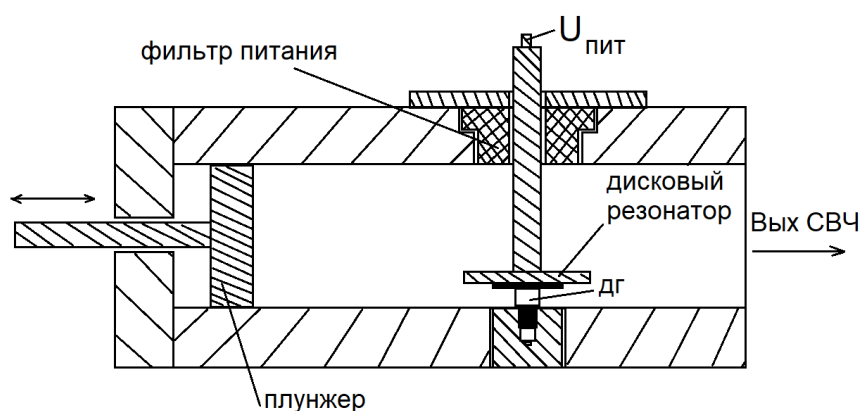


Рис. 5. Диодная камера волноводного типа

## Элементы конструкций линий передачи СВЧ

### Особенности волноводных линий передач

Основная особенность волноводных линий передачи заключается в том, что их электромагнитные поля имеют продольную составляющую электрических или магнитных полей. Наиболее распространенными являются волноводы прямоугольного сечения.

## Соединения линий передачи СВЧ

Для сборки и разборки элементов тракта СВЧ они оснащаются специальными разъемами или соединительными устройствами.

В волноводных трактах применяют два типа соединений: контактное и дроссельно-фланцевое. Контактное соединение может быть неразборным и разборным. Неразборное соединение волноводов осуществляется с помощью внешних муфт, надеваемых на место соединения с последующей сваркой или пропайкой (рис. 6, (а)). Разборное соединение выполняется в виде гладких фланцев, припаиваемых к концам волновода (рис. 6, (б)). Направляющие штифты обеспечивают необходимую точность установки волноводов.

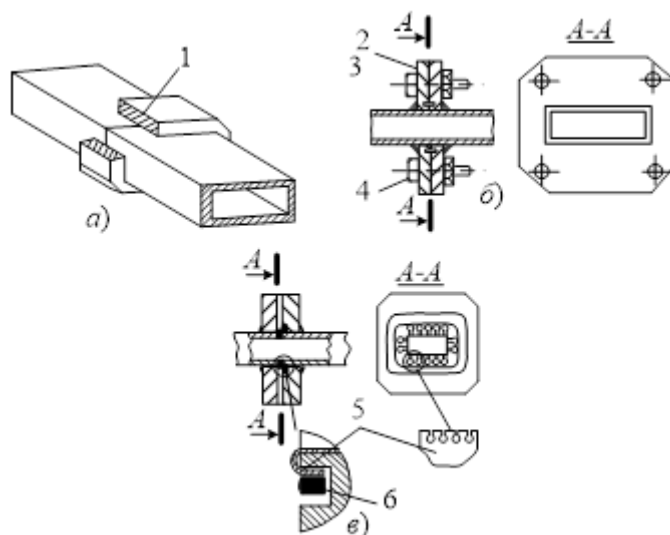


Рис. 6. Соединение волноводов: а – неразъемное контактное; б – разъемное контактное; в – контактное с пружинящей прокладкой; 1 – припой; 2 – гладкий фланец; 3 – направляющий штифт; 4 – болт.

## Экспериментальная часть

### Конструкция волноводного автогенератора

В работе исследуется автогенератор 3-х см-диапазона на диоде Ганна типа АА703Б волноводной конструкции. Конструкция генератора приведена на рис. 7.

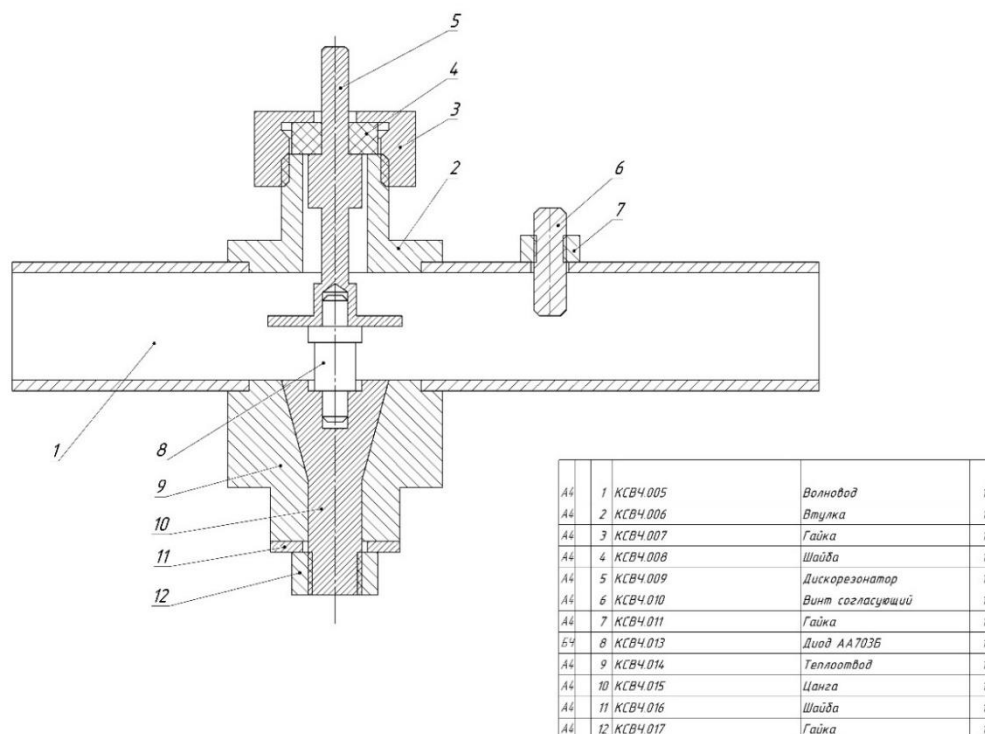


Рис. 7. Конструкция волноводного автогенератора на диоде Ганна

Анодная камера 1 автогенератор представляет собой монолитную конструкцию отрезка волновода 3/х см диапазона пониженного сечения (20×5) мм. Снижение высоты канала волновода позволяет снизить волновое сопротивление и улучшить согласование диода с волноводом. Винт 6 служит для подстройки частоты автогенератора. Диод Ганна помещен анодным выводом в отверстии цанги держателя 10, которая одновременно с радиатором 9 служит для отвода тепла от диода на корпус генератора 1. Ввод питание отрицательной полярности осуществляется через втулку 5 и подводится к катоду диода Ганна. Втулка 10 выполняет несколько функций:

- 1) собственно ввода питания;
- 2) фильтра низкой частоты(ФНЧ),
- 3) согласующего элемента.



Камера изготовлена из алюминиевого сплава с последующим анодным оксидированием, позволяющим получить на поверхности втулки 10 электроизолирующий слой  $Al_2O_3$ , толщиной несколько сотен ангстрем, таким образом, помещённая в отверстие корпуса втулка 5 представляет собой блокировочный конденсатор в цепи питания с ёмкостью несколько сотен пикофард. Для СВЧ колебаний такой конденсатор представляет короткое замыкание и предотвращает проникновение СВЧ колебаний в цепи питания диода.

Изображения изготовленного волноводного автогенератора на диоде Ганна представлено на рис. 8.



Рис. 8.

## Экспериментальная установка

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 9.

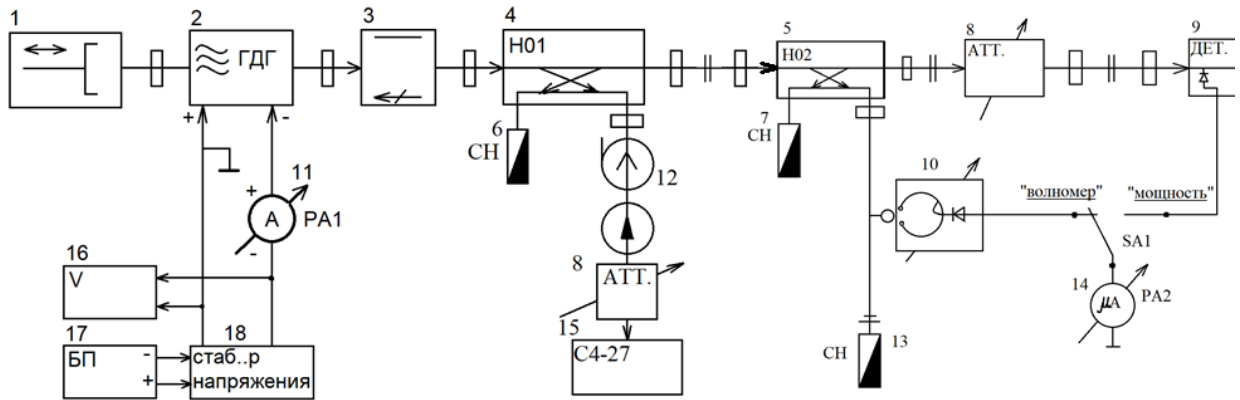


Рис. 9. Блок-схема экспериментальной установки

- 1) короткозамыкатель волноводный; 2) ГДГ автогенератор; 3) вентиль; 4) направленный ответвитель НО1; 5) направленный ответвитель НО2; 6,7) согласование нагрузки направленных ответвителей НО1 и НО2; 8) переменный аттенюатор; 9) детекторная головка; 10) волномер; 11) измеритель тока ГДГ; 12) коаксиально-волноводный переход (КВП); 13) согласование поглощающая нагрузка; 14) РА2 индикатор мощности (в режиме “переключателя мощность”) или индикатор настройки волномера (в режиме “волномер”) 15) анализатор спектра СЧ-27; 16) цифровой вольтметр; 17) блок питания; 18) регулируемый стабилизатор напряжения диода Ганна.

## Выполнение экспериментов

*Эксперимент 1. Исследование вольт-амперной характеристики диода Ганна*

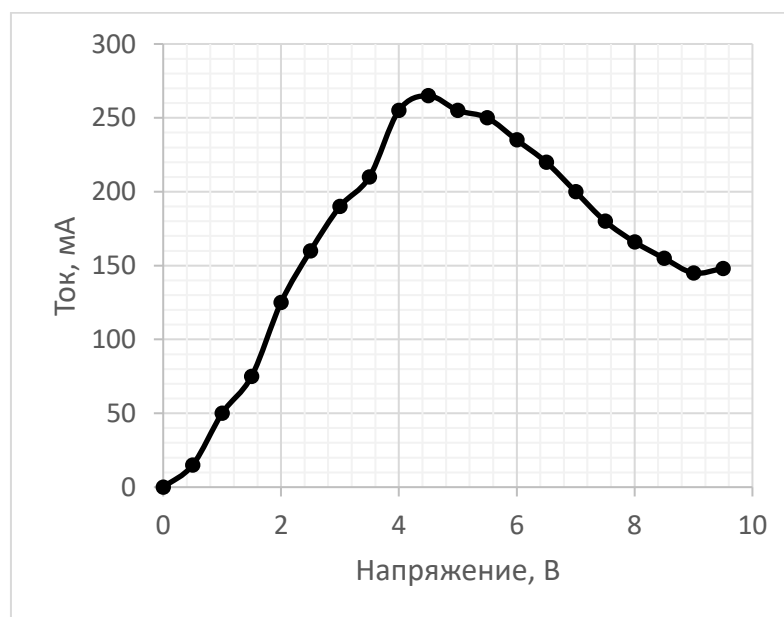


Рис. 10. Вольт-амперной характеристики диода Ганна

*Эксперимент 2. Исследование генерации диода Ганна*

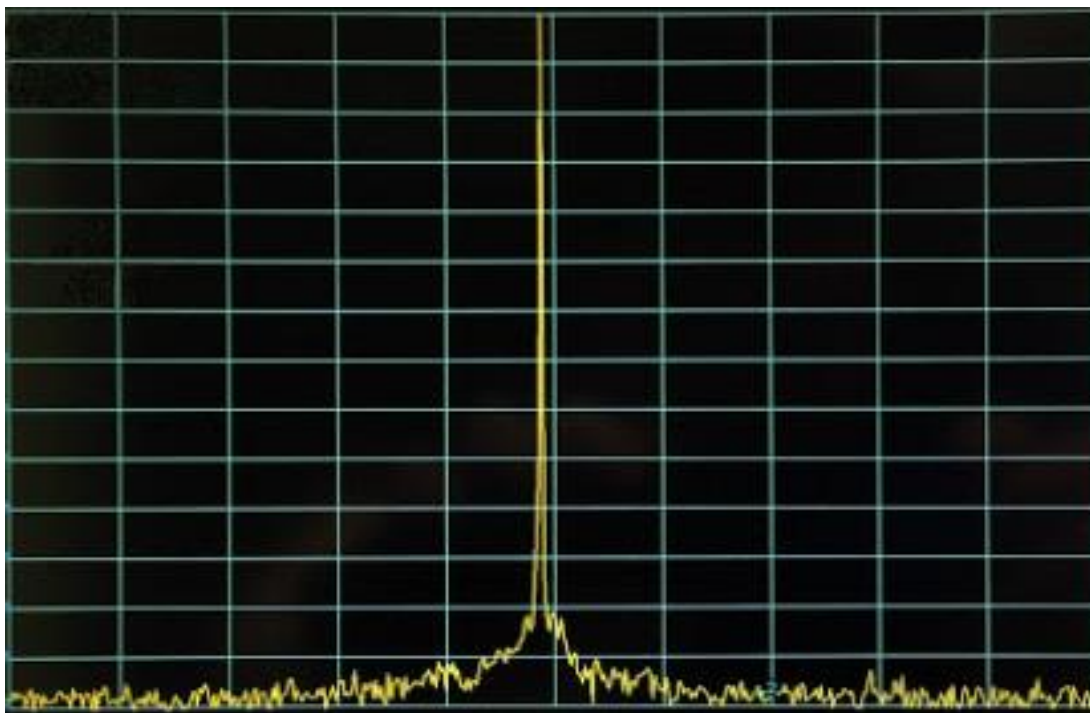


Рис. 11. Вид спектра генератора Ганна

*Эксперимент 3. Исследование механической перестройки частот ГДГ*

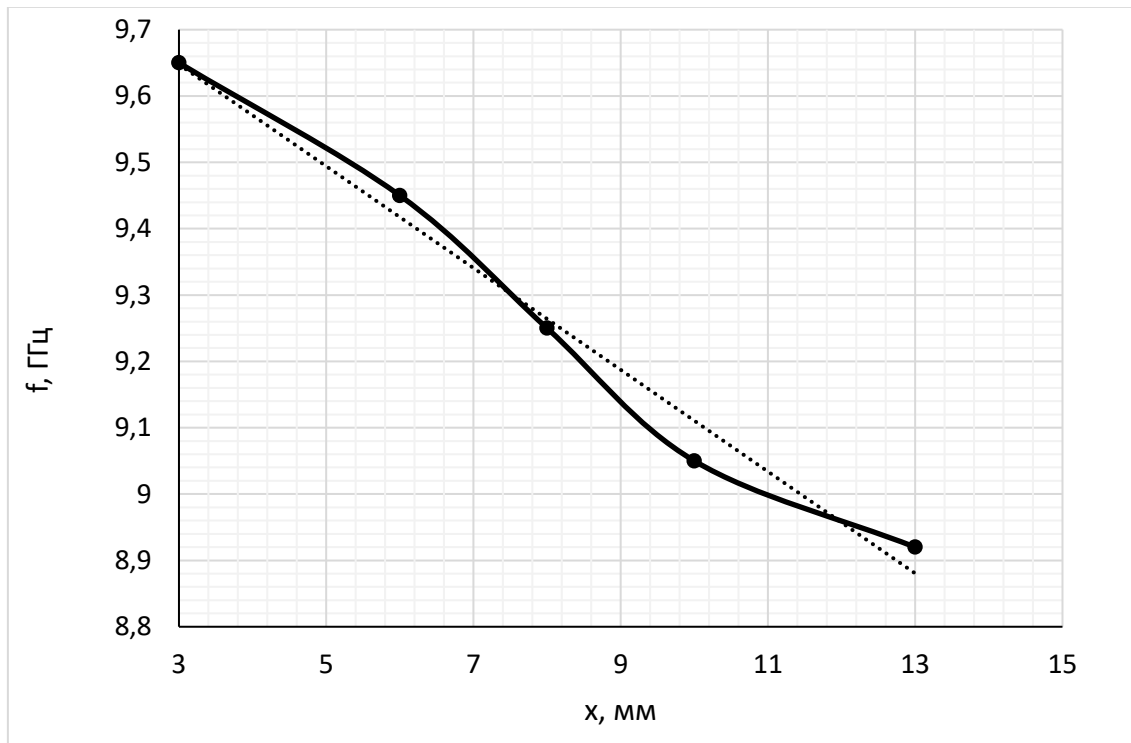


Рис. 12. Механическая перестройка частот ГДГ.

*Эксперимент 4. Исследование электрической перестройки частоты в зависимости от напряжения питания диода Ганна.*

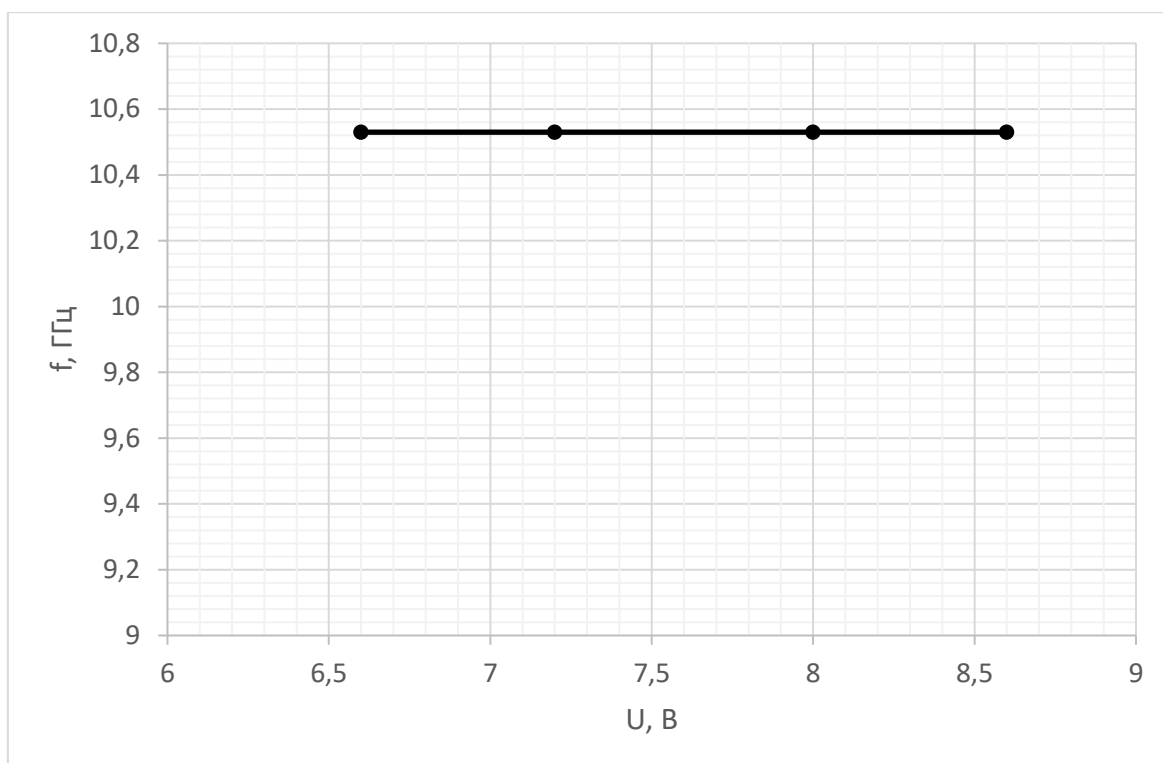


Рис. 13. Электрическая перестройка частоты в зависимости от напряжения питания ДГ.

*Эксперимент 5. Исследование ширины спектра автогенератора на диоде Ганна.*

Ширина спектра в экспериментах была примерно от 0,3 до 0,5 МГц. Подробное исследование не проведено.

## Заключение

В выпускной работе изложен краткий теоретический обзор физических основ работы генераторов СВЧ на диодах Ганна, а также элементы конструкций линий передачи СВЧ.

Была создана конструкция, представленная в приложении 3, и исследованы основные характеристики генератора, а также сборка макета генератора и установки.

В ходе работы было проведено исследование характеристик диода Ганна: исследовали механическую перестройку частот и электрическую перестройку частоты в зависимости от напряжения питания.

В результате проведения экспериментов были построены графики. В экспериментах была построена вольт-амперная характеристика диода Ганна. На графике имеется участок с отрицательным наклоном. Также был получен вид спектра генератора Ганна. Исследована механическая перестройка частот ГДГ. Увеличивая положение короткозамыкателя, частота уменьшалась с шагом  $\approx 0,2$  ГГц. Особое внимание имеет в экспериментах электрическая перестройка частоты в зависимости от напряжения питания диода Ганна. С увеличением напряжения, частота не меняла своё значение. Можно сделать вывод о том, что частота генерации практически не зависит от напряжения, что свидетельствует о хорошем свойстве для генератора. Диапазон изменения напряжений исследовался довольно узкий. Ширина спектра в экспериментах была примерно от 0,3 до 0,5 МГц, но подробное исследование ширины спектра автогенератора на диоде Ганна не проведено в связи с пандемической проблемой в стране.

Выпускная квалификационная работа может быть использована в качестве руководства к лабораторной работе «Исследование СВЧ-генератора на диоде Ганна». Полученные результаты эксперимента позволят оценить зависимость перестройки частоты от напряжения и от перемещения плунжера.

## Список использованных источников\

1. Литвинов, В. Р. Компактные 90-градусные скрутки в прямоугольных волноводах [Текст] / В. Р. Литвинов, Л. А. Рудь, Е. А. Свердленко // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2010.– Т. 53, № 3. – С. 50-57.
  2. Неганов, В. А. Теория и применение устройств СВЧ [Текст]: Учебн. пособие для вузов / В. А. Неганов, Г. П. Яровой; Под ред. В. А. Неганова – М.: Радио и связь, 2006. – 720с.
  3. Лебедев А. И. Физика полупроводниковых приборов. М., Физматлит, 2008.
  4. Кулешов В.Н., Удалов Н.Н., Богачев В.М. и др. Генерирование колебаний и формирование радиосигналов. — М.: МЭИ, 2008. — 416 с.
  5. В. В. Тюрнев. Теория цепей СВЧ: Учеб. пособие // Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003, 194 с.
- Альтман, Дж. Устройства СВЧ [Текст] / Дж. Альтман; пер. с англ.; под ред. И. В. Лебедева. - М.: Мир, 1968. – 488 с.
6. О. О. Дробахин, С. В. Плаксин, В. Д. Рябчий, Д. Ю. Салтыков. Техника и полупроводниковая электроника СВЧ: Учебное пособие [Электронное издание] / Севастополь: Вебер, 2013.– 322 с.
  7. С.М. Зи. Физика полупроводниковых приборов. – Книга 2, М.: 1984.
  8. Справочник по волноводам. Пер. с англ. Под ред. Я. Н. Фельда. – М.: Сов. радио, 1952, с. 431.
  9. В. И. Каганов. СВЧ полупроводниковые передатчики. М. – Радио и связь, 1981, пар. 1.2, 1.3, гл. 4, гл. 7.
  10. Л. Г. Гассанов, А. А. Липатов и др. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи. – М.: Радио и связь, 1988, пар. 7.4, с. 186-190.
  11. Справочник. Полупроводниковые приборы. Сверхвысокочастотные диоды. Ред ред. Б. А. Наливайко. Томск, МГП «Раско» - 1992г.
  12. Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ, Вып. 5 (1359), 1988г, А. И. Абраменков, И. И. Бропуленко, В. М. Геворкян, Д. А. Ковтунов. Состояние и перспективы применения миниатюрных

диэлектрических резонаторов в перестраиваемых полупроводниковых генераторах. М.: ЦНИИ «Электроника».

13. М. С. Гусятников, А. И. Горбачев. Полупроводниковые сверхвысокочастотные диоды. –М.: Радио и связь, 1983, с.181-194.

14 Генератор на диоде Ганна: Метод. указания/Ленинг. гос. техн. университет; Сост.: А.В.Мещеряков. 1991. 32.

15. Анализаторы спектра СЧ-27, СЧ-28. Техническое описание и инструкция по эксплуатации, ч. 1.