

06.3

Положительная задержанная фотопроводимость в двойных гетероструктурах $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ p -типа

© В. Краак, Н.Я. Минина*, А.М. Савин,
А.А. Ильевский, К.Б. Соренсон

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
E-mail: min@mig.phys.msu.su*

Поступило в Редакцию 8 ноября 2002 г.

Положительная задержанная фотопроводимость обнаружена в двойных гетероструктурах $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ p -типа после облучения красным светодиодом. В этом состоянии наблюдалось увеличение концентрации двумерных дырок в 1.5 раза и их подвижности в 1.7 раза по сравнению со значениями в начальном темновом состоянии. Задержанная фотопроводимость может быть объяснена существованием глубоких электронных ловушек, расположенных на инвертированной гетерогранице выше уровня Ферми.

Ранее было обнаружено, что освещение одиночной гетероструктуры $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ p -типа красным светодиодом при температуре жидкого гелия приводит к отрицательной фотопроводимости (ОФП), которая после выключения светодиода медленно релаксирует к начальному темновому состоянию [1].

В настоящей работе мы сообщаем о наблюдении эффекта положительной задержанной фотопроводимости (ПЗФП), впервые обнаруженной в двойной гетероструктуре $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ p -типа. Данная структура отличается от структуры, описанной в работе [1], наличием второй инвертированной гетерограницы. При изучении сверхрешеток на основе GaAs/AlAs большой интерес вызывает сильное различие электронных свойств нормальной „AlGaAs на GaAs“ и инвертированной „GaAs на AlGaAs“ гетерогранице. Это связывают с сегрегацией примесей и возникновением внутренних дефектов вблизи

* The text is submitted by the author in English.

инвертированной гетерограницы в процессе роста [2,3], однако возможное влияние таких дефектов на фотопроводимость и переходные процессы, насколько нам известно, не исследовалось.

Гетероструктура $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ p -типа была выращена методом молекулярно-лучевой эпитаксии в направлении [001] и модулированно легирована Ве с концентрацией $2 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ в активном слое AlGaAs по обе стороны от квантовой ямы (КЯ) в GaAs (шириной 100 \AA). Методом фотолитографии на поверхности образцов, имеющих форму прямоугольных параллелепипедов, изготавливалась мезоструктура в холловской конфигурации. При температуре $T = 1.5 \text{ К}$ темновая концентрация 2D дырок составляла $N = 2.7 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$, подвижность $\mu = 7.0 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Для освещения использовался красный светодиод с энергией фотона $h\nu = 1.9 \text{ эВ}$.

Концентрация 2D дырок в течение переходного процесса рассчитывалась из измерений эффекта Холла. В темновом состоянии и в состоянии ПЗФП она дополнительно контролировалась по осцилляциям Шубникова–де Гааза и квантовому эффекту Холла. Согласие в пределах 2% данных, полученных из эффекта Холла и квантовых эффектов, подтверждает, что наблюдаемая ПЗФП не связана с параллельной проводимостью, описанной в работе [4].

При освещении (1) образцы $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ переходили в состояние ОФП аналогично тому, что наблюдалось в работе [1] у образцов $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ с единичной нормальной гетерограницей. Однако в нашем случае двойной гетероструктуры после того, как светодиод выключался (2), переходный процесс переводил систему не в темновое состояние, как в [1], а в состояние ПЗФП (рис. 1), в котором концентрация 2D дырок возрастала в 1.5 раза, а их подвижность — в 1.7 раза по сравнению с темновыми значениями. Начальное темновое состояние могло быть восстановлено путем отогрева до комнатной температуры с последующим охлаждением до 1.5 К.

Переходный процесс между состояниями ОФП и ПЗФП неэкспоненциален и может быть хорошо описан логарифмическим законом [1]:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_0} + \Delta\sigma \left[\ln \left(\frac{t - t_0}{\tau} + 1 \right) \right]^{\gamma}, \quad (1)$$

где R_0 — сопротивление образца в момент выключения освещения $t = t_0$, $\Delta\sigma$ — амплитудный множитель и τ — временная константа,

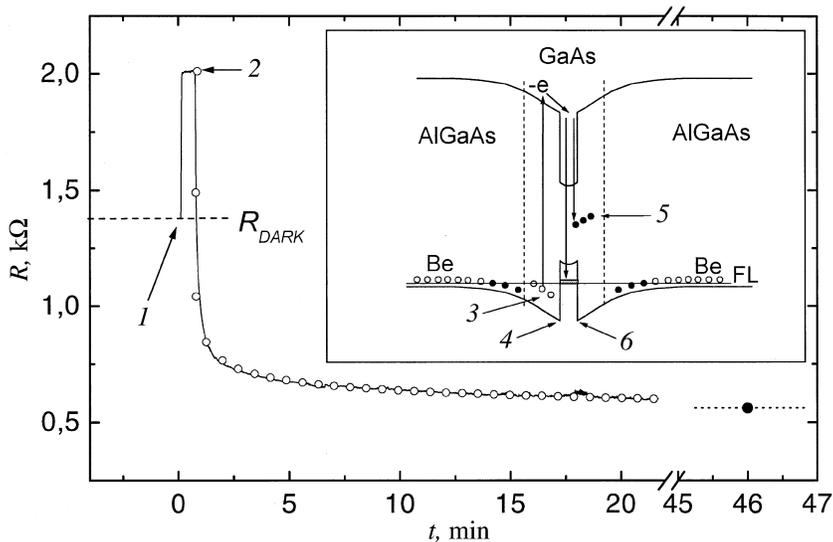


Рис. 1. ОФП и ПЗФП в двойной гетероструктуре $p\text{-Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ (сплошная линия). Штриховая линия показывает сопротивление в темновом состоянии. Светлые точки — результат подгонки. Черная точка — значение сопротивления через 45 min. после выключения светодиода. На вставке изображена предложенная модель процессов, происходящих под освещением.

характеризующая релаксационный процесс. Результат подгонки с параметрами $1/R_0 = 0.495 \text{ k}\Omega^{-1}$, $\Delta\sigma = 0.509 \text{ k}\Omega^{-1}$, $\tau = 6 \text{ s}$ и $\gamma = 0.51$ показан точками на рис. 1.

Поскольку энергия кванта падающего излучения составляет 1.9 eV , а ширина запрещенной зоны в $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ при температуре 4.2 K составляет 2.14 eV , прямые переходы из валентной зоны в зону проводимости невозможны. Следуя работе [1], мы предположили существование нейтральных донороподобных уровней (3), расположенных немного ниже уровня Ферми поблизости от нормальной (4) гетерограницы (вставка на рис. 1). Электроны, возбужденные в зону проводимости с этих уровней, под действием поля, действующего на гетерогранице, попадают в КЯ и рекомбинируют с 2D дырками, вызывая уменьшение их

концентрации. После выключения светодиода релаксационный процесс обусловлен туннелированием дырок обратно в КЯ с возбужденных донороподобных уровней на нормальной гетерогранице.

Состояние ПЗФП в двойной гетероструктуре характеризуется большим значением концентрации 2D дырок по сравнению с темновым состоянием. Так как $p\text{-Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ отличается от $p\text{-GaAs}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ наличием инвертированной гетерограницы, можно предположить, что в процессе освещения некоторое количество электронов захватывается электронными ловушками (5), расположенными вблизи инвертированной (6) гетерограницы над уровнем Ферми (вставка на рис. 1). Если считать, в соответствии с работой [1], что все дырки с возбужденных донороподобных уровней возвращаются в КЯ, то из соображения сохранения заряда общая концентрация 2D дырок в состоянии ПЗФП должна быть выше по сравнению с темновым. Недавно методом релаксационной спектроскопии [3] была обнаружена серия из четырех глубоких уровней, которые характерны для инвертированной гетерограницы $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ n -типа, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии, и действуют как электронные ловушки. Так как возникновение электронных ловушек, описанных в работе [3], не связано с наличием или отсутствием примеси в AlGaAs , а их концентрация зависит только от концентрации Al и условий роста, то можно предположить, что эти дефекты существуют и в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ p -типа, а возникновение ПЗФП связано именно с ними.

Зная концентрацию и подвижность 2D дырок в КЯ в любой момент времени, можно оценить вклад различных механизмов рассеяния в подвижность. Для расчета полной подвижности следует использовать правило Маттиссена:

$$1/\mu = 1/\mu_{RI} + 1/\mu_{BI} + 1/\mu_A + 1/\mu_{RS} + 1/\mu_{PE}, \quad (2)$$

где подвижности μ_{RI} , μ_{BI} , μ_A , μ_{RS} и μ_{PE} соответственно связаны с рассеянием на удаленной примеси (RI), фоновой примеси (BI), акустических фононах (A), шероховатостях гетерограницы (RS) и пьезоэлектрическим рассеянием (PE). Величина μ_{RS} была рассчитана согласно работе [5], для расчета других механизмов рассеяния применялся подход, разработанный в работе [6] для 2D электронного газа при низких температурах.

Оказалось, что процесс изменения величин концентрации N и подвижности μ при переходе из состояния ОФП в состояние ПЗФП

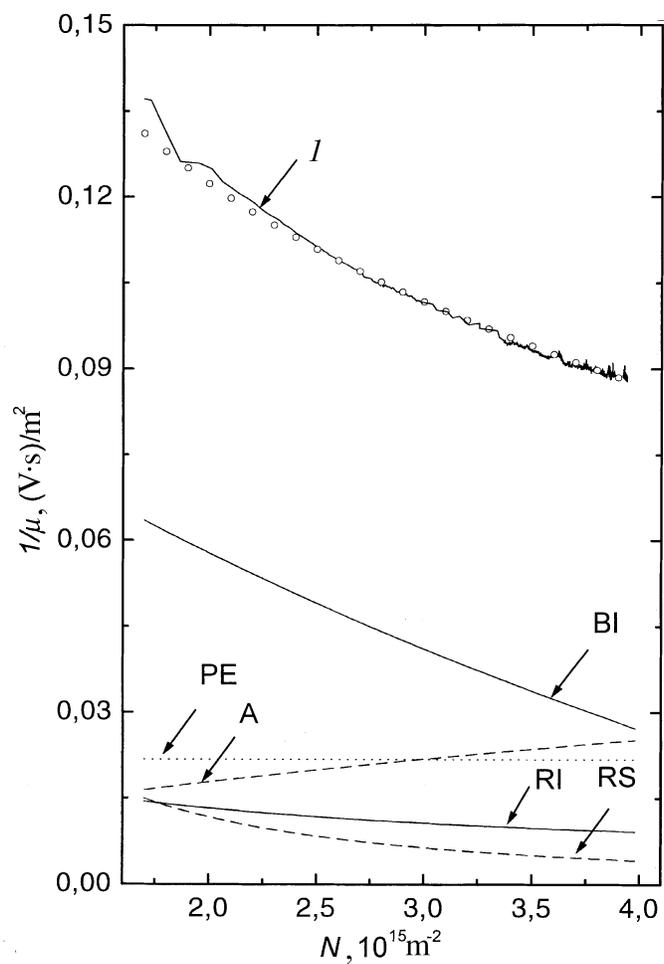


Рис. 2. Вычисленные вклады различных видов рассеяния в экспериментально полученную (1) зависимость $1/\mu(N)$ в течение переходного процесса между состояниями ОФП и ПЗФП. Соответствующие механизмы, упоминаемые в тексте, показаны стрелками. Точки — результат расчета.

(рис. 2) может быть хорошо описан, если предположить, что некоторое количество электронов, равное разнице концентраций в состоянии ПЗФП и в темновом состоянии, действительно захватывается электронными ловушками на инвертированной гетерогранице во время освещения, а концентрация 2D носителей в КЯ возрастает в течение переходного процесса за счет дырок, туннелирующих с ионизированных донороподобных уровней около нормальной гетерограницы. Результат расчета полной обратной подвижности $1/\mu(N)$ в период переходного процесса показан точками на рис. 2. Рассчитанный вклад всех механизмов рассеяния в общую экспериментальную величину $1/\mu$ также представлен на рис. 2. Видно, что фоновая примесь (поверхностный заряд) на гетерогранице является основным источником рассеяния.

Следует заметить, что вычисленная концентрация фоновой примеси (поверхностного заряда) N_{BI} в состоянии ПЗФП в 2.4 раза меньше, чем в темновом, что качественно согласуется с предположением о захвате электронов ловушками во время освещения.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 01-02-17786 и 00-15-96784).

Авторы благодарят доктора Х. Костиаля за внимание к данной работе и полезные замечания.

Список литературы

- [1] *Chou M.J., Tsui D.C., Weimann G.* // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 47. P. 609.
- [2] *Pfeiffer L., Schubert E.F., West K.W.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58 (20). P. 2258.
- [3] *Krispin P., Hey R., Kostial H.* // J. Appl. Phys. 1995. V. 77. P. 5773.
- [4] *Kusters R.M., Janssen T.J.B.M., Langerak C.G.M.* et al. // Semicond. Sci. Technol. 1992. V. 7. P. 961.
- [5] *Sakaki H., Noda T., Hirakawa K.* et al. // J. Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. P. 1934.
- [6] *Lee K., Shur M.S., Drummond T.J.* et al. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. P. 6432.