

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

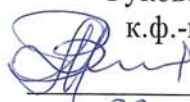
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Радиофизический факультет

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Руководитель ООП

к.ф.-м.н., доцент



В.А. Мещеряков

«23» января 2023 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

**МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ФОТОДИОДА НА БАЗЕ ИСТОЧНИКА ИЗМЕРИТЕЛЯ KEITHLEY 2410
И МОНОХРОМАТОРА MONOSCAN2000**

по основной образовательной программе подготовки специалиста
по специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы»

Хасанов Тимур Рустамович

Руководитель ВКР

канд. физ.-мат. наук

Копьев В. В. Копьев

«23» января 2023 г.

Автор работы

студент группы № 779

Хасанов Т. Р. Хасанов

Томск-2023

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель ООП
к.ф.-м.н., доцент



В.А. Мещеряков

« 20 » декабря 2022 г.

ЗАДАНИЕ

на подготовку ВКР специалиста
студенту 779 группы Хасанову Тимуру Рустамовичу

1. Тема ВКР: Модернизация системы измерения характеристик фотодиода на базе источника измерителя Keithley 2410 и монохроматора Monoscan2000

2. Срок сдачи студентом выполненной ВКР:

- а) на кафедре 26.01.2023,
б) в ГЭК 03.02.2023.

3. Краткое содержание работы:

Работа направлена на разработку автоматизированной системы измерения спектров пропускания на основе источника-измерителя Keithley 2410 и монохроматора Monoscan 2000.

Работа предполагает обзор литературы, разработку программного обеспечения, тестирование работы программного обеспечения.

4. Календарный график выполнения ВКР:

- | | |
|--|-------------------------|
| а) изучение литературы | 22.12.2022 – 28.12.2022 |
| б) разработка программного обеспечения | 24.12.2022 – 28.12.2022 |
| в) тестирование программного обеспечения, анализ результатов | 24.12.2022 – 16.01.2023 |
| г) написание ВКР и сдача в ГЭК | 12.01.2023 – 01.02.2023 |
| д) размещение текста ВКР в электронной библиотеке ТГУ | 26.01.2023 – 01.02.2023 |

5. Дата выдачи задания «20» декабря 2022 г.

Руководитель ВКР –
канд. физ.-мат. наук,
доцент кафедры полупроводниковой электроники

Задание принял к исполнению



В.В. Копьев

Т. Р. Хасанов

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Теоретическая часть.....	7
1.1 Среда проектирования виртуальных приборов LabVIEW	7
1.1.1 Краткая справка о среде LabVIEW	7
1.1.2 Виртуальные приборы.....	9
1.2 Комплект оборудования для автоматизации.....	10
1.2.1 Источник-измеритель Keithley 2410.....	10
1.2.2 Сканирующий монохроматор MonoScan2000	11
1.2.3 Комбинированный источник излучения DH-2000 (дейтерий-галоген)	12
1.3 Фотоэффект	14
1.3.1 Фотоэлектрические материалы	14
1.3.2 Поглощение оптического излучения в полупроводниках.....	16
1.4 Фотодиоды	17
1.4.1 Природа появления фототока.....	17
1.4.2 Режим работы фотодиода	18
1.4.3 <i>P-n</i> Фотодиоды.....	18
1.4.4 <i>P-i-n</i> Фотодиоды	20
1.4.5 Фотодиод с барьером Шоттки.....	22
1.4.6 Фотодиод с гетеропереходом	25
2 Методика эксперимента	27
2.1 Принцип автоматизации приборов Keithley 2410 и MonoScan2000....	27
2.2 Калибровка монохроматора MonoScan2000	29
2.3 Среда программирования LabView	30

2.3.1 Запуск LabView	30
2.3.2 Принцип потока данных	34
2.3.3 Типы данных	34
3 Экспериментальная часть.....	36
3.1 Реализация программно-аппаратной автоматизации приборов.....	36
3.1.1 Автоматизация прибора Keithley 2410	36
3.1.2 Автоматизация прибора MonoScan2000.....	37
3.1.4 Автоматизация приборов Keithley 2410 и MonoScan2000	41
3.1.5 Лицевая панель итоговой программы	42
3.1.6 Блок-диаграмма итоговой программы.....	43
3.2 Проверка программы на германиевом фотодиоде	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	52
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	53
ПРИЛОЖЕНИЕ А	54
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	56

РЕФЕРАТ

Выпускная работа 69 с., 38 рис., 11 источников, 2 приложения.

ИСТОЧНИК-ИЗМЕРИТЕЛЬ KEITHLEY 2410, МОНОХРОМАТОР
MONOSCAN2000, LABVIEW.

Объектом исследования являются источник-измеритель KEITHLEY 2410 и MONOSCAN2000.

Целью работы является получение данных с автоматизированной системы измерения спектров пропускания на основе источника-измерителя Keithley 2410 и монохроматора Monoscan 2000.

В процессе работы в программе LabView были написаны программы для управления приборами с компьютера. Затем написана общая программы для автоматизации источника-измерителя и монохроматора.

В результате работы:

- а) написан литературный обзор по теме научной исследовательской работы
- б) изучен принцип работы экспериментальной установки;
- в) изучена программная среда разработки LabView;
- г) написана программа для автоматизации процесса измерения фототока в зависимости от изменения длины волны;
- д) выполнены практические измерения;
- е) выполнен анализ полученных результатов и написан отчет.

ВВЕДЕНИЕ

Измерения спектров фототока различных веществ является важной научно-технической задачей. Фотоэффект, фотоэлектронная эмиссия или фотоэлектрический эффект, явление взаимодействия света или любого другого электромагнитного излучения с веществом, при котором энергия фотонов передаётся электронам вещества. В конденсированных (твёрдых и жидких) веществах выделяют внешний (поглощение фотонов сопровождается вылетом электронов за пределы тела) и внутренний (электроны, оставаясь в теле, изменяют в нём своё энергетическое состояние) фотоэффект. Фотоэффект в газах состоит в ионизации атомов или молекул под действием излучения.

Внешний фотоэффект был открыт Г.Герцем в 1887г. и в настоящее время широко используется в различных фотоэлектронных приборах (фотоэлементах, фотоэлектронных умножителях, электронно-оптических преобразователях и т.д.), а также является важным способом изучения энергетической структуры вещества. Фототок – это электрический ток, возникающий в фотоэлементе при воздействии света.

Усложнение нынешнего производства, развития научных исследований в разных направлениях привели к необходимости измерять контролировать одновременно сотни, а порой даже тысячи различных факторов и физических величин. Вследствие чего в нашем мире большую роль стала играть автоматизация разных процессов, все больше предприятий переходят на частичную или полную автоматизацию действий за счет использования компьютера и программного обеспечения, которые позволяют сократить степень влияния человеческого фактора.

Различают полную и частичную автоматизацию. Процесс измерения, при котором обратная связь управления осуществляется без участия человека, называется автоматическим. Если оператор является одним из звеньев в цепи получения информации то, речь идет об автоматизированных

измерениях. Автоматизированные измерения не принижают роль исследователя, техника или инженера, которые используют результаты полученных измерений. Наоборот, это повышает производительность их труда, помогая быстрее достичь нужных результатов. Так же благодаря автоматизации измерений исследователь может собирать информацию в местах недоступных для человека, совершать длительные, многократные измерения.

Целью выпускной работы является получение данных с автоматизированной системы измерения спектров пропускания на основе источника-измерителя Keithley 2410 и монохроматора Monoscan 2000.

Актуальность данной работы заключается во внедрении автоматизированного измерения фототока в зависимости изменения длины волны оптического излучения в обучающийся курс студентов для их обучения в пользовании подобных программ по автоматизации приборов, а так же для повышения качества проводимых измерений на лабораторных работах.

1 Теоретическая часть

1.1 Среда проектирования виртуальных приборов LabVIEW

1.1.1 Краткая справка о среде LabVIEW

LabVIEW это среда создания прикладных программ, выпущенная фирмой National Instruments (США). В ней используется язык графического программирования. Для его освоения не требуется знания традиционных текстовых языков программирования. LabVIEW (рисунок 1) предоставляет большой спектр возможностей для проведения вычислений и математического моделирования. В этом плане среда LabVIEW конкурирует с такими известными системами компьютерной математики, как MATLAB, MathCAD, Mathematica.



Рисунок 1 – Среда графического программирования LabVIEW [1]

Наиболее часто LabVIEW используется при создании приборов и систем для измерений физических величин в научных экспериментах, лабораторных и промышленных установках. Важным достоинством LabVIEW является возможность управления процессом измерения в автоматическом или интерактивном режиме. Для обработки и анализа данных используется большой набор функциональных библиотек (общего назначения и специализированных). Взаимодействие с исследователем или оператором осуществляется с помощью продуманного и простого в программировании графического интерфейса. С помощью программ-драйверов LabVIEW эффективно взаимодействует с различными платами ввода/вывода аналоговых и цифровых сигналов, модулями ввода видеосигналов, а также со специализированными модульными приборами (осциллографы, анализаторы спектра, генераторы сигналов и т.д.). Благодаря этому данная среда программирования является популярной во всем мире, что доказывает большое количество публикаций [1].

1.1.2 Виртуальные приборы

Программы, созданные в виртуальной среде LabVIEW, по своему функционалу и внешнему виду похожи на реальные приборы из-за этого, их принято называть виртуальными приборами (ВП). Каждый создаваемый виртуальный прибор (ВП) состоит из двух основных частей:

а) Лицевая панель (front panel) – задает пользовательский интерфейс ВП (рисунок 2). На ней чаще всего расположены элементы управления (controls), которые используются для ввода данных, и индикаторы (indicators), используемые для вывода результатов работы программы.

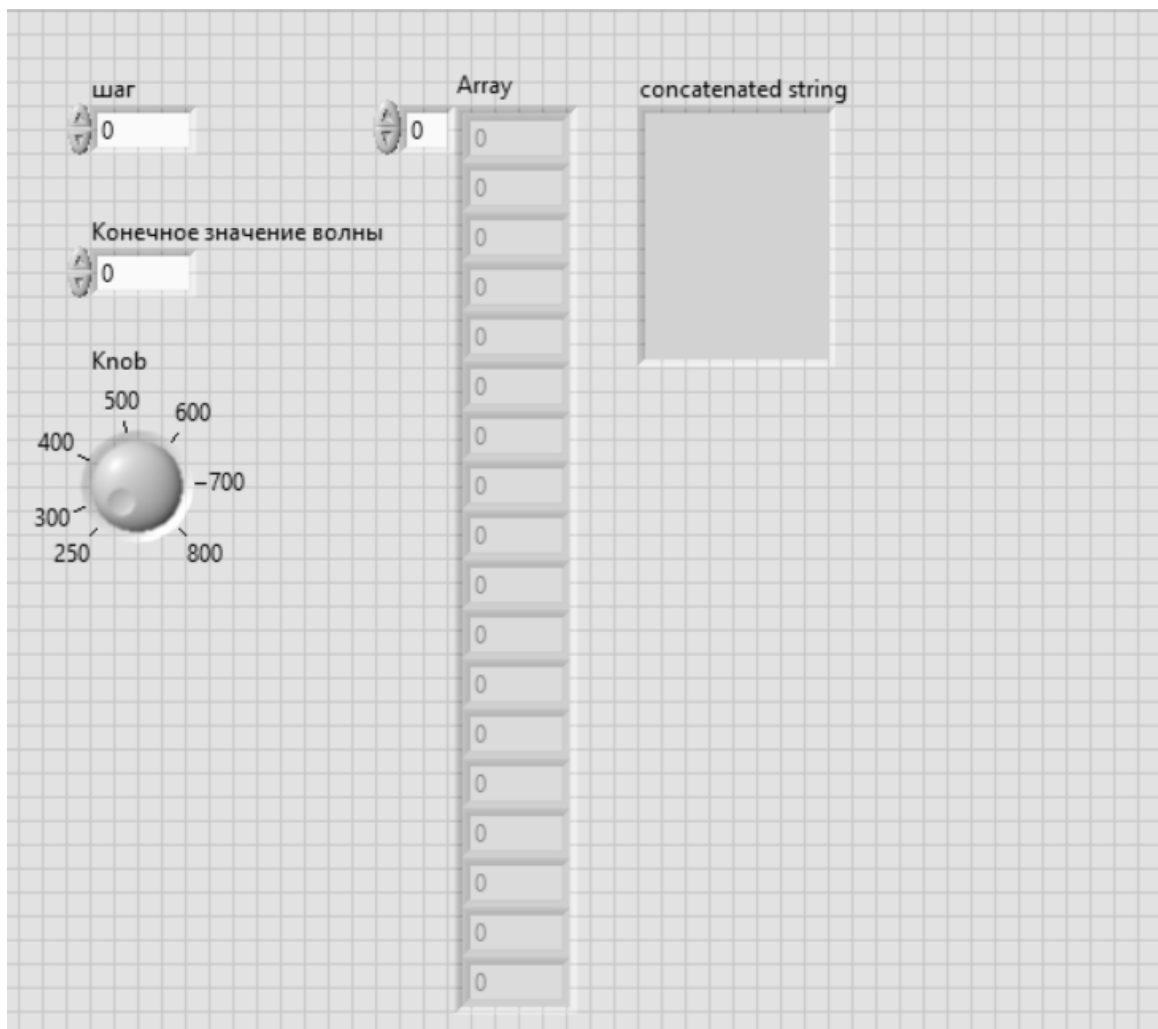


Рисунок 2 – Пример лицевой панели виртуального прибора

б) Блок-диаграмма (block diagram) – представляет алгоритм работы программы на языке графического программирования. На ней обычно размещаются: виртуальные приборы более низкого уровня, терминалы (объекты лицевой панели) встроенные функции LabVIEW, константы и другие структуры. На рисунке 3 показан пример блок-диаграммы виртуального прибора.

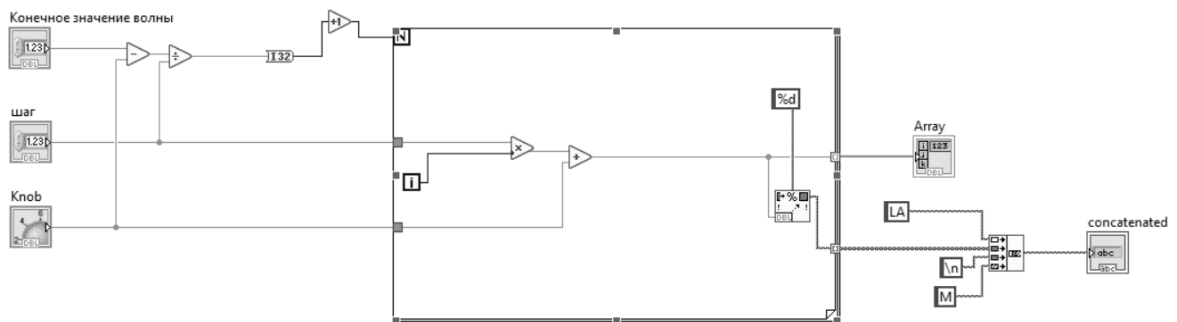


Рисунок 3 – Пример блок-диаграммы виртуального прибора

1.2 Комплект оборудования для автоматизации

1.2.1 Источник-измеритель Keithley 2410

В качестве базы для реализации измерения фототока использовали Источник-измеритель Keithley 2410 (рисунок 4).



Рисунок 4 – Источник-измеритель Keithley 2410 [2]

Источники-измерители Keithley серии 2400 представляют собой прецизионный четырёхквadrантный источник тока и напряжения с отображением результатов измерений обладающий высокой функциональностью и точностью. Приборы обеспечивают высокую скорость измерений. Источник питания отличается низким уровнем шумов, высокой точностью и возможностью эхосчитывания. Мультиметр имеет низкий уровень шумов и высокую повторяемость результатов. Эти приборы могут одновременно работать как источники и измерители тока от 10 фА до 10 А в импульсном режиме и/или напряжения от 100 нВ до 200 В с общей выходной мощностью 1000 Вт по импульсному току и 100 Вт по постоянному току.

Модель Keithley серии 2410 имеет следующие особенности:

- Генерация напряжения от 5 мкВ до 63 В ; измерение напряжения от 1 мкВ до 63 В .
- Генерация тока от 500 пкА до $3,15\text{ А}$; измерение тока от 100 пкА до $3,165\text{ А}$.
- Измерение сопротивления от 10 мкОм ($<10\text{ мкОм}$ при ручном режиме измерений сопротивления) до $21,1\text{ Мом}$.
- Максимальная мощность генерации 66 Ватт .

1.2.2 Сканирующий монохроматор MonoScan2000

MonoScan2000 – это сканирующий монохроматор с компьютерным управлением, перестраиваемый в диапазоне длин волн $250\text{--}800\text{ нм}$. Весь диапазон сканируется за три секунды. Для перестройки на один нанометр требуется $15\text{--}20\text{ мс}$. MonoScan2000 (рисунок 5) совместим со всеми спектрометрами, источниками излучения и оптическими волокнами Ocean Optics. Монохроматор работает путем пропускания света через решетку или призму, которая рассеивает свет на составляющие его длины волн. Управляя углом наклона решетки или призмы, можно выбрать определенную длину волны или диапазон длин волн света для дальнейшего анализа.



Рисунок 5 – Сканирующий монохроматор MonoScan2000 [3]

1.2.3 Комбинированный источник излучения DH-2000 (дейтерий-галоген)

Источник излучения DH-2000 (рисунок 6) способен объединять в одном оптическом выходе непрерывный ультрафиолетовый спектр дейтериевой лампы с радиочастотным возбуждением и спектр вольфрамовой галогенной лампы. Этот источник способен обеспечивать мощное и стабильное излучение в области от 190 до 2500 нм. Данная версия DH-2000 имеет возможность балансировки излучения дейтериевой и вольфрамовой ламп, используя потенциометр на задней стороне прибора. Этот потенциометр позволяет регулировать мощность излучения ламп в диапазоне от 10 до 100%. [4]

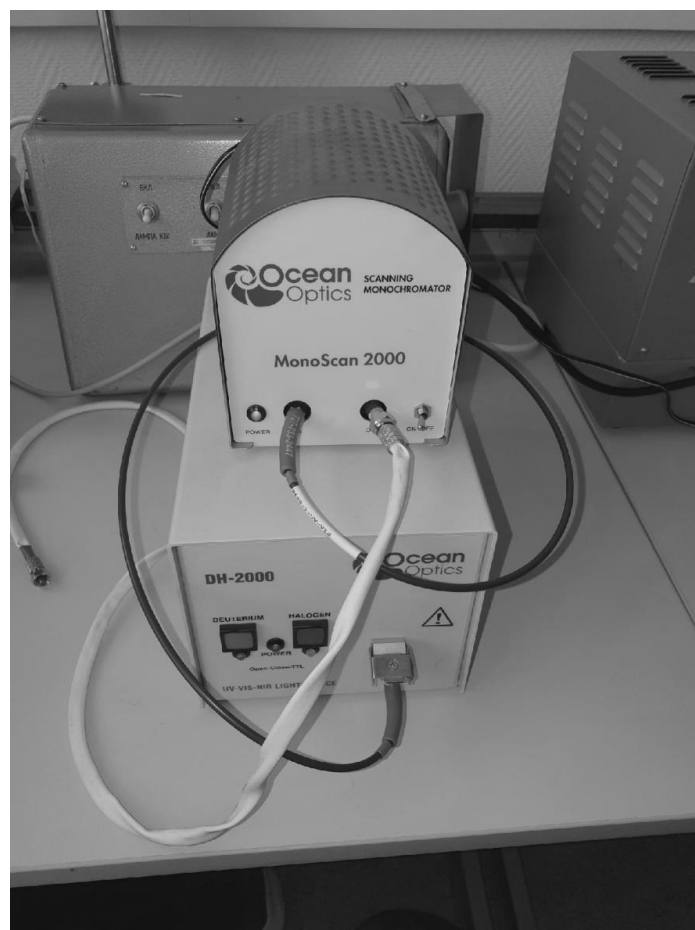


Рисунок 6 – Комбинированный источник излучения DH-2000

1.3 Фотоэффект

1.3.1 Фотоэлектрические материалы

Фотоэлектрическими материалами принято называть материалы, в которых может наблюдаться фотоэлектрический эффект или другими словами фотоэффект. Фотоэффект разделяют на внешний и внутренний. На использовании фотоэффекта основано действие фотоэлектронных приборов (фотоэлементов), имеющих на практике различное применение.

Внешний фотоэффект (фотоэффект, фотоэлектронная эмиссия) – это испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения (света). Электроны, вылетающие из вещества при внешнем фотоэффекте, называются фотоэлектронами, а электрический ток, образуемый ими при упорядоченном движении во внешнем электрическом поле, называется фототоком. Данное явление наблюдается в твердых телах (металлах, полупроводниках, диэлектриках), а также в газах на отдельных атомах и молекулах (фотоионизация).

Схема установки для исследования фотоэффекта изображена на рисунке 7. Она представляет собой вакуумный электронный прибор, важнейшей частью которого является фотокатод, т.е. катод, непосредственно подвергающийся воздействию электромагнитного излучения и эмитирующий электроны в результате этого воздействия. Катод освещается светом. Под действием света из катода вырываются фотоэлектроны, которые летят к аноду и образуют фототок, регистрируемый миллиамперметром. С помощью такой установки, используя электроды, изготовленные из разных материалов, можно снимать вольтамперные характеристики (ВАХ), т.е. зависимости силы фототока от напряжения между электродами.

Установлены следующие три закона внешнего фотоэффекта:

1) Закон Столетова: при фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов, вырываемых из катода в единицу времени,

пропорционально интенсивности света (сила фототока насыщения пропорциональна энергетической освещенности катода);

2) Максимальная начальная скорость (максимальная начальная кинетическая энергия) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой;

3) Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т.е. минимальная частота света (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), ниже которой фотоэффект невозможен.

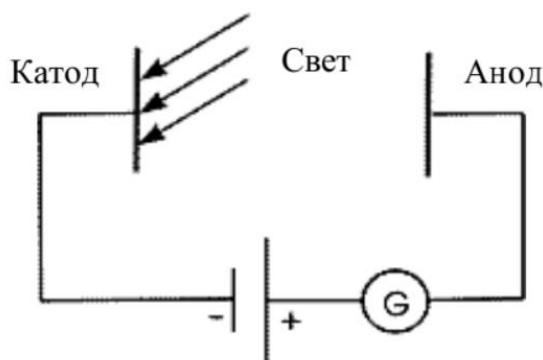


Рисунок 7 – Схема установки для исследования фотоэффекта [5]

Простейшим фотоэлементом с внешним фотоэффектом является вакуумный фотоэлемент, представляющий собой откачанный стеклянный баллон, внутренняя поверхность которого (за исключением окошка для доступа излучения) покрыта фоточувствительным слоем, служащим фотокатодом. В качестве анода обычно используется кольцо или сетка, помещаемая в центральной части баллона. Фотоэлемент включается в цепь электрической батареи, ЭДС которой выбирается такой, чтобы обеспечить фототок насыщения. Выбор материала фотокатода определяется рабочей областью спектра: для регистрации видимого и инфракрасного излучения используется кислородно-цезиевый катод, для регистрации ультрафиолетового излучения и коротковолновой части видимого света – сурьмяноцезиевый.

Внутренний фотоэффект – это вызванные электромагнитным излучением (светом) переходы электронов внутри полупроводника или

диэлектрика из связанных состояний в свободные без вылета наружу, в результате чего концентрация носителей тока внутри тела увеличивается, что приводит к возникновению фотопроводимости (повышению проводимости полупроводника или диэлектрика при его освещении) или к возникновению ЭДС.

Электрон при поглощении фотона переходит из валентной зоны в зону проводимости. В результате образуется пара носителей заряда: электрон в зоне проводимости и дырка в валентной зоне. Оба этих носителя заряда при приложении к полупроводнику напряжения создают электрический ток. При возбуждении фотопроводимости в собственном (беспримесном) полупроводнике энергия фотона должна превышать ширину запрещенной зоны. В полупроводнике с примесями поглощение фотона может сопровождаться переходом из уровня, расположенного в запрещённой зоне, что позволяет увеличить длину волны света, который вызывает фотопроводимость. Данное обстоятельство важно для детектирования инфракрасного излучения.

1.3.2 Поглощение оптического излучения в полупроводниках

Электромагнитное излучение с длиной волны от 1 нм до 1 мм называют оптическим излучением. Оптическое излучение разделяют на видимое, ультрафиолетовое и инфракрасное.

Представим монохроматическое оптическое излучение в виде потока квантов излучения, то есть фотонов с одинаковой энергией

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1,240 \text{ ЭВ*мкм}}{\lambda}, \quad (1)$$

где h – постоянная Планка,

$c = 2,998 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме,

ν – частота оптического излучения.

1.4 Фотодиоды

1.4.1 Природа появления фототока

Рассмотрим p – n -переход, который находится в условии равновесия, со стороны p -области падает оптическое излучение с энергией фотонов больше ширины запрещенной зоны. В результате поглощения излучения в полупроводнике начнется оптическая генерация свободных электронов и дырок, которая в зависимости от энергии фотонов (т.е. от длины волны падающего излучения) может происходить в различных частях p – n структуры. При этом носители заряда, возникающие внутри области пространственного заряда (ОПЗ), будут сразу разделяться контактным электрическим полем p – n -перехода и выбрасываться: дырки – в p -область, электроны – в n -область. Вследствие непрерывной, быстрой очистки от избыточных носителей концентрация их в ОПЗ и на ее границах близка к нулю. Поэтому в соседних нейтральных p - и n -областях, где также происходит фотогенерация, у границ с ОПЗ возникают градиенты концентраций неосновных носителей заряда – электронов и дырок. Эти градиенты приводят к появлению диффузионных потоков избыточных неосновных носителей, генерированных излучением в толще p - и n -областей, направленных к p – n -переходу. Подхваченные затем электрическим полем ОПЗ электроны и дырки будут попадать в те области p – n -структуры, где являются основными носителями. Заметим, что достичь ОПЗ способны только те избыточные носители, которые возникают на удалении от нее, равном 2–3 диффузионным длинам. Таким образом, в результате освещения p – n -перехода через него потечет электрический ток, по природе и по направлению аналогичный обратному току. Этот ток называется фототоком.

1.4.2 Режим работы фотодиода

Фотодиод – это полупроводниковый диод с потенциальным барьером, предназначенный для обнаружения и/или измерения параметров оптического излучения. Фотодиоды широко используются в различных оптоэлектронных устройствах, системах передачи информации, слежения, наведения, лазерной дальнометрии, спектроскопии и др.

Приступим к рассмотрению способа включения фотодиода во внешнюю цепь (рисунок 8). При условии, что контакты фотодиода, на который излучается свет, замкнуты накоротко, фототок потечет и во внешней цепи. (На рисунке 8, при условии, что сопротивление амперметра приближено к нулю.) Данный фототок принято называть фототоком короткого замыкания: $|I_{кз}| = I_{\phi}$. При этом внешняя разность потенциалов в p – n -переходе $U = 0$.

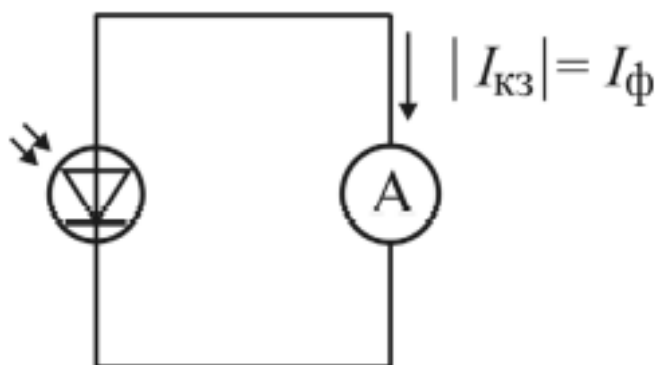


Рисунок 8 – Режимы включения фотодиода в цепь: короткого замыкания [5]

1.4.3 P - n Фотодиоды

Предположим, что на p – n -переход, изначально находившийся в условиях равновесия, со стороны p -области падает оптическое излучение с энергией фотонов больше ширины запрещенной зоны.

В ходе поглощения фотонов в полупроводнике начинается оптическая генерация, вследствие которой появляются свободные электроны и дырки. Исходя из энергии фотонов, оптическая генерация возможна в разных частях p – n -структуры.

Носители заряда, которые появляются внутри области пространственного заряда, начнут сразу же разделяться электрическим полем p – n -перехода и переходить: дырки – в p -область, а электроны – в n -область (рисунок 9,а).

Быстрая и безостановочная очистка избыточных зарядов приводит к тому, что концентрация их в области пространственного заряда и на её границах приближается к нулю.

Вследствие этого в ближайших p - и n - областях, где точно также происходит оптическая генерация, у границ с областью пространственного заряда начинают появляться градиенты концентраций неосновных носителей заряда – электронов и дырок. Появление градиентов приводит к появлению диффузионных потоков избыточных неосновных носителей, генерированных излучением в толще p - и n - областей, движущихся к p – n -переходу (рисунок 9, б, в). Подхваченные затем электрическим полем области пространственного заряда электроны и дырки начинают попадать в те области p – n -структуры, где они являются основными носителями.

Поэтому, в ходе попадания света на p – n -переход, через него потечет электрический ток, который по своей природе и по направлению аналогичен обратному току. Такой ток называется фототоком.

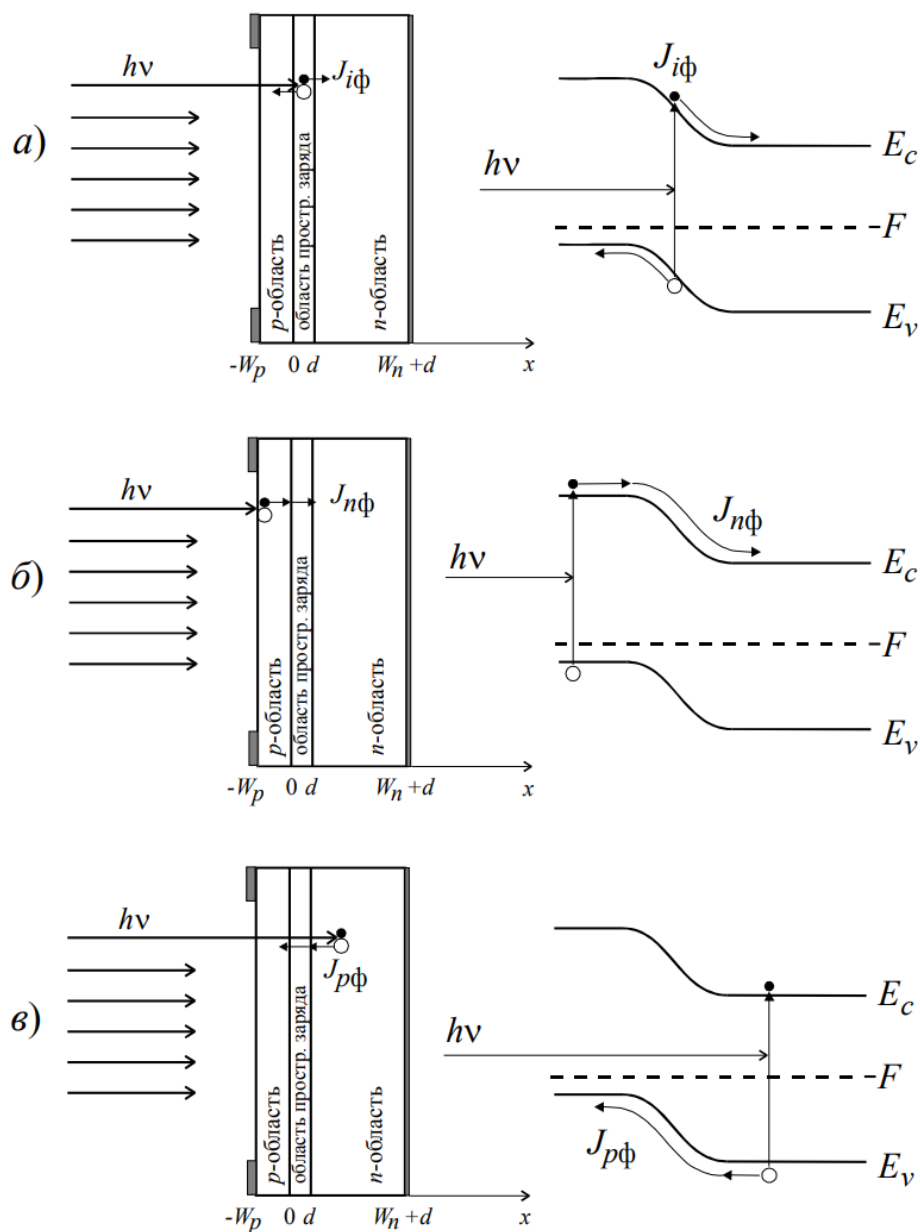


Рисунок 9 – Биполярная (а), электронная (б) и дырочная составляющая фототока в p – n -переходе [5]

1.4.4 P - i - n Фотодиоды

Также помимо фотодиодов с p – n -переходом, распространенным типом фотодиодов является p – i - n -фотодиод. В фотодиодах такого типа активная (поглощающая) i -область имеет проводимость близкую к собственной и

заклучена между областями p - и n -типов проводимости. (Так как реально i -область представляет собой слабо легированный полупроводник p - или n -типа, ее также часто обозначают как π - или ν -область).

Конструкция кремниевого p - i - n -фотодиода показана на рисунке 10, а. Высокоомная i - (а точнее, ν -) область представляет собой Si n -типа с низкой концентрацией доноров. Вследствие низкой плотности объемного заряда электрическое поле ОПЗ при рабочем смещении почти однородно и распространяется до сильно легированной n^+ -области (рис. 10, б). Оптимальной является такая толщина i -области, при которой для регистрируемого оптического излучения выполняется условие $\alpha \cdot d_i^{\text{опт}} \approx 1 \div 2$. В этом случае основная доля излучения поглощается непосредственно в области сильного электрического поля. В результате генерированные фотоносители быстро разделяются практически без рекомбинации.

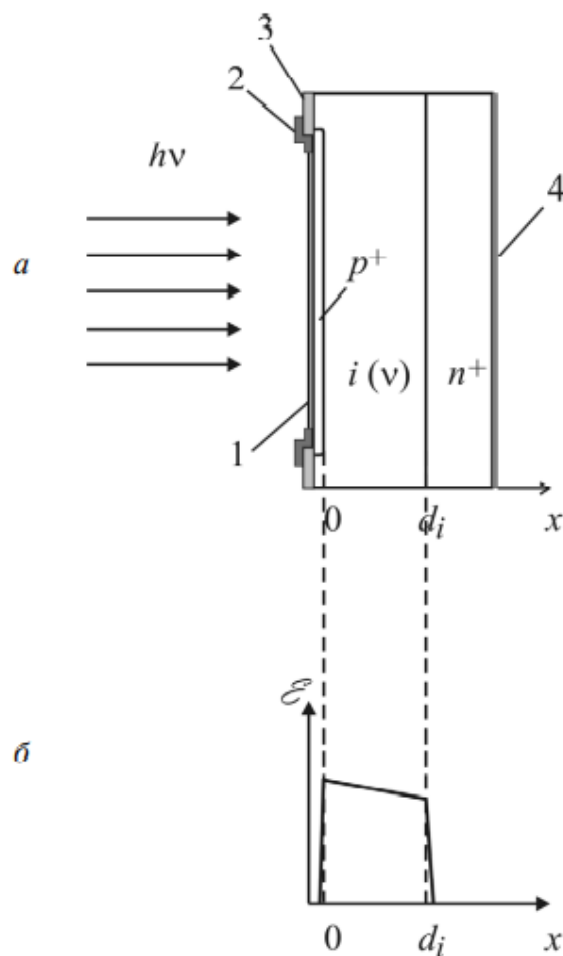


Рисунок 10 – Конструкция кремниевого $p^+ - i - n^+$ -фотодиода [9,11]

Конструкция кремниевого p^+-i-n^+ -фотодиода (а) и распределение напряженности электрического поля в нем при рабочем напряжении (б) [3, 4]: 1 – просветляющий диэлектрический слой; 2 – кольцевой омический контакт к p^+ -области; 3 – пленка диэлектрика SiO₂; 4 – контакт к n^+ -области.

Квантовая эффективность $p-i-n$ -фотодиода

$$\eta \cong \frac{J_{i\phi} + J_{p\phi}}{e\Phi_0} \cong \beta(1 - R) \left[1 - \frac{\exp(-\alpha d_i)}{1 + \alpha L_p} \right], \quad (2)$$

тем ближе к $\beta(1-R)$, чем больше толщина i -области d_i .

Поскольку в $p-i-n$ -фотодиоде процесс диффузии избыточных носителей через p - или n -области заменяется их дрейфом в сильном электрическом поле i -области, быстродействие $p-i-n$ -фотодиода выше, чем диода с обычным $p-n$ -переходом. Помимо высокой фоточувствительности и высокого быстродействия, достоинством $p-i-n$ -фотодиода является меньшее значение барьерной емкости

$$C_{p-i-n} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 A_{p-i-n}}{d_i}. \quad (3)$$

1.4.5 Фотодиод с барьером Шоттки

Фотодиоды с барьером Шоттки обладают высокими квантовой эффективностью и быстродействием при регистрации коротковолнового (например, ультрафиолетового) излучения. Конструкция фотодиода показана на рисунке 11.

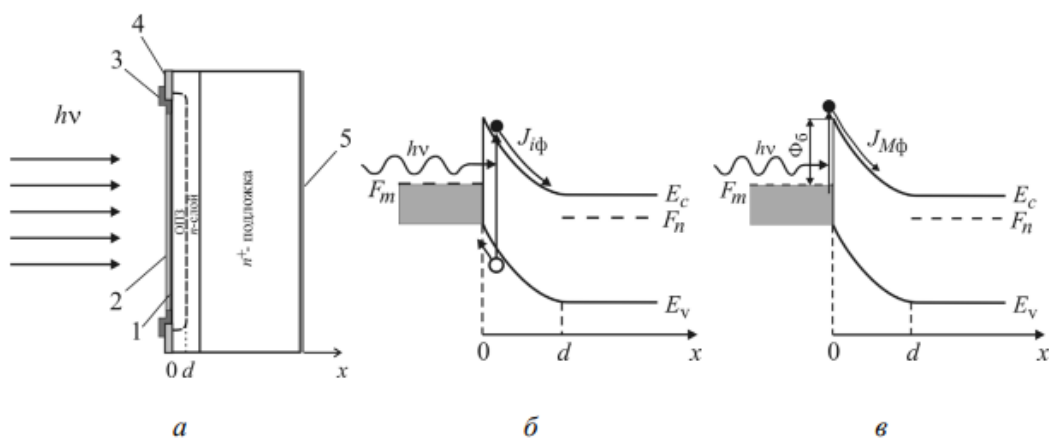


Рисунок 11 – Конструкция и энергетические диаграммы фотодиода с барьером Шоттки [6,9]

Конструкция (а) и энергетические диаграммы фотодиода с барьером Шоттки при регистрации коротковолнового (б) и длинноволнового (в) излучений: 1 – барьерный слой металла; 2 – просветляющий диэлектрический слой; 3 – кольцевой металлический контакт; 4 – слой диэлектрика SiO_2 ; 5 – омический контакт к n^+ -подложке.)

Для исключения больших потерь на отражение и поглощение в металле используется тонкий (≈ 10 нм) барьерный слой 1 и применяется просветляющее покрытие 2. (Например, сквозь пленку Au толщиной 10 нм в кремниевую пластину проникает более 95% излучения.)

Квантовая эффективность фотодиода с барьером Шоттки описывается выражением

$$\eta \cong \frac{J_{i\phi} + J_{p\phi}}{e\Phi_0} \cong \beta T_M \left[1 - \frac{\exp(-\alpha d)}{1 + \alpha L_p} \right], \quad (3)$$

где T_M – коэффициент пропускания, учитывающий отражение и поглощение в барьерном металле.

Если длина волны излучения такова, что $\alpha(\lambda) \cdot d > 1$, то основная доля излучения поглощается в области пространственного заряда. Возникшие

пары носителей быстро разделяются электрическим полем за время пролета $\tau_{пр}$ (рис. 11, б). При уменьшения λ соответственно уменьшается глубина проникновения света $l_{эф} = 1/\alpha$. Тем не менее, фотоносители рождаются в области сильного электрического поля, которое разделяет их, препятствуя рекомбинации. В отличие от фотодиодов с $p-n$ - или $p-i-n$ - структурой, в которых при $\alpha W_p \gg 1$ фототок сильно уменьшается вследствие рекомбинации на освещаемой поверхности (рис. 12, кривая 2), фотодиоды с барьером Шоттки обладают повышенной чувствительностью в коротковолновой области (кривая 1 на рис. 12)

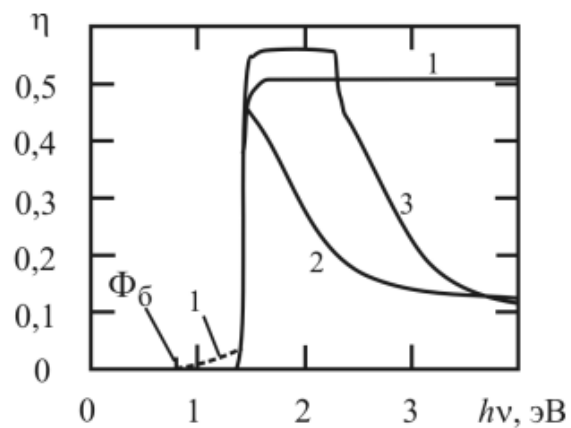


Рисунок 12 – Расчетные спектры квантовой эффективности фотодиодов на основе GaAs [5]

Расчетные спектры квантовой эффективности фотодиодов на основе GaAs: с барьером Шоттки (1), с $p-n$ -переходом (2), с гетеропереходом $P-Al_{0,6}Ga_{0,4}As/n-GaAs$ (3). $W_p = 0,5$ мкм; $d = 2$ мкм; $s_p = 10^7$ см/с; $R = 0,44$; $T_M = 0,5$; $\tau_n = \tau_p = 5 \cdot 10^{-9}$ с.

Особенностью барьеров Шоттки является и возможность регистрации фотонов с энергией $h\nu$ меньше ширины запрещенной зоны E_g . Если $h\nu$ превышает высоту барьера для электронов $\Phi_6 < h\nu < E_g$, электроны могут вырываться светом из пограничного слоя металла и выбрасываться

электрическим полем в полупроводник (плотность фототока $J_{\text{мф}}$ на рис. 11, в). На спектральной характеристике фотодиода с барьером Шоттки появляется длинноволновый хвост (штриховая линия на рис. 12).

1.4.6 Фотодиод с гетеропереходом

Гетеропереход – это переходная барьерная область, возникающая при металлургическом контакте двух различных полупроводников. Структура простейшего фотодиода с p - n -гетеропереходом представлена на рис. 13, а. На рис. 13, б показана его энергетическая диаграмма. (Отметим, что для наглядности часто тип проводимости более широкозонной области гетероперехода обозначают заглавной буквой.) В такой гетероструктуре широкозонная p -область с шириной запрещенной зоны E_{g1} играет роль «окна», прозрачного для оптического излучения с энергией фотонов $h\nu < E_{g1}$, поскольку коэффициент поглощения такого излучения в данной области $\alpha_1 \cong 0$. Поэтому излучение поглощается непосредственно в области пространственного заряда, расположенной в узкозонной области гетероперехода с $E_g = E_{g2} < h\nu$. (При приложении обратного смещения к гетеропереходу ОПЗ распространяется на всю толщину dn слаболегированной n -области.) Разделение электрическим полем ОПЗ генерированных фотоносителей (рис. 13, б) обеспечивает высокие квантовую эффективность и быстродействие гетерофотодиода, если соблюдаются два условия: – на гетерогранице отсутствует потенциальный барьер, обусловленный скачком края зоны, который будет препятствовать разделению пар; – на гетерогранице отсутствуют эффективные центры рекомбинации фотоносителей. В качестве примера гетерофотодиода можно привести диод на основе гетероструктуры $P\text{-}Al_{0,6}Ga_{0,4}As/n\text{-}GaAs/n^+\text{-}GaAs$. Из-за близости периодов кристаллических решеток твердого раствора $Al_{0,6}Ga_{0,4}As$ и $GaAs$ на p - n -гетерогранице практически не образуются

структурные дефекты и концентрация рекомбинационных центров мала. Влияние скачка потолка валентной зоны на движение избыточных дырок в этой гетероструктуре также незначительно.

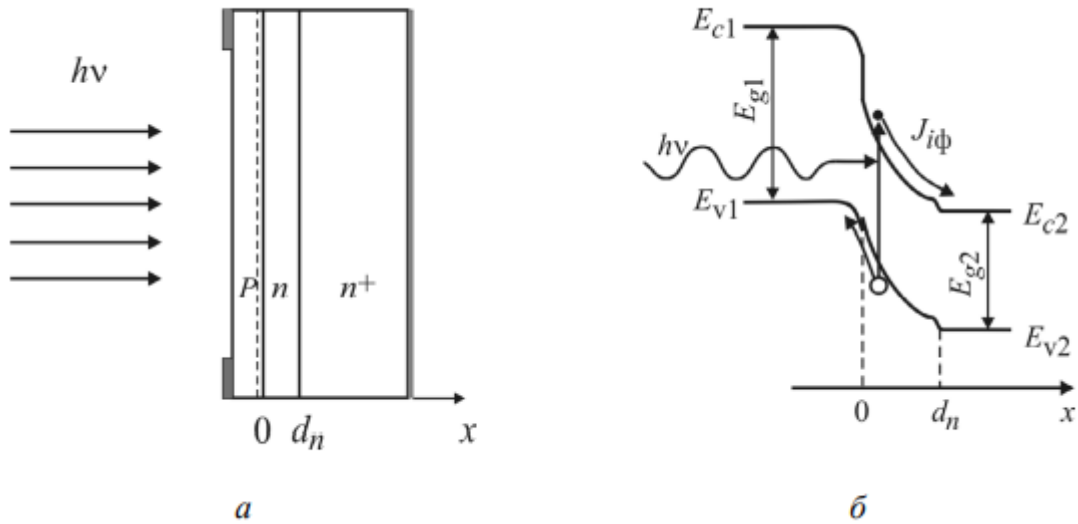


Рисунок 13 – Структура фотодиода с *P-n*-гетеропереходом (а) и его энергетическая диаграмма при рабочем смещении (б) [6,11]

Ширина запрещенной зоны *P*-слоя твердого раствора $Al_{0,6}Ga_{0,4}As$ равна $Eg1 = 2,03$ эВ, а для $n-GaAs$ $Eg2 = 1,42$ эВ. Поэтому область максимальной квантовой эффективности приходится на диапазон энергий фотонов $1,42 \text{ эВ} < h\nu < 2,03 \text{ эВ}$. В этом спектральном диапазоне значение квантовой эффективности можно выразить формулой:

$$\eta \cong \frac{J_{i\phi 2} + J_{p\phi 2}}{e\Phi_0} \cong \beta_2(1 - R_1) \left[1 - \frac{\exp(-\alpha_2 d_n)}{1 + \alpha_2 L_{p2}} \right], \quad (4)$$

где цифрой 2 помечены параметры, относящиеся к $n-GaAs$. При $h\nu > Eg1$ начинается поглощение в слое $P-Al_{0,6}Ga_{0,4}As$, и квантовая эффективность падает вследствие рекомбинации фотоносителей на освещаемой поверхности (рисунок 11, кривая 3).

2 Методика эксперимента

2.1 Принцип автоматизации приборов Keithley 2410 и MonoScan2000

На рисунке 14 показана блок-схема с помощью, которой происходит автоматизация приборов Keithley 2410 и MonoScan2000.

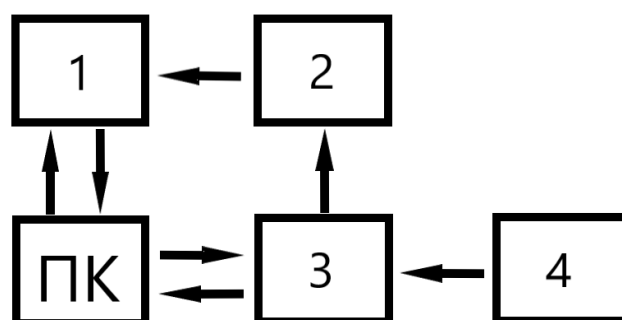


Рисунок 14 – Блок-схема автоматизации приборов Keithley 2410 и MonoScan2000

Рассмотрим подробнее блок-схему, показанную на рисунке 14. В представленной схеме основным устройством управления является Персональный компьютер (ПК), который с помощью графической среды разработки LabView проводит автоматизированное управление приборами 1 – Keithley 2410 и 3 – MonoScan2000. С помощью 4 – источника-излучателя DH-2000 (дейтерий-галоген) MonoScan2000 генерирует пучок света нужной длины волны и передает его через оптоволокно на 2 – фотодиод из германия или кремния. После этого Keithley 2410 измеряет силу фототока (фототок) и передает данные на компьютер.

Теперь рассмотрим блок-схему Виртуального прибора, с помощью которого персональный компьютер производит управление приборами

Keithley 2410 и MonoScan2000. Данная блок схема представлена на рисунке 15.

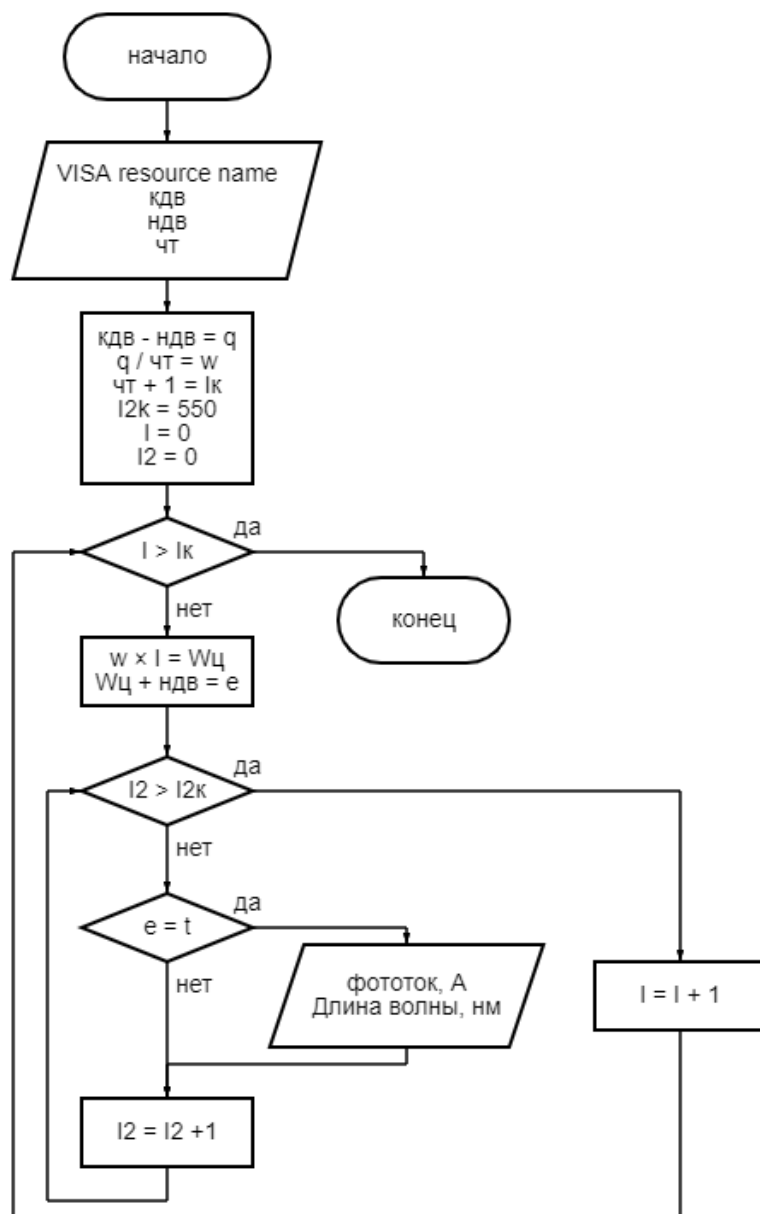


Рисунок 15 – Блок-схема Виртуально прибора.

Где кдв – конечная длина волны, ндв – начальная длина волны, чт – число точек, VISA resource name – подключение приборов через порты компьютера, q – разность между конечной длиной волны и начальной длиной волны, w – шаг длины волны в нм.

2.2 Калибровка монохроматора MonoScan2000

Для общения с монохроматором нужно использовать специальные команды (ASCII команды). Эти команды нужны, например, для задания нужной длины волны в нм, но в технической документации прибора кодировки с шагом в 10 нм от 250 до 800, что является недостаточно точным для измерения спектральных характеристик фотодиодов.

Создав первичный виртуальный прибор в LabView, который позволял отправлять команды на прибор и получать ответ от него. Используя команду «GPROGSEQ» был получен массив значений (кодировки). Фрагмент массива полученного от монохроматора представлен в таблице 1.

Таблица – 1 Фрагмент массива полученный от монохроматора

Код
-6580
-7138
-7696
-8269
-8858
-9423
-9973
-10528
-11067
-11615
-12165

Подключив выход монохроматора к спектрометру Ocean Optics Flame, были поданы по очереди команды использующие кодировки из массива, при каждой команде была записана длина волны со спектрометра. После этого полученные значения были добавлены в таблицу, в которой кодировки монохроматора сопоставлялись длинам волн в нм (приложение А). Также был построен график зависимости кода от длины волны (рисунок 16). Было

исследовано, что монохроматор выдал нам кодировки соответствующие длине волны от 250 до 800 с шагом в 10 нм.

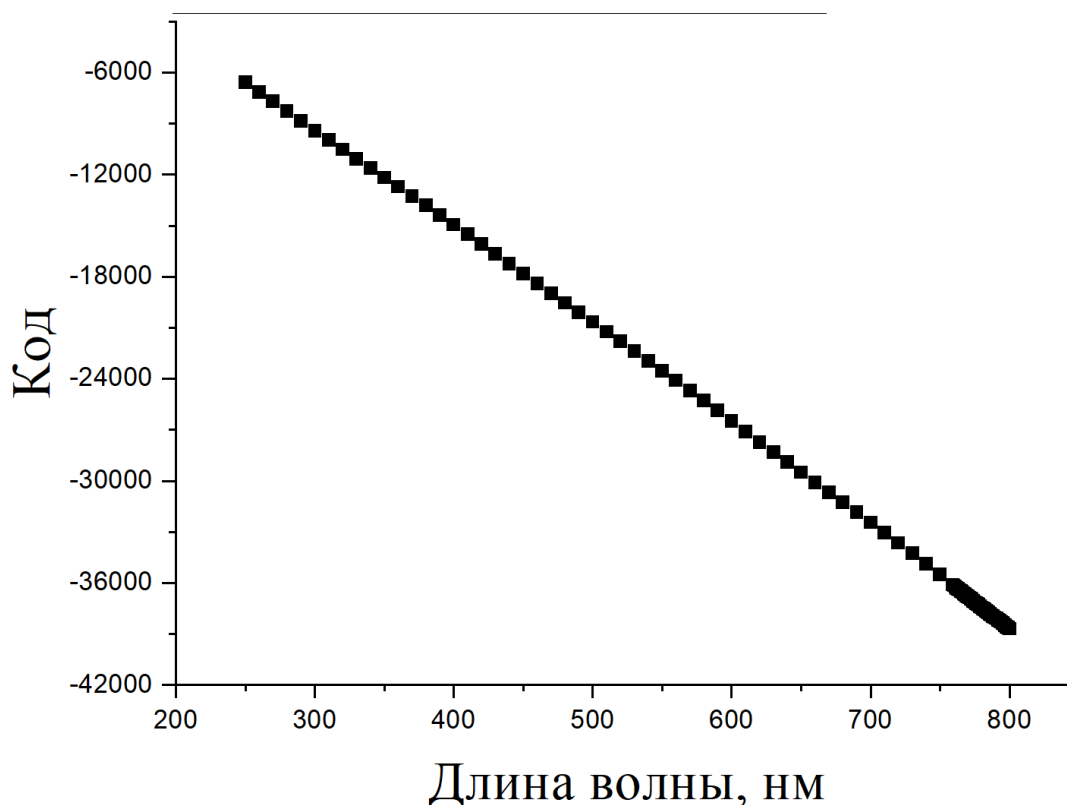


Рисунок 16 – Зависимость кода от длины волны

Далее полученный график был аппроксимирован полиномом второй степени. Вследствие чего были получены промежуточные значения кода для соответствующих им длинам волн с шагом в 1 нм (приложение Б). Данная таблица была записана в Виртуальный прибор в качестве двумерного массива.

2.3 Среда программирования LabView

2.3.1 Запуск LabView

Программы LabView принято называть виртуальными приборами, так как программы, созданные в LabView внешне похожи на реальные приборы.

При создании нового виртуального прибора перед пользователем открываются два окна, которые называются лицевая панель и блок-диаграмма (рисунок 17,18).

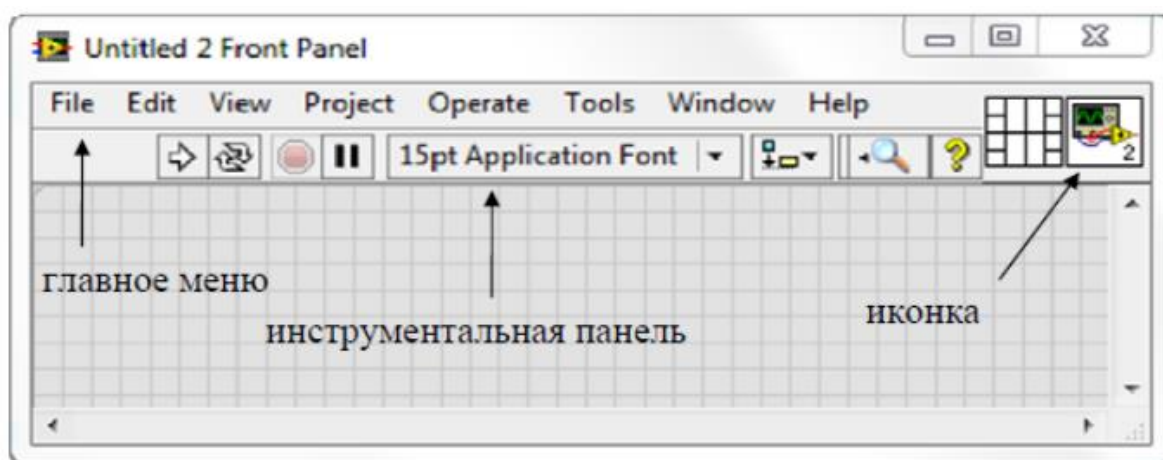


Рисунок 17 – Окно лицевой панели [7]

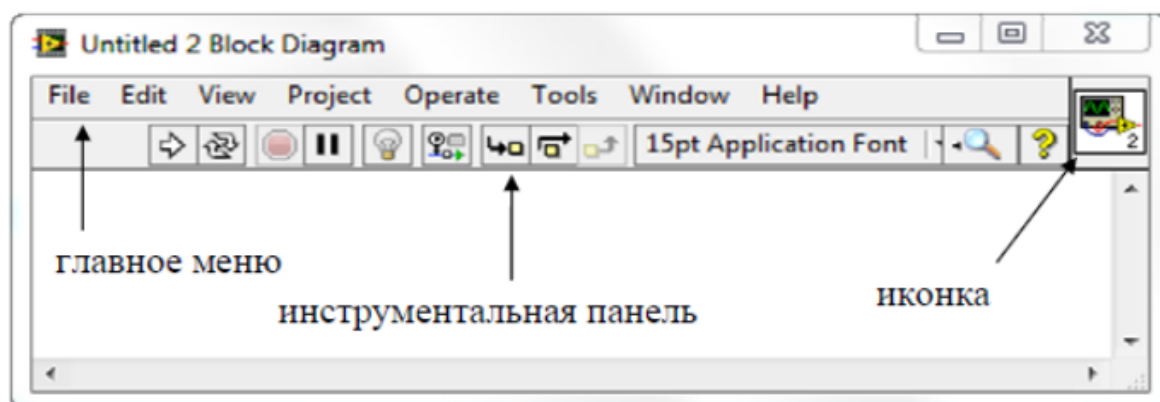


Рисунок 18 – Окно блок-диаграммы [7]

Лицевая панель предназначена для проектирования внешнего вида виртуального прибора. На ней создаются элементы управления и отображения, которые используются в качестве ввода и вывода данных виртуального прибора.

Блок-диаграмма предназначена для разработки исходного кода виртуального прибора. В блок-диаграмме присутствуют такие элементы как: узлы, терминалы, структуры, проводники данных.

В каждом окне присутствует главное меню, под которым расположена инструментальная панель, которая предназначена для старта виртуального прибора и его редактирования.

Для того что бы разместить элементы управления и отображения данных, в LabView существует палитра элементов. Данную палитру можно вызвать только с окна лицевой панели, для этого нужно кликнуть правой клавишей мыши в рабочей области лицевой панели(рисунок 17).

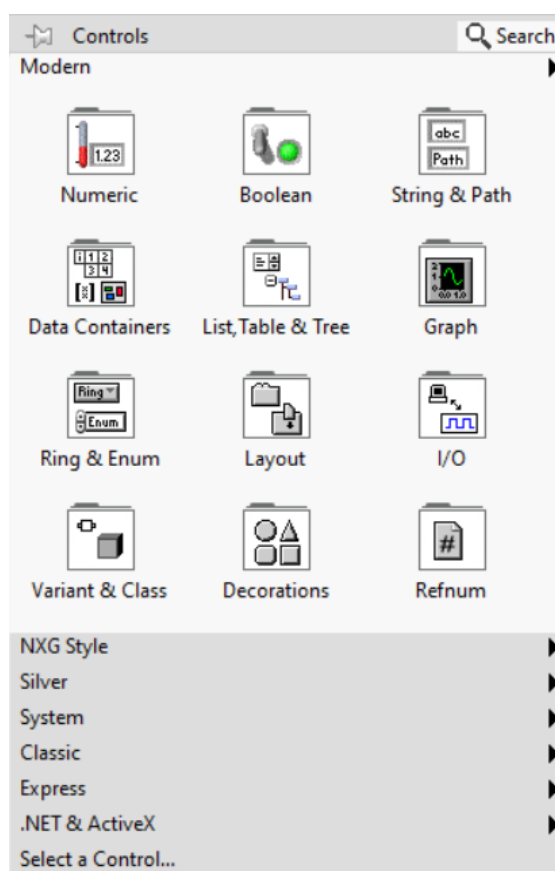


Рисунок 19 – Палитра элементов

В окне блок-диаграмм существует палитра функций, которая вызывается кликом правой кнопки мыши в рабочей области блок-диаграммы (рисунок 20).

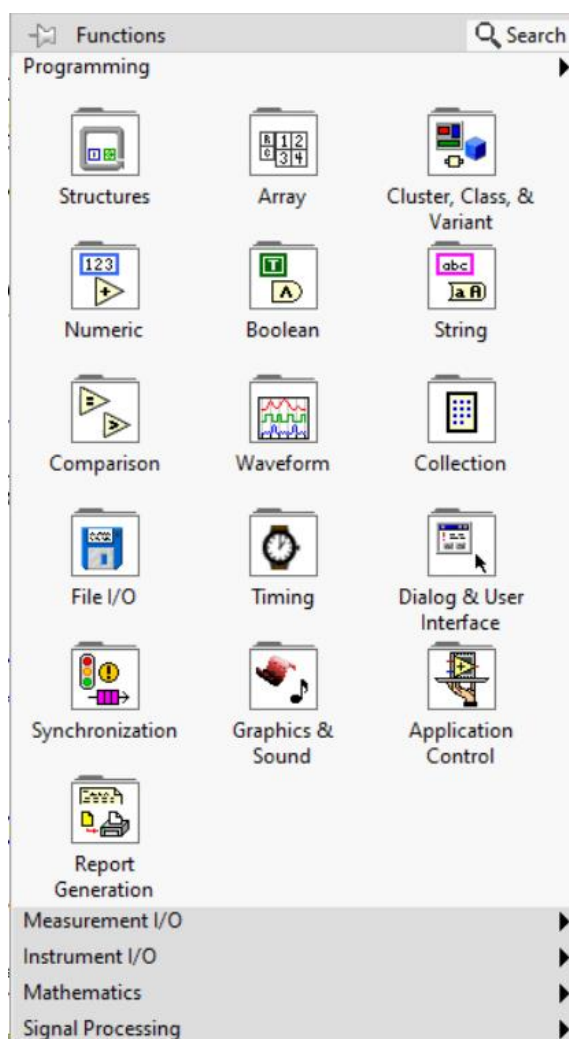


Рисунок 20 – Палитра функций

Создание каждого элемента управления и отображения в окне лицевой панели приводит к появлению соответствующего терминала данных в окне блок-диаграммы. Терминалы элементов управления создаются для ввода информации в блок-диаграмму, а терминалы индикаторов создаются для вывода данных из блок-диаграмм на лицевую панель. Для работы с информацией, полученной из терминалов в окне блок-диаграмм создаются различные константы, функции, подпрограммы и структуры, которые также имеют терминалы для ввода и вывода информации. Данные элементы являются узлами блок-диаграммы, которые имеют возможность соединяться с терминалами с помощью проводников. Во всех созданных виртуальных приборах данные передаются по проводникам от входных терминалов к

выходным. Узлы – это любые элементы на блок-диаграмме, у которых существует не меньше одного поля ввода и вывода информации, а также способные выполнять алгоритмические операции виртуального прибора.

2.3.2 Принцип потока данных

Принцип потока данных в LabView основан на архитектуре параллельных вычислений, в которых функции выполняются только при условии, что к ним на вход поступают все нужные значения данных.

Идея графической модели вычислений заключается в том, что потоки данных, проходящие через узлы в рамках программы, определяют порядок выполнения функций виртуально прибора. В виртуальной среде разработки LabView элементы из палитр анализируют входные данные, обрабатывают информацию и создают выходные сигналы.

Когда обработка данных внутри узла заканчивается, он создает данные на своих выходах, тем самым передавая следующему узлу поток данных. Когда пользователь соединяет узлы, он задает порядок их выполнения. Такой способ программирования позволяет настроить анализ и обработку сразу нескольких потоков данных независимо друг от друга.

2.3.3 Типы данных

Потоки передачи данных в LabView программируются при помощи графического соединения терминалов. Терминалы данных имеют форму прямоугольников и содержат буквенное и цветное обозначение, которое показывает принадлежность терминала к типу данных. Соединительные линии между терминалами обозначают потоки данных в виртуальном приборе. Передача данных всегда происходит от источника к приемникам сигнала. Цвет и толщина соединительных линий меняются в зависимости от типа данных идущих по ним. Так тонкая линия обозначает, что по ней

предаются данные являющиеся скалярной величиной, утолщенная линия обозначает передачу одномерного массива данных, двойная линия соответствует двумерному массиву. Тип используемых данных можно настраивать в свойствах терминала. Важная особенность в LabView это возможность терминалов обрабатывать данные разных типов. Так как узлы в состоянии сами определять, какой тип данных на них поступает и автоматически подстраиваться под него без вмешательства пользователя.

3 Экспериментальная часть

3.1 Реализация программно-аппаратной автоматизации приборов

3.1.1 Автоматизация прибора Keithley 2410

На официальном сайте компании Keithley были взяты драйвера для подключения и управления измерительным оборудованием. Для начала работы в виртуальной среде разработки LabView был создан виртуальный прибор, который частично позволяет автоматизировать работу Keithley 2410, данный виртуальный прибор позволяет:

- 1) Подключаться к прибору по выбранному порту.
- 2) Включать и выключать прибор.
- 3) Задавать ограничение по току в амперах.
- 4) Задавать напряжение в вольтах.
- 5) Задавать количество точек и время на точку.
- 6) Измерять фототок.

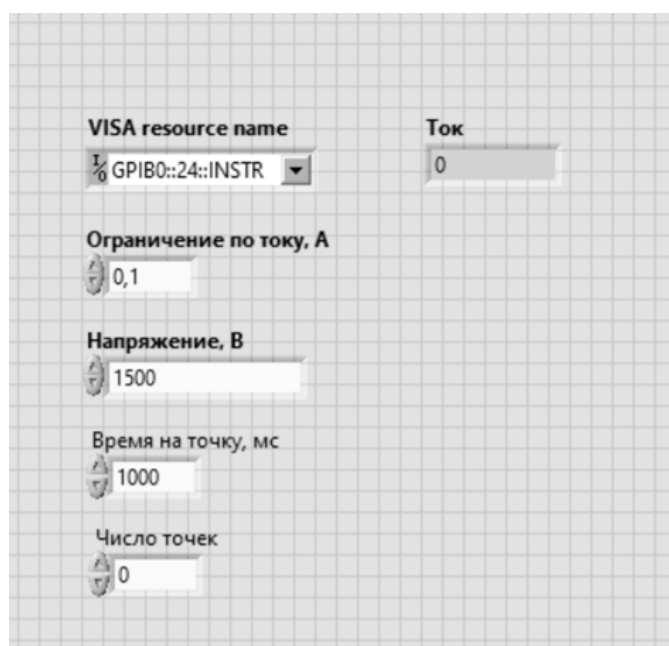


Рисунок 21 – Лицевая панель виртуального прибора для измерения фототока

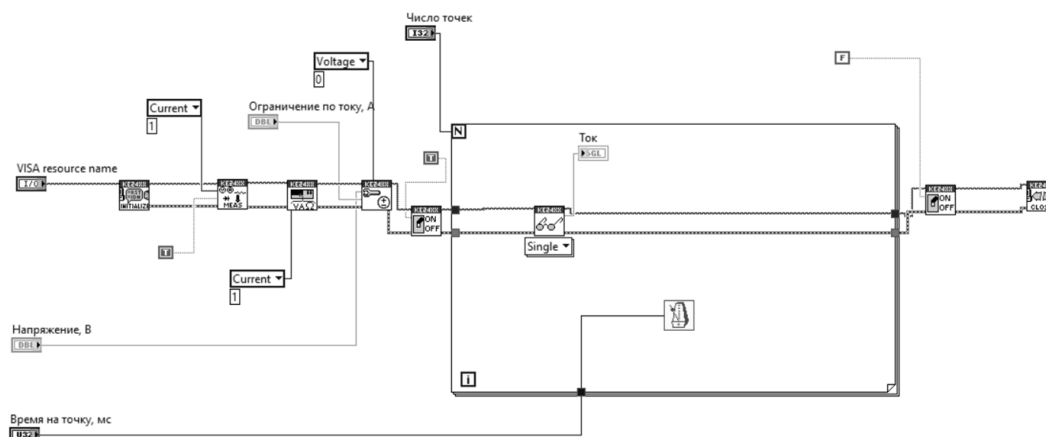


Рисунок 22 – Блок-диаграммы виртуального прибора для измерения фототока

В итоге был создан виртуальный прибор в среде NI LabView, который позволяет проводить измерения силы тока в автоматическом режиме.

3.1.2 Автоматизация прибора MonoScan2000

На официальном сайте компании нет готовых подВП для использования прибора в виртуальной среде разработки LabView. Но есть техническая документация, в которой указаны специальные команды для общения с прибором.

Пример команд (ASCII команд) для монохроматора:

- 1) GOHSEQ – Выполнить эталонный запуск. Проходит до нижней конечной точки и присваивает этому положению значение «0»;
- 2) LA<Pos> – Устанавливает абсолютное положение в шагах. Команда «М» запускает позиционирование;
- 3) LR<Pos> – Устанавливает относительное положение в шагах. Команда «М» запускает позиционирование;
- 4) POS – Показывает фактическое положение в шагах;

- 5) NO – Устанавливает текущее положение равным нулю;
- 6) M – Запускает команды по установке значений в шагах.
- 7) GPROGSEQ – Показывает данные, сохраненные в монохроматоре.

В среде разработки LabView был создан виртуальный прибор, который позволяет пользователю подключаться к прибору, управлять им с помощью команд и видеть ответ монохроматора на команды. Используя команду «GPROGSEQ» была получена таблица значений в технической документации, именуемые как шаги. Подавая эти значения на монохроматор и проверяя длину волны света выходящего из монохроматора с помощью спектрометра. Было исследовано, что монохроматор выдал значения, которые можно сопоставить с длиной волны от 250 до 800 с шагом в 10 нм.

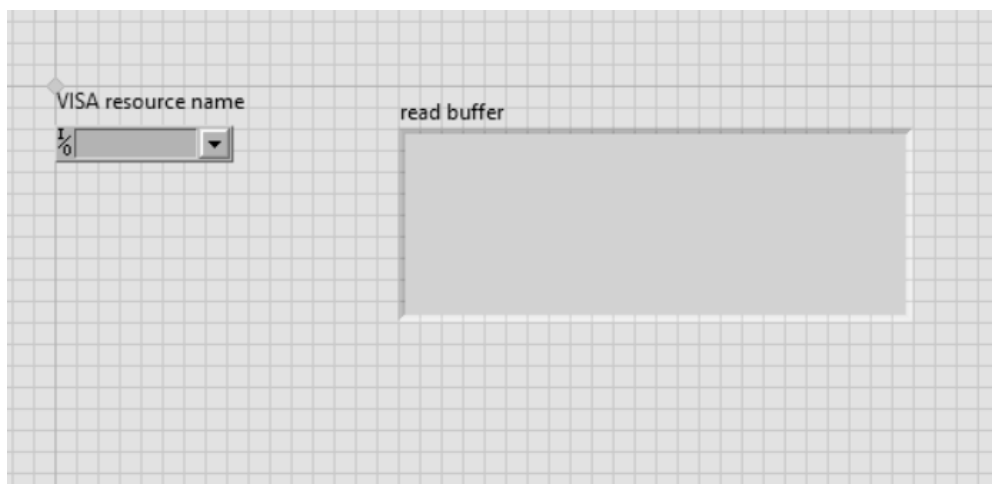


Рисунок 23 – Лицевая панель виртуального прибора для изменения длины волны

На лицевой панели виртуального прибора можно выбирать порт подключения для монохроматора, а также вывод полученных прибором значений.

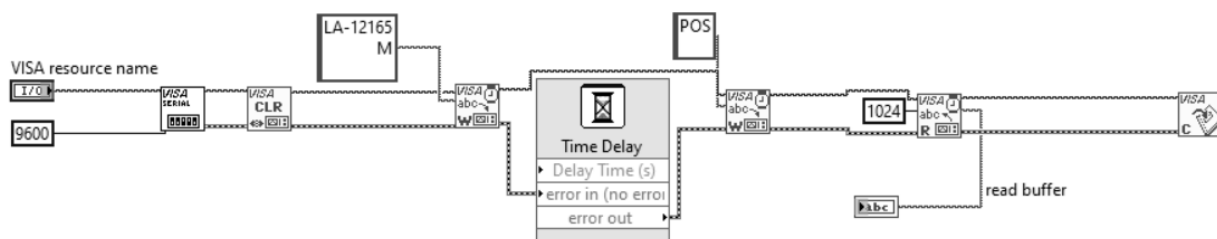


Рисунок 24 – Блок-диаграммы виртуального прибора для изменения длины ВОЛНЫ

Данная программа позволяет изменять длину волны, но для этого приходилось вводить значения, которые «понимает» сам прибор, в то время как обычный пользователь не сможет понять какие значения нужно ввести для получения нужной длины волны. Поэтому были выписаны все значения, которые «понимает» монохроматор и сопоставлены с длиной волны в нм, затем выписывалось все эти значения в таблицу и внесли её в LabView. После это была написана новая подпрограмма, которая автоматически переводила значения в нм волны в кодировки, которые «понимает» прибор.

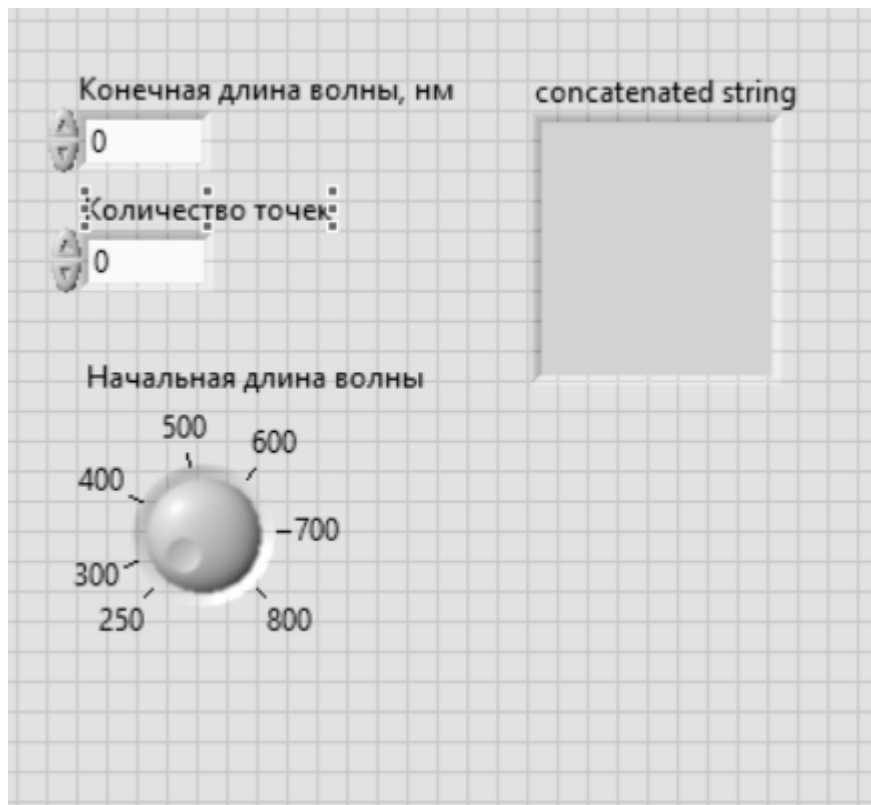


Рисунок 25 – Лицевая панель виртуального прибора подпрограммы

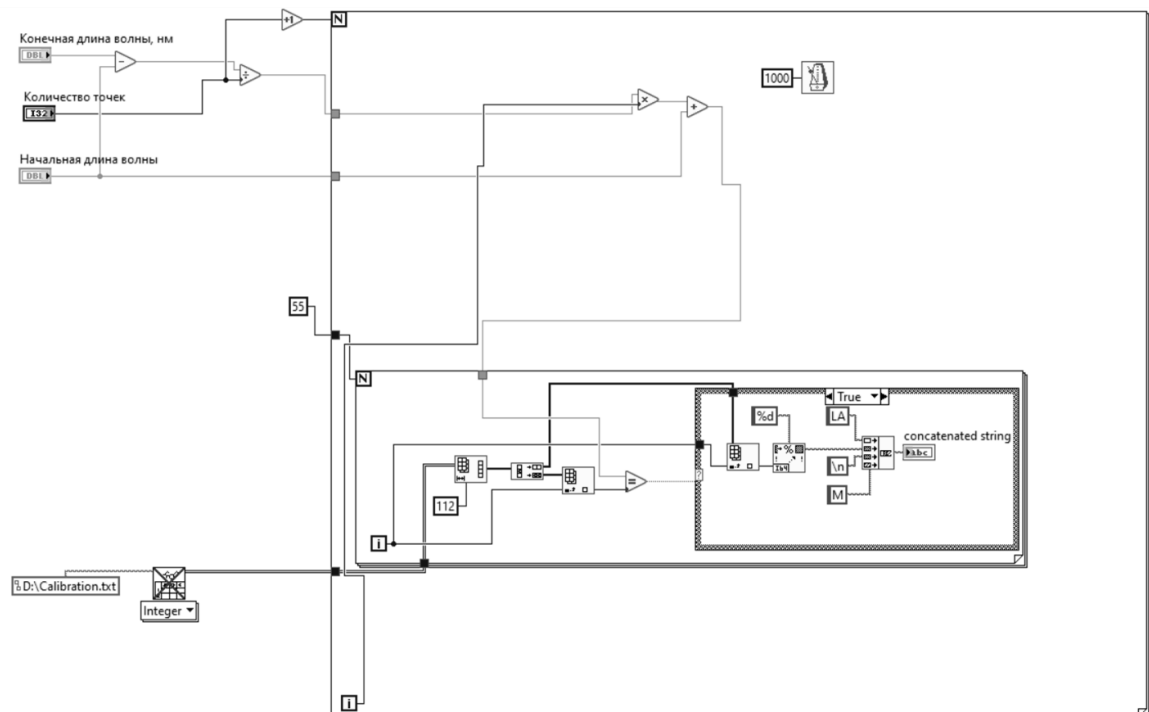


Рисунок 26 – Блок-диаграммы виртуального прибора подпрограммы

В данной подпрограмме имеется возможность задавать начальную длину волны, конечную и количество точек на которых будут происходить измерения фототока. Используя значения, полученные при измерении фототока, программа строит график зависимости фототока от длины волны оптического излучения.

3.1.4 Автоматизация приборов Keithley 2410 и MonoScan2000

Объединяем Виртуальные приборы, о которых сказано выше в один целый и получаем возможность управления одновременно двумя приборами вследствие чего, данный виртуальный прибор позволяет построить график в реальном времени, в котором можем наблюдать зависимость изменения фототока от изменения длины электромагнитной волны. Лицевая панель и блок-диаграмма представлены на рисунках 27 и 28.

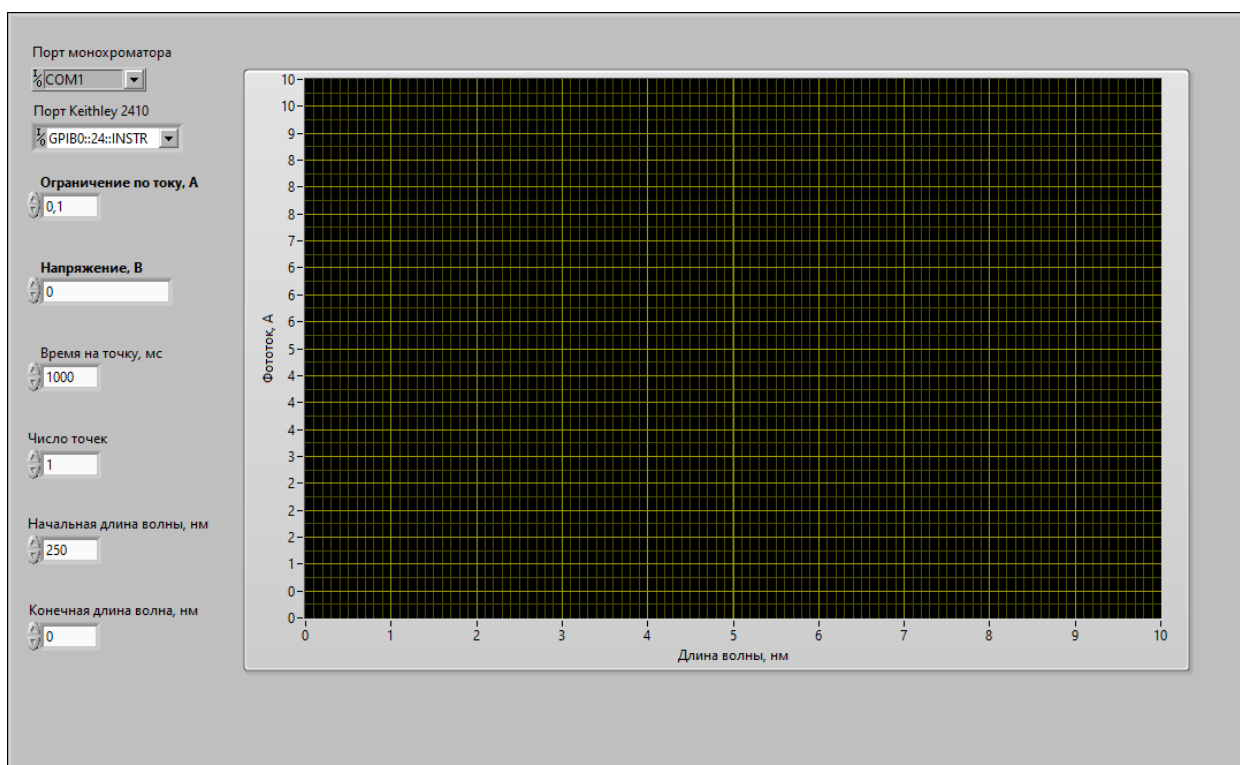


Рисунок 27 – Лицевая панель виртуального прибора итоговой программы

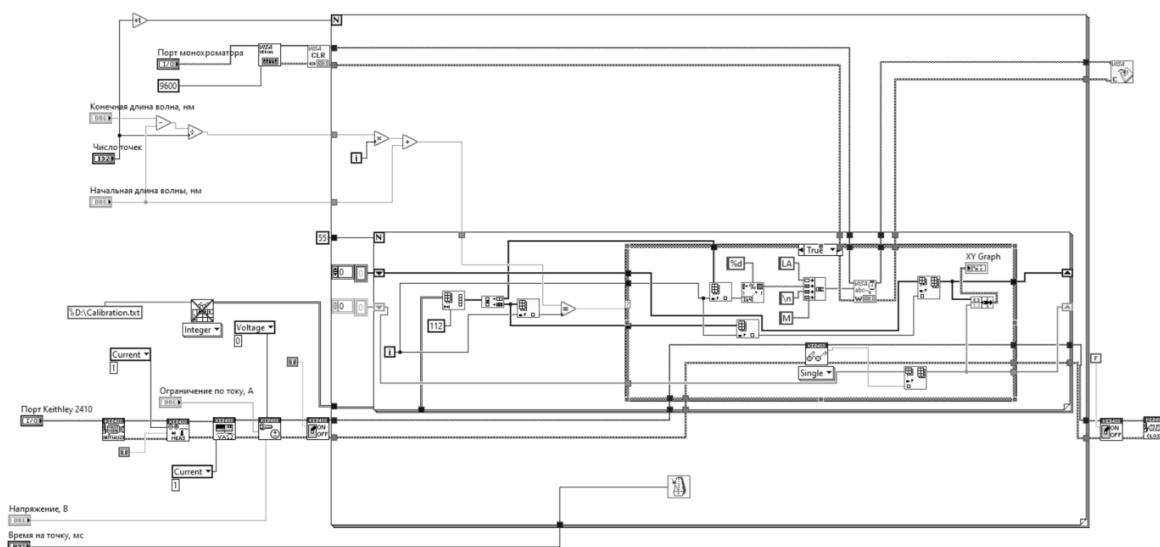


Рисунок 28 – Блок-диаграммы виртуального прибора итоговой программы

3.1.5 Лицевая панель итоговой программы

Лицевая панель данного виртуального прибора создавалась с максимально удобным и интуитивно понятным для пользователя интерфейсом. В левой верхней части находятся два окна с выбором нужных портов для подключения приборов. Так, например для подключения монохроматора используется COM-порт (RS-232). Далее располагаются окна с настройками Keithley 2410 и окна для задания нужных параметров для проведения измерений. На лицевой панели так же присутствует дисплей вывода полученных значений в качестве точек, из которых строиться график зависимости фототока от длины волны (рисунок 29).

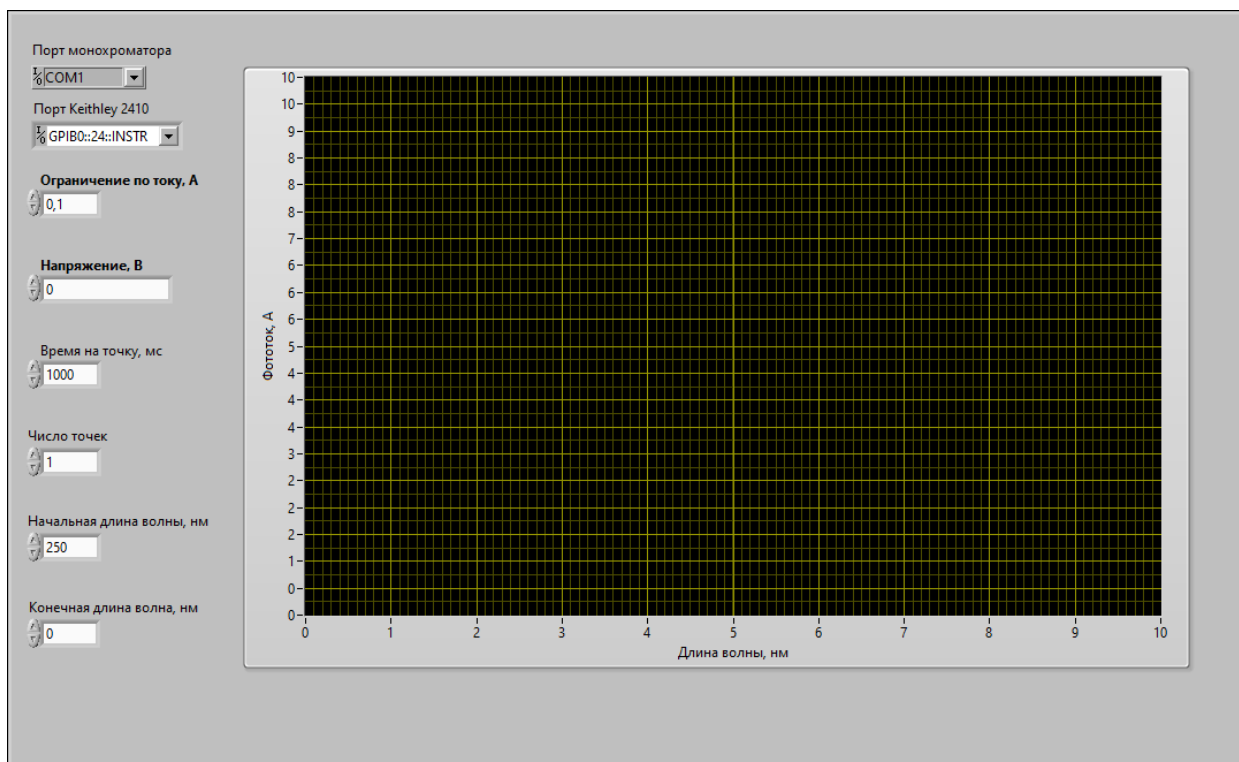


Рисунок 29 – Лицевая панель итоговой программы

3.1.6 Блок-диаграмма итоговой программы

На блок-диаграмме разрабатывается исходный код виртуального прибора. Для более понятного объяснения работы данной программы рассмотрим её отдельными частями. На рисунке 30 представлена часть данной блок-схемы, где под цифрами 1,2,3,4 – представлены «индикаторы», которые используются в качестве блоков, в которые можно записывать нужные пользователю значения, используя для этого лицевую панель виртуального прибора, а затем эти блоки передают эти значения далее по схеме. Блок 1 используется для выбора нужного пользователю порта, к которому подключен прибор и передачи информации с этого порта дальше по схеме. Блоки под цифрами 5,6,7 выполняют математические функции. Под цифрой 8 находится блок называемый «константа» в него записывают значения, которые впоследствии не будут изменяться, доступа с лицевой

панели к этим блокам нет. Блок 9 инициализирует последовательный порт, указанный блоком 1, так же для этого блока в блоке 8 указывается битовая скорость в бит/с для корректного подключения прибора. Блок 10 очищает входные и выходные буферы прибора.

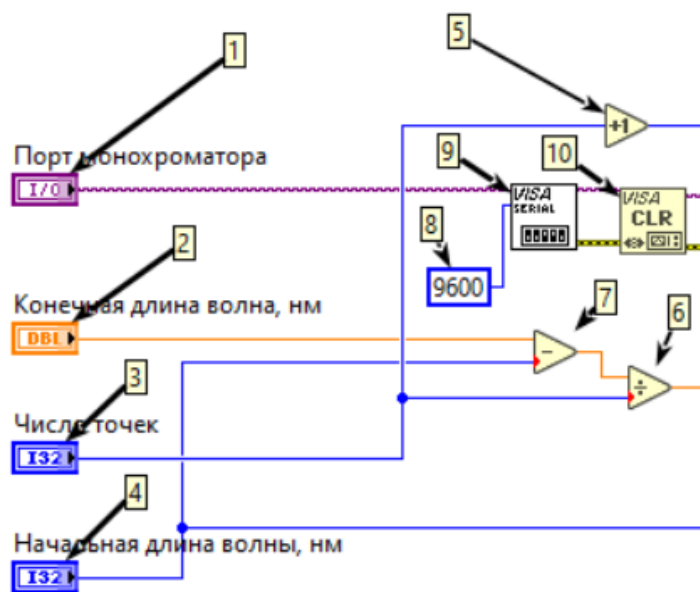


Рисунок 30 – Часть программы виртуального прибора

Рассмотрим блоки, представленные на рисунке 31. Блок 11 аналогичен блоку 1, только он используется для подключения другого прибора. Блоки 12,13,14,15,16 являются подВП заранее написанными производителем Keithley 2410 скачать их можно с официального сайта производителя. Блок 12 аналогичен блоку 9 за исключением того, что битовая скорость указана заранее внутри подВП. Блок 13 используется для включения или выключения автоматического числа и границ диапазонов измерений, блок 22 активирует автоматический диапазон измерений, а блок 17 задает тип измерений. Блок 14 задает отображаемое измерение на приборе, блок 23 задает тип измерений. Блок 15 используется для дополнительных настроек прибора, для этого используются блоки 18,19,24. Блок 18 задает ограничение по току в

Амперах. Блок 19 задаёт тип режима источника. Блок 24 задает напряжение в Вольтах. Блок 16 отвечает за включение или выключение прибора, блок 20 активизирует включение прибора. Блок 21 задает время на одну точку в миллисекундах. Блок 25 является таблицей значений кодировок прибора и соответствующие им длины волн в нанометрах.

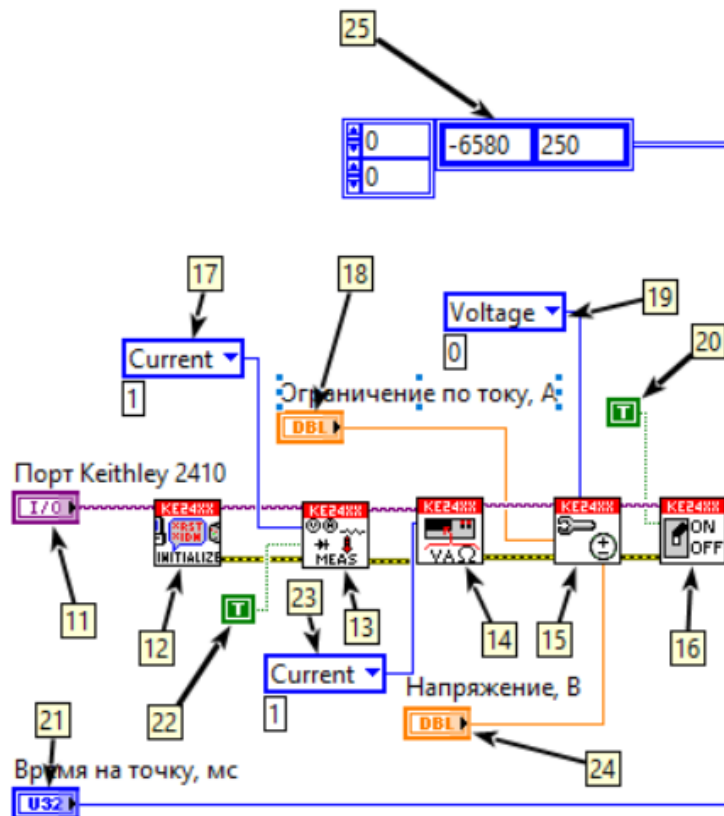


Рисунок 31 – Часть программы виртуального прибора

На рисунке 32 рассмотрим первый цикл Виртуального прибора. Данный цикл в LabView называется «For Loop» он выполняет свой цикл N раз, где N – значение, введенное с блока 3 и подключенное к блоку 26. Терминал итераций (блок 30) предоставляет текущее количество итераций цикла, которое колеблется от 0 до $N-1$. Поэтому для правильного количества измеряемых точек графика мы используем блок 5. Блоки 28 и 29 являются сдвиговыми регистрами, они получают доступ к данным из предыдущей итерации цикла и передают данные на следующую итерацию цикла. Блок 27

ожидает, пока значение миллисекундного таймера не станет равным указанному значению на блоке 21, этот блок контролирует скорость выполнения цикла. Блоки 6,7,31,32 являются математическими блоками, за счёт их комбинации Виртуальный прибор рассчитывает значения длины волны, на которой нужно измерить фототок и отправляет эти значения в следующий подцикл.

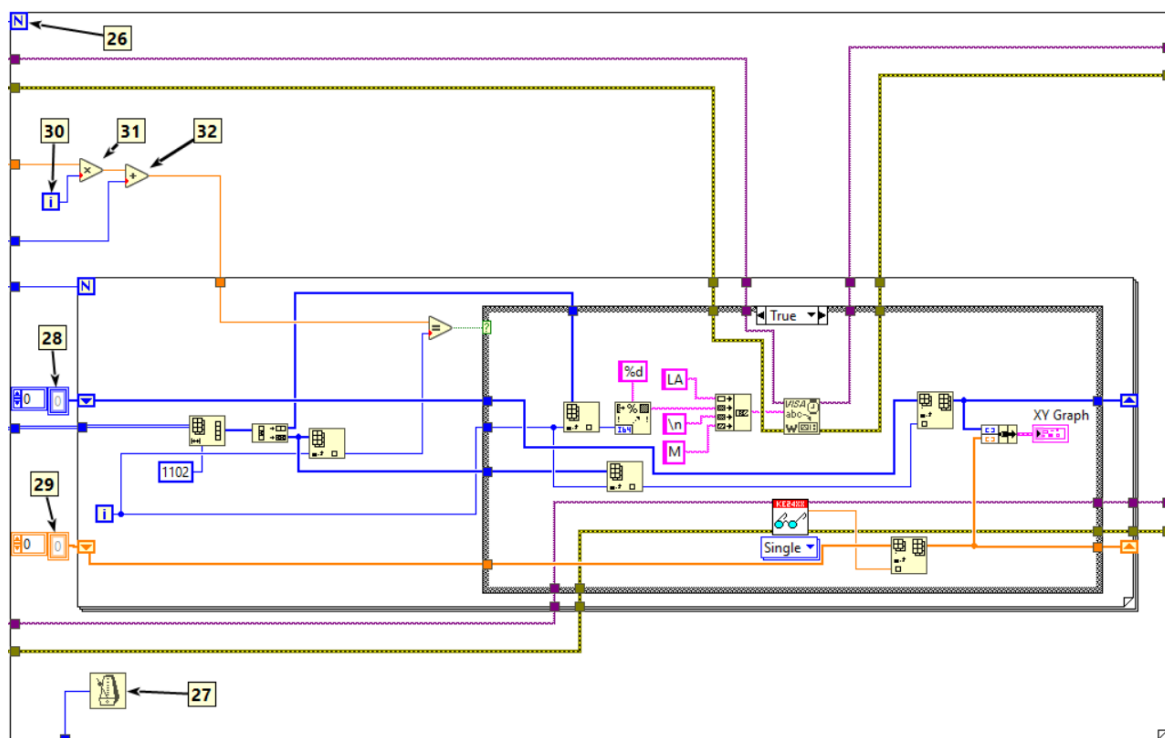


Рисунок 32 – Первый цикл For Loop в Виртуальном приборе

Рассмотрим подцикл For Loop Виртуального прибора, в котором количество итераций определяется блоком 38, в данной программе это число равно количеству элементов в одном столбце блока 25. С блока 25 поступает двумерный массив, который в блоке 33 преобразуется в одномерный массив. Блок 37 определяет количество элементов в массиве. Блок 34 разделяет элементы массива, последовательно помещая элементы в выходные данные так, например, на блок 35 поступает каждый второй элемент одномерного массива. Блок 35 из одномерного массива вытаскивает один элемент с

индексом, поступающим из блока 39. Этот элемент поступает на блок 36, который является логическим сравнением двух значений (рисунок 33).

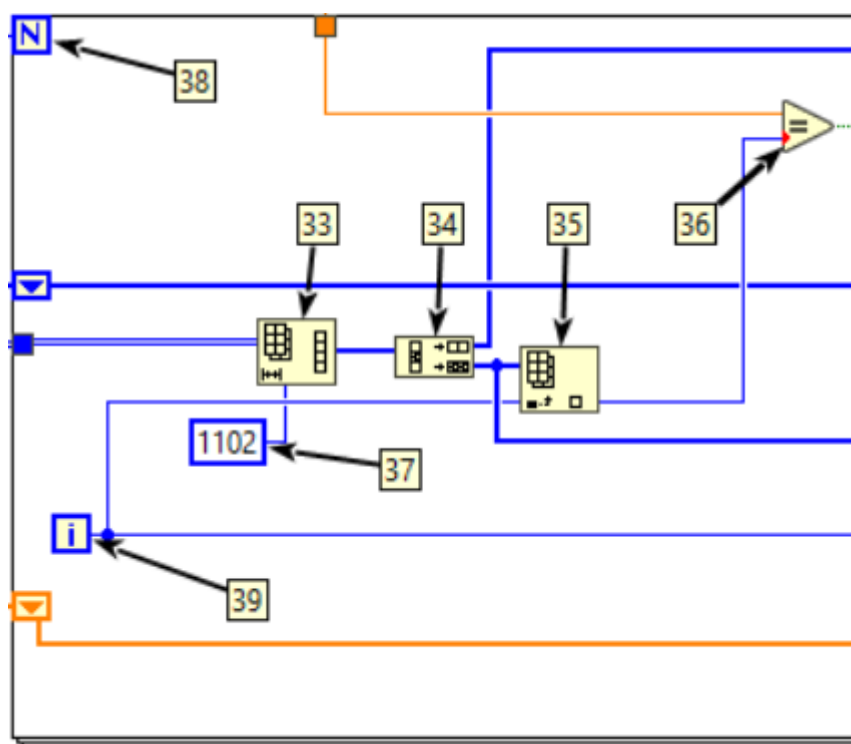


Рисунок 33 – Часть подцикла For Loop в Виртуальном приборе

Рассмотрим Структуру Варианта (Case Structure), которая находится в подцикле For Loop. Данная структура может содержать одну или несколько подпрограмм и ровно одна, из которых выполняется при выполнении условия с блока 36. В данной структуре иметься два варианта действий, если значения с блоков 32 и 35 совпадают, то запускаются действия из окна True, если не совпадают, то запускаются действия из окна False.

Приступим к рассмотрению варианта из окна True. На блок 40 поступает одномерный массив созданный блоком 34, этот массив является каждым первым элементом массива созданного блоком 33. Так же на блок 40 поступает информация о номере нужного элемента с блока 39. Выбранный элемент с блока 40 поступает на блок 41, который преобразует тип данных из 16-разрядного числа в формат строки. Блок 42 собирает из нескольких строк одну целую, тем самым позволяя программе отправить правильную команду

на блок 43, который отправляет команду на прибор подключенный через блок 1. Блок 47 выполняет аналогичную функцию блока 40, только на его вход поступает одномерный массив каждого второго элемента массива созданного блоком 33. Использование блоков 40 и 47 позволяет одновременно отправлять кодировки на прибор и соответствующее им значение длины волны отправлять на график. Отправка данных на график (блок 46) с помощью блока 45, который объединяет два одномерных массива в кластер типа данных строка. Блоки 44 и 49 создают одномерные массивы из элементов поступающих им из блоков 47 и 48 соответственно. Блок 48 является подВП написанным производителем Keithley 2410, его функция заключается в подаче данных о силе фототока на блок 49 (рисунок 34).

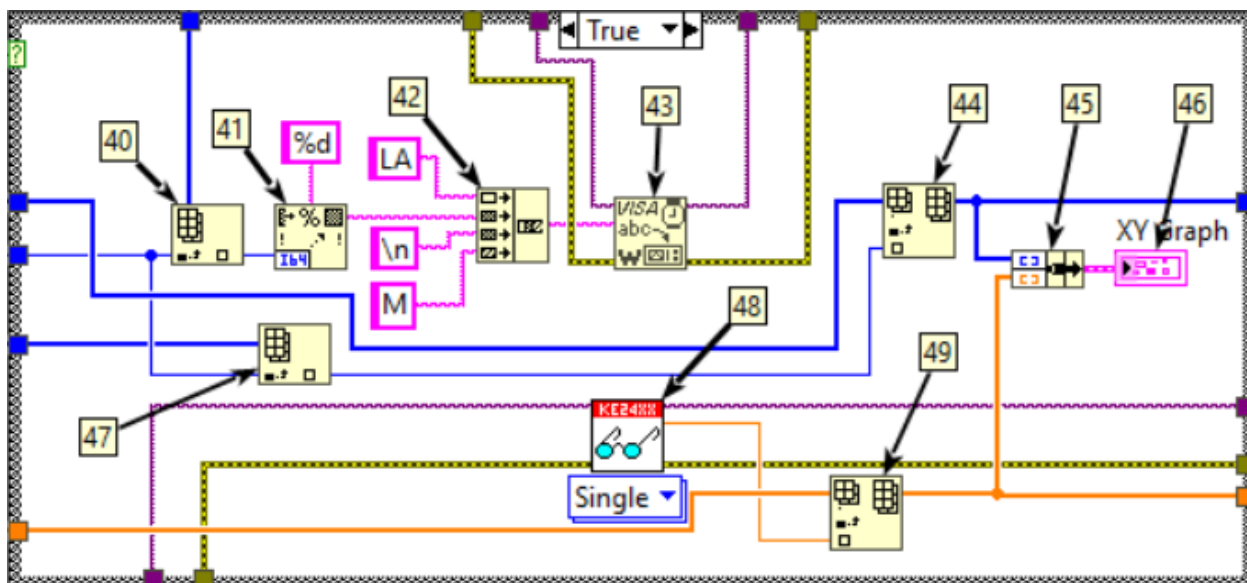


Рисунок 34 – Структура Варианта при выполнении условия True

Если значения полученные с блоков 35 и 32 не совпадают, то блок 36 выдает на Структуру выбора команду False. Во время выполнения окна False данные с блоков 44 и 49 полученные при срабатывании подпрограммы из окна True проходят круг с помощью сдвиговых регистров (блоков 28 и 29) и возвращаются обратно в блоки 44 и 49.

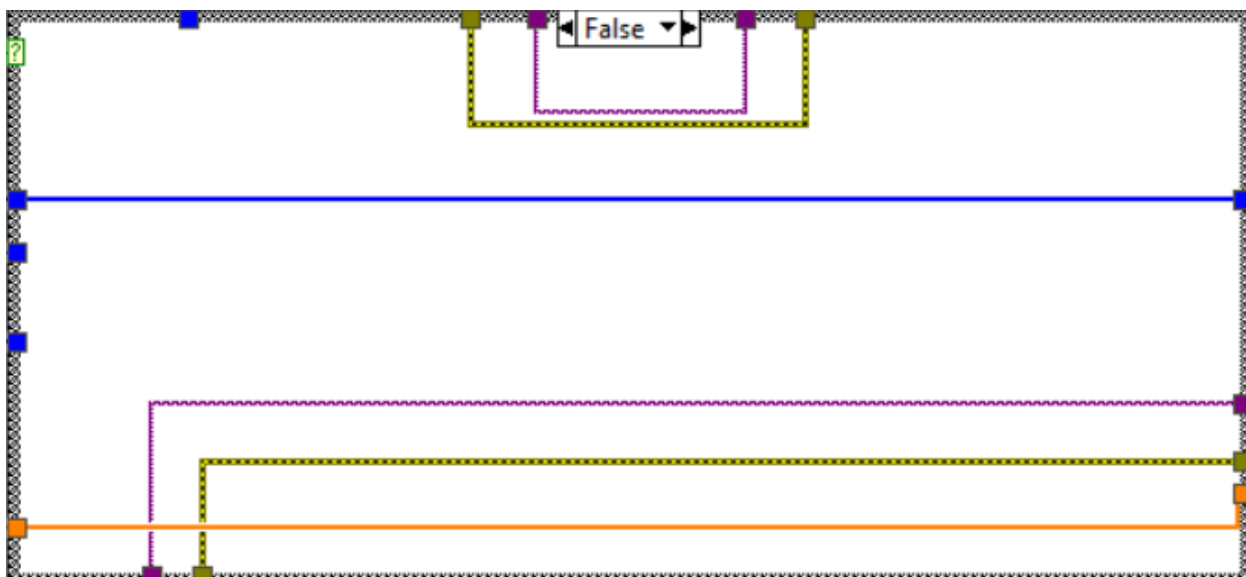


Рисунок 35 – Структура Варианта при выполнении условия False

После выполнения всех циклов данные, получаемые с приборов поступают на блоки разрыва соединения с прибором и программа останавливается (блок 50 и 52), для прибора Keithley 2410 предварительно перед блоком 52 стоит блок 51 отвечающий за выключение прибора.

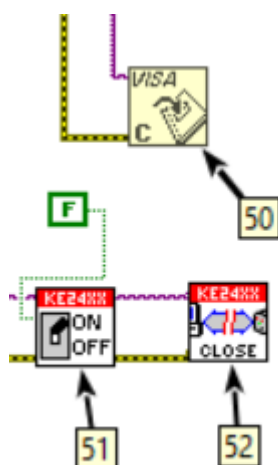


Рисунок 36 – Финальные блоки Виртуального прибора

3.2 Проверка программы на германиевом фотодиоде

В качестве образца использовали фотодиод на основе кремния. Произвели измерения фототока зависимости от изменения длины волны, на участке от 500 до 790 нм. (рисунок 37). Полученный график сравнили со спектром излучения лампы прибора ДН-2000. Наблюдается качественное совпадение полученных экспериментальной и эталонной зависимостей, из чего можно сделать вывод, что данная программа работает корректно (рисунок 38).

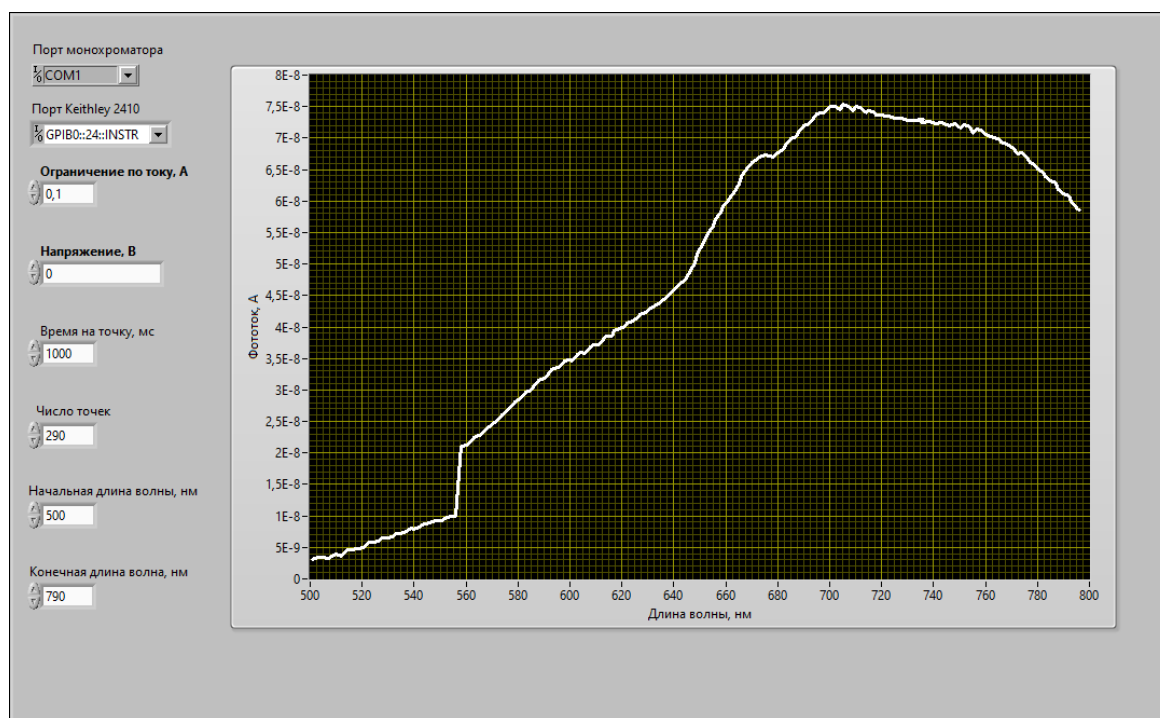


Рисунок 37 – Лицевая панель виртуального прибора итоговой программы

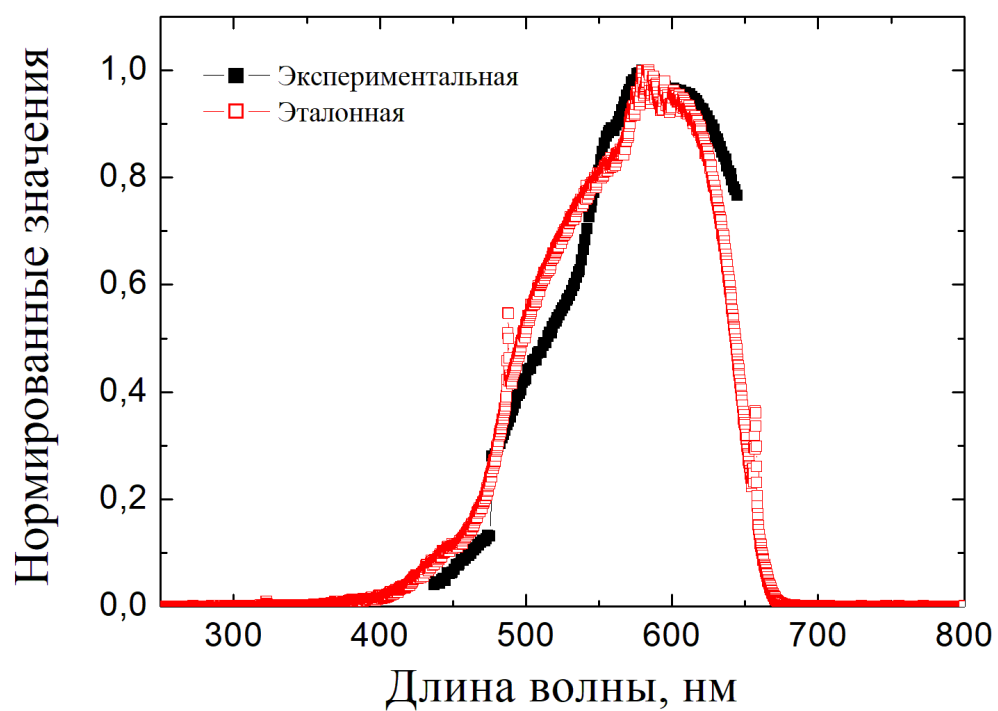


Рисунок 38 – Сравнение графиков, полученных с Виртуального прибора и со спектрометра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процесс выполнения работы были проведены испытания программы, исследованы кодировки монохроматора, получены и откалиброваны новые кодировки монохроматора, которых нет в технической документации прибора. Изучена среда разработки LabView, создан автоматизированный виртуальный прибор, который позволяет пользователю строить график зависимости величины фототока от длины волны и мощности излучения света.

В результате выполнения выпускной работы было сделано следующее:

- а) написан литературный обзор по выбранной теме;
- б) освоена среда разработки LabView;
- в) создана программа для автоматизации процесса измерения фототока в зависимости от изменения длины волны;
- г) протестировали работоспособность программы, используя в качестве образца фотодиод из кремния.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Система LabView. Программные и аппаратные средства. Готовые решения National Instruments. (Лекция 4) – URL: <https://myslide.ru/presentation/skachat-sistema-LabView-programmnye-i-apparatnye-sredstva-gotovye-resheniya-National-Instruments-lekciya-4> (дата обращения 06. 06. 2022)
2. Keithley 2410| Источник-измеритель 1А/ 1100 В | ФЕРРИЯ Телеком – URL: <https://ferria.ru/product/keithley-2410/> (дата обращения 06. 06. 2022)
3. Сканирующий монохроматор MonoScan2000 – URL: <https://oceanoptics.ru/controlling/145-monoscan2000.html> (дата обращения 06. 06. 2022)
4. DH-2000 Комбинированный источник излучения (дейтерий-вольфрам) – URL: <https://oceanoptics.ru/lightsources/85-dh-2000.html> (дата обращения 06. 06. 2022)
5. Гермогенов В. П. Материалы, структуры и приборы полупроводниковой оптоэлектроники : учеб. пособие. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2015. – 272 с.
6. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов: учебное пособие для студентов вузов. М. : Физматлит, 2008. 488 с.
7. Васильев А.С., Лашманов О.Ю. Основы программирования в среде LabVIEW. – Санкт-Петербург. Университет ИТМО 2015. – 80с
8. Магда Ю.С. LabVIEW: практический курс для инженеров и разработчиков. – Москва: ДМК. 2012 – 207 с.
9. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / пер. с англ. 2-е изд. М.: Мир, 1984. Кн. 2. 456 с.
10. Мартынов В.Н., Кольцов Г.И. Полупроводниковая оптоэлектроника : учебное пособие для вузов. М. : МИСИС, 1999. 400 с.
11. Гауэр Дж. Оптические системы связи / пер. с англ. М. : Радио и связь, 1989. 504 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Данные полученные с монохроматора

Таблица А – Данные полученные с монохроматора

Код	Длина волны в нм.
-6580	250
-7138	260
-7696	270
-8269	280
-8858	290
-9423	300
-9973	310
-10528	320
-11067	330
-11615	340
-12165	350
-12713	360
-13258	370
-13805	380
-14372	390
-14939	400
-15503	410
-16073	420
-16643	430
-17227	440
-17818	450
-18408	460
-18983	470
-19545	480
-20095	490
-20661	500
-21236	510
-21801	520
-22373	530
-22944	540
-23526	550
-24104	560
-24700	570
-25291	580
-25875	590
-26488	600

Окончание таблицы А

Код	Длина волны в нм.
-27106	610
-27730	620
-28317	630
-28905	640
-29499	650
-30089	660
-30676	670
-31262	680
-31856	690
-32450	700
-33049	710
-33649	720
-34268	730
-34895	740
-35516	750
-36157	760
-36814	770
-37444	780
-38080	790
-38703	800

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Калибровочная таблица для монохроматора

Таблица Б – Калибровочная таблица для монохроматора

Код	Длина волны в нм.
-6580	250
-6635	251
-6691	252
-6747	253
-6804	254
-6858	255
-6914	256
-6971	257
-7027	258
-7083	259
-7138	260
-7194	261
-7248	262
-7303	263
-7360	264
-7417	265
-7474	266
-7530	267
-7586	268
-7643	269
-7696	270
-7754	271
-7810	272
-7867	273
-7923	274
-7982	275
-8038	276
-8096	277
-8156	278
-8211	279
-8269	280
-8324	281
-8387	282
-8449	283
-8505	284
-8562	285
-8622	286

Продолжение таблицы Б

Код	Длина волны в нм.
-8680	287
-8736	288
-8803	289
-8858	290
-8912	291
-8970	292
-9028	293
-9084	294
-9140	295
-9195	296
-9254	297
-9310	298
-9365	299
-9423	300
-9478	301
-9535	302
-9590	303
-9641	304
-9697	305
-9755	306
-9811	307
-9866	308
-9918	309
-9973	310
-10029	311
-10085	312
-10141	313
-10197	314
-10250	315
-10305	316
-10361	317
-10419	318
-10472	319
-10528	320
-10583	321
-10637	322
-10691	323
-10745	324
-10797	325
-10853	326

Продолжение таблицы Б

Код	Длина волны в нм.
-10906	327
-10958	328
-11012	329
-11067	330
-11123	331
-11180	332
-11230	333
-11287	334
-11343	335
-11398	336
-11452	337
-11504	338
-11560	339
-11615	340
-11673	341
-11724	342
-11778	343
-11835	344
-11890	345
-11945	346
-11998	347
-12054	348
-12111	349
-12165	350
-12220	351
-12276	352
-12331	353
-12387	354
-12440	355
-12496	356
-12550	357
-12601	358
-12661	359
-12713	360
-12769	361
-12826	362
-12877	363
-12933	364
-12986	365
-13042	366

Продолжение таблицы Б

Код	Длина волны в нм.
-13095	367
-13148	368
-13200	369
-13258	370
-13311	371
-13365	372
-13423	373
-13478	374
-13533	375
-13586	376
-13644	377
-13693	378
-13746	379
-13805	380
-13868	381
-13917	382
-13972	383
-14034	384
-14088	385
-14143	386
-14199	387
-14258	388
-14316	389
-14372	390
-14431	391
-14487	392
-14543	393
-14599	394
-14655	395
-14712	396
-14770	397
-14823	398
-14879	399
-14939	400
-14994	401
-15052	402
-15108	403
-15164	404
-15221	405
-15276	406

Продолжение таблицы Б

Код	Длина волны в нм.
-15332	407
-15390	408
-15445	409
-15503	410
-15560	411
-15616	412
-15670	413
-15728	414
-15785	415
-15843	416
-15900	417
-15956	418
-16015	419
-16073	420
-16128	421
-16188	422
-16245	423
-16302	424
-16357	425
-16414	426
-16471	427
-16530	428
-16586	429
-16643	430
-16703	431
-16760	432
-16820	433
-16876	434
-16938	435
-16994	436
-17050	437
-17110	438
-17168	439
-17227	440
-17287	441
-17343	442
-17404	443
-17465	444
-17522	445
-17584	446

Продолжение таблицы Б

Код	Длина волны в нм.
-17641	447
-17700	448
-17755	449
-17818	450
-17878	451
-17936	452
-17993	453
-18054	454
-18112	455
-18173	456
-18231	457
-18290	458
-18350	459
-18408	460
-18466	461
-18524	462
-18580	463
-18637	464
-18696	465
-18751	466
-18811	467
-18867	468
-18926	469
-18983	470
-19038	471
-19096	472
-19150	473
-19206	474
-19263	475
-19320	476
-19377	477
-19431	478
-19487	479
-19545	480
-19601	481
-19655	482
-19711	483
-19764	484
-19820	485
-19873	486

Продолжение таблицы Б

Код	Длина волны в нм.
-19930	487
-19984	488
-20039	489
-20095	490
-20153	491
-20209	492
-20267	493
-20321	494
-20377	495
-20433	496
-20492	497
-20550	498
-20606	499
-20661	500
-20720	501
-20775	502
-20835	503
-20892	504
-20948	505
-21007	506
-21065	507
-21121	508
-21179	509
-21236	510
-21294	511
-21349	512
-21405	513
-21461	514
-21518	515
-21574	516
-21631	517
-21687	518
-21746	519
-21801	520
-21860	521
-21914	522
-21972	523
-22029	524
-22088	525
-22144	526

Продолжение таблицы Б

Код	Длина волны в нм.
-22202	527
-22258	528
-22315	529
-22373	530
-22429	531
-22484	532
-22544	533
-22600	534
-22659	535
-22715	536
-22771	537
-22827	538
-22886	539
-22944	540
-23001	541
-23060	542
-23118	543
-23177	544
-23234	545
-23291	546
-23349	547
-23406	548
-23465	549
-23526	550
-23581	551
-23629	552
-23696	553
-23757	554
-23814	555
-23870	556
-23931	557
-23986	558
-24045	559
-24104	560
-24163	561
-24221	562
-24280	563
-24339	564
-24400	565
-24460	566

Продолжение таблицы Б

Код	Длина волны в нм.
-24519	567
-24578	568
-24639	569
-24700	570
-24758	571
-24817	572
-24877	573
-24933	574
-24994	575
-25052	576
-25111	577
-25171	578
-25230	579
-25291	580
-25348	581
-25407	582
-25466	583
-25523	584
-25580	585
-25641	586
-25697	587
-25757	588
-25814	589
-25875	590
-25935	591
-25995	592
-26058	593
-26119	594
-26180	595
-26242	596
-26303	597
-26362	598
-26425	599
-26488	600
-26548	601
-26611	602
-26671	603
-26734	604
-26796	605
-26859	606

Продолжение таблицы Б

Код	Длина волны в нм.
-26919	607
-26981	608
-27045	609
-27106	610
-27169	611
-27229	612
-27295	613
-27357	614
-27420	615
-27478	616
-27544	617
-27604	618
-27669	619
-27730	620
-27789	621
-27845	622
-27907	623
-27963	624
-28022	625
-28083	626
-28141	627
-28199	628
-28258	629
-28317	630
-28376	631
-28436	632
-28494	633
-28553	634
-28612	635
-28669	636
-28728	637
-28788	638
-28847	639
-28905	640
-28965	641
-29026	642
-29085	643
-29141	644
-29203	645
-29262	646

Продолжение таблицы Б

Код	Длина волны в нм.
-29322	647
-29380	648
-29441	649
-29499	650
-29558	651
-29617	652
-29676	653
-29736	654
-29791	655
-29851	656
-29912	657
-29973	658
-30030	659
-30089	660
-30148	661
-30207	662
-30264	663
-30323	664
-30384	665
-30438	666
-30497	667
-30555	668
-30618	669
-30676	670
-30734	671
-30792	672
-30850	673
-30909	674
-30969	675
-31025	676
-31085	677
-31143	678
-31203	679
-31262	680
-31320	681
-31378	682
-31440	683
-31499	684
-31559	685
-31616	686

Продолжение таблицы Б

Код	Длина волны в нм.
-31678	687
-31737	688
-31797	689
-31856	690
-31915	691
-31974	692
-32034	693
-32091	694
-32155	695
-32212	696
-32272	697
-32330	698
-32391	699
-32450	700
-32509	701
-32568	702
-32629	703
-32688	704
-32749	705
-32809	706
-32869	707
-32929	708
-32989	709
-33049	710
-33109	711
-33169	712
-33229	713
-33289	714
-33348	715
-33407	716
-33467	717
-33527	718
-33588	719
-33649	720
-33709	721
-33774	722
-33833	723
-33896	724
-33957	725
-34020	726

Продолжение таблицы Б

Код	Длина волны в нм.
-34083	727
-34142	728
-34206	729
-34268	730
-34331	731
-34394	732
-34455	733
-34517	734
-34582	735
-34655	736
-34707	737
-34768	738
-34832	739
-34895	740
-34960	741
-35016	742
-35081	743
-35143	744
-35205	745
-35269	746
-35328	747
-35392	748
-35455	749
-35516	750
-35581	751
-35645	752
-35706	753
-35773	754
-35835	755
-35899	756
-35965	757
-36028	758
-36089	759
-36157	760
-36230	761
-36290	762
-36360	763
-36420	764
-36480	765
-36550	766

Окончание таблицы Б

Код	Длина волны в нм.
-36600	767
-36670	768
-36750	769
-36814	770
-36870	771
-36940	772
-37000	773
-37070	774
-37130	775
-37190	776
-37250	777
-37300	778
-37380	779
-37444	780
-37500	781
-37570	782
-37650	783
-37690	784
-37750	785
-37820	786
-37890	787
-37950	788
-38030	789
-38080	790
-38100	791
-38180	792
-38240	793
-38300	794
-38359	795
-38432	796
-38500	797
-38573	798
-38620	799
-38703	800

Отчет о проверке на заимствования №1



Автор: Хасанов Тимур
Проверяющий: Хасанов Тимур

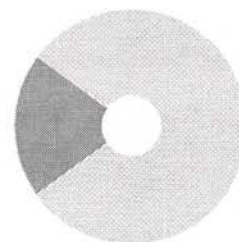
Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат» - <http://users.antiplagiat.ru>

ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 21
Начало загрузки: 31.01.2023 09:06:35
Длительность загрузки: 00:00:02
Имя исходного файла:
ПЕЧАТАТЬ_ВКР_Хасанов.pdf
Название документа:
ПЕЧАТАТЬ_ВКР_Хасанов
Размер текста: 57 кб
Символов в тексте: 58145
Слов в тексте: 6035
Число предложений: 338

ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Начало проверки: 31.01.2023 06:06:37
Длительность проверки: 00:00:07
Комментарии: не указано
Модули поиска: Интернет Free



СОВПАДЕНИЯ

19,9%

САМОЦИТИРОВАНИЯ

0%

ЦИТИРОВАНИЯ

0%

ОРИГИНАЛЬНОСТЬ

80,1%

Совпадения — доля всех найденных текстовых пересечений, за исключением тех, которые система отнесла к цитированиям, по отношению к общему объему документа.
Самоцитирования — доля фрагментов текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника, автором или соавтором которого является автор проверяемого документа, по отношению к общему объему документа.

Цитирования — доля текстовых пересечений, которые не являются авторскими, но система посчитала их использование корректным, по отношению к общему объему документа. Сюда относятся оформленные по ГОСТу цитаты; общеупотребительные выражения; фрагменты текста, найденные в источниках из коллекций нормативно-правовой документации.

Текстовое пересечение — фрагмент текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника.

Источник — документ, проиндексированный в системе и содержащийся в модуле поиска, по которому проводится проверка.

Оригинальность — доля фрагментов текста проверяемого документа, не обнаруженных ни в одном источнике, по которым шла проверка, по отношению к общему объему документа.

Совпадения, самоцитирования, цитирования и оригинальность являются отдельными показателями и в сумме дают 100%, что соответствует всему тексту проверяемого документа.

Обращаем Ваше внимание, что система находит текстовые пересечения проверяемого документа с проиндексированными в системе текстовыми источниками. При этом система является вспомогательным инструментом, определение корректности и правомерности заимствований или цитирований, а также авторства текстовых фрагментов проверяемого документа остается в компетенции проверяющего.

№	Доля в отчете	Источник	Актуален на	Модуль поиска
[01]	16,5%	http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vtls:000511917/SOURCE1 http://vital.lib.tsu.ru	27 Янв 2020	Интернет Free
[02]	2,15%	Издательство Высшая школа 2001 Оригиналмакет данного издания является собственностью издательства Вы http://samzan.ru	05 Янв 2017	Интернет Free
[03]	0%	http://elib.psuti.ru/Trofimova_Kurs_phiziki.pdf http://elib.psuti.ru	28 Сен 2019	Интернет Free

Еще источников: 7

Еще совпадений: 1,24%

Ром Конев В.В