

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Резин Павел Владимирович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование шумовых характеристик полупроводникового
фотодиода**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19302

Научный руководитель:

Оценка научного руководителя

мнс НГУ М.И. Скворцов

« _____ » _____ 20 __ г.

Преподаватель практикума

Оценка преподавателя практикума

А.В. Никишин

« _____ » _____ 20 __ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

« _____ » _____ 20 __ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

В данной работе производились измерения шумовых характеристик одночастотного лазерного излучения с использованием полупроводниковых фотодетекторов марки Thorlabs DET08CFC/M и Thorlabs PDA20CS2. Для определения шумовых характеристик самих фотодиодов экспериментально была определена их чувствительность, которая составила 0,99 А/Вт для модели Thorlabs DET08CFC/M. Для PDA20CS2 производились измерения для нескольких режимов усиления: 17,71 А/Вт - 0 дБ, 53,22 А/Вт - 10 дБ, 158,59 А/Вт - 20 дБ соответственно. При оптическом усилении одночастотного сигнала (до 10 мВт) и применении фотодиода Thorlabs DET08CFC/M частотный диапазон, в котором были измерены шумовые характеристики, составил 20 МГц. Для Thorlabs DET08CFC/M дробовой шум составил -188 дБ.

Ключевые слова: полупроводниковые фотодиоды, дробовой шум, шумы фотодиодов.

Оглавление:

1. Введение.....	3
2. Теоретическая часть.....	3
2.1. Полупроводники.....	3
2.2. PN переход.....	4
2.3. PIN диод.....	5
2.4. Дробовой шум.....	5
3. Экспериментальная часть.....	7
3.1. Экспериментальная установка.....	7
3.2. Результаты.....	8
3.3. Обработка результатов.....	11
4. Выводы.....	12
5. Литература.....	13

1. Введение

Одним из базовых компонентов волоконной оптики, благодаря которым производится регистрация оптического излучения, являются фотодетекторы. Данные компоненты изготовлены на основе фоточувствительных полупроводниковых элементов, использующие эффект фотопроводимости, который заключается в увеличении электропроводимости за счёт увеличения носителей зарядов под действием оптического излучения. Несмотря на преимущества данного прибора: быстрое действие, большой частотный диапазон, в полупроводниковых фотодиодах присутствует дробовой шум. Значения данного шума могут ограничивать возможность измерения шумов для оптического излучения. Таким образом, необходимо знать его точное значение.

В настоящей работе были исследованы характеристики фотодиодов марки Thorlabs DET08CFC/M и Thorlabs PDA20CS2: чувствительность, вносимый дробовой шум, частотный диапазон измерения (полоса пропускания фотодиода).

2. Теоретическая часть

2.1 Полупроводники

Полупроводник - материал, по электропроводности занимающий место между диэлектриками и проводниками. Главным отличием от группы проводников является сильная зависимость электропроводности от концентрации примесей, температуры и воздействия разного рода излучения. К числу полупроводников относятся многие химические соединения. Самые распространённые из них это кремний, мышьяк, германий. Также различают два вида полупроводников: *p-проводимости* и *n-проводимости*.

p-проводимость характеризуется проводимостью с помощью так называемых дырок, которые являются абстрактным положительным зарядом, равным по модулю заряду электрона. Данная абстракция заменяет собой отсутствие электрона в четырёхвалентной системе полупроводника. Данную проводимость получают при помощи добавления к четырёхвалентному проводнику примеси по донорно-акцепторному механизму, где акцептором является примесь (например – бор). Также данное добавление другого элемента называется *легированием*.

n-проводимость характеризуется проводимостью электронов. Это достигается с помощью легирования элементом - донором, добавляющим электрон к системе (например – фосфор).

2.2 p-n-переход

Если между двумя полупроводниками (n и p типа) установить контакт, то возникнет диффузионный ток, основные носители заряда (электроны и дырки) будут хаотично перетекать из той

области, где их больше, в ту область, где их меньше, и рекомбинировать друг с другом. Как следствие, вблизи границы между областями практически не будет свободных (подвижных) основных носителей заряда, но останутся ионы примесей с некомпенсированными зарядами. Область в полупроводнике р-типа, которая примыкает к границе, получает при этом отрицательный заряд, приносимый электронами, а пограничная область в полупроводнике n-типа получает положительный заряд, приносимый дырками. Таким образом, на границе полупроводников образуются два слоя с пространственными зарядами противоположного знака, порождающие в переходе электрическое поле. Это поле вызывает дрейфовый ток в направлении, противоположном диффузионному току. В конце концов, между диффузионным и дрейфовым токами устанавливается динамическое равновесие, и изменение пространственных зарядов прекращается. Процесс, описанный выше, и называют *p-n-переходом*.

2.3 PIN диод

Pin диод – основным отличием данного типа диодов от обычных диодов с p-n-переходами является наличие между сильнолегированными p^* и n^* слоями полупроводника так называемого *i*-слоя, который представляется собой слаболегированный полупроводник n-типа (Также его иногда называют обедненным слоем ввиду отсутствия свободных носителей заряда). Так как сильное легирование слоев увеличивает проводимость этих слоёв, внешнее напряжение, приложенное к p^* и n^* слоям, создает в *i*-слое градиент электрического поля.

При воздействии на *i*-слой внешним излучением в нем образуются свободные носители электронно-дырочные пары, которые быстро разделяются.

Таким образом, *i*-слой необходим для увеличения обедненной области.

InGaAs – материал, используемый в рассматриваемых, в данной работе, фотодиодах.

2.4 Дробовой шум

Дробовой шум – шум беспорядочных флуктуаций напряжений относительно их среднего значения, связанный с дискретностью носителей заряда – электронами. Найти его можно по формуле:

$$S_{shot}(f) = 2e(RP_0)r, \quad (2)$$

где *e* – заряд электрона, *R* – токовая чувствительность фотодиода, *P*₀ – постоянная мощность оптического излучения.

Данный шум является самым значительным шумом в фотодиоде. Поэтому он может перекрывать шумы оптического сигнала. В следствии этого нам необходимо знать его точное значение.

3. Экспериментальная часть

3.1 Схема экспериментальной установки

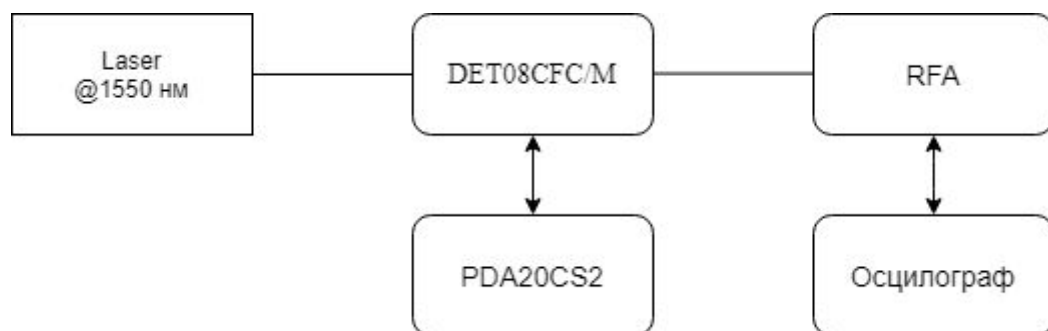


Рис. 1. Экспериментальная схема. RFA – анализатор спектра

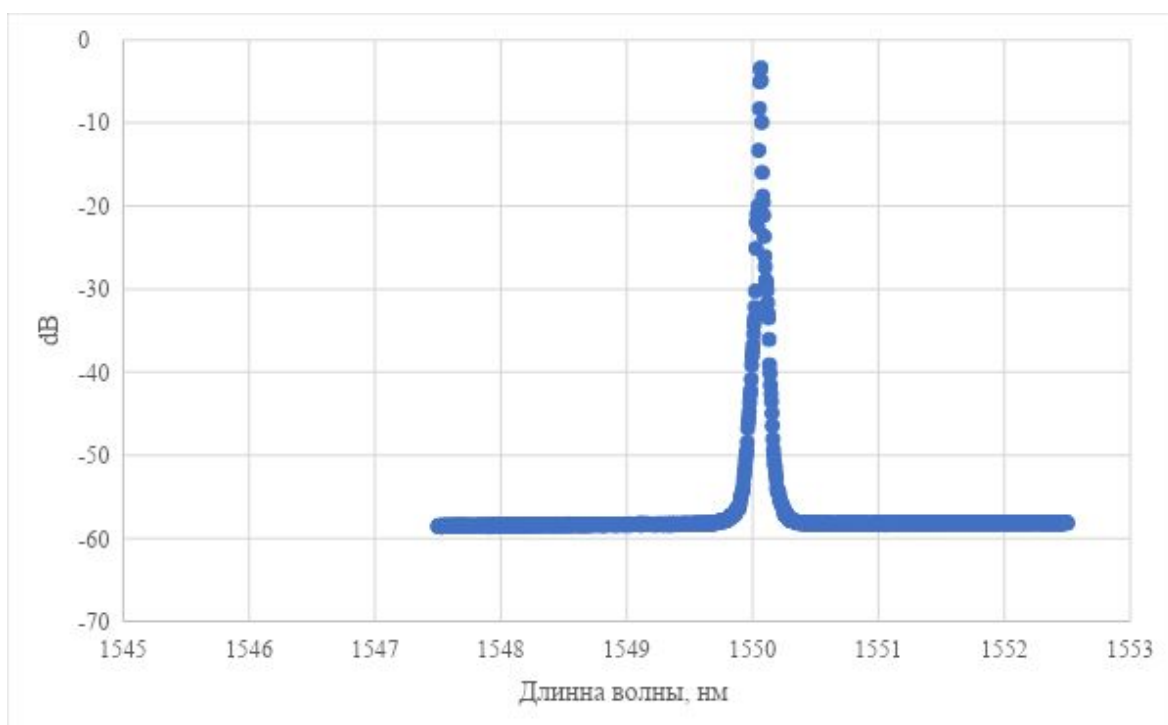


Рис. 2. Спектр лазера

В качестве источника излучения использовался одночастотный Er^{3+} лазер с длиной волны генерации 1550 нм (на Рис. 2. Представлен его спектр), выходная мощность генерации составила ≈ 600 мкВт. Оптический сигнал поступал на полупроводниковый фотодетектор марки PDA09CAC/M, после чего регистрировался на анализаторе радиочастотных спектров Agilent N9010A для определения рабочего диапазона фотодиода. Для определения токовой чувствительности вместо анализатора использовался осциллограф Tektronix.

3.2 Результаты

Нахождение чувствительности фотодиода марки DET08CFC/M и фотодиода марки PDA20CS2 с усилением 0, 10, 20 dBm: производились замеры мощности выдаваемом фотодиодом и его напряжения. На их основе были составлены графики (Рис. 3., Рис. 4., Рис. 5.):

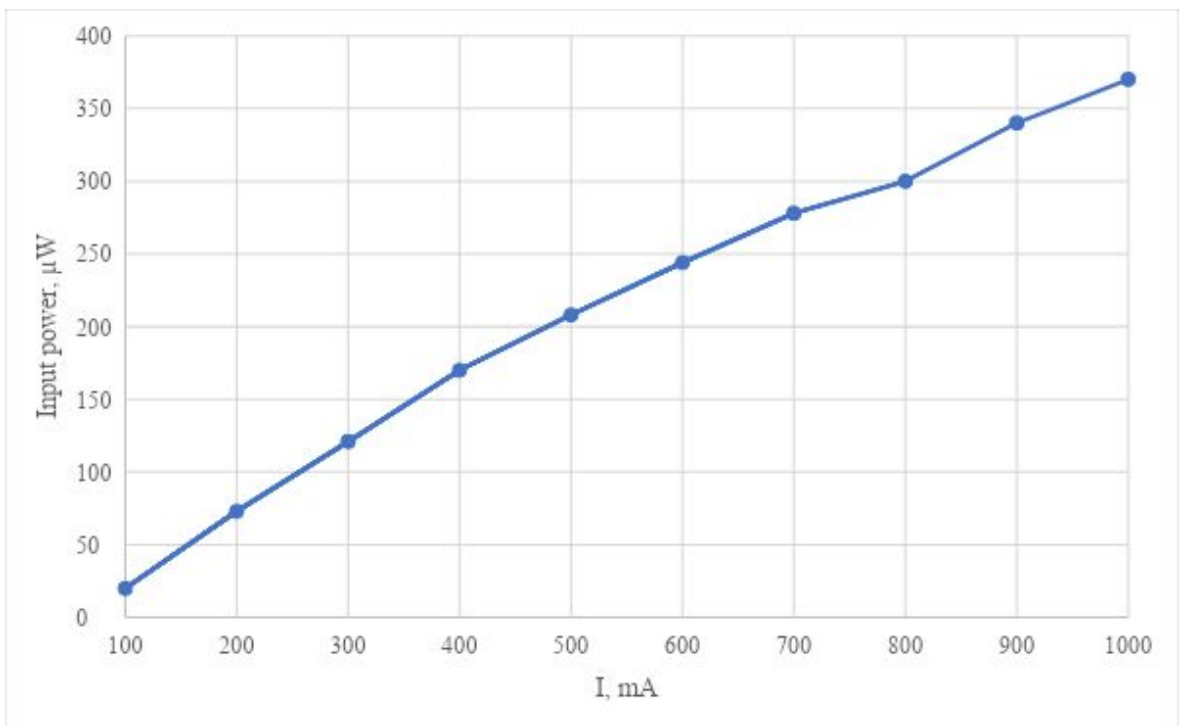


Рис. 3. Зависимость мощности, падающей на фотодиод, от тока через источник мощности

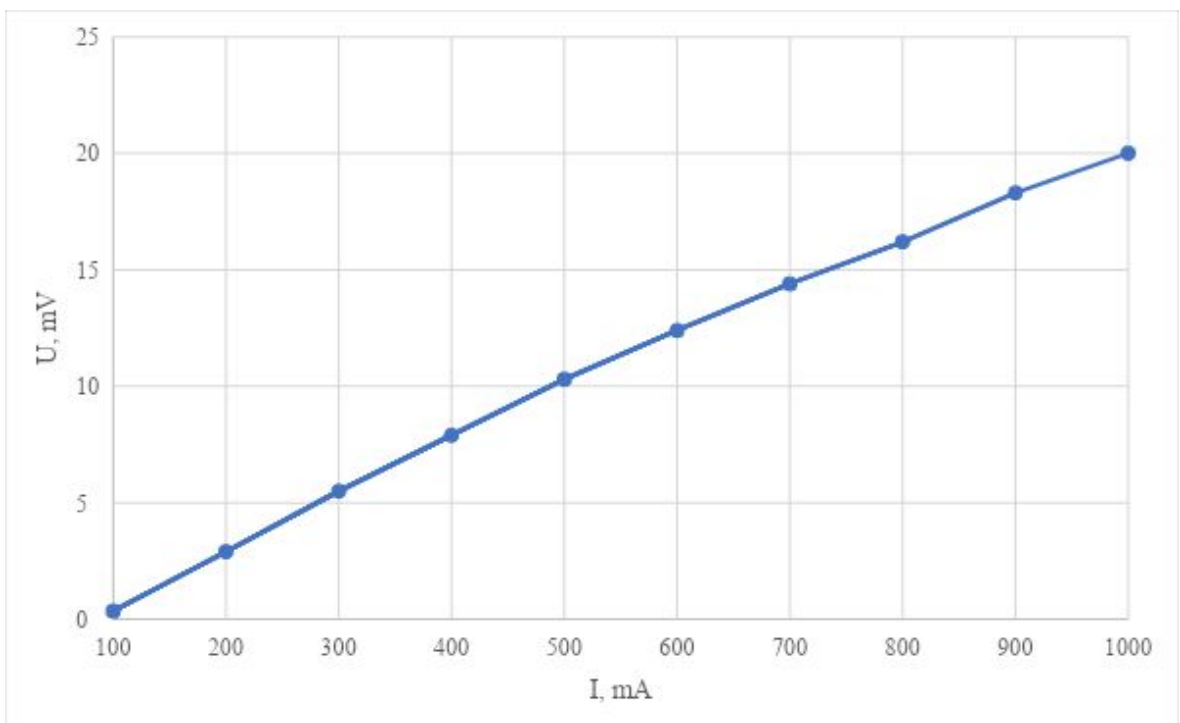


Рис. 4. Зависимость напряжения для первого фотодиода от тока через источник

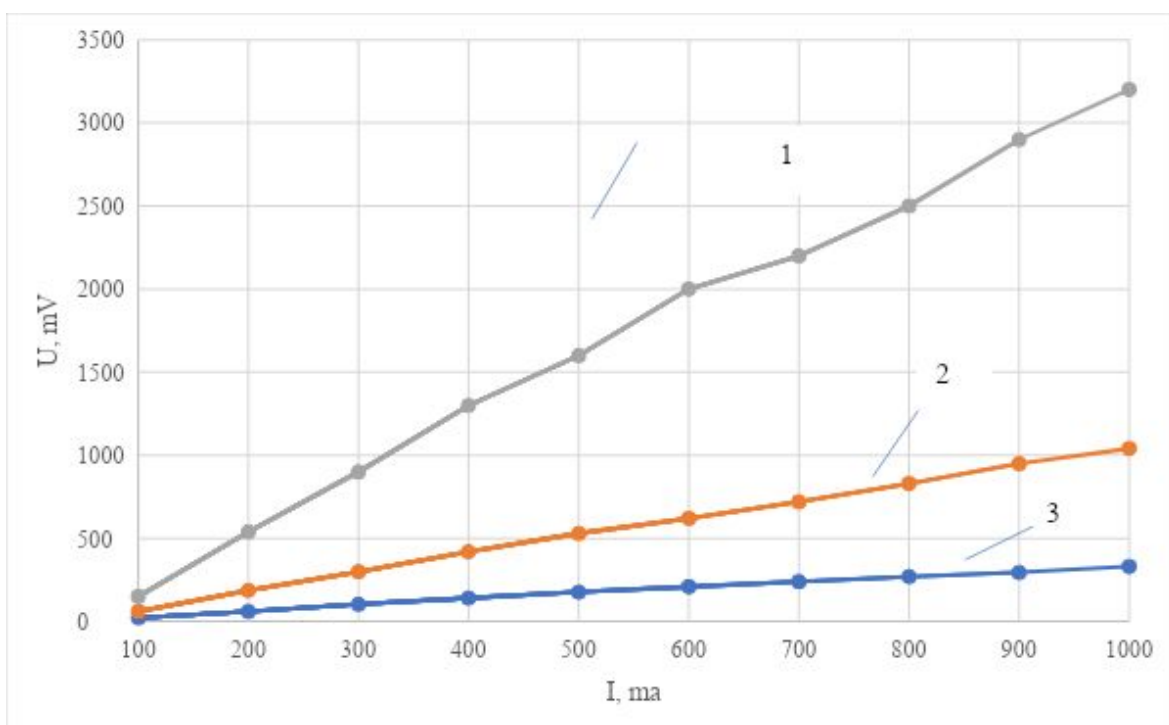


Рис. 5. Зависимость напряжения, выдаваемого вторым фотодиодом, от усиления и тока на источнике мощности; 1 – усиление 20 dBm, 2 – усиление 10 dBm, 3 – усиление 0 dBm

Далее используя формулу:

$$R = \frac{I}{W(I)}, \quad (2)$$

где \$W(I)\$ – падающая мощность, \$I\$ – ток снятый с фотодетектора, \$R\$ – токовая чувствительность, была найдена средняя токовая чувствительность (Таблица 1) для фотодиодов (для фотодиода марки PDA20CS2 находилась чувствительность с усилением 0, 10, 20 dBm).

Таблица. 1. Экспериментальная чувствительность фотодиодов.

Для фотодиода марки Thorlabs DET08CFC/M	0,99 А/Вт
Для фотодиода марки Thorlabs PDA20CS2 без усиления	17,71 А/Вт
Для фотодиода марки Thorlabs PDA20CS2 с усилением 10 dBm	53,22 А/Вт
Для фотодиода марки Thorlabs PDA20CS2 с усилением 20 dBm	158,59 А/Вт

В следствии этого было принято решение остановиться на варианте использования фотодетектора без усиления и использовать оптическое усиление.

Измерение частотного диапазона

Далее приведен график (рис 6) зависимости шумового сигнала от частоты для фотодиода марки Thorlabs DET08CFC/M.

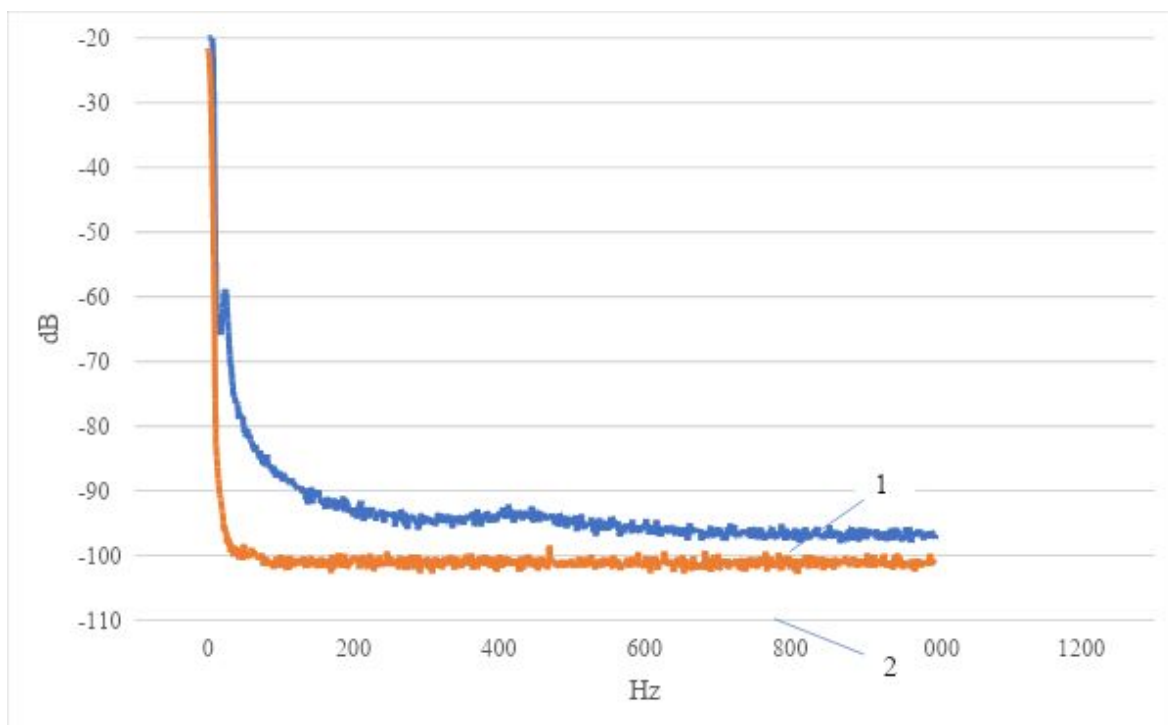


Рис. 6. 1 – сигнал есть, 2 – сигнала нет для фотодиода марки Thorlabs DET08CFC/M

3.3 Обработка результатов

Токовая чувствительность для двух моделей фотодиодов марки Thorlabs DET08CFC/M и марки Thorlabs PDA20CS2 составила (Таблица. 2.):

Таблица. 2. Экспериментальная чувствительность фотодиодов.

Для фотодиода марки Thorlabs DET08CFC/M	0,99 А/Вт
Для фотодиода марки Thorlabs PDA20CS2 без усиления	17,71 А/Вт

Для фотодиода марки Thorlabs PDA20CS2 с усилением 10 dB	53,22 А/Вт
Для фотодиода марки Thorlabs PDA20CS2 с усилением 20 dB	158,59 А/Вт

Дробовой шум (формула 1) для фотодетекторов модели DET и PDA составил (Таблица. 3.). Также в этих расчётах учтено изменение импеданса при изменении усиления у фотодетектора марки PDA (были взяты паспортные данные).

Таблица. 3. Экспериментальный дробовой шум фотодиодов.

Для фотодиода DET08CFC/M	-188 dB
Для фотодиода марки Thorlabs PDA20CS2 без усиления	-171 dB
Для фотодиода марки Thorlabs PDA20CS2 с усилением 10 dB	-161 dB
Для фотодиода марки Thorlabs PDA20CS2 с усилением 20 dB	-151 dB

4. Выводы

Процессы: р-п-переход, поглощение фотона, возникновение дробового шума – изучены. Были получены реальные токовые чувствительности для фотодиодов марки Thorlabs DET08CFC/M и марки Thorlabs PDA20CS2. Были получены спектральные и частотные характеристики, которые совпали со значениями, приведенными в паспорте данных фотодиодов. На основе этих измерений были посчитаны значения дробовых шумов для фотодиодов. На основе значений чувствительности и дробовых шумов пришли к выводу, что для детектирования шумов от фотодиода при измерении внешнего излучения на малых частотах (до 11 МГц) следует

использовать фотодиоды с усилением. На частотах выше 11 МГц следует использовать фотодиоды без усиления совместно с оптическим усилением (уровень оптического шума обычно составляет 140дБ).

5. Литература

- 1) Иванов А.Б. – волоконная оптика, компоненты, системы передачи, измерения.
- 2) Rongqing Hui, Maurice O’Sullivan - Fiber Optic Measurement Techniques
- 3) https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=4&pn=PDA20CS2 – Паспорт фотодиода марки Thorlabs PDA20SC2
- 4) <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=DET08CFC/M#ad-image-0> – Паспорт фотодиода марки Thorlabs DET08CFC/M