

Письма в ЖЭТФ, том 18, вып. 6, стр. 376 - 380 20 сентября 1973 г.

О МЕХАНИЗМЕ ТАК НАЗЫВАЕМОЙ "АНОМАЛЬНОЙ" ФОТОПРОВОДИМОСТИ

С. М. Рыжкин

1. В 1961 г. в работе [1] были представлены результаты исследования фотопроводимости аморфного селена, особым образом обработанного в парах ртути. Оказалось, что характеристики фотопроводимости в этом веществе радикально отличаются от всех ранее известных, что послужило основанием для авторов назвать обнаруженную ими фотопроводимость "аномальной". Основные особенности аномальной фотопроводимости сводятся к следующему: 1) стационарная величина фотопроводимости не зависит от интенсивности света в очень широком (много порядков) интервале изменения интенсивности и определяется только длиной волны используемого света. При этом максимум чувствительности сдвинут в длинноволновую сторону относительно края собственного поглощения; 2) время релаксации фотопроводимости обратно пропорционально интенсивности света и, следовательно, после выключения света очень велико (практически неизмеримо).¹

Детальные количественные характеристики аномальной фотопроводимости подробно описаны в монографии Корсунского, изданной в 1972 г. [2]. Там же изложена интересная феноменологическая модель автора, связанная, однако, с искусственным допущением о существовании в запрещенной зоне полупроводника некоторых локальных центров (так называемые "У-центры) со специфическими свойствами.

В настоящей работе предлагается модель аномального фотопроводника, основанная на вполне реальной структуре. Из модели естественным образом вытекают все особенности аномальной фотопроводимости.

II. Аномальная фотопроводимость должна иметь место при поглощении света свободными носителями тока (для определенности электронами), если в полупроводнике имеются две области с различной по величине концентрацией электронов, разделенные потенциальным барьером (рис. 1¹).

Действительно, если измерять проводимость между контактами I - I' или III - III', установленными на любой из электронных областей, то при освещении эта проводимость будет изменяться, так как электроны в областях I и III, поглощая свет, смогут преодолевать потенциальный

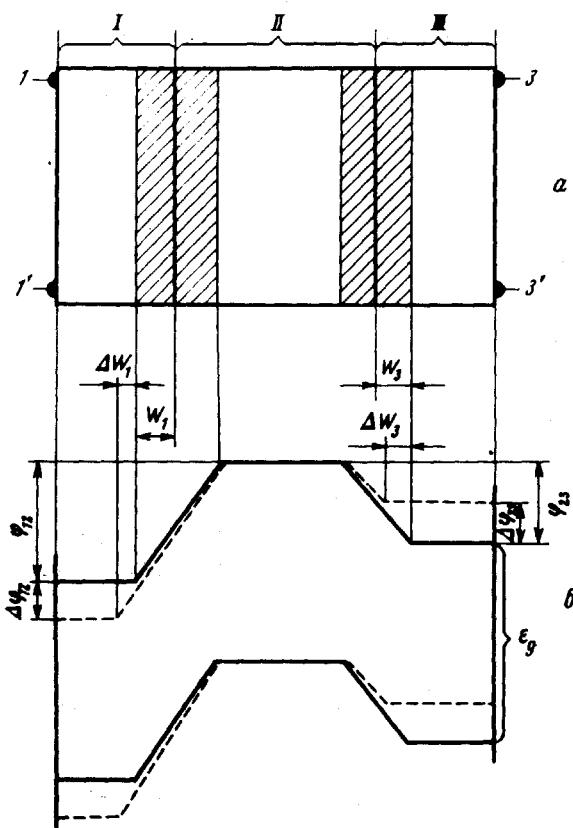


Рис. 1. Модель "аномально-го" фотопроводника: а – геометрическая схема, б – энергетическая схема. Сплошные линии – до освещения. Пунктирные линии показывают изменения, происходящие в результате освещения

барьер, как показано стрелками на рис. 2. В результате, поскольку интенсивности переходов электронов слева направо и справа налево, вообще говоря, неодинаковы, проводимости областей I и III будут меняться, причем в разных направлениях, т. е. в одной области возникает положительная, а в другой – отрицательная фотопроводимость. Эта фото-

¹⁾ Для определенности будем в дальнейшем считать область барьера II – областью *p*-типа, хотя, в принципе, это может быть более высокоменная *n*- или *i*-область.

проводимость обладает перечисленными выше особенностями "аномальной" фотопроводимости.

Действительно, изменение при освещении числа электронов N_1 , например, в области I определяется двумя противоположно направленными потоками электронов над барьераом, каждый из которых пропорционален интенсивности света I

$$-\frac{dN_1}{dt} = \alpha_1(\lambda) n_1 q I - \alpha_3(\lambda) n_3 q I \quad (1)$$

Здесь q – сечение захвата фотона свободным электроном; n_1 , n_3 – концентрации электронов слева и справа от барьера соответственно; $\alpha_1(\lambda)$ и $\alpha_3(\lambda)$ – зависящие от длины волны и независящие от интенсивности света коэффициенты, характеризующие вероятность для электрона, поглотившего фотон, перейти над барьером в соседнюю область.

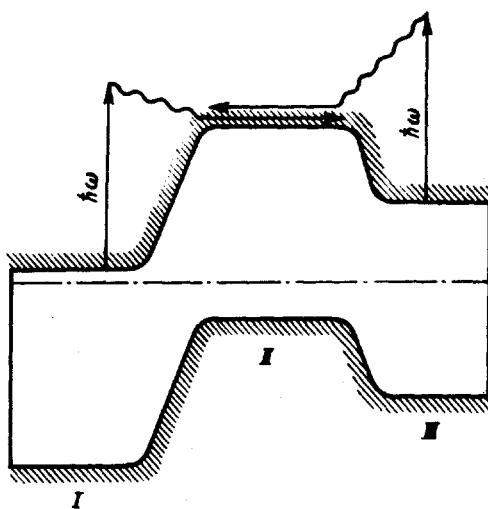


Рис. 2. Схема переходов электронов над барьером при поглощении фотонов с энергией, превышающей его высоту $\hbar\omega > \phi_{12} > \phi_{23}$

Из (1) следует, что условие стационарности $\alpha_1 n_1 = \alpha_3 n_3$ не содержит интенсивности света.

III. При расчете величины и постоянной времени фотопроводимости следует исходить из того, что появление в областях I или III избытка или недостатка электронов приводит к изменению заряда этих областей и, следовательно, скачков потенциальной энергии ϕ_{12} и ϕ_{23} на границах с p -областью II. (см. рис. 1). При этом меняются и толщины высокоомных слоев объемного заряда W_{12} и W_{23} на этих границах. Изменение проводимости между контактами 1 – 1' (или 3 – 3') в случае чистого полупроводника без глубоких примесей определяется именно этим эффектом сужения (или расширения) проводящего "канала" между контактами за счет изменения толщины W_1 (или W_2) непроводящей области объемного заряда^{1).}

¹⁾ Аналогично тому, как это имеет место в полевых (канальных) транзисторах.

Для случая, когда взаимодействие между электронами является слабым и над барьером могут проходить только электроны, оптически возбужденные, в состояния с энергией выше, чем энергия вершины барьера ("внешний фотоэффект" из области I в область III и обратно), расчет в линейном приближении дает: для стационарной фотопроводимости:

$$\Delta\sigma_I = \frac{h}{\ell} e \mu \frac{\beta_3 n_3 - \beta_1 n_1}{\frac{\gamma_1}{w_1} + \frac{\gamma_3}{w_3}} \neq f(l) \quad (2)$$

для постоянной времени:

$$\tau = \frac{d_2 \theta}{D_2 q l \left(\frac{\gamma_1}{w_1} + \frac{\gamma_3}{w_3} \right)} \approx \frac{1}{l} \quad (3)$$

где $\beta_1 = (h\omega - \phi_{12}) \exp\left(-\frac{W_{12}}{L_1}\right)$; $\beta_3 = (\hbar\omega - \phi_{23}) \exp\left(-\frac{W_{23}}{L_3}\right)$;

$$\gamma_1 = \left(2\phi_{12} + \hbar\omega \frac{W_{12}}{L_1}\right) \exp\left(-\frac{W_{12}}{L_1}\right); \quad \gamma_3 = \left(2\phi_{23} + \hbar\omega \frac{W_{23}}{L_3}\right) \exp\left(-\frac{W_{23}}{L_3}\right)$$

ℓ – расстояние между электродами; h – размер образца, перпендикулярный к чертежу; e – элементарный заряд; μ – подвижность; D_2 – коэффициент диффузии в области II; d_2 – толщина области II; θ – скорость потери энергии горячими носителями тока; L_1 и L_3 – эффективные длины остыивания возбужденных светом носителей до вершины барьера.

Остальные обозначения ясны из рис. I.

Итак, стационарная фотопроводимость не зависит от интенсивности света, а τ обратно пропорционально ей.

Оценка τ для германиевой $n-p-n$ структуры при $T = 77^{\circ}\text{K}$; $d_2 = 10^{-4} \text{ см}$; $n_1 = 1,1$; $n_3 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$; $l = 10^{16} \text{ фотон/сек} \cdot \text{см}^2$ приводит к величине $\sim 10^2 \text{ сек}$.

IV. В принципе, свойствами аномального фотопроводника может обладать не только 3-х слойная (например, $n-p-n$ или $p-n-p$) система, но и система, построенная из 2-х контактирующих слоев, но разных материалов, т. е. гетеропереход или даже контакт полупроводника с металлом (рис. 3). Для такой "двухслойной" структуры роль третьего (барьерного) слоя играет область объемного заряда на границе. Возможно материал, использованный в работах [1, 2] представляет из себя систему такого рода (например, гетеропереход $\text{Se}-\text{HgSe}$ или контакт ртуть-полупроводник).

Из изложенного следует, однако, что явление аномальной фотопроводимости, впервые обнаруженное и до сих пор известное только в сис-

теме ($\text{Se} + \text{Hg}$), в принципе, может быть сознательно воспроизведено и на других полупроводниковых материалах.

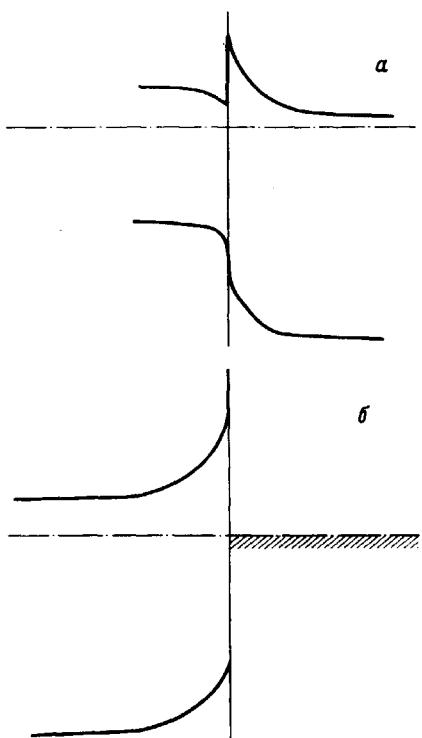


Рис. 3. Двухслойная модель "аномального" фотопроводника (энергетическая схема): *а* – система полупроводник – полупроводник, *б* – система металл – полупроводник

В заключение отметим, что, как показывает анализ, в случае обычного гомо-*p-n*-перехода, поглощение света свободными носителями в одной из областей, их переход в соседнюю область и рекомбинация там с основными носителями (процесс обратный подробно рассмотренному в [3]) также приводит к своеобразным явлениям, близким к "аномальной" фотопроводимости (обратная пропорциональность *r* интенсивности света и независимость от нее стационарной фотопроводимости). Однако, в этом случае, проводимость меняется только при переходе к освещению более коротковолновым светом, в то время как величина аномальной фотопроводимости не зависит от "направления" изменения длины волны.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
23 июля 1973 г.

Литература

- [1] М.И.Корсунский, Н.Г.Пастушук, Г.Д.Мохов. ФТТ, 3, 2667, 1961.
- [2] М.И.Корсунский. "Аномальная фотопроводимость" М., изд. Наука, 1972.
- [3] С.М.Рывкин, Д.В.Тархин. ФТП, 6, 1447, 1972.