

## МАГНИТОПРИМЕСНЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ В АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ

*В.Н.Зверев*

При исследовании низкотемпературной фотопроводимости  $n$ -GaAs обнаружены осцилляции, периодичные в шкале обратного магнитного поля, которые обусловлены процессами неупругого рассеяния электронов на нейтральных возбужденных донорах.

При низких температурах существенный вклад в кинетические параметры системы неравновесных носителей в полупроводниках могут вносить мелкие примеси, находящиеся в возбужденном состоянии. Впервые на это обстоятельство было указано в работе <sup>1</sup>, в которой при исследовании зависимости от магнитного поля фотопроводимости  $p$ -Ge были обнаружены магнитопримесные осцилляции. Эти осцилляции обусловлены процессами неупругого

рассеяния термализованных электронов на возбужденных акцепторах, переходящих при рассеянии из низшего возбужденного состояния в основное и передающих свою энергию электронам.

Наличие заметной заселенности низшего из возбужденных состояний акцепторов в фото-возбужденном германии обусловлено тем, что энергетическая релаксация центра идет сравнительно быстро по возбужденным состояниям, в то время как переход в основное состояние характеризуется на один — два порядка большим временем  $\tau^* \approx 10^{-7}$  с и оказывается затрудненным. Оценки показывают, что примерно такое же большое значение  $\tau^*$  следует ожидать для доноров в GaAs и, следовательно, в этом материале также возможно наблюдение магнитопримесных осцилляций.

В настоящей работе магнитопримесные осцилляции были обнаружены при исследовании фотопроводимости образцов эпитаксиального *n*-GaAs толщиной  $\sim 100$  мкм с разностной концентрацией  $N_D - N_A = 2 \cdot 10^{14}$  см $^{-3}$ . Образцы, снабженные низкоомными индиевыми контактами, помещались в жидкий гелий в центр сверхпроводящего соленоида. Для создания неравновесных электронов использовалось инфракрасное излучение, идущее от теплых частей криостата. Сигнал пропорциональный фототоку  $J$ , или производной  $dJ/dH$  записывался в функции обратного магнитного поля  $H^{-1}$  при постоянном напряжении на контактах, создающем электрическое поле  $\sim 1$  В/см. Измерения проводились в геометрии  $J \parallel H \parallel [110]$ . Температуру можно было менять в диапазоне 4,2 — 1,3 К. При этом фототок изменялся примерно на порядок, падая с понижением температуры.

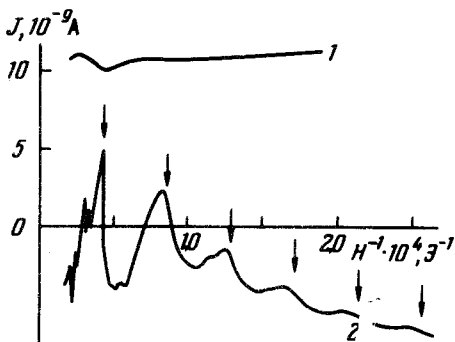


Рис.1. Зависимость фототока  $J$  (кривая 1) и величины  $dJ/dH$  (кривая 2, отн. ед.) от обратного магнитного поля.  $T = 1,3$  К

Пример экспериментальных записей представлен на рис.1. Как видно из рисунка, величина  $dJ/dH$  испытывает осцилляции периодичные в шкале  $H^{-1}$ . На зависимости  $J(H^{-1})$  виден только первый минимум, глубина которого составляет около 10% от полного тока. Стрелками на рисунке указаны значения магнитных полей, при которых выполняется условие резонанса

$$n \hbar \Omega = E_{2p_1}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

где  $\Omega = eH/mc$  — циклотронная частота электронов,  $m$  — циклотронная масса,  $m = 0,0665 m_0$ ,  $E_{2p_1}$  — низший потенциал возбуждения донора. Величина  $E_{2p_1}$  и ее зависимость от  $H$  были взяты из работы <sup>3</sup> для донора, у которого химический сдвиг основного состояния близок к среднему значению для разных примесей (линия IV в <sup>3</sup>). Зависимости от  $H$  потенциалов возбуждения донора для ряда возбужденных состояний показаны на рис.2. Значения резонансных полей, при которых выполняется соотношение (1) для первых четырех номеров, показаны на рис.2 стрелками. Соотношение (1), как видно из рис.1, хорошо описывает периодичность наблюдаемых осцилляций. Этот факт, а также то, что на зависимости  $dJ/dH(H^{-1})$  явно выделен период, отвечающий лишь низшему потенциалу возбуждения донора, позволяет утверждать, что осцилляции обусловлены процессами неупругого рассеяния электронов на возбужденных донорах.

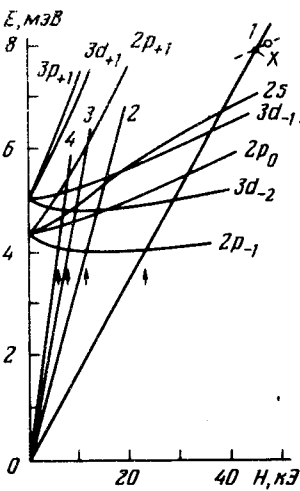


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость от магнитного поля энергии возбужденных состояний донора, построенная по данным работы <sup>3</sup>. Прямые линии – зависимости величин  $n \hbar \Omega$  от  $H$  для первых четырех номеров. Светлая точка соответствует линии, наблюдавшейся в работе <sup>4</sup>

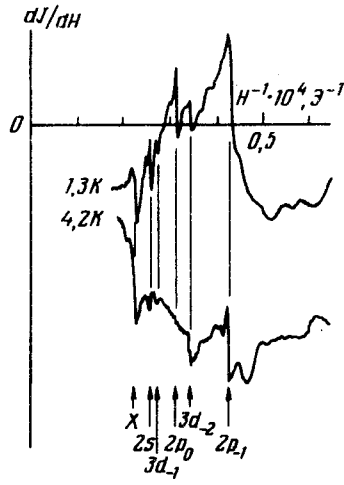


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость  $\frac{dJ}{dH} (\text{Э}^{-1})$  в области больших полей при разных температурах.

Ту же периодичность мог бы дать и противоположный процесс: охлаждение горячих электронов за счет возбуждения примесей. Однако в рамках такой модели невозможно было бы объяснить выделение низшего из возбужденных состояний примеси. Кроме того, здесь существенны лишь горячие электроны с энергией  $E \geq E_{2p_{-1}} \approx 40 \text{ К}$ . Сильная температурная зависимость фотопроводимости означает, что вклад таких носителей в ток мал и их резонансным рассеянием трудно объяснить наблюдаемую большую амплитуду осцилляций.

Помимо магнитопримесных осцилляций в области больших магнитных полей на зависимости  $\frac{dJ}{dH} (\text{Э}^{-1})$  наблюдается ряд дополнительных особенностей. На рис. 3 эта область показана в расширенном масштабе для двух разных значений температуры. Стрелками показаны значения магнитных полей, вычисленные по данным работы <sup>3</sup>, при которых энергия  $\hbar \Omega$  сравнивается с потенциалами возбуждения доноров для нескольких низколежащих возбужденных состояний. Полученные значения полей довольно точно описывают положения экстремумов. Идентификация линии  $X (H_X = 45 \text{ кЭ})$  затруднена, поскольку мы не располагаем надежными данными о зависимости от  $H$  энергии возбужденных состояний, лежащих выше состояния  $2s$ . По-видимому, эту линию следует приписать тому же уровню, на который наблюдались переходы в поле  $H = 47,9 \text{ кЭ}$  в экспериментах по лазерной спектроскопии GaAs <sup>4</sup> (см. рис. 2).

Таким образом, помимо магнитопримесных осцилляций на зависимости  $\frac{dJ}{dH} (\text{Э}^{-1})$  наблюдаются также резонансные линии меньшей амплитуды, отвечающие неупругому рассеянию электронов на донорах, при котором идут переходы с участием основного и возбужденных состояний, лежащих выше состояния  $2p_{-1}$ . Отметим, что амплитуды линий, соответствующих этим переходам, довольно сильно отличаются друг от друга, а соотношение между амплитудами зависит от температуры (рис. 3). Исходя из совпадения формы линии, соответствующей уровню  $2p_{-1}$  на рис. 3, и линий, лежащих в больших полях, можно предположить, что наблюдаемые резонансы обусловлены процессами того же типа, что и магнитопримесные осцилляции. Тогда амплитуда наблюдаемых линий должна отражать степень заселенности возбужденных состояний, пронормированную на вероятность неупругого рассеяния электрона на доноре в соответствующем возбужденном состоянии.

К сожалению, для проверки этого предположения мы не располагаем данными ни о степени заселенности возбужденных состояний доноров в GaAs в условиях фотовозбуждения, ни о вероятностях неупругого рассеяния электронов на водородоподобных примесях в области промежуточных магнитных полей.

Автор благодарен В.Ф.Гантмахеру и С.В.Мешкову за полезные дискуссии.

#### Литература

1. Гантмахер В.Ф., Зверев В.Н. ЖЭТФ, 1975, 69, 695.
2. Stillman G.E., Wolfe C.M., Dimmock J.O. Solid State Comm., 1969, 7, 921.
3. Гершензон Е.М., Гольцман Г.Н., Елантьев А.И. ЖЭТФ, 1977, 72, 1062.
4. Simmonds P.E., Chamberlain J.M., Hoult R.A., Stradling R.A., Bradley C.C. J.Phys. C: Solid State Phys., 1974, 7, 4164.

Институт физики твердого тела  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
7 декабря 1982 г.