

Измерение спектра квантовой эффективности полупроводникового фотокатода на основе арсенида галлия

Ильин Иван Евгеньевич

Физический факультет. Практикум по физической оптике. Курсовая работа.

Группа №17345, 4 семестр, 2019.

Научный руководитель :

д.ф.-м.н. **Терехов Александр Сергеевич**

Аннотация

В данной работе был изучен принцип работы полупроводникового фотодетектора на примере арсенид галлиевого фотокатода. Главной целью исследования было получение спектра квантовой эффективности, который позволяет установить применимость и оценить эффективность фотокатода для большого спектра излучения. Путём калибровки кремниевым фотодиодом можно очень точно измерить квантовую эффективность. Высокая точность измерения достигается за счет надежности кремниевого фотодиода, который долго сохраняет свои заводские параметры.

Нами было получено, что квантовая эффективность с хорошей точностью не зависит от длины волны при $\lambda \in [560, 900]$ нм. Начиная с 900 нм наблюдается резкий спад квантовой эффективности, связанный с тем, что при больших длинах волн энергии падающего кванта света не хватает для преодоления работы выхода и все электроны остаются в зоне Ферми. То есть электронов проводимости не возникает.

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Ильин Иван Евгеньевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение спектра квантовой эффективности полупроводникового
фотокаатода на основе арсенида галлия**

Практикум по физической оптике, 2 курс, группа №17345

Научный руководитель:

д.ф.-м.н. Терехов Александр Сергеевич

Оценка научного руководителя

« ____ » _____ 20 ____ г.

Преподаватель практикума:

д.ф.-м.н Краснопевцев Спартак Евгеньевич

Оценка преподавателя практикума

« ____ » _____ 20 ____ г.

Куратор практикума:

д.ф.-м.н Маслов Николай Анатольевич

Итоговая оценка

« ____ » _____ 20 ____ г.

Рекомендуется к публикации в сборнике избранных курсовых работ

Научный руководитель

Преподаватель практикума

Куратор практикума

Содержание

1	Введение	4
2	Принцип работы фотокатода	5
3	Методика измерения	6
4	Эксперимент	10
5	Заключение	12
	Список используемой литературы	12

1 Введение

Фотокатод - это прибор, работающий с использованием внешнего фотоэффекта. Внешним фотоэффектом или электронной эмиссией называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения (необязательно светового). Эмитированные из вещества электроны называется фотоэлектронами, а упорядоченное движение фотоэлектронов называется фототоком. Важной характеристикой фотокатода является его **квантовая эффективность**, равная числу эмитированных электронов на один фотон. Подробно о характеристиках фотокатодов и их устройстве написано в книге Р. Л. Белла [1]. В данной работе используется арсенид-галлиевый фотокатод **GaAs**, охватывающий спектральный диапазон от 560 до 1016 нм. Измерению квантовой эффективности этого прибора посвящена данная работа.

Фотокатоды применяются во многих областях науки, военной промышленности и медицине. Арсенид-галлиевый фотокатод, исследуемый в данной работе, позволяет делать сверхчувствительные датчики и камеры ночного видения. Такие возможности фотокатодов неожиданно нашли применение в медицине при исследованиях болезней мозга. Для того чтобы узнать, почему мозг с возрастом начинает деградировать, нужно понять принцип его работы. Оказывается, что во время мыслительных процессов внутри мозга происходят небольшие свечения и для их фиксации нужны самые чувствительные приборы в мире.

В книге Aspnes [3] подробно написано о арсенид-галлиевых фотокатодах и области их применения.



Рис. 1: Защита вертолётa тепловыми ловушками

Также фотокатод используется в военной промышленности для обнаружения снарядов. Когда ракета летит в танк или вертолёт, она даёт слабое инфракрасное излучение, которое может фиксироваться фотокатодом. При обнаружении снаряда вертолёт или танк выпускает тепловые ловушки, отвлекающие ракету на себя (рис. 1).

Арсенид-галлиевые фотокатоды, исследуемые в данной работе, считаются самыми чувствительными в мире. Также они способны фиксировать фотоны с спиновой поляризацией, что делает их незаменимыми во многих областях.

Институт полупроводников Новосибирского Академгородка имеет технологию изготовления приборов, способных воспринимать отдельные фотоны. Именно поэтому исследование фотокатода и увеличение его квантовой эффективности очень полезная и важная задача.

2 Принцип работы фотокатода

Внешним фотоэффектом (фотоэмиссией) называется испускание веществом электрона под воздействием электромагнитного излучения (рис. 2). Электроны, вылетающие из вещества при внешнем фотоэффекте, называются фотоэлектронами. В 1905 году А. Эйнштейн объяснил явление внешнего фотоэффекта [2].

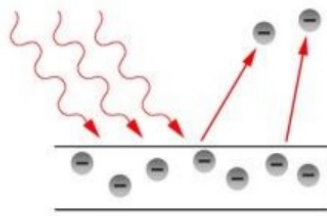


Рис. 2: Фотоэмиссия электронов под воздействием электромагнитного излучения

Из закона сохранения энергии при представлении света в виде частиц (фотонов), следует формула Эйнштейна для фотоэффекта:

$$\left(\frac{1}{2}mV^2\right)_{max} = h\nu - \chi$$

где $(\frac{1}{2}mV^2)_{max}$ - максимальная кинетическая энергия электрона, преодолевшего потенциальный порог выхода, $h\nu$ - энергия падающего кванта, χ - характеристика твердого тела, определяющая красную границу фотоэффекта и называемая работой выхода.

Красная граница фотоэффекта – минимальная частота света, при которой возможен внешний фотоэффект, то есть конечная кинетическая энергия фотоэлектронов больше нуля.

После того, как электрон покинул жесткую связь в решётке, он способен стать электроном проводимости. Для фиксации тока остаётся только приложить напряжение между концами полупроводникового прибора.

3 Методика измерения

Схема установки представлена на (рис. 3). Источник света (лампа КГМ) создаёт излучение, охватывая весь видимый спектр частот. Свет, проходя через конденсор (систему из нескольких линз для фокусировки пучка), проходит через заслонки и фильтры, попадая в монохроматор МДР-23.

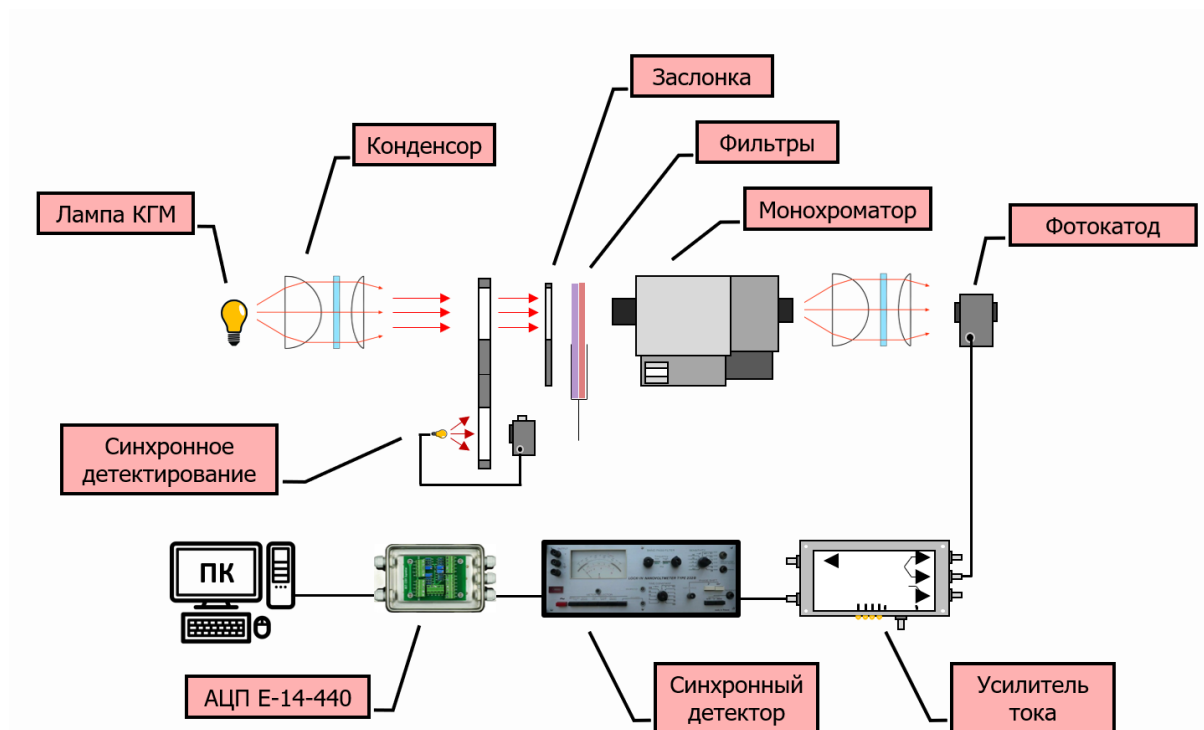


Рис. 3: Схема установки

Для удаления высших порядков спектра, попадающих в рабочую область, служат светофильтры (рис. 4).

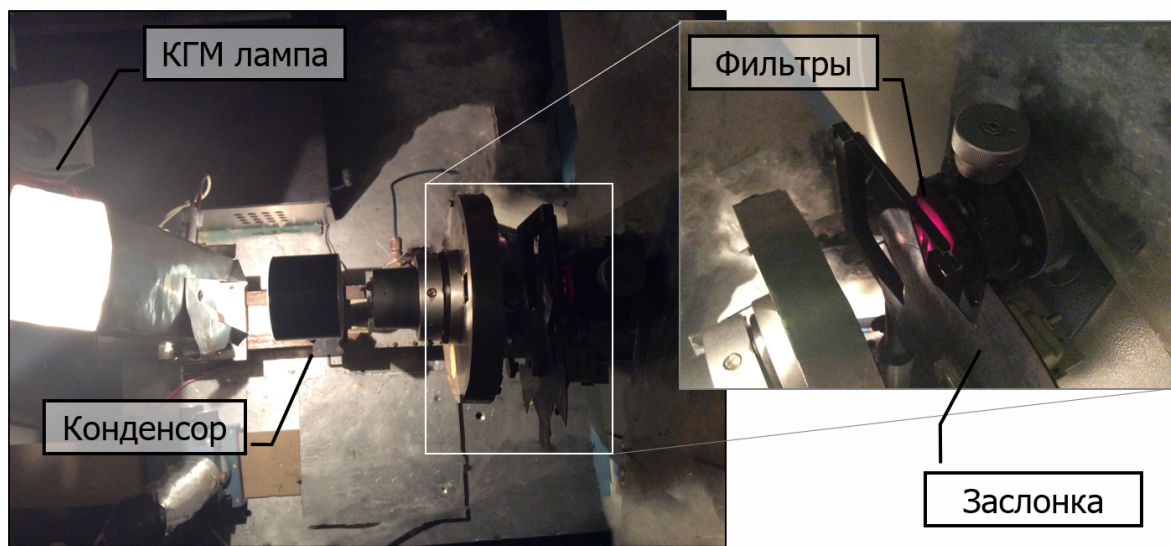


Рис. 4: Экспериментальная установка, вид сверху.

В монохроматоре МДР-23 происходит Фурье преобразование (разложение пучка на спектр цветов) (рис. 5).

Источник света 1 через конденсор 2 освещает входную щель 3. Поворотное зеркало 4 и зеркальный сферический объектив 5, в фокальной плоскости которого расположена входная щель, направляют параллельный пучок на дифракционную решётку 6, которая может поворачиваться вокруг вертикальной оси с помощью шагового двигателя, вырезая излучение в требуемом диапазоне длин волн.

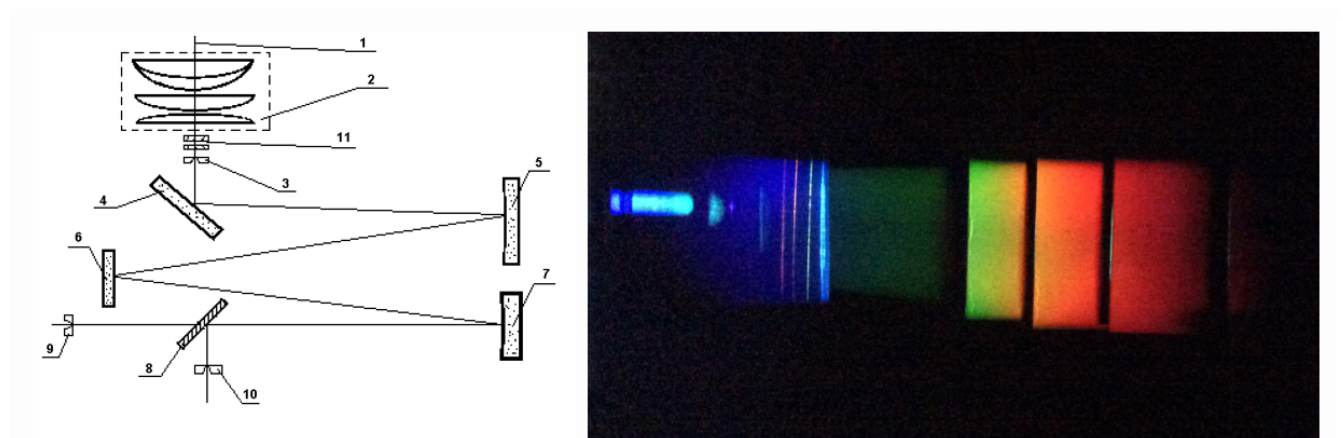


Рис. 5: Устройство монохроматора МДР-23. Внутри происходит разложение пучка в спектр

После дифракции параллельный пучок лучей фокусируется зеркальным сферическим объективом 7 на входную щель. В зависимости от положения поворотного зеркала 8 пучок света попадает на выходные щели: либо на щель 9, либо на щель 10, за которыми могут находиться фотоэлектронные умножители для разных диапазонов длин волн. В случае необходимости использования одновременно обеих выходных щелей в пучок вводится зеркало, срезанное по высоте.

То есть монохроматор даёт возможность выделять излучение заданной длины волны.

Из МДР-23 выходит монохроматический пучок света и фокусируется на изучаемый арсенид-галлиевый фотокатод (рис. 6).



Рис. 6: Арсенид-галлиевый фотокатод, исследуемый в данной работе

Фототок, возникающий в результате фотоэффекта, очень слабый и поэтому требуется его усиление для дальнейшего преобразования АЦП. Выход усилителя попадает в синхронный детектор, где происходит калибровка и усиление сигнала (когда света нет в фотокатоде может возникать теневой ток - малый электрический ток, который протекает через фотоэлектронный умножитель при отсутствии поглощенных фотонов. Синхронный детектор выполняет калибровку и минимизирует влияние теневого тока).

После усиления и калибровки сигнала происходит его преобразование в АЦП и обработка персональным компьютером. Для изменения измеряемого спектра и

хранения результатов экспериментов используется программа "Измерение спектра 218МЗ"(рис. 7).

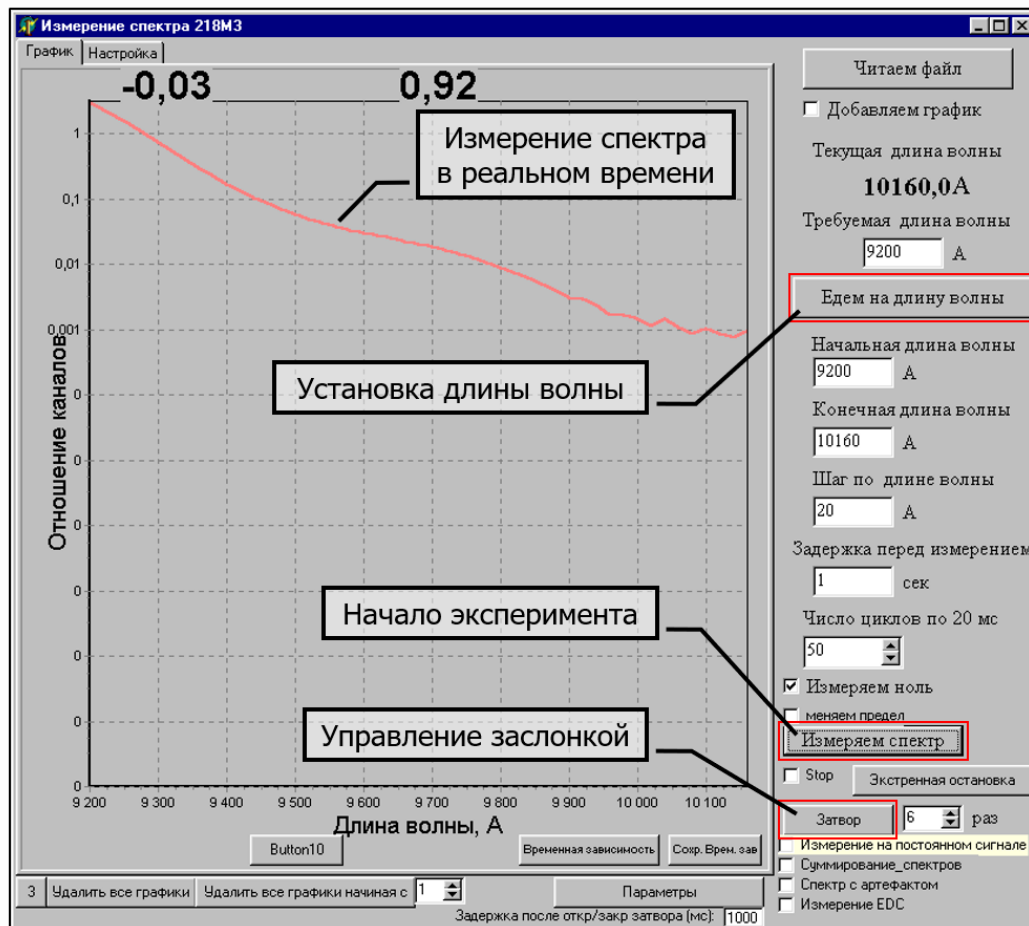


Рис. 7: Окно программы 'Измерение спектра 218МЗ'

Цель нашего эксперимента будет измерение квантовой эффективности арсенид-галлиевого фотокатода для разных длин волн (спектр квантовой эффективности).

Мы не можем напрямую измерить квантовую эффективность. Для получения спектра мы будем пользоваться следующей техникой: сначала измерим зависимость фототока от длины волны для прибора с известным спектром квантовой эффективности (в нашем случае это кремниевый фотодиод). После этого проделываем аналогичную процедуру для исследуемого прибора (арсенид-галлиевый фотокатод).

В итоге получается два графика зависимости фототока от длины волны. Если второй график поделить на первый, то получим график зависимости от-

ношения квантовой эффективности исследуемого фотокатода к квантовой эффективности эталонного от длины волны. Теперь умножаем полученный график на известный спектр квантовой эффективности кремниевого фотодиода и получаем спектр квантовой эффективности арсенид-галлиевого фотокатода.

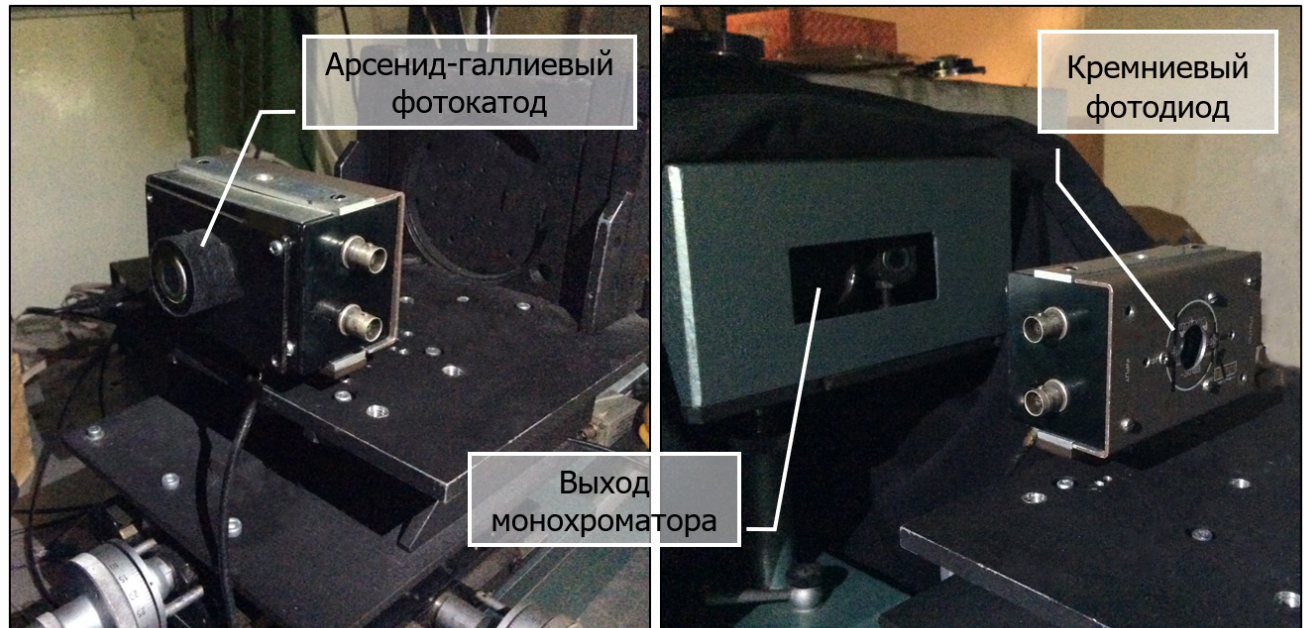


Рис. 8: Штатив для фотокатодов (вращением выбирается нужный прибор)

4 Эксперимент

Для более точного измерения фототока эксперимент проводился при с различными фильтрами и разных коэффициентах усиления тока. Диапазон исследования был $\lambda \in [560, 1016]$ нм. Этот диапазон разбивался на 4 части и в каждой из этих частей проводился эксперимент (рис. 9).

После этого спектр нужно сшить с учётом разных коэффициентов усиления и только после этого получается готовый спектр.

Результат сшивки диапазонов для кремниевого фотодиода и арсенид-галлиевого фотокатода представлены на (рис. 10).

Кремниевый фотодиод

Начальная длина волны [nm]	Конечная длина волны [nm]	Фильтры	Коэффициент усиления тока
560	770	GaP	10^7
750	998	GaP + KC18	10^7
850	1016	GaP + RG850	10^7
920	1016	АГП + RG850	10^7

Арсенид-галлиевый фотодиод

Начальная длина волны [nm]	Конечная длина волны [nm]	Фильтры	Коэффициент усиления тока
560	770	GaP	10^7
750	998	GaP + KC18	10^8
850	1016	GaP + RG850	10^8
920	1016	АГП + RG850	10^{10}

Рис. 9: Параметры, при которых проводились эксперименты.

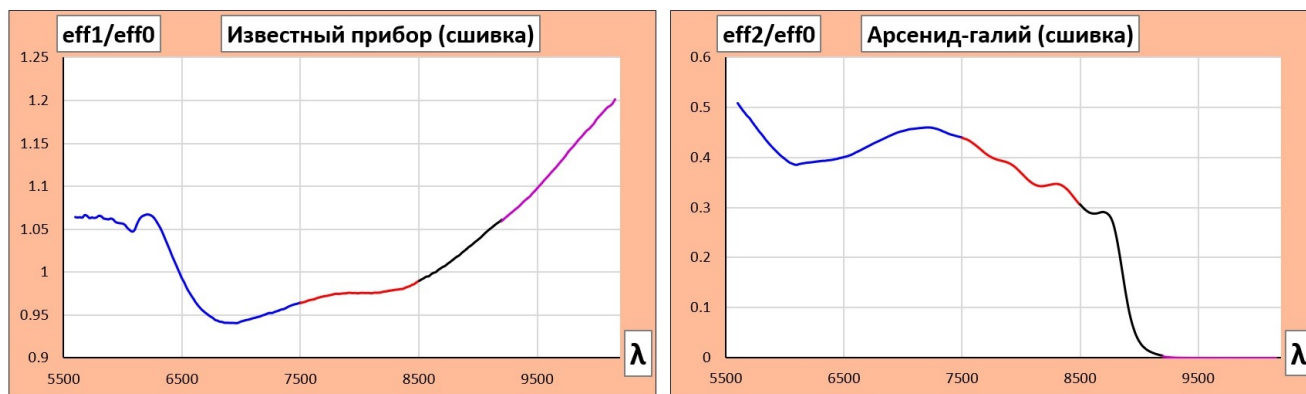


Рис. 10: Графики зависимости отношения квантовой эффективности

После деление одного спектра на другой получаем спектр квантовой эффективности арсенид-галлиевого фотокатода (рис. 11).

Видно, что при длине волны от 550 до 900 нм квантовая эффективность фотокатода практически постоянна. Резкое снижение квантовой эффективности при больших длинах волн вызвано тем, что энергии кванта, падающего на поверхность не хватает для выбивания электрона из решётки.

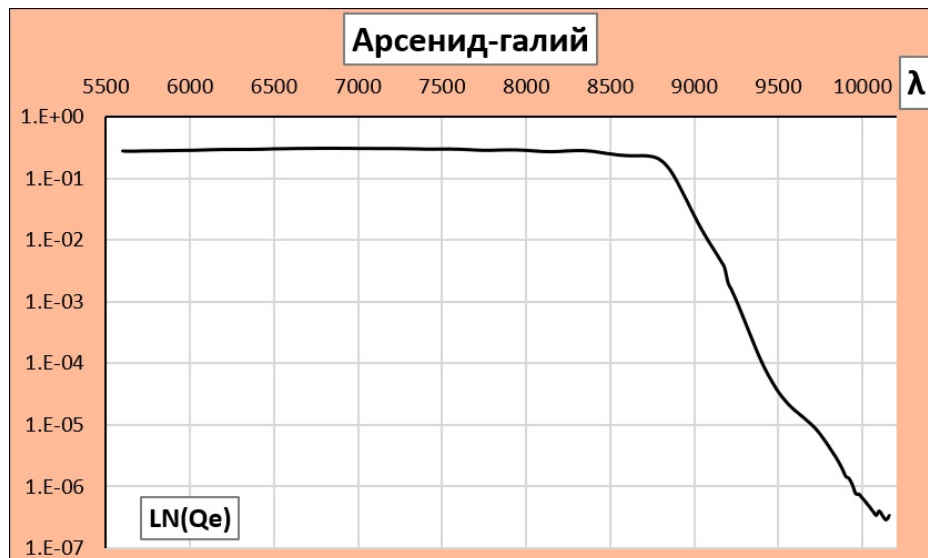


Рис. 11: Спектр квантовой эффективности арсенид-галлиевого фотокатода (логарифмический масштаб)

Действительно, энергия падающего кванта $E = h\nu = \frac{h}{T} = \frac{hc}{\lambda}$

При $\lambda > 900\text{нм}$ работа выхода $\chi > \frac{hc}{\lambda}$ и электронов проводимости не возникает.

5 Заключение

Нами был изучен принцип работы полупроводникового фотодетектора на примере арсенид галлиевого фотокатода. Главной целью исследования было получение спектра квантовой эффективности, который позволяет установить применимость и оценить эффективность фотокатода для большого спектра излучения. Путём калибровки кремниевым фотодиодом можно очень точно измерить квантовую эффективность. Высокая точность измерения достигается за счет надежности кремниевого фотодиода, который долго сохраняет свои заводские параметры.

Было получено, что квантовая эффективность с хорошей точностью не зависит от длины волны при $\lambda \in [560, 900]\text{нм}$. Начиная с 900нм наблюдается резкий спад квантовой эффективности, связанный с тем, что при больших длинах волн энергии падающего кванта света не хватает для преодоления работы выхода и все электроны остаются в зоне Ферми. То есть электронов проводимости не возникает.

Список литературы

- [1] Белл Р.Л. Эмиттеры с отрицательным электронным сродством. М.: Энергия, 1978. 192 с.
- [2] . Einstein A. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt // Annalen der Physik. 1905. Т. 322. № 6. — С. 132-148.
- [3] Aspnes, D. E., Kelso, S. M., Logan, R. A., Bhat, R. (1986). Optical properties of $Al_xGa_{1-x}As$. Journal of applied physics, 60(2), 754-767.