

СЕЧЕНИЕ СВЯЗЫВАНИЯ СВОБОДНЫХ НОСИТЕЛЕЙ В ЭКСИТОНЫ В ГЕРМАНИИ

*Е.М.Гершензон, Г.Н.Гольцман, В.В.Мултановский,
Н.Г.Птицина*

Исследована кинетика фотопроводимости, возникающей при ионизации экситонов в германии субмиллиметровым излучением. Определено сечение связывания $\sigma_{\text{СВ}}$ свободных носителей в экситоны в интервале температур 1,5 — 8 К. Оказалось, что $\sigma_{\text{СВ}}$ больше измеренного таким же методом [1] сечения захвата носителей притягивающим мелким донором или акцептором и имеет другую температурную зависимость.

Несмотря на большое количество работ по исследованию свободных экситонов в германии и их конденсации, процесс связывания носителей в экситоны экспериментально практически не изучался. Измерить сечение связывания $\sigma_{\text{СВ}}$ в широком диапазоне температур и концентраций свободных носителей не удавалось из-за трудностей отделения конкурирующих механизмов межзонной рекомбинации, влияния диссоциации экситонов при высоких температурах ($T > 4$ К) и их конденсации при низких. В кремнии это сделать проще, однако и для него известна только одна работа [2].

В то же время теория связывания носителей в экситоны в последнее время получила значительное развитие. В [3] к процессу связывания свободных носителей в экситоны применена методика расчета, ранее с успехом использованная для примесных центров [4]. Каскадная рекомбинация электронно-дырочной пары рассматривается как диффузия в пространстве полной энергии, причем особое внимание уделяется процессам рассеяния энергии при движении центра масс электронно-дырочной пары и обмена энергией между внутренним и поступательным движением экситона. Этот дополнительный, по сравнению с рекомбинацией на примесных центрах, канал потери энергии приводит к большему значению $\sigma_{\text{СВ}}$ и к другой зависимости его от температуры. Результаты теории применимы к Ge, по-видимому, с существенно большей точностью, чем к Si, так как значительная часть расчетов выполнялась в предположении большой разницы в массах электрона и дырки.

Нам представляется, что для изучения процесса связывания свободных носителей в экситоны большие возможности дают измерения субмиллиметровых спектров фотопроводимости и поглощения, которые стали возможными благодаря созданию спектрометров с лампами обратной волны [5]. Они позволяют проводить не только измерения в диапазоне волн, соответствующем энергии связи экситона в германии [6], и, тем самым, отделить связывание в экситоны от других конкурирующих механизмов межзонной рекомбинации, но и измерять времена нестационарных процессов до 10^{-9} сек. Проведение измерений как стационарным, так и нестационарным методом необходимо для получения досто-

верных значений сечения связывания, поскольку первый метод не дает, как правило, точных абсолютных значений сечения, а во втором значительное влияние на результаты оказывает реемиссия неравновесных носителей с высоких возбужденных состояний центров каскадной рекомбинации [1]. Кроме того, мы получаем возможность сопоставить связывание носителей в экситоны с изученным тем же методом захватом носителей на мелкие доноры и акцепторы.

Эксперимент проводился в диапазоне волн $\lambda = 0,5 - 0,25$ мкм в интервале температур $T = 1,5 \div 10$ К на образцах Ge с концентрацией доноров и акцепторов $10^{10} - 10^{12}$ см⁻³. Основными измеряемыми величинами были концентрация фотоносителей Δn , возбуждаемых субмиллиметровым излучением, и время релаксации субмиллиметровой фотопроводимости τ_p . Однако, зависимость $\tau_p(T)$ даже при постоянном уровне межзонного возбуждения определяется не только изменением сечения связывания с температурой, но и изменением концентрации нейтральных центров-экситонов (N_3), ионизация которых приводит к субмиллиметровой фотопроводимости, и концентрации центров захвата (N_p), роль которых играют носители противоположного знака. Поэтому нами измерялись Δn , n , N_3 , τ_p в зависимости от температуры и уровня межзонного возбуждения. Значения Δn и n определялись по площади линии циклотронного резонанса на частоте 36 ГГц, N_3 — по коэффициенту поглощения субмиллиметрового излучения при фотоионизации экситонов [6], а τ_p — по зависимости фотопроводимости от частоты модуляции субмиллиметрового излучения.

По этим данным получены зависимости стационарного времени жизни τ , пропорционального $\Delta n/N_3$, и времени релаксации фотопроводимости τ_p от n и T . Для определения абсолютного значения τ необходимо измерить еще время жизни свободных экситонов τ_3 . Действительно, при низких температурах, когда термическая диссоциация отсутствует и рекомбинация электронов и дырок идет только через экситоны. $n/\tau = N_3/\tau_3$. Для определения τ_3 измерялась зависимость коэффициента поглощения субмиллиметрового излучения от частоты модуляции межзонного света. Характерная частота спада этой зависимости давала значение τ_3 ; для измерений отбирались образцы с $\tau_3 = 4 - 8$ мксек.

На рис.1 приведены зависимости τ и τ_p от n при $T = 4,2$ К. Они одинаковы для всех исследуемых образцов. Видно, что $\tau \sim n^{-1}$ (пунктир) и заметно меньше τ_p . Отличие τ_p от τ объясняется нами реемиссией носителей с высоких возбужденных состояний экситонов, выступающих в качестве уровней прилипания. На том же рисунке сплошной линией показана зависимость $\tau_p(N_p)$, полученная в соответствии с работой [1], посвященной аналогичным исследованиям мелких примесных центров. Совпадение сплошной кривой рис.1 с экспериментальными данными свидетельствует, что прилипание носителей в высоких возбужденных состояниях мелких примесей и экситонов одинаково влияет на релаксацию избыточной концентрации носителей.

Измеренные температурные зависимости Δn , n , N_3 позволяют получить значения сечения связывания в интервале температур 1,6 — 8 К. Эти результаты представлены на рис.2 вместе с соответствующими данными для мелких доноров и акцепторов в Ge, полученными тем же ме-

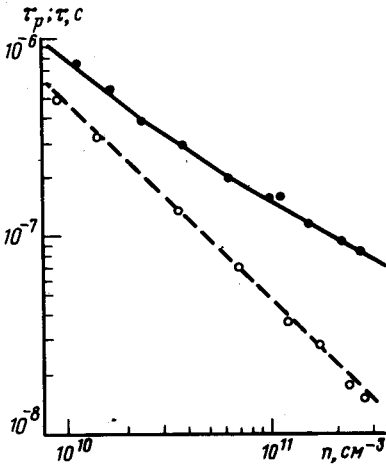


Рис. 1

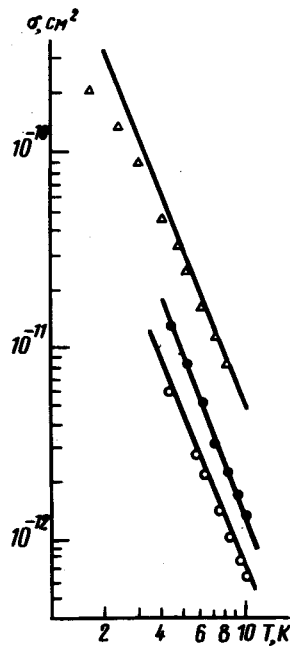


Рис. 2

Рис.1. Зависимости времени жизни (о) и времени релаксации (●) субмиллиметровой фотопроводимости при связывании носителей в экситоны от концентрации свободных носителей n ($T = 4,2\text{ K}$)

Рис.2. Зависимости сечений захвата носителей на мелкие доноры (●) и акцепторы (о) и сечения связывания свободных носителей в экситоны (Δ) от температуры

Тодом — по кинетике субмиллиметровой фотопроводимости [1]. Здесь же приведены теоретические кривые, для экситонов по [3] и для примесей по [4]. Видно, что сечение связывания в экситоны совпадает с теорией [3] и превышает сечение захвата носителей как донорами, так и акцепторами: например, при $T = 4,2\text{ K}$ $\sigma_{\text{св}}$ составляет $\sigma_{\text{св}} = 3,2 \times 10^{-11}\text{ cm}^2$, а сечения захвата на доноры и на акцепторы равны соответственно: $\sigma_{\text{Д}} = 1,4 \cdot 10^{-11}\text{ cm}^2$, $\sigma_{\text{А}} = 6 \cdot 10^{-12}\text{ cm}^2$. Отметим, что $\sigma_{\text{св}}$ имеет более слабую температурную зависимость в диапазоне измерений. Важно, что температурный интервал, использованный в измерениях, представляет наибольший интерес при сопоставлении сечения связывания в экситоны и захвата на примесь. Согласно [3] для Ge при $T = 1 \div 10\text{ K}$ основную роль в связывании играют такие расстояния между электроном и дыркой, при которых скорость релаксации полной энергии сравнивается со скоростью обмена энергией между внутренним и поступательным движениями экситона. В этом интервале температур расчет наиболее сложен. При более низких T (для Ge при $T < 1\text{ K}$) процесс связывания ничем не отличается от захвата на примесь, а при $T > 10\text{ K}$ релаксация энергии определяется остыванием горячих экситонов в основном состоянии.

В заключение следует отметить, что в условиях эксперимента при $T = 1,6 - 2,2\text{ К}$, когда конденсация экситонов приводит к существенно-му уменьшению их концентрации, механизм рекомбинации свободных носителей не меняется.

Московский государственный
педагогический институт

Поступила в редакцию
18 апреля 1981 г.

Литература

- [1] Е.М.Гершензон, Г.Н.Гольцман, В.В.Мултановский, Н.Г.Птицина. ЖЭТФ, 77, 1450, 1979 .
 - [2] J.Barrow, M.Heckmann, M.Brousseau. J. Phys. Chem, Sol., 34, 381, 1973.
 - [3] В.Н.Абакумов, В.И.Перель, И.Н.Яссиевич. ЖЭТФ, 78, 1240, 1980.
 - [4] В.Н.Абакумов, В.И.Перель, И.Н.Яссиевич. ФТП, 12, 3, 1978.
 - [5] Е.М.Гершензон, Г.Н.Гольцман, Н.Г.Птицина. ЖЭТФ, 64, 587, 1973.
 - [6] Е.М.Гершензон, Г.Н.Гольцман, Н.Г.Птицина. ЖЭТФ, 70, 224, 1976.
-