

КИНЕТИКА ИНИЦИИРОВАННОЙ F-СВЕТОМ ИНФРАКРАСНОЙ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В ОКРАШЕННЫХ КРИСТАЛЛАХ NaCl

Е. В. Коровкин, Т. А. Лебёдкина

Исходя из наличия электронных ловушек, способных терять электроны под действием ИК-света, рассчитана кинетика иницированной F -светом инфракрасной фотопроводимости с учетом эффекта поляризации образца. Экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с расчетом. Дано качественное объяснение зависимости эффекта от интенсивности F -света, основанное на процессах образования и разрушения F' -центров под действием F -света.

При исследовании [1] низкотемпературной фотопроводимости в гамма-облученных кристаллах NaCl обнаружено, что, в то время как инфракрасный свет сам по себе не вызывает фотопроводимости, дополнительная к F -свету ИК-подсветка приводит к увеличению фотопроводимости в 5—8 раз. Было высказано предположение, что увеличение фотопроводимости при дополнительной инфракрасной подсветке связано с наличием ловушек, которые способны захватывать электроны, покидающие F -центр, и терять их под действием ИК-света. Проведенные исследования подтвердили наличие этих ловушек. Были измерены такие их характеристики, как спектральная чувствительность и энергия активации процесса термического разрушения [1].

В данной работе исследуется кинетика эффекта. Для концентрации заполненных электронами ИК-ловушек N и концентрации электронов в зоне проводимости n можно записать

$$\dot{N} = I_0 \alpha p - IN\beta + (n/\tau_e) p, \quad \dot{n} = IN\beta - n/\tau_e,$$

где I_0 — интенсивность F -света (предполагается, что F -свет полностью поглощается в образце); α — вероятность того, что возбужденный F -центр выбросит электрон; p — вероятность того, что выброшенный с F -центра электрон захватится на ИК-ловушку (предполагается, что доля заполненных электронами ИК-ловушек всегда мала); I — интенсивность ИК-света; β — вероятность того, что ловушка захватит ИК-фотон и затем выбросит электрон; τ_e — время жизни электрона в зоне проводимости.

Принимая во внимание, что τ_e на много порядков меньше наблюдаемых в эксперименте характерных времен, имеем

$$N = N_0 [1 - \exp(-t/\tau_0)], \quad N = I_0 \alpha p / I\beta (1 - p), \quad \tau_0 = 1/I\beta (1 - p) \gg \tau_e.$$

Переходя далее к фотопроводимости под действием F -света G_0 и под действием одновременно F - и ИК-света G , получаем

$$G_0 = I_0 \alpha A, \quad G = I_0 \alpha A + IN\beta B = G_0 \left[1 + \frac{B}{A} \frac{p}{1-p} (1 - \exp(-t/\tau_0)) \right],$$

а для стационарного состояния, т. е. при $t \gg \tau_0$

$$\frac{\Delta G}{G_0} = \frac{G - G_0}{G_0} = \frac{B}{A} \frac{p}{1-p},$$

где A — вклад в фототок покидающего F -центр электрона; B — вклад в фототок электрона, покидающего ловушку. Отметим далее, что

$$p = \sigma c_{\text{нк}} / (\sigma c_{\text{нк}} + \sigma_i c_i),$$

где σ — сечение захвата электрона ИК-ловушкой; $c_{\text{нк}}$ — концентрация занятых электронами ловушек; σ_i , c_i — соответствующие величины для других ловушек. Так как наиболее распространенными ловушками в кристалле являются сами F -центры ($F+e=F'$), концентрация которых (10^{18} см^{-3}) соизмерима или больше суммарной концентрации всех прочих ловушек, а ИК-ловушки составляют, по-видимому, небольшую часть этих ловушек, то p не более нескольких процентов. Следовательно, в случае $A=B$ величина эффекта также не превышала бы нескольких процентов. В нашем же случае имеем $\Delta G/G_0 = 5-8$, что означает $B/A \approx 10^2$. Это подтверждает сделанные в [1] предположения, что электроны с ловушек под действием ИК-света переходят в зону проводимости. Следует, однако, отметить, что, хотя непосредственная фотоионизация и является наиболее вероятной, возможны другие, более сложные механизмы. Потеря же электрона F -центром осуществляется при столь низких температурах туннелированием на близлежащие ловушки (по оценкам, это расстояние порядка 100 \AA [2]), что и обеспечивает соотношение $B \gg A$.

Поначалу может показаться странным, что величина стационарного эффекта $\Delta G/G_0 \approx (B/A) p/(1-p)$ оказалась не зависящей от интенсивности ИК-света. Однако в стационарном состоянии темп выброса электронов с ИК-ловушек равен темпу их захвата, захват же, естественно, не зависит от интенсивности ИК-света. Следовательно, темп выброса с ИК-ловушек также не зависит от интенсивности ИК-света. Т. е. стационарное количество заполненных электронами ловушек N_0 подстраивается так, что произведение $N_0 I$ становится не зависящим от I . Время достижения стационарного состояния $\tau_0 \sim 1/I$ становится очень большим при малых интенсивностях ИК-света, что делает невозможным экспериментально обнаружить большой эффект $\Delta G/G_0$ при малых I , хотя бы из-за наличия пренебрегаемой нами до сих пор поляризации образца.

Рассмотрим кинетику эффекта с учетом поляризации. Ток через образец

$$\dot{q} = G(U - q/c),$$

где U — приложенное к образцу напряжение; q/c — поляризация образца, естественно, пропорциональная заряду, прошедшему через образец; коэффициент c имеет размерность емкости (емкость пространственного заряда, образованного захватившими электроны ловушками). Согласно предыдущему,

$$G = G_0 [1 + k(1 - \exp(-t/\tau_0))], \quad (1)$$

где $k = (B/A) p/(1-p)$. Следовательно,

$$\dot{q} = G_0 [1 + k(1 - \exp(-t/\tau_0))](U - q/c). \quad (2)$$

Для случая, когда $I=0$, имеем более простое соотношение

$$\dot{q} = G_0(U - q/c),$$

что дает выброс тока при включении F -света величиной $G_0 U$ и дальнейший спад тока с постоянной времени $\tau = c/G_0$. Решая (2), получаем

$$dq/dT = (G_0 U) [1 + k(1 - e^{-ST})] e^{-(1+k)T} e^{k(1-e^{-ST})/S}, \quad (3)$$

где \dot{q} — фототок под суммарным воздействием F - и ИК-света; T — безразмерное время, $T = t/\tau$; S — безразмерная интенсивность ИК-света, $S = \tau/\tau_0$. Так как $\tau_0 \sim I^{-1}$, то $S \sim I$.

На рис. 1 представлена кинетика фототока, рассчитанная по (3) для случая $k=4.1$ (а) и наблюдаемая экспериментально (б). Видно весьма

хорошее качественное совпадение экспериментальных и расчетных кривых. Не видно какой-либо тенденции к насыщению фототока при увеличении интенсивности ИК-света, что свидетельствует о хорошем выполнении ранее сделанного предположения о малой доле заполняемых электронами ИК-ловушек. В то же время нужно отметить отличие в спаде кривых. Спад амплитуды рассчитанных кривых идет с самопересечением, а экспериментальные кривые идут более полого. Возможно, это связано с тем, что часть ловушек, создающих объемный заряд, оказывается разрушаемой светом (F -центры и ИК-ловушки). Это приводит к тому, что емкость объемного заряда s не остается постоянной во времени, что и приводит

к наблюдаемому отличию в спаде кривых.

Из приведенных выше формул следует, что величина $\Delta G/G_0$ не должна зависеть от интенсивности F -света I_0 . Однако опыт показывает, что это не

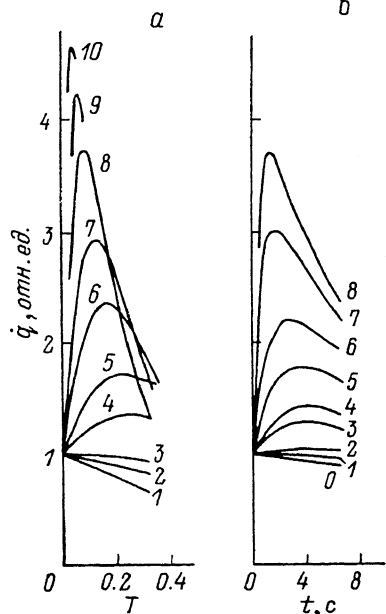


Рис. 1. Кинетика иницированной F -светом ИК-фотопроводимости.

a : $S=0$ (1), 0.1 (2), 0.25 (3), 1 (4), 2 (5), 5 (6), 10 (7), 26 (8), 50 (9), 100 (10).

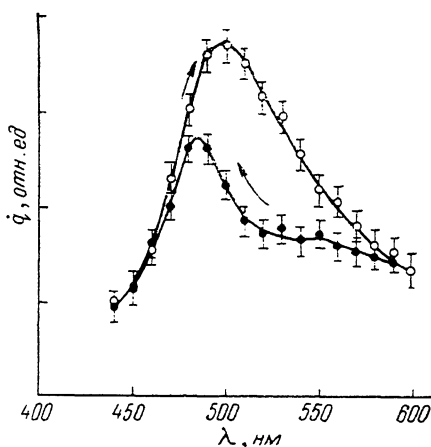


Рис. 2. Спектр фотопроводимости в диапазоне 450—600 нм в окрашенных кристаллах NaCl.

так. При меньшей интенсивности F -света эффект больше. Это приводит к тому, что при достаточно малой интенсивности F -света уже из-за наличия непреднамеренной подсветки образца ИК-светом (тепловое излучение от нагретых до комнатной температуры предметов) начальная форма импульса отличается от кривой 0 и соответствует кривым 2, 3 (рис. 1, б).

Выше предполагалось, что при возбуждении F -центра возникает первичный ток. Каждый электрон, создающий этот ток, дает небольшой вклад в проводимость по сравнению с электронами, покидающими ИК-центры ($B/A \gg 1$), что и обеспечивает большой эффект. Однако, кроме этого начального тока, при освещении образца F -светом возникает вторичный ток по следующей схеме: часть электронов, создающих первичный ток, захватываются F -центрами, являющимися эффективными ловушками для электронов из-за своей большой концентрации, и образует F' -центры. Так как F' -полоса достаточно широка, то падающий на образец F -свет возбуждает и разрушает также F' -центры с выбросом электронов в зону проводимости, где они могут дать большой вклад в проводимость. Поэтому даже небольшое число этих электронов может дать сравнимый с первичным фототок.

Экспериментально эта ситуация проявляется при измерениях фотопроводимости в диапазоне 450—600 нм (рис. 2). Каждой точке кривой соответствует пара импульсов (с разной полярностью электрического поля в образце, чтобы избежать накопления поляризации образца; под-

робнее изложено в [1]) длительностью 1.5—2 с. Из рис. 2 видно, что кривая измерения фотопроводимости свидетельствует о наличии гистерезиса. Свет 450—480 нм не только создает F' -центры, но и разрушает их; свет же 600 нм разрушает сильнее и практически уже не создает их, что и обеспечивает наличие гистерезиса. Конечно, из результатов этого эксперимента можно лишь сделать вывод, что в кристалле имеется дефект, способный эффективно захватывать выброшенные из F -центров электроны, образуя при этом электронный центр окраски, способный под действием света выбрасывать электроны в зону проводимости, и что максимум чувствительности к свету этого центра лежит в диапазоне 500—600 нм. Однако исходя из известных данных по электронным центрам окраски, нетрудно сделать вывод, что это F' -центр. Предполагая, что вклад вторичного тока для нижней кривой в отличие от верхней кривой незначителен (особенно в диапазоне 550—500 нм), можно получить из разности кривых оценку снизу для доли вторичного тока в полный фототок не менее 40 %. Наличие этого тока уменьшает эффект $\Delta G/G_0$ из-за большого вклада вторичных электронов в фототок, уменьшающих отношение B/A и в тем большей степени, чем большую часть от общего тока составляет вторичный ток. В то время как первичный ток должен быть пропорционален I_0 , вторичный ток должен быть пропорционален I_0^2 , т. е. при большей интенсивности F -света его доля увеличивается, что и приводит к уменьшению эффекта.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Коровкин Е. В., Лебедекина Т. А. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 9. С. 2807—2809.
[2] Beall Fowler W. // Phys. Rev. A. 1964. V. 135. N 6. P. 1725—1732.

Институт физики твердого тела
АН СССР
Черноголовка
Московская область

Поступило в Редакцию
12 января 1990 г.
В окончательной редакции
26 июня 1990 г.