



---

**Лабораторная работа №27**  
**Исследование характеристик ПЗС фотоматрицы**

---

**Студент:**  
Исламов Сардор  
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау  
Московский Физико-Технический Институт

12 декабря 2023 г.

**Аннотация.** В ходе работы были исследованы аппаратная функции прибора на базе ПЗС-камеры и возможности его использования для регистрации различных оптических сигналов.

## Теоретическое введение

**Полупроводниковые ПЗС фотоматрицы.** Основная идея ПЗС (приборов с зарядовой связью) состоит в накоплении зарядов в конденсаторах с МОП (метал-окисел-полупроводник) структурой и передаче накопленных зарядов к устройству, измеряющему величину каждого из них. Передача накопленных зарядов осуществляется по цепочке таких же МОП-конденсаторов под действием специальных электрических управляющих импульсов. Накопленный заряд линейно пропорционален числу фотонов, попавших на светочувствительный элемент. Таким образом, распределение зарядов, накопленных в ячейках ПЗС-матрицы, пропорционально распределению освещенности спроецированного изображения, так что, измеряя накопленный в каждой из ячеек заряд, мы получаем двумерный числовой массив, определяющий измеряемое распределение освещенности  $E(x,y)$ .

Рассмотрим устройство работы МОП: На рис. 1 изображена МОП-емкость, сформированная на полупроводнике  $p$ -типа ( $p$ -тип рассматривается как пример, все рассуждения применимы и к полупроводнику  $n$ -типа с соответствующими изменениями знаков). Состоит МОП-емкость из электрода (4), который может быть изготовлен из металла или сильно легированного поликремния, диэлектрика (3) и полупроводниковой подложки (1). Для придания зарядам направления движения вдоль регистра с обеих сторон канала переноса создают стоп-каналы (2) – области, легированные более сильно, чем кремний в самом канале переноса. Потенциальная яма в стоп-канале не возникает, и пакет зарядов не расплывается. Сразу же после приложения напряжения основные носители очень быстро (за единицы пикосекунд) уходят от поверхности, образуется приповерхностный обедненный слой и потенциальную яму у поверхности электрода (5).

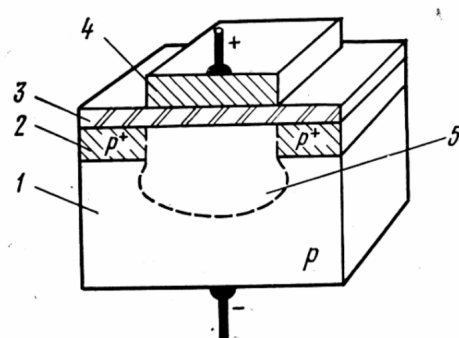


Рис. 1: Схема установки

Если ПЗС осветить, то поглощаемые в полупроводнике фотоны вызывают генерацию электронно-дырочных пар. В обедненном слое под действием электрического поля эти пары разделяются: электроны локализуются в потенциальных ямах, а дырки выносятся в нейтральную область полупроводника. Величина зарядового пакета, накапливаемого в каждом элементе, как мы уже говорили, пропорциональна усредненному по площади фоточувствительного элемента потоку фотонов, времени накопления и квантовой эффективности.

**Аппаратная функция.** Большинство измерительно-регистрирующих систем конструируются так, чтобы в пределах того динамического диапазона, на который они рассчитаны, эти системы были бы системами линейными. Введем некоторые важные понятия для таких систем: входной сигнал  $f_{in}$  называется воздействием, а выходной  $f_{out}$ . Примерами входного сигнала являются:

$$\delta(x) = \begin{cases} \infty, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases} \quad - \text{единичный импульс, т.ч. } \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx = 1;$$

$$\chi(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad - \text{край освещенного поля.}$$

Отклик системы на единичный импульс называется импульсной реакцией (в оптике - аппаратной функцией) и обозначается  $g(x)$ . Отклик системы на единичную функцию называется переходной функцией и обозначается  $h(x)$ . Также нам известна связь между  $\delta(x)$ ,  $\chi(x)$ ,  $g(x)$ ,  $h(x)$ :

$$\delta(x) = \frac{d}{dx}\chi(x); \quad (1)$$

$$g(x) = \frac{d}{dx}h(x). \quad (2)$$

Амплитудно-частотной характеристикой называется функция  $K(\omega)$ , которая связывает входные и выходные функции  $f_{out} = K(\omega)f_{in}$ . При этом аппаратная функция и коэффициент передачи связаны парой Фурье преобразований:

$$K(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x)e^{-i\omega x}dx \quad (3)$$

$$g(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} K(\omega)e^{i\omega x}dx. \quad (4)$$

В случае, если аппаратная функция симметрична относительно своего максимума, коэффициент передачи строго адекватен частотно-контрастной характеристике (ЧКХ), которая экспериментально определяется по максимальным и минимальным значениям освещенности в выходном изображении ( $E_{max}$  и  $E_{min}$  соответственно) при подаче на вход периодической структуры, освещенность, в которой изменяется по синусоидальному закону:

$$K(\omega) = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \quad (5)$$

## Экспериментальная установка

Блок-схема устройства, позволяющего измерить перечисленные выше параметры ПЗС-фотоматрицы, приведена на рис. 2. Элементы установки описаны ниже.

- 1 – световой источник;
- 2 – светофильтры и матовые пластинки;
- 3 – тестовые объекты (цель или мира);
- 4, 5 – объективы;
- 6 – ПЗС фотоматрица;
- 7 – БП ПЗС;
- 8 – ПК;
- 9 – монитор.

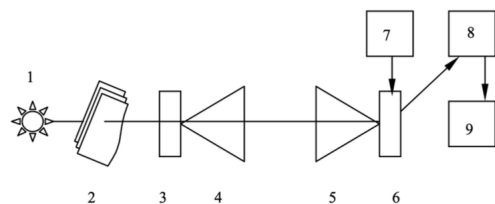


Рис. 2: Блок-схема исследования параметров ПЗС

## Методы измерений и обработка данных

В ходе работы, после калибровки установки, были сохранены 7 изображений щели с шириной от 10 до 70 мкм. Каждый из снимков был обработан: выделена его основная часть и построен график распределения интенсивности по ширине щели с учетом паразитной засветки.

По полученным результатам была получена зависимость ширины пика на полувысоте от ширины щели (рис. 3). Как видно, линейная зависимость нарушается при ширине щели, меньшей 60 мкм, соответственно, аппаратная функция соответствует  $\sim 60$  мкм.

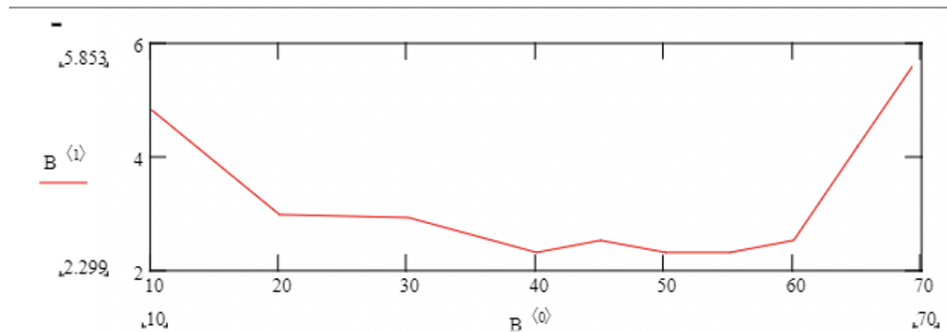


Рис. 3: Аппаратная функция прибора

После работы с щелью она была заменена на мир. Далее исследования с ней проводились аналогичным образом: были зафиксированы 5 изображений мира с разными расстояниями между штрихами и построены распределения интенсивности по щели. Обработав и усреднив данные, была получена зависимость видности для каждой пары по формуле (5). Полученная зависимость представлена на рис. 4. Синм

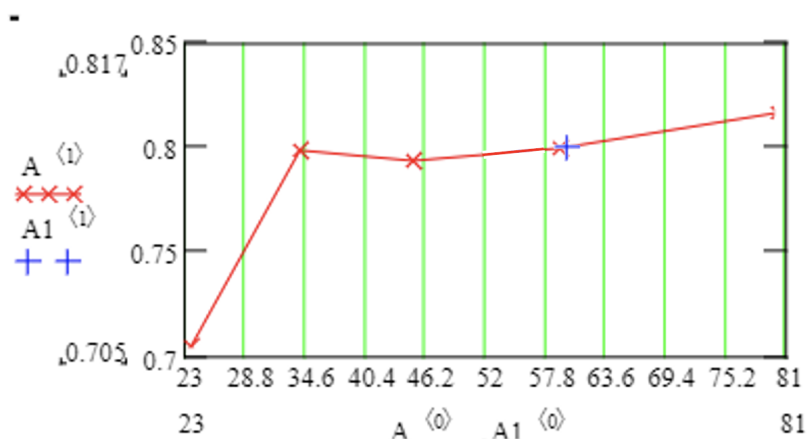


Рис. 4: Видность для пары

## Вывод

В ходе эксперимента была вычислена и изучена аппаратная функция ПЗС-камеры. С помощью распределений интенсивности для разных размеров щели аппаратная функция была получена как распределение интенсивности для щели и равна 60 мкм. Также из изображений мира была получена зависимость видности от расстояния между штрихами мира.