

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФОТОРЕЗИСТОРА

1. Цель работы

Ознакомиться с принципом работы фоторезистора, исследовать его основные характеристики, оценить ширину запрещенной зоны полупроводника, из которого сделан фоторезистор.

2. Экспериментальное изучение внутреннего фотоэффекта

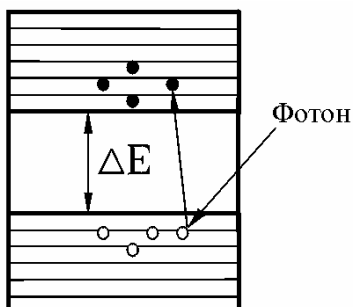
Фоторезистором называется полупроводниковый прибор, действие которого основано на фотопроводимости – изменении проводимости полупроводника при освещении (внутренний фотоэффект). В полупроводнике под действием света генерируются свободные носители заряда (в отличие от внешнего фотоэффекта, когда электроны под действием света выходят из вещества).

Рассмотрим это явление. В химически чистом (собственном) полупроводнике при абсолютном нуле валентная зона заполнена электронами, а зона проводимости свободна. Неосвещенный полупроводник при абсолютном нуле является изолятором. Если полупроводник нагреть, то вследствие теплового возбуждения появятся электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне. Электропроводность полупроводника, обусловленная тепловым возбуждением, называется темновой проводимостью:

$$\sigma_T = q_e n (\mu_n + \mu_p), \quad (1)$$

где n - концентрация электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне; μ_n и μ_p - подвижность электронов и дырок соответственно; q_e - заряд носителя тока.

При освещении полупроводника возникают дополнительные носители заряда, обусловленные внутренним фотоэффектом. При поглощении кванта света один из валентных электронов переходит в зону проводимости, а в валентной зоне образуется дырка. Очевидно, такой переход возможен, если энергия фотона $h\nu$ равна или несколько больше ширины запрещенной зоны ΔE (рис.1):



Очевидно, такой переход возможен, если энергия фотона $h\nu$ равна или несколько больше ширины запрещенной зоны ΔE (рис.1):

$$h\nu \geq \Delta E. \quad (2)$$

Аналогично протекает процесс фотоионизации и в примесном полупроводнике. В донорном

Рис.1

полупроводнике под действием квантов света электроны переходят с донорных уровней в зону проводимости (рис.2,а), в акцепторных – из валентной зоны на акцепторные уровни (рис.2,б).

Очевидно, примесная фотопроводимость возникает при условии

$$h\nu \geq \Delta E_a, \quad (3)$$

где ΔE_a - энергия активации примесных атомов. Частоту, соответствующую знаку равенства в выражении (2) называют краем собственного поглощения, а в выражении (3) – краем примесного поглощения. Край поглощения называют также красной границей внутреннего фотоэффекта.

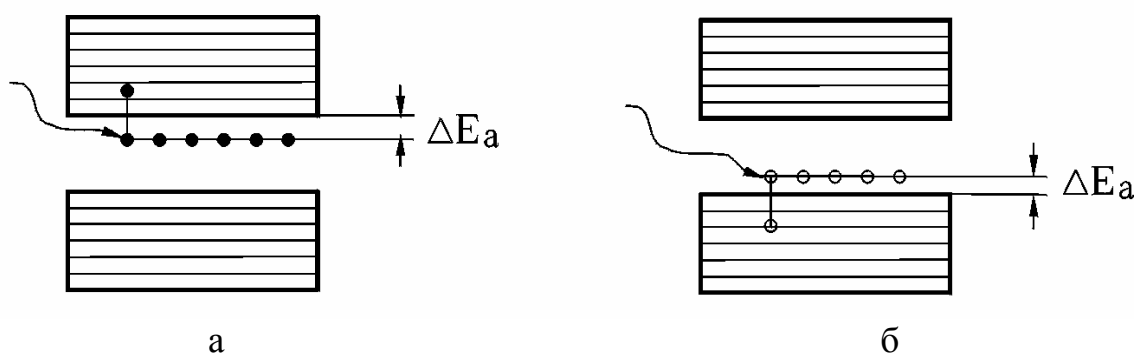


Рис.2

Избыточные электроны и дырки, генерируемые при освещении, являются неравновесными носителями заряда в отличие от равновесных носителей, которые имеются в полупроводнике при данной температуре и находятся в термодинамическом равновесии с решеткой кристалла. Дополнительная проводимость, обусловленная появлением неравновесных носителей заряда, и есть фотопроводимость. В случае собственного поглощения фотопроводимость равна

$$\sigma_{\Phi} = q_e \Delta n (\mu_n + \mu_p), \quad (4)$$

где Δn - число пар электрон-дырка, возникающих при поглощении квантов света.

При примесном поглощении появляются неравновесные носители заряда преимущественно одного типа. В общем случае $\Delta n \neq \Delta p$ фотопроводимость определяется выражением

$$\sigma_{\Phi} = q_e (\Delta n \cdot \mu_n + \Delta p \cdot \mu_p). \quad (5)$$

На величину фотопроводимости влияет также время жизни носителей заряда (промежуток времени от момента генерации носителя заряда до его рекомбинации – соединения электрона и дырки), коэффициент оптического поглощения, квантовый выход внутреннего фотоэффекта (отношение числа генерируемых носителей заряда к числу поглощенных фотонов).

Из сказанного ясно, что полная электропроводность складывается из темновой и фотопроводимости:

$$\sigma = \sigma_T + \sigma_{\Phi}. \quad (6)$$

3. Методика эксперимента

Схематическое устройство фоторезистора дано на рис.3. На изолирующую подложку 1 помещается тонкий слой полупроводника 2 (фоточувствительный слой). По краям этого слоя нанесены металлические электроды (контакты) 3. Для предохранения фоточувствительного слоя его покрывают тонкой пленкой лака, прозрачной в области спектральной чувствительности материала. Прибор заключен в закрытый корпус с окном для света. Электроды 3 соединены с клеммами, через которые прибор включается в электрическую цепь последовательно с источником питания.

Основными характеристиками фоторезистора являются вольт-амперная, световая и спектральная.

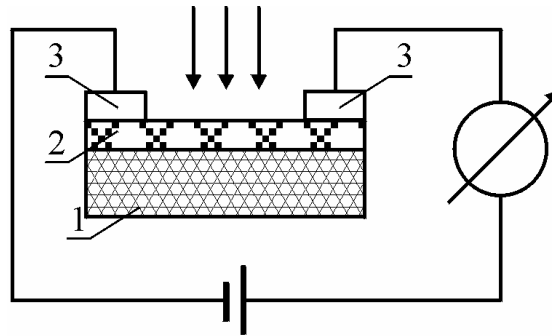


Рис.3

Вольт-амперной характеристикой называется зависимость тока, протекающего через фоторезистор, от величины приложенного напряжения при постоянном световом потоке $I = f(U)_{\Phi = Const}$:

$$I_C = \frac{\sigma S}{l} U = \frac{(\sigma_T + \sigma_{\Phi}) S}{l} U = I_T + I_{\Phi}, \quad (7)$$

где I_C называется световым током; I_T - темновой ток; I_{Φ} - фототок.

В частности, если световой поток равен нулю, то характеристика называется темновой. Из уравнения (7) видно, что вольт-амперная характеристика как темновая, так и при освещении является линейной, поскольку при постоянной температуре и постоянном световом потоке электропроводность не зависит от напряжения. Следует отметить, что в области обычно реализуемых освещенностей световой ток намного больше темнового, т. е. $I_C \approx I_{\Phi}$.

Световой характеристикой фоторезистора называется зависимость фототока от величины падающего светового потока при постоянном значении приложенного напряжения $I_{\Phi} = f(\Phi)_{U = Const}$. Эту зависимость можно заменить зависимостью I_{Φ} от освещенности E : $I_{\Phi} = f(E)_{U = Const}$, называемой часто люкс-амперной характеристикой.

Световая характеристика обычно нелинейная (рис.4). При больших освещенностях увеличение фототока отстает от роста светового потока, намечается тенденция к насыщению. Это объясняется тем, что при увеличении

светового потока наряду с ростом концентрации генерируемых носителей заряда растет вероятность их рекомбинации.

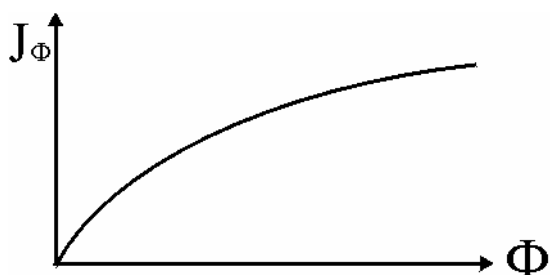


Рис.4

Спектральной характеристикой называется зависимость фототока от длины волны при постоянной энергии падающего излучения $I_{\Phi} = f(\lambda)_{E=Const}$. Фототок в собственном полупроводнике появляется, начиная с длины волны λ_0 (рис.5), соответствующей равенству

$$\frac{hc}{\lambda_0} = \Delta E, \quad (8)$$

где ΔE - ширина запрещенной зоны полупроводника; λ_0 - край собственного поглощения. Казалось бы, что спектральная характеристика должна иметь вид ступени (рис.5, кривая «а»), но такой вид она могла бы иметь лишь при абсолютном нуле. При повышении температуры тепловое движение «размывает» край собственного поглощения (рис.5, кривая «б»).

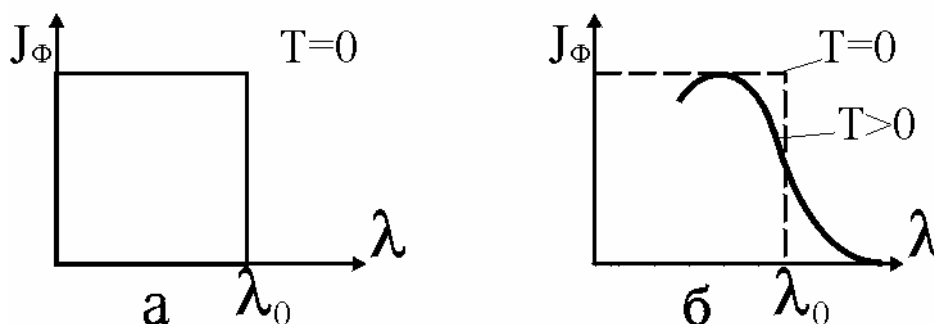


Рис.5

С увеличением энергии фотона в реальной спектральной характеристике фототок быстро достигает максимума, а затем начинает уменьшаться (рис.5, кривая «б»), хотя энергии фотона более чем достаточно для возникновения фотопроводимости. Это объясняется тем, что с уменьшением λ растет коэффициент оптического поглощения, а это приводит к поглощению света в тонком приповерхностном слое вещества, к повышению концентрации неравновесных носителей и соответственно повышенной скорости рекомбинации в этом слое. Другими словами, носители заряда активно рекомбинируют на поверхности, не успевая диффундировать в объеме полупроводника, что приводит к уменьшению фотопроводимости.

Край примесного поглощения λ_1 , соответствующий равенству

$$\frac{hc}{\lambda_1} = \Delta E_a, \quad (9)$$

смещается в сторону больших длин волн относительно собственной фотопроводимости (рис.6). Очевидно, что по спектральной характеристике, определив λ_0 , можно оценить ширину запрещенной зоны полупроводника, из которого сделан фоторезистор, а определив λ_1 , - энергию активации примесей.

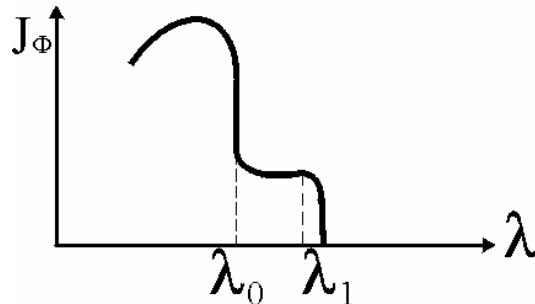


Рис.6

Фоторезистор характеризуется также такими параметрами, как интегральная и спектральная чувствительности. Интегральной удельной чувствительностью называется величина γ , равная отношению фототока к величине потока белого света и к величине приложенного к фоторезистору напряжения, соответствующих этому фототоку:

$$\gamma = \frac{I_\phi}{\Phi U} \quad (10)$$

Если фоторезистор облучается монохроматическим светом, то γ , найденная по этой формуле, будет спектральной чувствительностью.

Фоторезисторы широко применяются в различных схемах измерения, автоматизации и контроля.

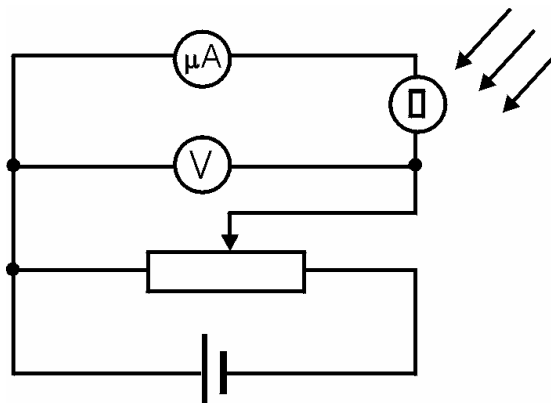


Рис.7

4. Порядок выполнения работы

1. Соберите схему, показанную на рис.7.
2. Снимите семейство двух-трех вольт-амперных характеристик

$$I = f(U)_{\Phi = Const}$$

3. Снимите семейство двух-трех световых характеристик $I_{\Phi} = f(\Phi)_{U=Const}$.
4. Снимите спектральную характеристику фоторезистора $I_{\Phi} = f(\lambda)_{E=Const}$, следуя указаниям преподавателя.
5. По результатам измерений, проведенных согласно пунктам 2, 3, 4, постройте графики вольт-амперных, световых и спектральной характеристик фоторезистора.
6. Определите по спектральной характеристике край собственного поглощения λ_0 . Оцените ширину запрещенной зоны полупроводника ΔE , из которого сделан фоторезистор, по формуле (8). Запишите полученное значение в электрон-вольтах.
7. Определите либо интегральную, либо спектральную удельную чувствительность фоторезистора γ (формула 10).

5. Контрольные вопросы

1. Что такое внутренний фотоэффект? Сравните с внешним фотоэффектом.
2. Объясните механизм возникновения фотопроводимости в собственном и примесном полупроводнике.
3. Что такое край собственного и примесного поглощения? Каким равенством он удовлетворяет?
4. Что представляет собой фоторезистор?
5. Чем объясняется наличие темнового тока фоторезистора?
6. Объясните ход вольт-амперной и световой характеристик фоторезистора. Сравните их с аналогичными характеристиками фотоэлемента.
7. Объясните спектральную зависимость фототока в собственном и примесном полупроводниках.
8. Как с помощью спектральной характеристики можно оценить ширину запрещенной зоны полупроводника? Энергию активации примеси?
9. Что такое интегральная и спектральная чувствительность фоторезистора?

6. Рекомендуемая литература

1. Епифанов Г.И. Физика твердого тела.- М.: Высшая школа, 1966 и более поздние издания этого курса.
2. Соболева Н.А., Меламид А.Е. Фотоэлектронные приборы. - М.: Высшая школа, 1974.
3. Анисимова И.Д., Викулин И.М. Полупроводниковые фотоприемники. – М.: Радиосвязь, 1984.