

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Ооржак Айдаш Аккоевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование зависимости коэффициента усиления гибридного
фотодетектора от рабочего напряжения**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20302

Научный руководитель:

М. Ю. Барняков

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

А. А. Инжеваткина

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н В. Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2021

Аннотация

Целью данной работы является изучение зависимости коэффициента усиления гибридного фотодетектора от рабочего напряжения. В ходе работы с помощью осциллографа были измерены зависимости количества электронов, эмитированных непосредственно с фотокатода, количества электронов, полученных при бомбардировке полупроводника, от внешнего напряжения. Отношение числа электронов на выходе и на входе называется коэффициентом усиления - важнейшая характеристика гибридного фотодетектора. Согласно теории, зависимость между коэффициентом усиления и напряжения должна быть линейной. Однако наблюдаются нелинейные участки на графике. Даны объяснения этого явления. Тщательно обработаны результаты измерений, и построены графики зависимостей при помощи пакета объектно-ориентированных программ и библиотек - ROOT. Измерены погрешности полученных величин.

Ключевые слова: гибридный фотодетектор, коэффициент усиления, фотокатод, фотон, светодиод, осциллограф, полупроводник, диод, электрон-дырочные пары.

Оглавление

Оглавление	3
Введение	4
Теоретическая часть	6
Описание экспериментальной установки и постановка задачи	8
Результаты эксперимента	11
Анализ экспериментальных данных	14
Выводы	16
Список литературы	17

Введение

Технология фоторегистрации - мощный инструмент для познания и понимания сложных явлений. Измерения со светом дают уникальные преимущества: например, анализ вещества без его разрушения и т.д. В последние годы продвинутые научные области, в частности, медицинская диагностика, физика высоких энергий, спектроскопия и биотехнология, требуют разработки фотоприемников, которые демонстрируют максимально широкий рабочий диапазон их параметров (коэффициент усиления, рабочее напряжение и т.д.) [1].

Фотодетекторы или датчики света можно условно разделить по принципу действия на две основные категории, на основе которых лежат явления: внешний фотоэффект, внутренний фотоэффект. Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) - электровакуумный прибор, в котором поток электронов, излучаемый фотокатодом под действием оптического излучения, усиливается в умножительной системе. Фотоумножительные трубки, содержат фотокатод, который испускает электроны, когда освещается, электроны затем усиливаются цепью динодов. Фотоэлектронные умножители имеют широкое применение в промышленной аппаратуре и научных исследованиях: экспериментальной физике, геология, астрономия, лазерная техника и т.д. Наиболее многочисленное применение имеют фотоэлектронные умножители для измерений временных интервалов или формы (структуры) световых сигналов [2].

Данная работа посвящена гибриднему фотодетектору, его количественным параметрам и характеристикам. Гибридный фотодетектор – фотодатчик, преобразующий электромагнитное излучение (фотоны) в электрический сигнал. Гибридный фотодетектор содержит в себе полупроводниковый диод в вакуумной электронной трубке. В конструкции гибридного фотодетектора, фотоэлектроны, эмитированные из фотокатода, ускорены внешним полем прямоком в полупроводник, где их число возрастает. Плюсы гибридных

фотодетекторов это: низкая флуктуация во время умножения, высокий коэффициент усиления и стабильность. Гибридные фотоэлектронные умножители не внедрены пока в серийное производство, несмотря на многочисленные сообщения о разработке экспериментальных образцов [3].

Целью работы является определение зависимости коэффициента усиления у гибридного фотодетектора от рабочего напряжения.

Основные задачи:

1. Экспериментально определить зависимость коэффициента усиления от рабочего напряжения
2. Исследовать полученные данные.

Теоретическая часть

В конструкции гибридного фотодетектора лежат два основных явления: фотоэлектронная эмиссия и ударная ионизация [4].

Фотоэлектронной эмиссией (внешним фотоэффектом) называют эмиссию электронов из вещества в вакуум под действием электромагнитного излучения. Количество эмитируемых электронов (фототок) пропорционально интенсивности облучения фотокатода.

Ударная ионизация – это физическая модель, описывающая ионизацию атома при «ударе о него» электрона или другой заряженной частицы — например, позитрона, иона или «дырки». Явление наблюдается как в газах, так и в твёрдых телах, например в полупроводниках. В полупроводниках электрон или дырка, обладающие достаточно высокой кинетической энергией (по крайней мере превосходящей ширину запрещённой зоны), могут ионизовать кристалл и создать в нём электронно-дырочную пару.

Для количественного описания ионизации в сильном поле E служит коэффициент ударной ионизации (см^{-1})

$$\alpha_{ii} = A * \exp\left(-\frac{B}{E}\right), A, B = \text{const}$$

Он задаёт число ионизаций, осуществляемых одним электроном, дыркой или другой частицей на единичном пути, и играет роль показателя интенсивности размножения. (ii – impact ionization).

Приведу также формулировки законов и необходимых формул при выполнении данной работы.

$$\text{Закон Ома: } I = \frac{U}{R}. \text{ Связь силы тока и заряда: } I = \frac{dq}{dt}$$

Отсюда выразим дифференциал заряда, проинтегрируем обе части равенства и получим полный заряд, а затем подставим силу тока из закона Ома.

$$Q = \int dq = \int I(t)dt = \frac{1}{R} \int U(t)dt$$

Число электронов прямо пропорционально заряду: $Q \sim N$

Коэффициент усиления:

$$G = \frac{N_1}{N_2} = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\int U_1(t)dt}{\int U_2(t)dt} = \frac{S_1}{S_2}$$

где N_1 - число электронов, образованных внутри диода, N_2 - число электронов, эмитированных из фотокатода, S_1 - площадь под графиком зависимости $U_1(t)$, S_2 - площадь под графиком зависимости $U_2(t)$.

Описание экспериментальной установки и постановка задачи

Эксперименты по измерению зависимости коэффициента усиления гибридного фотодетектора от рабочего напряжения были проведены в лаборатории ИЯФ, в котором есть большой экспериментальный ящик (бокс) с подвижной крышкой. Он необходим, поскольку гибридный фотодетектор чувствителен в обнаружении внешнего света. Это означает, что даже слабый внешний свет может повлиять на результаты измерений. Сам гибридный фотодетектор находится внутри бокса, который в свою очередь накрыт чёрным одеялом для дополнительной надёжности. В боксе имеются специальные маленькие отверстия для проводов от генератора, источника, осциллографа и т.д. Гибридный фотодетектор укреплен на штативе (Рис. 1), который, в свою очередь, имеет штативы для проводов и кабелей. Сам гибридный фотодетектор имеет цилиндрическую форму с двумя белыми проводами из фотокатода, с одной стороны имеет входное окно для светодиода, а с другой выводы. Подключаю кабель светодиода к стороне гибридного фотодетектора с входным окном, с другой стороны подключаю коаксиальные кабели источника напряжения и осциллографа к гибриднему фотодетектору с заземлением. Включаю светодиод с амплитудой 5 В, включаю источник напряжения. На схеме гибридного фотодетектора не отображено фокусирующее напряжение. Оно необходимо для устранения отклонения траектории эмитирующих электронов из фотокатода. Фокусирующее напряжение в два раза меньше, чем напряжение, приложенное к фотокатоду. Для фокусирующего напряжения есть второй вывод из фотокатода. Коаксиальный кабель осциллографа можно подключить к выводам для фокусирующего напряжения, чтобы можно было пронаблюдать фототок из фотокатода. Фототок необходим для измерения коэффициента усиления. Меняя значения напряжений, я наблюдаю выходной сигнал на интерфейсе осциллографа. Форма сигнала, гистограмма, которая вырисовывается в нормальное распределение, число событий, средние значения, дисперсия, среднеквадратическое отклонение и т.д.

На рис. 1 предоставлена внутренняя конструкция гибридного фотодетектора.

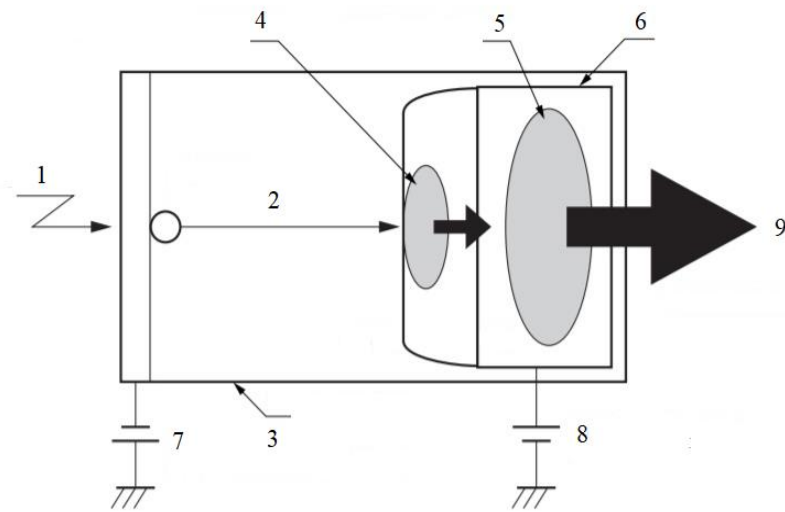


Рис. 1. Схема гибридного фотодетектора: 1 – фотоны; 2 – фотоэлектроны; 3 – вакуум; 4 – поверхность полупроводника; 5 – ударная ионизация; 6 – диод; 7 – напряжение на фотокатоде; 9 – конечное усиление.

На рис. 2 предоставлена схема экспериментальной установки.

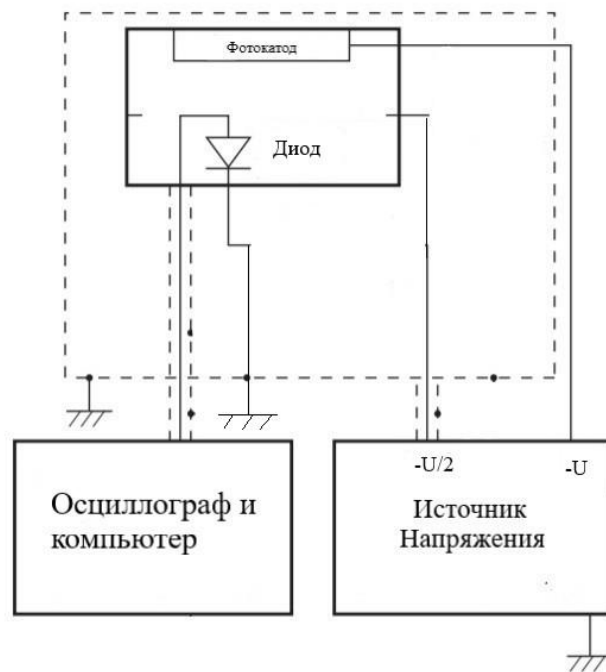


Рис. 2 Схема экспериментальной установки.

Алгоритм действий

1. Собираем схему с гибридным фотодетектором. Подключаем источник напряжения, осциллограф, светодиод, компьютер.
2. Помещаем гибридный фотодетектор в “бокс”, и покрываем его чёрным одеялом, для того чтобы устранить шумы и проникновение внешнего света, который способствует лишним срабатываниям.
3. Настраиваем осциллограф. На компьютере работаем с интерфейсом осциллографа. Включаем режим работы X-T. Наблюдаем формы выходного сигнала.
4. Сначала подключаем выход осциллографа к диоду, а потом к фотокатоду.
5. Меняя ускоряющее напряжение и используя курсоры, вычислить площади под графиком выходного сигнала, значение которого пропорционально числу электронов, образованных внутри диода.
6. Меняя ускоряющее напряжение и используя курсоры, вычислить площади под графиком выходного сигнала, значение которого пропорционально числу электронов, эмитированных из фотокатода.
7. Для предыдущих двух пунктов дополнительно требуется вычислить площадь под графиком, создаваемое шумами и неоднородностями. Истинное значение будет разность площадей.
8. Имея среднее значение площади, среднеквадратическое отклонение, число событий, вычислить для каждого измерения коэффициент усиления гибридного фотодетектора и его абсолютную и относительную погрешности.
9. Используя пакет данных ROOT, обработать результаты измерений и построить графики.
10. Провести анализ полученных графиков, и объяснить явления и эффекты.

Результаты эксперимента

Для обработки экспериментальных данных был использован ROOT - пакет объектно-ориентированных программ и библиотек [5]. Интерпретатором является язык программирования C++.

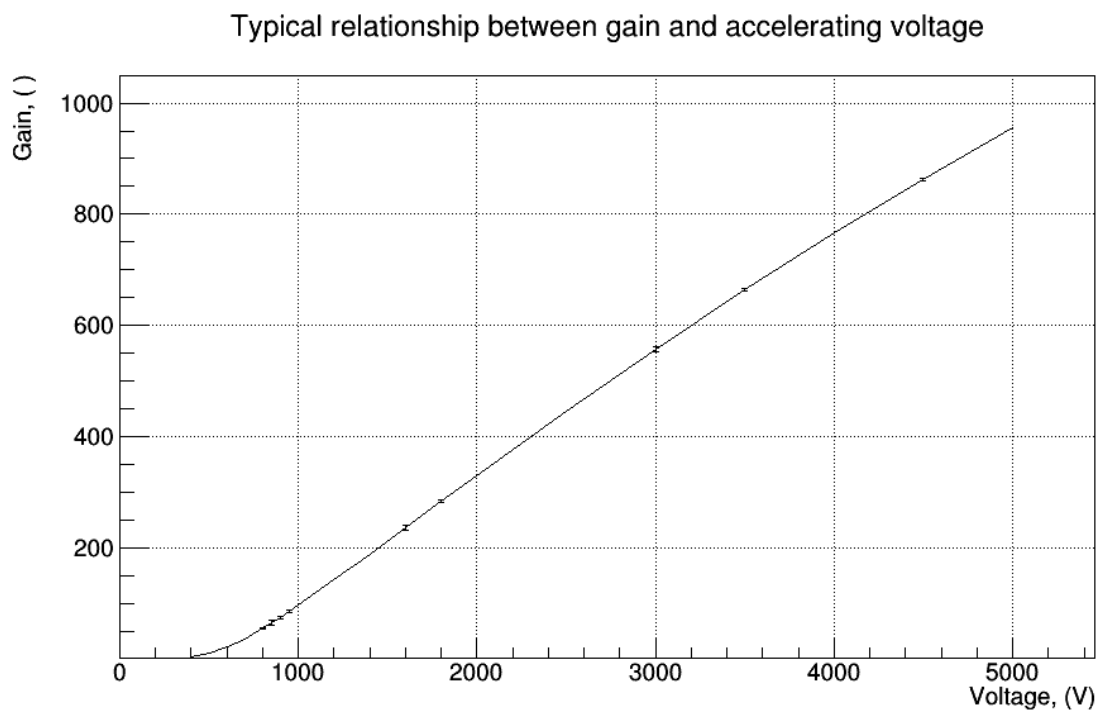


Рис. 3 Типичный график зависимости коэффициента усиления гибридного фотодетектора от ускоряющего напряжения с вертикальными ошибками измерений

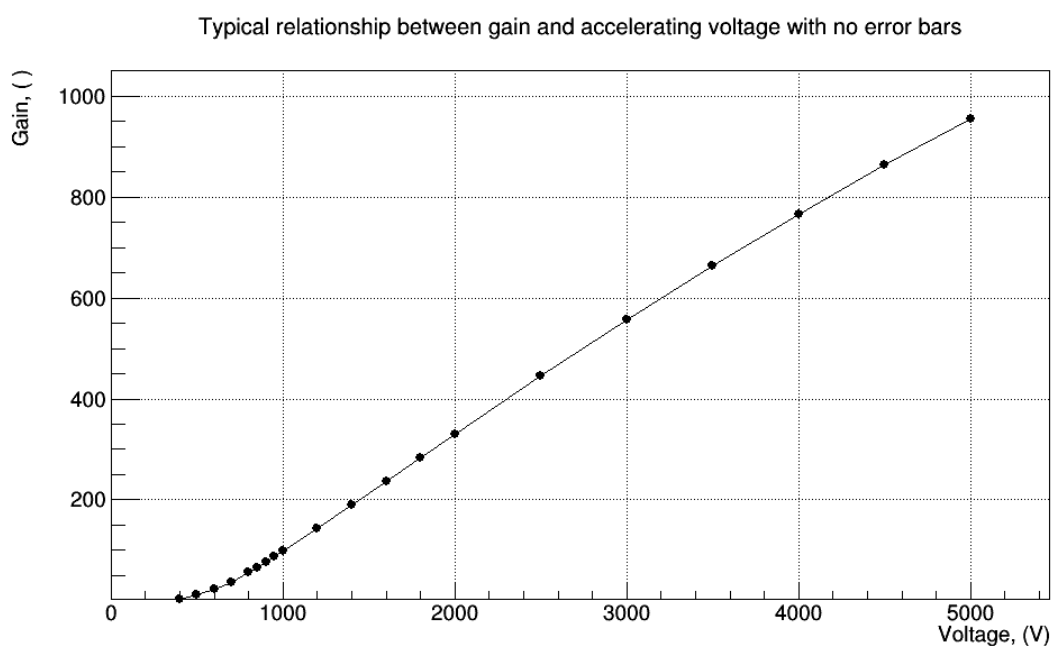


Рис. 4 Типичный график зависимости коэффициента усиления гибридного фотодетектора от ускоряющего напряжения без вертикальных ошибок измерений.

Для расчета погрешностей я делал следующее. Я записывал средние значения S_1 (площадь под графиком выходного сигнала, которое пропорционально числу электронов, эмитированных с фотокатода) и среднее квадратическое отклонение всех измерений. Зная среднее квадратическое отклонение, я посчитал абсолютную погрешность $\Delta S_1 = \frac{S_1}{\sqrt{N}}$ (N – число событий) величины S_1 . Аналогично поступил с измерениями фототока. Все эти измерения являются прямыми. Теперь, зная S_1 среднее, S_2 среднее, ΔS_1 , ΔS_2 , можно посчитать абсолютную погрешность коэффициента усиления. Подробно:

Формула для коэффициента усиления: $G = \frac{S_1}{S_2}$.

Поскольку усиление считается с помощью, приведённой выше формулы, то это измерение является косвенным. Делаю 20 измерений с различными шагами, с подробными точками в низких значениях напряжения, величины S_1 , записываю все средние значения и среднее квадратические отклонения. Дальше, известно, что при неизменной интенсивности света фототок не меняется, но, тем не менее, из-за шумов и неоднородностей среды, значение S_2 могло колебаться, поэтому я сделал 10 измерений и взял среднее значение из полученных измерений за S_2 . Также измерил абсолютную погрешность ΔS_2 .

Формула для абсолютной погрешности коэффициента усиления:

$$\Delta G = \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial S_1} \Delta S_1\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial S_2} \Delta S_2\right)^2}$$

Частные производные: $\frac{\partial G}{\partial S_1} = \frac{1}{S_2}$, $\frac{\partial G}{\partial S_2} = -\frac{S_1}{S_2^2}$

Окончательно: $\Delta G = \sqrt{\left(\frac{1}{S_2} \Delta S_1\right)^2 + \left(\frac{S_1}{S_2^2} \Delta S_2\right)^2}$

Относительная погрешность: $\delta G = \frac{\Delta G}{G}$

Относительная погрешность для большинства измерений примерно 0.005%. Однако есть точки, в которых относительная погрешность составляет 3.81%, 6.47%, 1.8%, 2.81%, 0.76%, 0.24%. Именно этих точек абсолютная погрешность отчетливо видно на графике. При изменении напряжения источнику требуется время из-за инерционности прибора, следовательно, нужно было подождать секунд 6-7 и начинать измерения с новой гистограммой, что не было сделано именно для этих точек во время измерений.

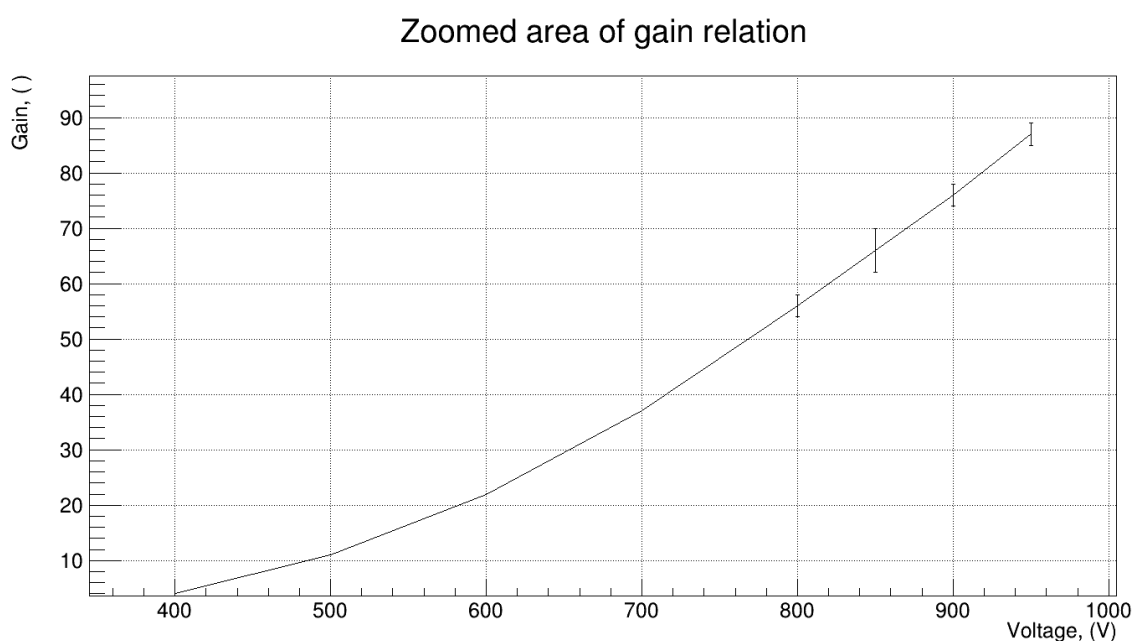


Рис. 5 График зависимости коэффициента усиления гибридного фотодетектора от ускоряющего напряжения в диапазоне от 400 В до 1000 В.

На рис. 6 приведён график зависимости усиления от напряжения при меньшей интенсивности (светодиод с амплитудой 4 В.). Примечателен тот факт, что при меньшей интенсивности усиление оказывается чуть больше. Относительная погрешность для большинства измерений равно 0.01%, для некоторых 5.89%, 5,88% и т. д.

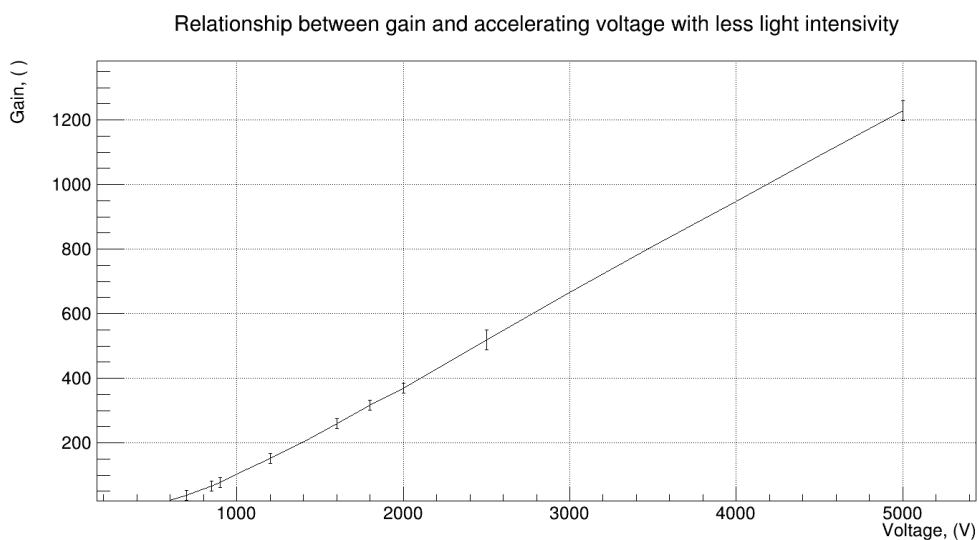


Рис. 6 График зависимости коэффициента усиления гибридного фотодетектора от ускоряющего напряжения с меньшей интенсивности светодиода

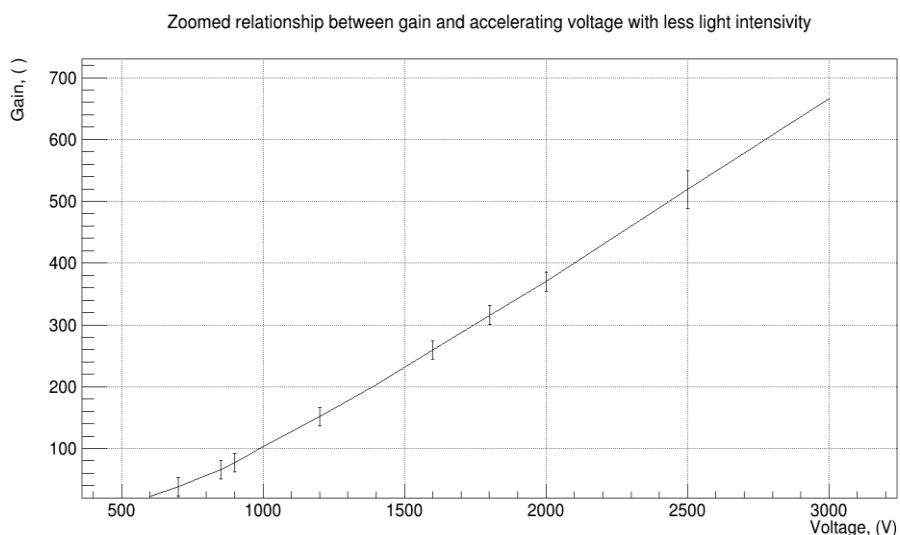


Рис 7. График зависимости коэффициента усиления гибридного фотодетектора от ускоряющего напряжения с меньшей интенсивности светодиода в диапазоне от 500 В до 3000 В.

Аппроксимация по двум точкам (Рис. 6) 2000 В – 370, 5000 В – 1229.

$$1229 = A * 5000 + B$$

$$370 = A * 2000 + B$$

Решение системы даёт: $A = 0,29$, $B = -202,6$.

Анализ экспериментальных данных

Полученный график (Рис 1.) с высокой точностью коррелирует с паспортом гибридного фотодетектора. Видно, что, начиная с некоторого значения напряжения, зависимость является линейной. Иными словами, усиление прямо пропорционально напряжению, приложенному фотокатоду. Так и должно быть согласно теории [4]. Диод внутри гибридного фотодетектора генерирует электрон-дырочные пары за столкновение около 3,62 эВ. Таким образом, можно выразить коэффициент усиления, используя разность потенциалов между фотокатодом и диодом, который и есть напряжение, приложенное фотокатоду, и порогового напряжения, которое определяется самим диодом

$$G = \frac{U_{\text{фотокатод}} - U_{\text{пороговое}}}{3.6}$$

Однако при низких напряжениях наблюдается нелинейность. Здесь наблюдается потеря энергии при бомбардировке из-за нечувствительного поверхностного слоя в диоде. Исследования показали [6], что тем тоньше слой, тем выше располагается график зависимости. То есть, в зависимости от толщины “мёртвого слоя” (dead layer), мы получаем семейство кривых, смещаемые по вертикали. Таким образом, уменьшая толщину слоя, мы уменьшаем энергию, потерянную в ней, и, следовательно, увеличиваем энергетический диапазон для ускоренных электронов. Пороговое напряжение и есть напряжение, при котором происходит переход от нелинейной зависимости к линейной.

Вычислим среднюю энергию w для образования одной пары электрон-дырки и пороговое напряжение для рис. 6. Параметры для линейной функции были вычислены выше А и В. Используем вышеприведённую формулу.

$$1/w = 0,29 \Rightarrow w = 3,44 \text{ эВ}$$

$$-\frac{U_{\text{пороговое}}}{3,44} = -202,6 \Rightarrow U_{\text{пороговое}} = 696.9 \text{ В.}$$

Для высокой точности можно аппроксимировать график линейной функцией.

Выводы

В ходе выполнения работы я ознакомился с явлениями фотоэффекта и ударной ионизации. Были изучены подробно конструкции фотодатчиков. Был изучен основной прибор в работе – гибридный фотодетектор. Разработан алгоритм расчета коэффициента усиления гибридного фотодетектора от рабочего напряжения. Из полученных графиков можно качественно проанализировать явления внутри гибридного фотодетектора, аппроксимировать график линейной функцией, и вычислить пороговое напряжение, при котором происходит переход от нелинейной зависимости к линейной, и вычислить среднюю энергию образования одной пары электрон-дырки.

Список литературы

1. Photomultiplier Tubes. Basics and applications. Chapter 14. Applications /Hamamatsu Photonics K.K. – 3rd edition (edition 3a)
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier_tube
3. Photomultiplier Tubes. Basics and applications. Chapter 11. Hybrid Photo Detector/Hamamatsu Photonics K.K. – 3rd edition (edition 3a)
4. Вакуумные фотоэлектронные приборы/А. Г. Берковский, В. А. Гаванин, И. Н. Зайдель. – 2-е изд., перераб, и доп. – М.; Радио и связь, 1988. – 272с.: ил.
5. <https://root.cern/>
6. Development of a multi-pixel hybrid photo-detector with high quantum efficiency and gain/M. Suyama, A. Fukasawa, J. Haba, T. Iijima, M. Sakuda, T. Sumiyoshi, F. Takasaki, M. Tanaka, T. Tsuboyama, Y. Yamada. Belle Preprint 2004-7, KEK Preprint 2003-134.