

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОРЕЗИСТОРОВ

К основным характеристикам фоторезисторов можно отнести вольт-амперную, световую (или люкс-амперную) и спектральную характеристики.

*Вольт – амперная (ВАХ)* представляет собой зависимость светового тока  $I_{св}$  при неизменном световом потоке, а также темнового тока  $I_{тем}$  от приложенного к фоторезистору напряжения. В рабочем диапазоне напряжения ВАХ фоторезисторов при различных значениях светового потока практически линейны. Однако у большинства плёночных фоторезисторов с фоточувствительным слоем из поликристаллического полупроводникового материала линейность ВАХ нарушается при малых напряжениях. Эта нелинейность связана с явлениями на контактах между отдельными зёрнами или кристаллами полупроводника. При малых напряжениях сопротивление фоторезистора определяется в основном сопротивлением этих контактов. Напряжение, приложенное к фоторезистору, падает в основном на контактах между зёрнами полупроводника. Поэтому напряжённость электрического поля на контактах получается большой даже при малых напряжениях на фоторезисторе. В связи с этим при увеличении приложенного напряжения сопротивление контактов уменьшается либо из-за эффектов сильного поля (например, туннелирование сквозь тонкие потенциальные барьеры на контактах), либо из-за разогрева приконтактных областей отдельных зёрен полупроводника. При дальнейшем увеличении напряжения сопротивление фоторезистора определяется уже объёмным сопротивлением зёрен полупроводника и поэтому остаётся постоянным, что соответствует линейному участку ВАХ [1].

При больших напряжениях на фоторезисторе ВАХ опять может отклоняться от линейной. Это связано с повышением температуры всего фоточувствительного слоя из-за большой выделяющейся мощности.

*Световая, или люкс – амперная, характеристика фоторезистора* представляет собой зависимость фототока  $I_{ф} = I_{св} - I_{тем}$  от освещённости или от падающего на фоторезистор светового потока. Фоторезисторы имеют обычно сублинейную световую характеристику. Сублинейность световой характеристики объясняется смещением демаркационных уровней, или квазиуровней Ферми, для электронов и для дырок с увеличением отклонения от равновесного состояния при увеличении освещённости. Электронный демаркационный уровень (квазиуровень Ферми для электронов) смещается к зоне проводимости в результате увеличения концентрации свободных электронов, дырочный демаркационный уровень (квазиуровень Ферми для дырок) одновременно смещается к валентной зоне из-за увеличения концентрации дырок. Вследствие смещения демаркационных уровней часть уровней ловушек захвата становится уровнями рекомбинационных ловушек. С ростом концентрации рекомбинационных ловушек уменьшается время жизни носителей заряда, что и является первой причиной сублинейности световой характеристики. Закономерности возрастания фототока от освещённости различны у различных фоторезисторов и определяются концентрацией тех или иных примесей в полупроводнике и распределением примесных уровней по запрещённой зоне энергетической диаграммы полупроводника:

Второй причиной, приводящей к сублинейности световой характеристики фоторезистора, является уменьшение подвижности носителей заряда при увеличении освещённости из-за увеличения концентрации ионизированных атомов в полупроводнике и, следовательно, из-за увеличения рассеяния носителей заряда ионизированными атомами.

*Спектральная характеристика фоторезистора* – это зависимость фототока от длины волны падающего на фоторезистор света. При больших длинах волн, т.е. при малых энергиях квантов света по сравнению с шириной запрещённой зоны полупроводника, энергия кванта оказывается недостаточной для переброса электрона из валентной зоны в зону проводимости. Поэтому для каждого полупроводника и соответственно для каждого фоторезистора существует пороговая длина волны (наибольшая), которую обычно определяют как длину волны, соответствующую спаду фототока на 50% со стороны больших длин волн.

При малых длинах волн с уменьшением длины волны падающего на фоторезистор света растёт показатель поглощения. Поэтому глубина проникновения квантов света в полупроводник уменьшается, т.е. основная часть неравновесных носителей заряда возникает вблизи освещаемой поверхности фоточувствительного слоя. При этом увеличивается роль поверхностной рекомбинации и уменьшается среднее время жизни неравновесных носителей. Таким образом, спектральная характеристика имеет спад и при малых длинах волн.

Различные полупроводники имеют ширину запрещённой зоны от десятых долей до 3 эВ. Максимум спектральной характеристики различных фоторезисторов может находиться в инфракрасной, видимой, или ультрафиолетовой частях электромагнитного спектра [2].

Для определения основных характеристик фоторезистора СФ-БЗ была собрана установка, состоящая из источника постоянного тока (ИПТ); магазина сопротивлений; осветительной лампы; фоторезистора; амперметра; люксметра; автотрансформатора.

С помощью данной установки были измерены вольтамперная, световая и спектральная характеристики фоторезистора СФ-БЗ.

Для измерения вольтамперной характеристики фоторезистора устанавливаем на магазине сопротивлений значение  $R = 2 \text{ кОм}$  и с помощью люксметра значение освещённости  $E = 200 \text{ лк}$ . Изменяя с помощью источника постоянного тока (ИПТ) напряжение  $U$  от 0 до 1,4 В через 0,2 В на участке цепи, состоящем из сопротивления  $R$  и фоторезистора, измеряем при каждом значении  $U$  силу тока в цепи  $I$ . Используя полученные данные, строим график зависимости  $I(U)$ , т.е. вольт-амперную характеристику нелинейного участка цепи (ВАХ). Убеждаемся, что в рабочем диапазоне напряжения ВАХ фоторезисторов при различных значениях светового потока практически линейны.

*Получение световой характеристики исследуемого фоторезистора*

Устанавливаем на магазине сопротивлений значение  $R = 0 \text{ Ом}$ . С помощью источника постоянного тока устанавливаем напряжение на фоторезисторе  $U = 0,5 \text{ В}$ . С помощью авто-трансформатора изменяем освещённость от 0 до 500 лк с шагом 50 лк, измеряя при каждом значении освещённости  $E$  силу тока  $I_{\phi}$  ( $U_{\phi} = \text{const}$ ). Строим график зависимости  $I_{\phi}(E)$  (рисунок 1). Те же измерения проводим при значении напряжения 1 В.

*Строим график зависимости  $I_{\phi}(E)$*

$U = 0,5 \text{ В}$

$E, \text{ лк}$	0	100	150	200	250	300	350	400	450	500
$I, \text{ мА}$	0	90	120	140	160	175	190	215	215	225

$$U = 1 \text{ В}$$

Е, лк	0	100	150	200	250	300	350	400	450	500
I, мА	0	98	130	175	190	210	225	240	255	265

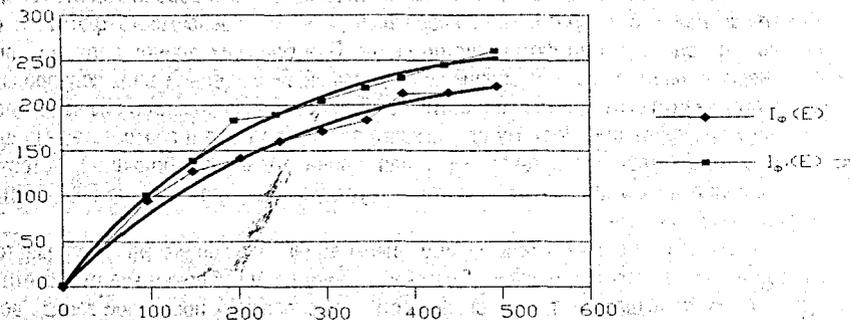


Рисунок 1 – Световая характеристика фоторезистора СФ-Б3

### Получение спектральной характеристики фоторезистора

Устанавливаем на магазине сопротивлений значение  $R = 0 \text{ Ом}$ . С помощью источника постоянного тока (ИПТ) устанавливаем напряжение на фоторезисторе  $U = 0,4 \text{ В}$ . Изменяя с помощью светофильтров длину волны света от  $\lambda_{\text{ф}}$  до  $\lambda_{\text{кф}}$ , измеряем при каждом значении длины волны  $\lambda$  силу тока  $I$  и освещенность  $E$ . Строим график зависимости фототока от длины волны падающего на фоторезистор света  $I(\lambda)$ . Для построения спектральной характеристики фоторезистора на графике зависимости  $I(\lambda)$  строим график зависимости освещенности  $E$  от длины волны  $\lambda$  ( $E(\lambda)$ ), а затем делим ординаты первой кривой на соответствующие ординаты второй кривой. Результирующая кривая  $I/E(\lambda)$  и будет являться спектральной характеристикой фоторезистора (рисунок 2)

Свет	$\lambda$ , мкм	Е, лк	I, мА	$I/E$ , мА/лк
фиолетовый	400	30	190	6,3
синий	490	110	250	0,27
зеленый	600	70	5	0,07
желтый	650	400	260	0,65
оранжевый	690	300	265	0,88
красный	760	150	245	1,76

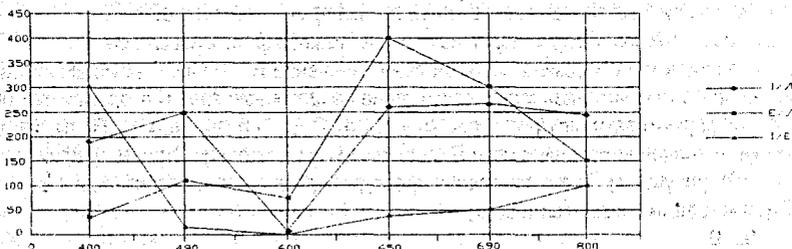


Рисунок 2 – Спектральная характеристика фоторезистора СФ-Б3

Световая характеристика получена для двух значений напряжения. Мы убедились в сублинейности световой характеристики, т.к. при увеличении освещённости увеличивается рост концентрации рекомбинационных ловушек и уменьшается время жизни носителей заряда, а также подвижность носителей заряда. При увеличении напряжения фототок возрастает. Спектральная характеристика фоторезистора исследована для пяти различных длин волн. При малых длинах волн с уменьшением длины волны падающего на фоторезистор света растёт показатель поглощения. Поэтому глубина проникновения квантов света в полупроводник уменьшается, т.е. основная часть неравновесных носителей заряда возникает вблизи освещаемой поверхности фоточувствительного слоя. При этом увеличивается роль поверхностной рекомбинации и уменьшается среднее время жизни неравновесных носителей. Таким образом, спектральная характеристика спектральной характеристика имеет спад при длине волны 490 и 600 нм. Максимум спектральной чувствительности для исследуемого фоторезистора лежит в пределах 650 нм.

С нашей точки зрения, проведенные исследования основных характеристик фоторезистора способствует более глубокому пониманию физических основ работы прибора, активизируют познавательную деятельность, развивают творческое и инженерное мышление будущих специалистов.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Епифанов, Г.И. Физика твёрдого тела. – М.: Высшая школа, 1977. – С. 168-173.
2. Пасынков, В.В. Полупроводниковые приборы / В.В. Пасынков, В.В. Чиркин. – М.: Высшая школа, 1987. – С. 378-393.

УДК 004.896

*Дунец И.П.*

*Научный руководитель: д.т.н., профессор Головкин В.А.*

## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ МИРА МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

### ВВЕДЕНИЕ

В современной робототехнике высокую актуальность имеет проблема восприятия роботом окружающего мира с целью выделения и обработки им той части данных, которая имеет непосредственную ценность для его эффективного функционирования. Этот процесс невозможен без фильтрации, обработки и хранения роботом данных, получаемых из окружающей среды через его сенсоры. Результатом работы этого процесса являются объекты, отражающие представление робота об окружающем мире и формирующие модель мира робота. Несмотря на существенную разницу между различными типами роботов и большое количество способов организации их систем сенсорики, можно выделить ту общую часть, которая будет присуща именно мобильным роботам – отражение в модели мира возможных или невозможных для движения областей.

### ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМНЫЕ ОБЛАСТИ ЗАДАЧИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ МИРА

Эта задача включает в себя множество проблемных областей, основными и наиболее актуальными являются:

- 1) глобальное позиционирование робота;