

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОПРИЕМНИКОВ (ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЙ, ФОТОДИОДОВ, СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ДРУГИХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ)

Цель работы: изучить распределение спектральной чувствительности различных фотоприемников и на основе вида спектральных характеристик дать примерную энергетическую структуру фотоприемника.

Приборы и оборудование, используемые в работе:

1. Монохроматор ИКС-21.
2. Двухкоординатный самописец ЛКД4-003.
3. Селективный усилитель фототока У2-8М.
4. Модулятор.
5. Блок питания источника света.
6. Координатный столик.
7. Эталонные фотоприемники: солнечный элемент большого размера с синей поверхностью и меньший с квадратной освещаемой поверхностью серого цвета.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПРИЕМНИКОВ

Фотоприемники осуществляют преобразование световой энергии в электрическую. По результату взаимодействия фотона излучения с атомами кристалла различают фотоприемники с внешним фотоэффектом (фотоэмиссионные индикаторы, ФЭУ) и фотоприемники с внутренним фотоэффектом, которые мы будем рассматривать в данной работе. Фотоприемники с внутренним фотоэффектом получили наибольшее распространение, так как они обладают целым рядом преимуществ: простота реализации, универсальность, возможность микроминиатюризации и интеграции. Внутренний фотоэффект позволяет создавать фотоприемники с большим внутренним усилением фототока (фоторезисторы, лавинные фотодиоды), реализовывать большое быстродействие (р-і-n-диоды, диоды Шоттки), сопрягать с фотодетектором усилительные и ключевые элементы (фототранзисторы и фототиристоры).

Параметры фотоприемников описаны в литературе, мы рассмотрим только параметры, связанные со спектральной характеристикой.

Коротковолновая (длинноволновая) граница спектра чувствительности - наименьшая (наибольшая) длина волны излучения, при которой монохроматическая чувствительность фотоприемника равна 0.1 ее максимального значения.

Максимум спектральной характеристики - длина волны, соответствующая максимуму чувствительности. Положение максимума зависит от времен жизни неосновных носителей заряда, скорости поверхностной рекомбинации, глубины залегания р-n-перехода, диффузионных длин носителей заряда и др. факторов. Токовая монохроматическая чувствительность $S_{i\lambda}$ (А/Вт) или (А/лк) значение фототока, создаваемое единичным потоком излучения одной длины волны на единице фотоприемной площади. Коэффициент собирания Q - доля фотонов, проникших в кристалл и участвующих в создании фототока. Q всегда меньше или равен единице.

Фоторезисторы. Являются наиболее простым типом приемника излучения. Их действие основано на явлении фотопроводимости. Фоторезисторы имеют симметричную вольтамперную характеристику, описываемую выражением:

$$I = G_0 \cdot U + G \cdot U = I_T + I_\Phi = I_T + S \cdot \Phi \quad (1)$$

где I_T - темновой ток, S - чувствительность, Φ - поток фотонов. Фототок связан с интенсивностью светового потока выражением $I_\Phi = A \cdot \Phi^\gamma$, где A - коэффициент

пропорциональности, γ - коэффициент, характеризующий нелинейность энергетической характеристики. При разных освещенностях энергетическая характеристика может иметь следующие участки: сверхлинейную ($\gamma > 1$), линейную ($\gamma = 1$) и сублинейную ($\gamma < 1$). Подбирая состав вещества можно изготовить фоторезисторы с линейными энергетическими характеристиками. При омическом характере тока I_T световая ВАХ линейна практически при любом соотношении между токами I_T и I_Φ . При больших освещенностях увеличение фототока отстает от роста светового потока, на энергетической характеристике намечается тенденция к насыщению, однако явного участка насыщения нет. При практическом использовании фоторезисторов большое значение имеет кратность изменения сопротивления при освещении ($R/R_T = I_T/I$) и относительное изменение сопротивления. Эти величины также являются мерой чувствительности резистора (R -сопротивление его на свету). Характер зависимости $R=f(\Phi)$ аналогичен энергетической характеристике.

Фотодиоды. ВАХ фотодиодов при освещении дается выражением:

$$I = I_{\text{нас}} \cdot (\exp(e \cdot U / kT) - 1) - I_\Phi, \quad (2)$$

где I_Φ - фототок, $I_{\text{нас}}$ - ток насыщения, U - напряжение. Фотодиоды используются в двух режимах - фотодиодном и режиме генерации фотоэдс (вентильном). В фотодиодном режиме на фотодиод подается обратное напряжение и ток через структуру является функцией интенсивности света.

Оценим величину фототока фотодиода для простого случая, когда излучение поглощается в n -области p - n -перехода и интенсивность света постоянна по толщине $\alpha \cdot \omega \ll 1$, здесь ω толщина базы. При обратном смещении процесс переноса генерированных светом носителей тока не отличается от переноса равновесных носителей заряда в n -базе. Для определения фототока воспользуемся формулой для обратного тока p - n -перехода, которая для случая $p_p \gg n_n$ имеет вид

$$I_{\text{нас}} = e \cdot S \cdot L_p \cdot p_p / \tau_h \quad (3)$$

Это ток неравновесных носителей заряда, генерируемых с темпом p_p/τ_h в слое базы, шириной равной длине неосновных носителей (дырок) L_p . По аналогии фототок будет

$$I_\Phi = e \cdot S \cdot (\Delta P / \tau_p) \cdot \omega \quad (4)$$

где $(\Delta P/\tau_p)$ - темп генерации неосновных носителей тока светом, S - площадь светоприемной поверхности, ΔP - концентрация генерированных светом дырок. Выполняется соотношение $\omega \ll L_p$. Так как $\Delta P = \eta \cdot \alpha \cdot \tau_p \cdot \Phi$, где Φ - световой поток, η - квантовый выход фотоэффекта, α - коэффициент поглощения. Подставляя выражение для P в (4) получаем

$$I_\Phi = e \cdot \alpha \cdot \omega \cdot \eta \cdot S \cdot \Phi = e \cdot C \cdot \eta \cdot S \cdot \Phi \quad (5)$$

где $C = \alpha \cdot \omega$ - безразмерный коэффициент, характеризующий долю излучения, поглощаемого в базе. Формула (5) остается справедливой и для реального случая, когда интенсивность света спадает по экспоненциальному закону.

Если выражение для фототока (5) привести на единицу площади и учесть потери на отражение от освещаемой поверхности, то:

$$I = (1-R) \cdot Q \cdot \eta \cdot e \quad (6)$$

если привести к единичной энергии фотона, разделив на $h\nu$, то получим выражение для монохроматической чувствительности

$$S_{i\lambda} = I/E = (1-R) \cdot Q \cdot \eta / h\nu \quad (7)$$

подставив $h\nu = 1.24 / \lambda$, имеем

$$S_{i\lambda} = (1-R) \cdot Q \cdot \eta \cdot \lambda / 1.24 \quad (8)$$

где η - квантовый выход фотоэффекта, обычно $\eta = 1$.

В выражении (8) есть две характеристики, описывающие спектральную чувствительность фотоприемника: монохроматическая чувствительность $S_{i\lambda}$ и коэффициент собирания Q . Спектр токовой чувствительности $S_{i\lambda}(\lambda) = f(\lambda)$ имеет вид прямой, проходящей через начало координат с ростом λ чувствительность возрастает. Для идеального фотоприемника чувствительность дается выражением $S_i = 0.8 \cdot \lambda$. Отсюда чувствительность реальных фотоприемников всегда меньше $0.8 \cdot \lambda$ (Рис.1). Спектр коэффициента собирания по длинам волн для идеального фотоприемника в отличие от спектра токовой чувствительности имеет вид прямой, идущей параллельно оси длин волн, со значением $Q = 1$. Необходимость использования двух видов спектральных характеристик заключается в их применении: спектр токовой чувствительности необходим для расчетов фототока при засветке от источника с конкретным спектром излучения, а спектр коэффициента собирания удобен для физического анализа работы фотопреобразователя и выяснения его внутренней структуры.

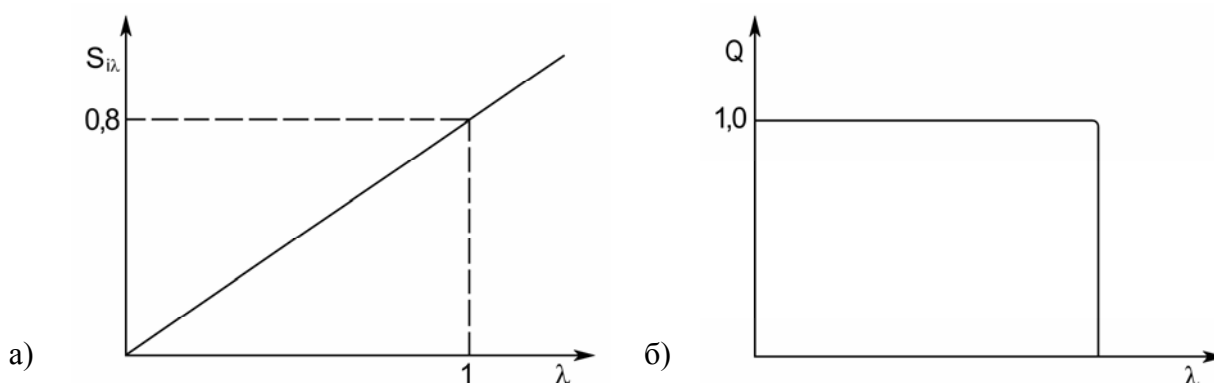


Рис. 1. Спектральная характеристика идеального фотоприёмника в виде $S_{i\lambda} = f(\lambda)$ (а) и $Q = f(\lambda)$ (б).

Величины $S_{i\lambda}$ и Q связаны между собой соотношением $S_{i\lambda} = Q \cdot \lambda / 1.24$. Необходимо отметить, что данное соотношение справедливо только для проникших в полупроводник фотонов.

ЗАВИСИМОСТЬ ВИДА СПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ ФОТОПРИЕМНИКА

Очевидно, что при энергии фотона $h\nu$ меньше ширины запрещённой зоны E_g не будет генерации неосновных носителей тока и соответственно фототока. Так как величины $h\nu$ и λ связаны соотношением $h\nu = 1.24/\lambda$, то отсутствие генерации справедливо и при $\lambda > \lambda_{гр}$ ($\lambda_{гр} = 1.24/E_g$). Таким образом, длинноволновая граница спектральной характеристики фотоприемника однозначно связана с шириной запрещенной зоны. Крутизна спада чувствительности в длинноволновой области будет определяться в первую очередь степенью поглощения фотонов (условиями поглощения) т.е. какая доля падающего на освещаемую поверхность фотонов будет поглощаться и создавать неосновные носители, которые будут разделены полем р-п-перехода. Это условие (условие полного поглощения) находится из соответствия глубины залегания р-п-перехода или толщины базы ω толщине слоя, соответствующего полному поглощению $\omega \leq 1/\alpha$ или $\alpha \cdot \omega \leq 1$. Затем, в случае соблюдения условия полного поглощения, ход спектра чувствительности в длинноволновой области будет определяться ходом кривой спектра поглощения. Например, если сравнить спектры поглощения излучения таких полупроводников, как кремний, германий и арсенид галлия, то для непрямозонных полупроводников (германий и кремний) характерен плавный ход спектра: поглощения, а для прямозонного арсенида галлия - резкий спад. Это же соответствие повторится и в ходе спектральных

характеристик фотоприемников, изготовленных из этих полупроводников, рис. 2.

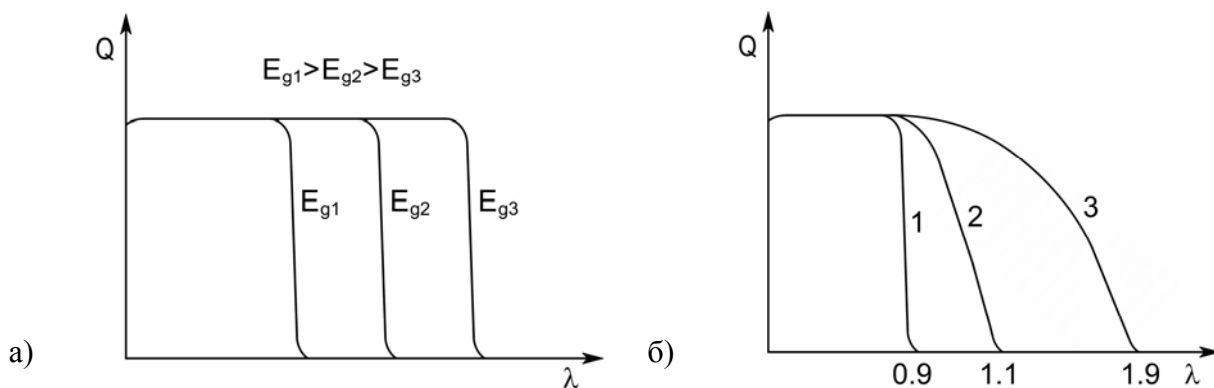


Рис. 2. Зависимость длинноволновой границы спектра чувствительности от величины E_g материала фотоприёмника (а) и длинноволновая часть спектра фотоприёмников (б): 1- GaAs; 2-Si; 3-Ge.

При условиях неполного поглощения крутизна длинноволнового края спектра определяется уже количеством (долей) фотонов, поглощенных полупроводником и, соответственно, кривая края собственного поглощения будет еще более полой (плавной), см. рис.3. Коротковолновая граница и коротковолновая область спектра формируется под влиянием следующих факторов: глубины залегания р-п-перехода; зависимости коэффициента поглощения от длины волны излучения; величиной скорости поверхностной рекомбинации неосновных носителей тока и величиной E_g у освещаемой поверхности.

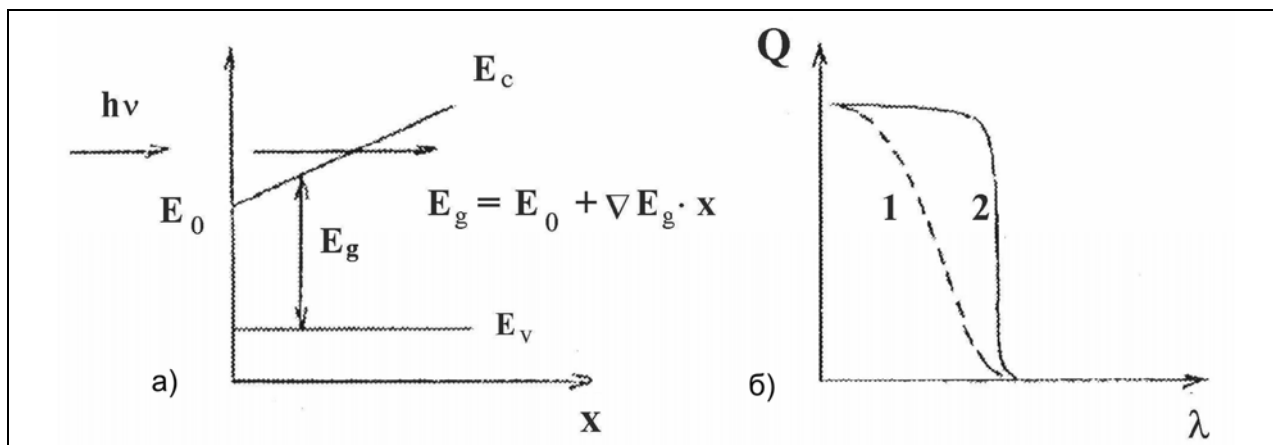
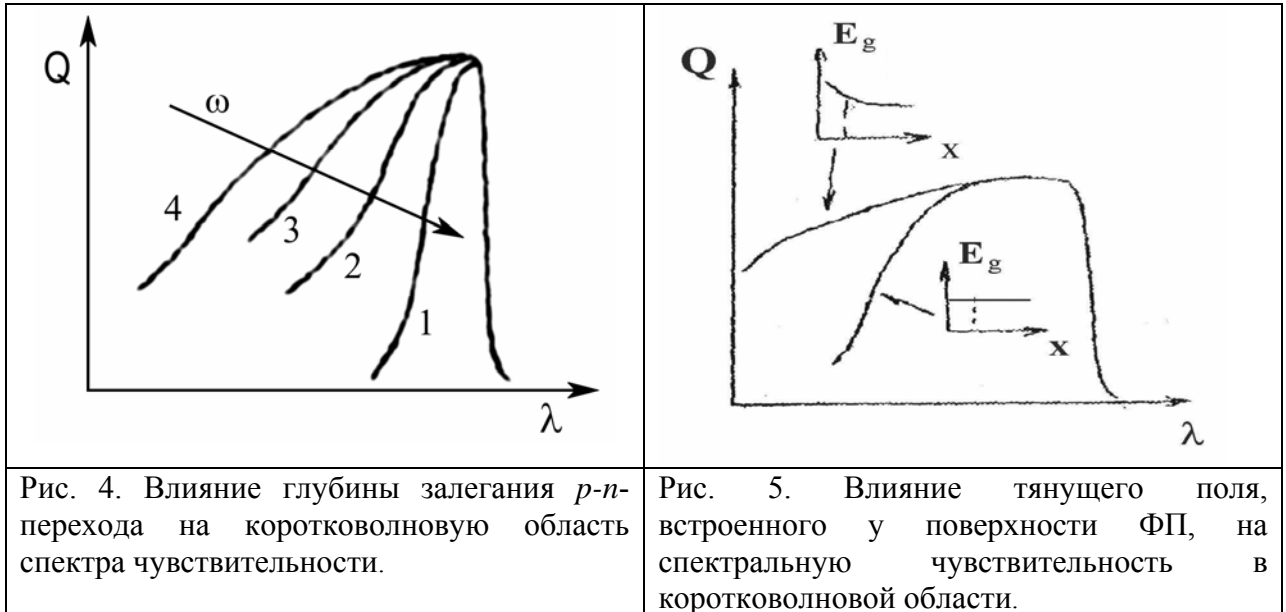


Рис. 3. Пример неполного поглощения фотонов: а) – структура, в которой E_g растёт вглубь освещаемой поверхности полупроводника; б) – длинноволновая область спектра (пунктиром).

Влияние глубины залегания р-п-перехода иллюстрируется рис. 4. Вероятность создания электронно-дырочной пары фотоном растет с ростом энергии фотона (при $h\nu > E_g$), поэтому коротковолновое излучение поглощается сильнее у поверхности, а длинноволновое - в глубине. С приближением к поверхности р-п-перехода увеличивается доля собираемых р-п-переходом носителей тока, генерированных коротковолновыми фотонами и происходит увеличение коротковолновой части спектра. С заглублением р-п-перехода доля коротковолновых фотонов уменьшается, так как поглощение их идет у поверхности, а поглощение длинноволновых фотонов - в глубине. При достаточной глубине залегания р-п-перехода спектральная чувствительность может иметь селективный характер.

При расположении р-п-перехода у освещаемой поверхности существенное влияние на вид спектра оказывает поверхностная рекомбинация, которая действует как «насос»,

отсасывающий генерированные коротковолновыми фотонами неосновные носители заряда к поверхности и их гибель. В реальных фотоприемниках из-за поверхностной рекомбинации с уменьшением длины волны происходит плавный спад чувствительности к нулю.



В солнечных элементах (фотоприемниках для преобразования солнечной энергии в электрическую) для увеличения КПД в частности расширяют спектр чувствительности в сторону коротких длин волн. Для этого у освещаемой поверхности создают тянущие поля путем увеличения ширины запрещенной зоны к освещаемой поверхности либо изменением уровня легирования. Например, за счёт изменения E_g возникают квазиэлектрические поля, которые перемещают генерированные светом носители тока к *p-n*-переходу, препятствуя их рекомбинации на поверхности и в объеме полупроводника. Таким образом, фоточувствительность в коротковолновой области спектра увеличивается, рис. 5.

ГЕТЕРОПЕРЕХОДНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ

Выше рассмотренные случаи фотоприемников предполагали, что фотоприемник состоит из полупроводника с постоянной E_g , т.е. фотоприемник является гомозонным. Использование гетеропереходов, полупроводниковых материалов с другим значением E_g , позволяет улучшить характеристики фотоприемников, в том числе и формировать требуемую спектральную характеристику. Гетеропереход есть контакт двух полупроводников с различной E_g , отличающихся зонной структурой, эффективными массами носителей заряда, различными подвижностями и т.д. Наличие широкозонного окна в структуре фотоприемника позволяет обеспечить эффективное фотопреобразование, исключает рекомбинационные потери на освещаемой поверхности, а также обеспечивает высокое быстродействие.

Коротковолновая область спектров чувствительности гетеропереходных фотоприемников формируется широкозонным «окном». Рассмотрим фотоприемник, состоящий из двух полупроводников *n*- и *p*-типа, в котором ширина запрещенной зоны в освещаемом слое больше, чем во втором, рис.6. Выберем толщину освещаемого слоя достаточно большой: ее толщина больше диффузионной длины неосновных носителей тока $d > L_n$. В этом случае генерированные светом у поверхности носители тока не смогут достичь *p-n*-перехода и участвовать в создании фототока. Таким образом коротковолновая область спектра (край спектра) будет определяться значением E_g освещаемого слоя, $\lambda_{гр} = 1.24/E_g$. Приближая значения E_g в слоях друг к другу можно

последовательно получать следующие фотоприемники: датчики цвета, полосовые и селективные фотодиоды.

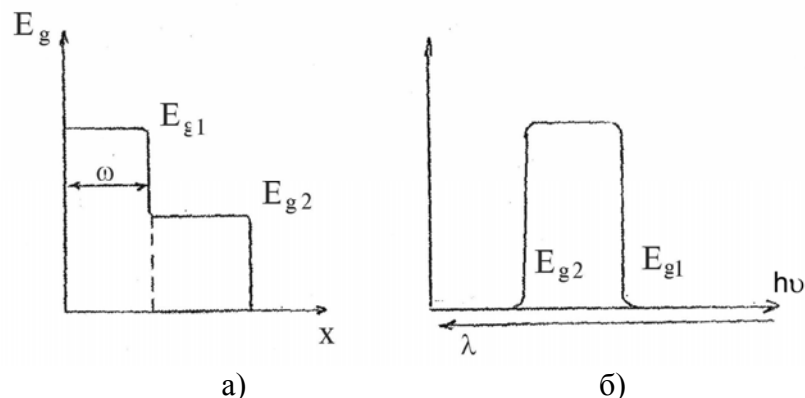


Рис.6. Координатное изменение E_g в структуре гетеропереходного ФП (а) и его спектральная характеристика (б).

ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Измерительная установка собрана на базе монохроматора ИКС-21. В состав установки входят: монохроматор ИКС-21, двухкоординатный самописец ЛКД4-003, усилитель фототока фотоприемника У2-8М, блок питания источника света, модулятор, координатный столик.

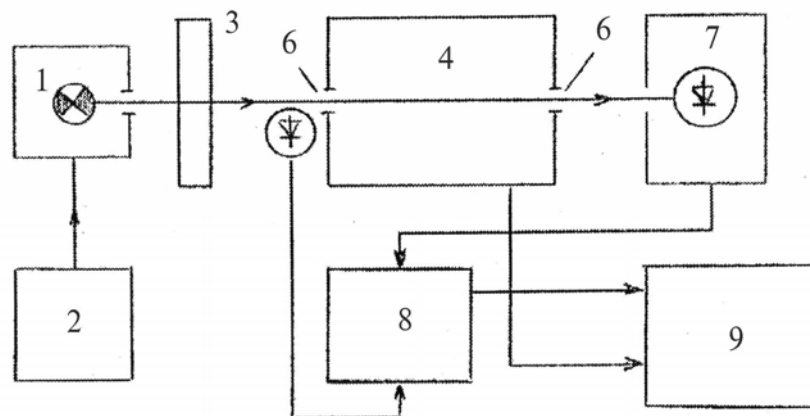


Рис.7. Блок-схема установки: 1 - источник света, 2 - блок питания лампы, 3 - модулятор, 4 - монохроматор, 5 - датчик опорного сигнала, 6 - входные щели монохроматора, 7 - координатный столик для фотоприемников, 8 - селективный усилитель, 9 - самописец.

Свет от источника лампы накаливания КГМ150-24 модулируется в прямоугольные импульсы света частотой 60 Гц и подается на вход монохроматора ИКС-21, рис.7. В монохроматоре выделяется узкая полоса излучения, которая на выходе фокусируется на координатный столик в виде светового пятна размером 1*2 мм. На координатном столике размещены клеммы для подсоединения исследуемого фотоприемника (в том числе и возможно исследование и фоторезисторов), а также эталонные фотоприемники: солнечный элемент большого размера с синей поверхностью и меньший с квадратной освещаемой поверхностью серого цвета. Спектральные характеристики эталонов известны и приведены в приложении. Фотоприемники на координатном столике подключены к нагрузочному сопротивлению 50 или 100 Ом и далее фототок усиливается селективным усилителем У2-8М. Параллельно входу монохроматора установлен датчик опорного сигнала, германиевый фотодиод, освещаемый световыми импульсами, сигнал с которого подается на детекторную часть усилителя У2-8М. С выхода усилителя полезный сигнал в виде постоянного напряжения подается на вход Y двухкоординатного самописца. Модулирование света необходимо для исключения постоянной составляющей фототока

фотоприемника при работе на свету, а также для повышения помехоустойчивости схемы усиления фототока.

Монохроматор имеет узел автоматики, обеспечивающий автоматическую развертку спектра от синей области к инфракрасной, а также автоматически подает на вход Y реперные сигналы для отметок целых значений делений барабана. Узел автоматики позволяет задавать скорость развертки спектра и переводить монохроматор либо в ручной либо в автоматический режимы. Коммутация фотоприемников на вход У2-8М осуществляется кнопками на панели усилителя: "эталон 1" - есть эталон меньшего размера, «эталон 3» - эталон с большой площадью.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить установку и дать ей прогреться 10-15 мин.
2. Установить исследуемый фотоприемник в держатель образца координатного столика.
3. Включить модулятор и осветитель.
4. Установить барабан ИКС-21 по делениям на 41-00 или 40-00, что соответствует зеленому или красному цвету луча и сфокусировать излучение на поверхность фотоприемника (ФП).
5. Подстроить частоту усиления в селективном усилителе ручками «Частота» плавно и грубо, а также «нуль» усилителя. В дальнейшем на время нескольких записей спектров эти ручки не трогать. Этим самым мы фиксируем однозначную пропорциональную зависимость высоты отклонения пера самописца по оси Y с величиной фототока от ФП.
6. Записать относительный спектр эталонного ФП с известной спектральной характеристикой. Для этого поставить ручкой барабана ИКС-21 на деление 45-00, включить на самописце опускание пера-фломастера и включить автоматическую запись.
7. При достижении делений барабана 37-00 выключить тумблер автоматической записи.
Примечание: Работа за пределами делений 46,20-35.00 чревата поломкой автоматики.
8. Аналогично снять относительный спектр исследуемого ФП.
9. Методом сравнения - одинаковому отклонению соответствует одинаковая токовая чувствительность - вычислить значения спектральной чувствительности исследуемого ФП: $S_i = S_{i_{эт}} \cdot (Y_{обр}/Y_{эт})$ $Q_i_{обр} = Q_{i_{эт}} \cdot (Y_{обр}/Y_{эт})$ в точках, кратных долям деления барабана, пользуясь табличными данными для эталонов (см. приложение).
10. По полученным значениям построить спектральную характеристику ФП.

РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Снять спектральные характеристики исследуемого и эталонного фотоприемников.
2. Построить спектральные характеристики в виде двух зависимостей $Q=F(\lambda)$ и $S_{i\lambda}=F(\lambda)$ для исследуемого ФП.
3. Сделать анализ спектральной характеристики, определить красную границу fotocувствительности, найти значение E_g в области р-п-перехода и по виду спектра (ширина спектра, форма спектра) сделать примерную оценку структуры ФП и его тип (селективный ФП, полосовой, солнечный элемент). Расположение р-п-перехода у поверхности или в глубине, значения E_{g1} и E_{g2} в структуре гетеропереходных ФП.

ПРИМЕЧАНИЕ: задание может варьироваться преподавателем.

Контрольные вопросы:

1. Объясните механизм увеличения проводимости фоторезистора при его освещенности.
2. Объясните возникновение фотогальванического эффекта при освещении фотодиода.
3. Чем объясняется существование длинноволновой границы спектра чувствительности полупроводниковых диэлектриков?
4. Как влияет глубина залегания р-п-перехода на коротковолновую область спектра

- чувствительности?
5. Объясните механизм действия тянущего поля, встроенного у поверхности фотоприемника и его влияние на спектральную чувствительность в коротковолновой области спектра чувствительности.
 6. Каким образом ограничивается коротковолновая область спектра чувствительности гетеропереходных фотоприемников?

ЛИТЕРАТУРА

1. Полупроводниковые фотоприемники. Ультрафиолетовый, видимый и ближний ИК диапазон спектра. - Под ред. Стафеева В.И., М.: Радио и связь, 1984.
2. Бузанова Л.К., Глиberman А.Я. Полупроводниковые фотоприемники. - М.: Энергия, 1976.
3. Васильев А.М., Ландсман А.П. Полупроводниковые преобразователи-М: Сов.Радио, 1971.
4. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. - М.: Энергия, 1973.

Спектральная характеристика идеального фотоприемника в виде

$$S_i = F(\lambda) \text{ (а) и } Q = F(\lambda) \text{ (б).}$$

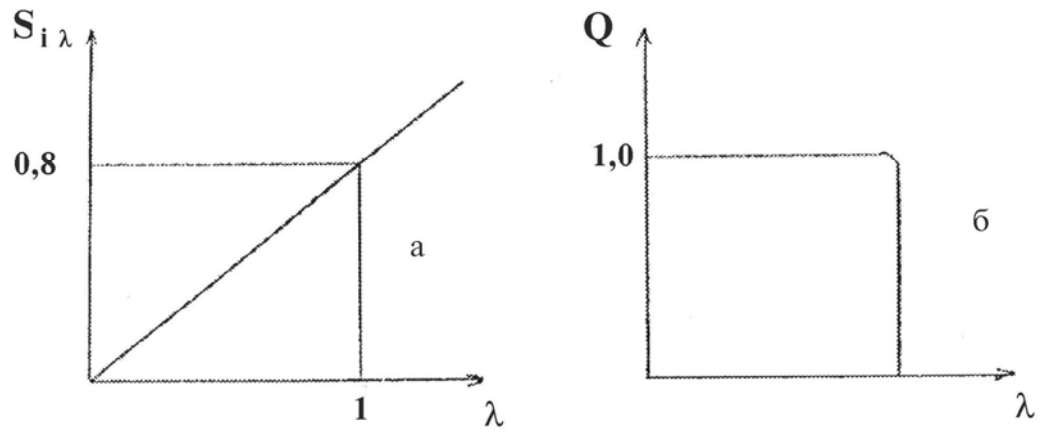


Рис. 1.

Зависимость длинноволновой границы спектра чувствительности от величины E_g материала фотоприемника (а) и длинноволновая часть фотоприемников (б): 1- GaAs; 2 - Si; 3- Ge.

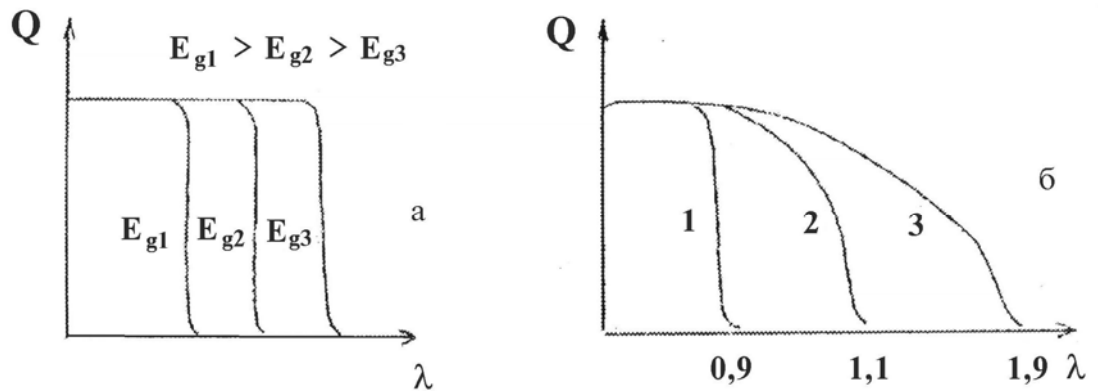


Рис. 2.

Пример неполного поглощения фотонов: (а) - структура, E_g растет от освещаемой поверхности вглубь полупроводника; (б) - длинноволновая область спектра (пунктиром).

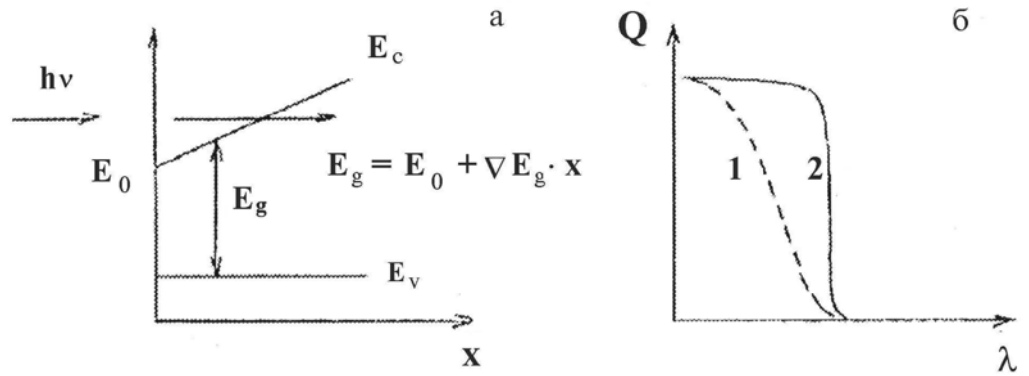


Рис. 3, 4.

Влияние глубины залегания р-п-перехода на коротковолновую область спектра чувствительности

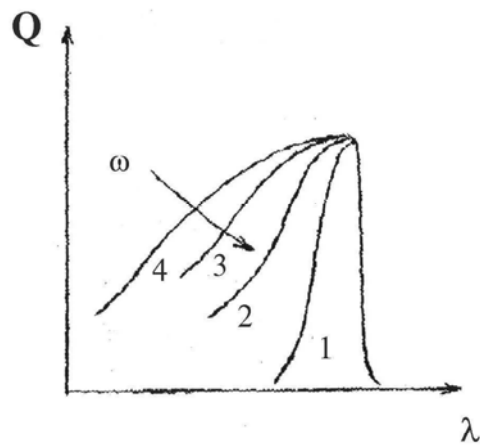


Рис. 5.

Влияние тянущего поля, встроенного у поверхности ФП, на спектральную чувствительность в коротковолновой области

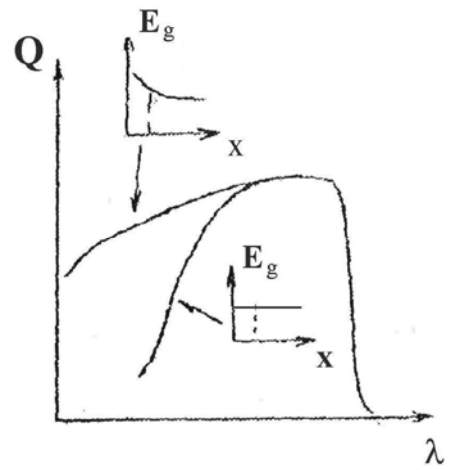


Рис. 6.

Координатное изменение E_g в структуре гетеропереходного ФП (а)
и его спектральная характеристика (б).

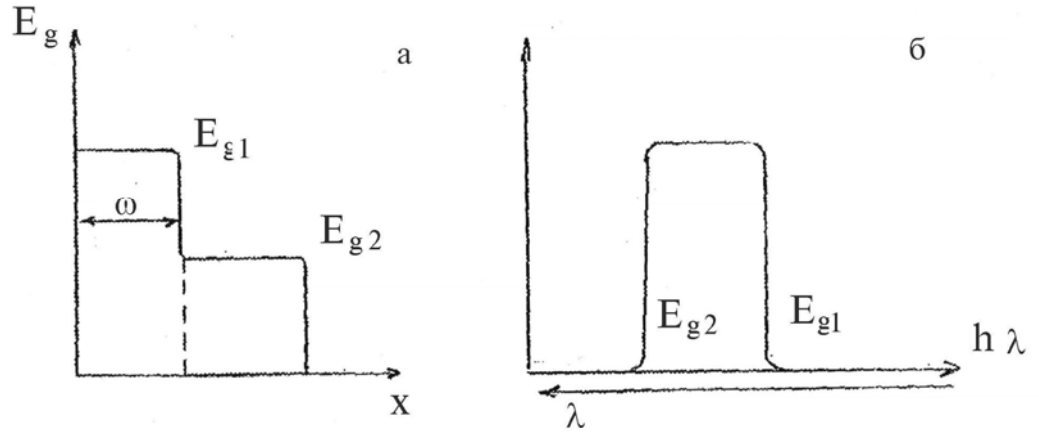


Рис. 7.

Блок-схема установки: 1 - источник света, 2 - блок питания лампы, 3 - модулятор, 4 - монохроматор, 5 - датчик опорного сигнала, 6 - входные щели монохроматора, 7 - координатный столик для фотоприемников, 8 - селективный усилитель, 9 - самописец.

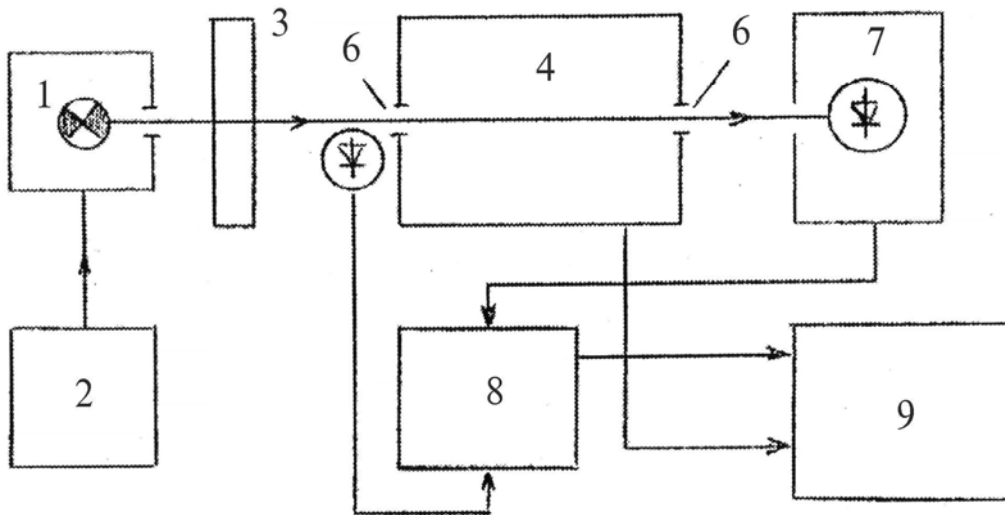


Рис. 8.