

МЕЖЗОННАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ МЕЗОСКОПИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА GaAs

А.А.Быков, Г.М.Гусев, З.Д.Квок,
Д.И.Лубышев, В.П.Мигаль

Обнаружено, что межзонная фотопроводимость (ФП) мезоскопического образца GaAs ведет себя принципиально по-новому: она аperiodически осциллирует во времени, при этом средняя частота осцилляций пропорциональна интенсивности излучения. Анализ ФП показывает, что при малых интенсивностях она обусловлена перезарядкой единичного числа примесей.

К настоящему времени исследования мезоскопических систем на основе полупроводников ведутся широким фронтом¹⁻³. Однако все еще отсутствуют работы, в которых были бы изучены их фотозлектрические свойства. В данной статье впервые исследована межзонная ФП мезоскопического образца GaAs и обнаружено, что она является осциллирующей во времени, при этом с увеличением интенсивности падающего излучения растет как амплитуда, так и средняя частота осцилляций. Это означает, что мезоскопический полупроводник обладает принципиально новым типом фотопроводимости. Образцы, исследованные в работе, представляли собой δ -легированные слои GaAs субмикронных размеров. Методика их изготовления описана ранее⁴. Параметры исходного δ -слоя: $n_s = 3,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $\mu = 4200 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Размеры: длина $L = 1 \div 2 \text{ мкм}$, ширина $W = 0,2 \div 0,5 \text{ мкм}$. ФП измерялась в диапазоне температур 1,7–4,2 К с помощью активного моста по четырехточечной схеме. Образец освещался AlGaAs – светодиодом, максимум излучения которого соответствовал длине волны $\lambda = 670 \text{ нм}$. Измерения ФП макроскопических образцов δ -легированного GaAs ($L = 500 \text{ мкм}$, $W = 200 \text{ мкм}$) показали, что она ведет себя обычным образом, а кинетика нарастания описывается классической формулой:

$$\Delta\sigma_{\text{ф}}(t) = \Delta\sigma_{\text{ст}}(1 - \exp(-t/\tau)),$$

где $\Delta\sigma_{\text{ст}} = e\mu\beta n_{\text{ф}} \tau$ (τ – время жизни, β – квантовый выход, $n_{\text{ф}}$ – поток фононов) с $\tau = 10^2 - 10^3 \text{ с}$.

На рис. 1а показаны результаты измерения $\Delta\sigma_{\text{ф}}(t)$ мезоскопического образца с размерами $L = 1 \div 1,5 \text{ мкм}$ и $W = 0,2 \div 0,4 \text{ мкм}$ при $T = 1,7 \text{ К}$. Хорошо видно, что поведение ФП в этом случае имеет ряд принципиальных особенностей: 1) ФП представляет собой аperiodическую

дические во времени осцилляции, которые сохраняются некоторое время и после выключения освещения; 2) как видно из рис. 1б, на котором приведена зависимость среднего числа максимумов и минимумов ФП в одну секунду \bar{n} от количества падающих фотонов n_{ϕ} (калибровка потока проводилась по кремниевому фотодиоду с известной β), частота флуктуаций ФП при $n_{\phi} \lesssim 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ растет примерно пропорционально n_{ϕ} , затем рост \bar{n} уменьшается и зависимость $\bar{n}(n_{\phi})$ выходит практически на насыщение; 3) фурье-спектр описанных зависимостей $\Delta\sigma_{\phi}(t)$, приведенный на рис. 2, показывает, что в спектре сигнала присутствует набор частот, причем амплитуда фурье-компонент растет с уменьшением частоты (этим он напоминает спектр $1/f$ шума), и падает с уменьшением интенсивности; 4) величина средней амплитуды осцилляций $\delta\sigma_{\phi} = \sqrt{\langle \delta\sigma_{\phi}^2 \rangle}$ растет с увеличением n_{ϕ} (см. вставку к рис. 2); 5) величина $\delta\sigma_{\phi}$ растет с уменьшением температуры примерно по закону $\delta\sigma_{\phi} \sim T^{-0,5 \pm 0,15}$.

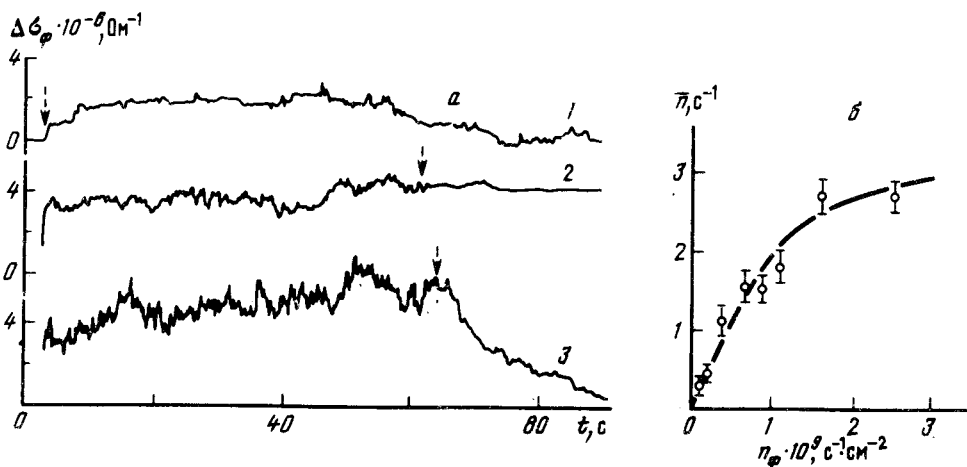


Рис. 1. а) Зависимость фотопроводимости мезоскопического образца GaAs от времени при различных потоках фотонов n_{ϕ} ($10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$): 1 – 0,2, 2 – 1,1, 3 – 5, $T = 1,7 \text{ К}$, сплошная стрелка – момент включения света, пунктирная – выключения. б) Зависимость среднего числа максимумов и минимумов ФП в секунду от n_{ϕ} .

Перейдем к анализу перечисленных экспериментальных фактов. Как показано теоретически в работах ^{5,6}, мезоскопический проводник может заметным образом изменить свою проводимость, если меняется конфигурация рассеивающего потенциала из-за перезарядки одной примеси. Это свойство мезоскопического образца позволяет объяснить, по крайней мере, качественно, все описанные выше особенности поведения ФП, если предположить, что возбужденные светом неравновесные носители инициируют (скажем вследствие ионизации или захвата) изменение этой конфигурации. Это предположение подтверждается тем, что после облучения образца потоком фотонов $n_{\phi} \gtrsim 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в течение времени $t \approx 60 \text{ с}$ существенным образом менялась картина флуктуаций проводимости в зависимости от магнитного поля. В связи с этим интересно оценить какому числу фотонов ν , падающих в одну секунду на образец соответствует \bar{n} при $n_{\phi} < 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Эта оценка дает $\bar{n} = (1 \div 3)\nu$ (неопределенность в результате обусловлена главным образом сложной геометрией исследованного субмикронного образца). Это означает, что одна особенность в ФП соответствует поглощению одного – трех фотонов.

Из вышесказанного следует, что если поглощение одного фотона сопровождается перезарядкой одной примеси, то ФП обусловлена изменением состояния единичного числа

примесей. Этот вывод подтверждается оценкой количества перезаряжаемых примесей по величине средней амплитуды флуктуации ФП на основе теории⁵⁻⁷, которая предсказывает,

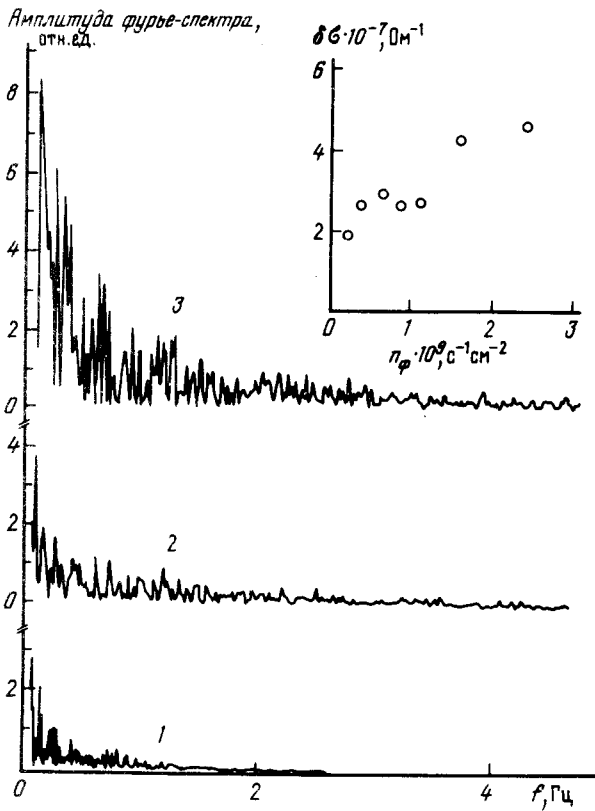


Рис. 2. Зависимость амплитуды Фурье спектра фотопроводимости при различных уровнях интенсивности света (n_{ϕ} то же, что и на рис. 1а). На вставке: зависимость средноквадратичного отклонения ФП от интенсивности света.

что для того чтобы флуктуация $\delta\sigma$ была равна $\frac{e^2}{h} \left(\frac{W}{L}\right)^{1/2} \frac{L_{\phi}}{L}$ (L_{ϕ} — длина фазовой когерентности) необходимо перезарядить $(N_s l_p^2 / \kappa)^{1/2}$ примесей (N_s — концентрация примесей, l_p — длина свободного пробега, $\kappa = 0,23$). Из этой формулы видно, что при понижении температуры амплитуда флуктуаций проводимости при постоянной подсветке должна расти пропорционально $L_{\phi} \sim T^{-0,5}$, что и наблюдается в эксперименте. Величину $\delta\sigma$ можно определить из измерений в магнитном поле⁴. Они дают $\delta\sigma = 5 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1}$. При наименьшей

интенсивности потока, как видно из вставки к рис. 2, $\delta\sigma_{\phi} = 2 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1}$. Отсюда среднее

число перезаряжаемых примесей $\Omega = \frac{N_s l_p^2}{\kappa} (\delta\sigma_{\phi} / \delta\sigma)^2 = 2-3$. Таким образом в этих условиях ФП обусловлена перезарядкой единичного числа примесей. Исходя из этой картины рост $\delta\sigma_{\phi}$ с n_{ϕ} можно связать с увеличением Ω при больших интенсивностях. Отметим, что захват на поверхностные состояния единичных электронов наблюдался в кремниевых МДП транзисторах малых размеров⁸, а перемещение единичного числа примесей в мезоскопических образцах Vi ⁹ и Cu ¹⁰. В этих системах, однако, конфигурация потенциала менялась неконтролируемым образом. В данной работе впервые осуществлено изменение этой конфигурации за счет перезарядки примесей, обусловленной поглощением фотонов. Показано, что фотон, возбуждая неравновесные носители, позволяет контролируемым образом менять зарядовое состояние единичного числа примесей, причем этот

эффект является доминирующим. Именно он приводит к тому, что ФП мезоскопического проводника имеет принципиальные особенности и можно говорить о появлении нового вида ФП полупроводников – мезоскопической ФП.

Авторы благодарят Е.Б.Ольшанецкого и А.Ю.Сарычева за помощь при обработке эксперимента, В.Л.Альперовича, В.А.Принца и М.В.Энтина за полезные обсуждения, М.Р.Бакланова за проведение плазмохимического травления GaAs, Ю.В.Настаушева за изготовление фотошаблонов.

Литература

1. *Licini J.C., Bishop D.J., Kastner M.A., Melngailis J.* Phys. Rev. Lett., 1985, 2987.
2. *Thornton T.J., Pepper M., Ahmed H. et al.* Phys. Rev. B, 1987, 36, 4514.
3. *Taylor R.P., Leadbeater M.I., Whittington G.P. et al.* Surf. Sci., 1988, 196, 52.
4. *Быков А.А., Гусев Г.М., Квон З.Д. и др.* Письма в ЖЭТФ, 1989, 49, 13.
5. *Альшулер Б.Л., Спивак Б.З.* Письма в ЖЭТФ, 1985, 42, 363.
6. *Feng S., Lee P.A., Stone A.D.* Phys. Rev. Lett., 1986, 56, 1960.
7. *Giordano N.* Phys. Rev. B, 1987, 36, 4190.
8. *Balls K.S., Skocpol W.J., Jackel L.D. et al.* Phys. Rev. Lett., 1984, 52, 228.
9. *Beutler D.E., Meisnheimer T.L., Giordano N.* Phys. Rev. Lett., 1987, 58, 1240.
10. *Ralls K.S., Buhram R.A.* Phys. Rev. Lett., 1988, 60, 2426.

Институт физики полупроводников
Сибирское отделение Академии наук СССР

Поступила в редакцию
20 декабря 1988 г.