

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**
(СГУ)

Кафедра физики полупроводников

**Разработка устройства исследования параметров полупроводниковых
структур на основе высокоомного GaAs**
АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 412 группы
направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»
факультета нано- и биомедицинских технологий

Иванова Романа Игоревича

Научные руководители:

д.ф.-м.н., профессор
должность, ученая степень, ученое звание

подпись, дата

Михайлов А.И.
инициалы, фамилия

Заведующий лабораторией
должность, ученая степень, ученое звание

подпись, дата

Кожевников И.О.
инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой
д.ф.-м.н., профессор
должность, ученая степень, ученое звание

подпись, дата

Михайлов А.И.
инициалы, фамилия

Саратов 2019

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика работы.

Актуальность темы. Полупроводниковые приборы являются неотъемлемой частью современной электроники. Количество различных видов полупроводниковых приборов сильно увеличилось за последние 40 лет. Но их разнообразие не решило проблемы нежелательных эффектов возникающих в кристаллах полупроводника. Такие эффекты подлежат изучению, чтобы в дальнейшем иметь возможность минимизировать их действие на характеристики полупроводникового прибора.

При исследовании различных эффектов научные сотрудники зачастую обременены рутинной работой по сбору данных, которая может занимать значительную часть времени. Это связано с тем, что исследования тех или иных параметров полупроводника осуществляются с помощью измерительных устройств не связанных между собой. То есть при необходимости исследования зависимостей, научный сотрудник вручную записывает полученные данные на бумажный носитель или таблицу в персональном компьютере. Ранее не существовало устройств, способных синхронно накапливать данные, позволяющие строить зависимости характеристик полупроводникового прибора.

На данный момент имея развитую отрасль электроники есть возможность реализовывать устройства способные измерять несколько параметров полупроводниковых структур, а также накапливать полученные данные в цифровом виде для дальнейшей обработки на электронных вычислительных машинах.

В данной работе рассматриваются некоторые методы исследования глубоких уровней в полупроводниковых структурах, их влияние на характеристики полупроводниковых структур, а так же описывается процесс разработки многофункционального измерительного устройства, совмещающего

функции частотомера, измерителя температуры образца в диапазоне $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и микротоков для реализации метода термостимулированных токов.

Цель бакалаврской работы

Целью данной работы является разработка многофункционального измерительного устройства для исследования параметров полупроводниковых структур на основе высокоомного GaAs.

Задачи бакалаврской работы

Задачами данной работы являлись:

- выбор метода исследования параметра глубоких уровней в высокоомных полупроводниках, который не требует дорогостоящих электронных компонентов для реализации измерительного устройства;
- реализация способа измерения частоты токовых колебаний структуры в диапазоне $1\text{ кГц} - 1\text{ МГц}$,
- реализация способа измерения температуры полупроводниковой структуры в диапазоне $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- реализация способа измерения микротоков в диапазоне $0,1 - 5\text{ мкА}$,
- реализация устройства, совмещающего выбранные способы измерений частоты, температуры и микротоков с возможностью регистрации, обработки и записи измеряемых величин на электронный накопитель,
- калибровка блоков измерительного устройства.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Методы исследования глубоких уровней в высокоомных полупроводниках

Метод нестационарной спектроскопии глубоких уровней (НСГУ) основан на анализе температурной зависимости изменения барьерной емкости полупроводниковой структуры после импульсного изменения напряжения смещения.

Метод инфракрасной спектроскопии основан на анализе спектра света прошедшего через образец. Этот метод позволяет изучить химический состав образца.

Метод сканирующего туннельного спектроскопа (СТС) основан на явлении квантово-механического туннельного эффекта, заключающегося в способности частиц преодолевать потенциальные барьеры, высота которых больше полной энергии частицы. Туннельный эффект связан с волновыми свойствами частиц.

Метод термостимулированных токов (ТСТ) основан на заполнении ловушек в кристалле электронами и дырками под действием облучения при низких температурах с последующим опустошением их при нагревании. После перезарядки примесных уровней носителями различных знаков (электронами и дырками) оказывается возможным определение глубины залегания этих перезаряженных уровней в запрещенной зоне кристалла (ΔE) по энергии активации захваченных на примесные уровни носителей в соответствующие разрешенные зоны кристалла по температурной зависимости ТСТ при нагревании образца.

Влияние глубоких уровней на характеристики полупроводниковых структур

Глубокие уровни – энергетические уровни образованные рядом примесей, имеющих в полупроводнике (или специально вводимых в него), энергетические

уровни которых расположены вблизи середины запрещенной зоны. Такие примеси обычно не являются ни донорами, ни акцепторными.

Энергия активации в этом случае достаточно большая, поэтому атомы таких примесей практически не ионизируются, соответственно не изменяют концентрации свободных носителей, тем не менее, роль глубоких уровней существенна, так как представляют собой «ловушки» или центры захвата подвижных носителей.

Наличие глубоких уровней в кристалле полупроводника может негативно повлиять на работу полупроводникового прибора. Наличие ловушек в объеме кристалла приводит к захвату носителей заряда, что сказывается на проводимости полупроводникового прибора. Так же ловушки ведут себя как центры безызлучательной рекомбинации носителей заряда, что приводит к токам утечки и уменьшению КПД лазеров с кристаллами содержащими глубокие уровни.

Разработка устройства

Образцы высокоомных полупроводников

В качестве образца высокоомной полупроводниковой структуры была выбрана структура исследуемая Александром Ивановичем Михайловым, Антоном Васильевичем Митиным и Ильей Олеговичем Кожевниковым в работе «Функциональный однокристалльный преобразователь свет-частота на основе высокоомного n -GaAs».

Функциональный однокристалльный преобразователь свет-частота представляет собой планарно-эпитаксиальную мезаструктуру на основе высокоомного n -GaAs с двумя омическими контактами, схожую по конструкции с фоторезистором. Длина засвечиваемой области (расстояние между омическими контактами) лежит в диапазоне 50–200 мкм.

Требования к разрабатываемому устройству:

- устройство должно быть изготовлено из доступных деталей, элементов и электронных модулей;

- суммарная стоимость деталей и приборов должна быть такой, чтобы обеспечить возможность их приобретения студентами высших учебных заведений;

- устройство должно иметь возможность собирать полученные данные и сохранять их на широко используемом виде носителя;

- формат сохраненных данных должен быть таковым, чтобы обеспечить возможность их обработки с помощью среднестатистического персонального компьютера;

- устройство должно измерять такие показатели как температура, частота, ток;

- диапазон измеряемых температур должен быть не менее чем от $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- диапазон измеряемых частот должен быть не менее чем от 1 кГц до 1 МГц;

- предел микроамперметра должен составлять не менее 5 мкА;

- сопротивление шунта микроамперметра не должно превышать 100 кОм;

- устройство должно иметь дисплей;

- мгновенные измеренные данные должны выводиться на дисплей.

Измерительное устройство должно состоять из следующих блоков:

- блок обработки и преобразования данных;

- блок записи данных;

- блок отображения мгновенных данных;

- блок измерения микротоков;

- блок измерения температуры;

- блок измерения частоты.

Методика выбора компонентов и их характеристики

В качестве основы устройства была выбрана плата прототипирования Arduino nano. Плата имеет достаточное количество выводов, различного назначения, для реализации устройства на основе этой платы.

В качестве датчика температуры был использован платиновый термистор. В качестве термистора был выбран Pt1000. Термистор Pt1000 класса Б предназначен для измерения температуры в диапазоне от $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+500\text{ }^{\circ}\text{C}$. В качестве аналогово-цифрового преобразователя для термистора использовалась плата MAX31865. Термистор подключается к АЦП по двухпроводной схеме включения.

Блок измерения микротоков был осуществлен на основе аналогового входа платы Arduino nano. Максимальное входное напряжение аналогового входа 5 В. Аналоговый вход имеет внутренний АЦП с разрядностью 10 бит (1024 разряда соответствующие 5 вольтам). Для усиления напряжения использовался операционный усилитель MAX4372F с коэффициентом усиления напряжения 50.

Измеритель частоты был осуществлен на базе внутренних таймеров платы Arduino T0 и T1. Для получения прямоугольного сигнала на входе таймера T1 использовался триггер 74НС14. Для подсчета величины частоты использовалась библиотека «FreqCount». Данная библиотека наиболее эффективна при измерении частот в диапазоне от 1 кГц до 8 МГц. Для диапазона от 1 Гц до 1 МГц то следует использовать библиотеку «FreqMeasure».

Была разработана электрическая схема устройства. Согласно этой схеме была проведена трассировка токопроводящих дорожек печатной платы. Для изготовления печатной платы был выбран метод фотолитографии. Был изготовлен фотошаблон. При изготовлении печатной платы использовался позитивный пленочный фоторезист. Плата была изготовлена, а затем на плату был осуществлен монтаж электронных компонентов устройства.

Программирование платы и калибровка

Программирование платы Arduino nano

Программирование платы осуществлялось с помощью программного обеспечения Arduino IDE.

Программный код собирает данные с датчиков, осуществляет численные преобразования. Так же программный код содержит калибровочные коэффициенты. Затем численные значения измеренных величин записываются на карту памяти, установленную в плату модуля записи карты памяти. После эти значения выводятся на жидкокристаллический экран и передаются по СОМ порту на персональный компьютер. Данные с СОМ порта можно считывать с помощью Arduino IDE, а так же с помощью любого другого программного обеспечения с возможностью принимать данные с СОМ порта.

Калибровка микроамперметра

Была произведена калибровка блока микроамперметра устройства, в качестве эталона использовался микроамперметр Ф195. В качестве исследуемой структуры использовался эквивалентный резистор с сопротивлением 4 МОм. В качестве источника напряжения использовался лабораторный источник питания GRATTEN APS3005D. Были проведен ряд измерений в 10 точках в диапазоне от 0,5 мкА до 5 мкА.

При калибровке использовались калибровочные коэффициенты(1).

$$I_{\text{к}} = I_{\text{и}}^A * B - C \quad (1)$$

где $I_{\text{к}}$ – величина тока которая выводится на экран, $I_{\text{и}}$ – величина тока измеренная блоком измерения микротоков, A – калибровочный коэффициент отвечающий за кривизну функции, B – коэффициент отвечающий за наклон функции, C – коэффициент отвечающий за смещение функции.

Были подобраны коэффициенты $A = 0,8$; $B = 1,9$; $C = 0,31$.

Разработанное устройство выполняет все поставленные задачи, имеет модульную конструкцию, которую при необходимости можно модернизировать, дополнять и объединять с другими автоматизированными системами научного исследования. К недостаткам относится ограничение по дальнейшему наращиванию функций устройства, связанную с малым объемом встроенной памяти микроконтроллера, в которой программа разработанного устройства уже занимает 80 %, что перекрывается такими положительными качествами, как миниатюрность, портативность и простота реализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были рассмотрены некоторые методы измерения глубоких уровней в полупроводниках. Рассмотрены различные эффекты, как негативные, так и позитивные, вызванные наличием глубоких уровней в подложках структур полупроводниковых приборов. Были установлены требования к разрабатываемому устройству. Был выбран метод термостимулированных токов как метод, которым будут проводиться исследования полупроводниковых структур с помощью разрабатываемого устройства. Выбор был обусловлен относительной простотой проведения исследований данным методом. Была разработана блок-схема устройства, подобраны радиоэлектронные компоненты для реализации устройства. Создана электрическая схема устройства. Было произведено макетирование устройства на макетной плате, в результате которого был выявлен конфликт работы платы записи карт памяти и АЦП датчика температуры. В результате было найдено решение в разделении интерфейсов АЦП датчика температуры и платы записи карт памяти путем программного создания второго интерфейса SPI. Изготовлена печатная плата по окончательной схеме и осуществлена сборка устройства. Была осуществлена калибровка блока измерения микротоков и температуры, введены калибровочные коэффициенты.

Разработанное устройство выполняет все поставленные задачи. Оно уникально тем, что имеет модульную конструкцию, которую при необходимости можно модернизировать, дополнять и объединять с другими автоматизированными системами научного исследования.

В процессе выполнения данной работы были получены навыки разработки, калибровки, изготовления и сборки измерительного устройства для реализации методов измерения параметров полупроводниковых структур на основе высокоомного GaAs.