

**ДОЛГОЖИВУЩАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ  
В СЕЛЕКТИВНО ЛЕГИРОВАННЫХ СТРУКТУРАХ  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$   
В УСЛОВИЯХ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ**

*А.Н.Вороновский, И.Е.Ицкевич, Л.М.Каширская,  
В.Д.Кулаковский, Б.К.Медведев, В.Г.Мокеров*

В структурах  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  обнаружено качественное изменение характера долгоживущей фотопроводимости (ДФ) при их всестороннем сжатии: при больших  $P$  ( $> 8$  кбар) ДФ исчезает в объемном слое  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , но продолжает наблюдаться в прилегающем двумерном канале в  $\text{GaAs}$ . Исчезновение ДФ в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  связано с опусканием долин  $L$  или  $X$  ниже дна  $\Gamma$ -минимума.

1. Долгоживущая фотопроводимость (ДФ) в гетероструктурах  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  с  $x > 0,2$  связывается с необычным поведением донорных примесей в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ <sup>1, 2</sup>. Любая донорная примесь, образующая в GaAs простой мелкий донорный центр, в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с  $x > 0,2$  приводит к возникновению относительно глубоких ( $> 100$  мэВ) так называемых ДХ-центров, особенностью которых являются аномально большие времена захвата свободных электронов  $\tau_0$  при низких температурах. В литературе<sup>1-4</sup> обсуждаются две причины больших значений  $\tau_0$ : специфичное локальное окружение примеси в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (например, донор + вакансия)<sup>4</sup> и структура зоны проводимости, а именно малый энергетический зазор между минимумами в разных точках ( $\Gamma$ ,  $X$  и  $L$ ) зоны Бриллюэна. Для разделения этих двух факторов мы в данной работе предлагаем использовать гидростатическое сжатие, которое изменяет зазор между минимумами  $\Gamma$ ,  $X$  и  $L$ , но не влияет на локальное окружение примеси.

2. Для описания явления ДФ в структурах  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  достаточно получить информацию о концентрациях электронов раздельно в слое  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и в двумерном (2D) канале в GaAs до облучения и после облучения их светом с различными интенсивностями. С этой целью нами измерялись магнитосопротивление  $\rho_{xx}$  и холловское сопротивление  $\rho_{xy}$  в магнитных полях до  $H \sim 4$  Т. Корректные измерения  $\rho_{xx}(H)$  и  $\rho_{xy}(H)$  при любой промежуточной по величине подсветке были возможны потому, что величины  $\rho_{xx}$  и  $\rho_{xy}$  после выключения подсветки лишь немного (менее чем на 1%) изменялись в первые несколько секунд и затем оставались неизменными в течение многих часов. Все измерения были выполнены при 4,2 К на переменном токе (20 Гц, 300 нА), не приводящем к разогреву носителей в 2D-слое в GaAs.

Измерения проводились на одиночных селективно легированных переходах  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  с  $x \approx 0,3$  и концентрацией примеси Si в  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , близкой к  $10^{18}$  см<sup>-3</sup> } полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Их структура схематически показана на рис. 1. Слой  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  толщиной 120 Å, не подвергавшийся специальному легированию, служил для большего пространственного разделения свободных носителей в 2D-слое и ионизированных центров в  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Подвижность 2D-электронов при 4,2 К составляла  $4 \div 15 \cdot 10^4$  см<sup>2</sup>/В<sup>2</sup>·с.

Гидростатическое сжатие структуры осуществлялось в автономной низкотемпературной камере фиксированного давления<sup>5, 6</sup>. Для подсветки использовался GaAs-светодиод, помещавшийся в рабочем пространстве камеры вблизи образца. Энергия испускаемых светодио-дом квантов света возрастала с увеличением давления, однако всегда оставалась чуть меньше ширины запрещенной зоны чистого GaAs.

3. На рис. 1 показаны измеренные зависимости  $\rho_{xx}(H)$  и  $\rho_{xy}(H)$  при  $P = 0$  и 8,5 кбар до подсветки и после подсветки до насыщения ДФ. В незасвеченных структурах при всех  $P$  эти зависимости имеют вид, присущий 2D-электронному газу в GaAs<sup>7, 8</sup>; свободные носители в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  отсутствуют. Концентрации 2D-электронов  $n_s$  легко определяются по частоте осцилляций в зависимости  $\rho_{xx}(H)$  (рис. 2). При  $P = 0$  концентрация 2D-электронов составляет  $5 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>, что на порядок меньше полной концентрации атомов Si в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  на единицу поверхности. Уровень Ферми в структуре  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  при этом совпадает с уровнем глубоких доноров в  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (рис. 3). При всестороннем сжатии структуры (оно всегда осуществляется при комнатной температуре) наблюдается уменьшение  $n_s$  (рис. 2), что свидетельствует о понижении уровня Ферми относительно дна  $\Gamma$ -минимума (рис. 3). Это возможно только при условии, что уровень глубоких доноров в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  "отслеживает" движение боковых минимумов в зоне проводимости.

Подсветка несжатых и слабо сжатых ( $P < 8$  кбар) структур прежде всего приводит к существенному возрастанию частоты осцилляций в  $\rho_{xx}(H)$ , т.е. к увеличению концентрации  $n_s$  2D-электронов в GaAs (ДФ в 2D-канале в GaAs). При больших подсветках зависимости  $\rho_{xx}(H)$  и  $\rho_{xy}(H)$  качественно изменяются: в малых полях магнитосопротивление становится положительным, а в зависимости  $\rho_{xy}(H)$  на месте плато, соответствующих квантовому эффекту Холла, возникают минимумы (рис. 1). Такие зависимости свидетельствуют о появлении в образце носителей второго типа — электронов в объемном канале  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (ДФ в

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ )<sup>1</sup>. Картина качественно изменяется при  $P \gg 8,5$  кбар. Как видно из рис. 1, в этом случае подсветка приводит только к увеличению частоты осцилляций в  $\rho_{xx}(H)$ , т.е. к возрастанию  $n_s$ . Однако из-за положительного магнитосопротивления, ни минимумов на месте плато в  $\rho_{xy}$  уже не наблюдается, т.е. ДФ в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  не возникает. Подчеркнем, что нами обнаружена ДФ в структурах  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  в таких условиях, когда она не существует отдельно ни в GaAs, ни в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ .

Исчезновение ДФ в  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$  при  $P \gg 8,5$  кбар совпадает с переходом его при таком давлении из прямозонного в непрямозонный<sup>9</sup>. Так как в наших экспериментах локальная структура примесных центров не изменялась, мы приходим к выводу, что чрезвычайно большие времена захвата свободных электронов на примесные центры в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с  $x = 0,2 \div 0,4$  обусловлены спецификой зонной структуры, а именно, расположением  $\Gamma$ -минимума в промежутке между дном боковых минимумов в зоне проводимости и связанным с ними глубоким донорным уровнем.

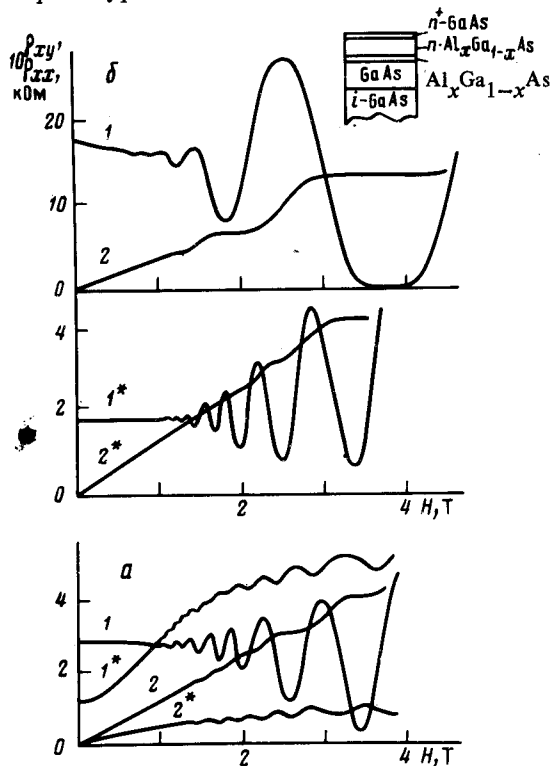


Рис. 1. Зависимости поперечного магнитосопротивления  $\rho_{xx}$  (1) и холловского сопротивления  $\rho_{xy}$  (2) от магнитного поля  $H$  для гетероперехода  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  при давлениях  $P = 0$  (а) и  $P = 8,5$  кбар (б). Цифры без звездочки — образец не засвечен, со звездочкой — засвечен до насыщения ДФ. Вверху показана схема структуры, толщина слоев  $n\text{-GaAs}$  — 5 нм,  $n\text{-Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$  — 50 нм,  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$  — 10 нм и GaAs — 0,5 мкм.  $i\text{-GaAs}$  — подложка

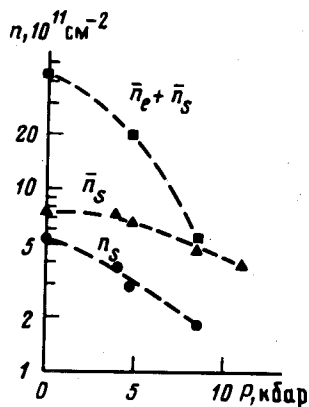


Рис. 2.

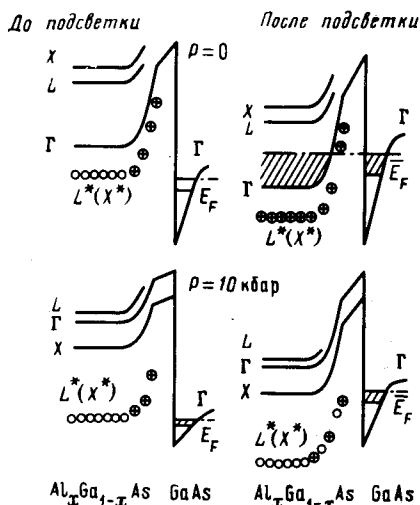


Рис. 3

Рис. 2. Зависимости от величины давления плотности 2D-электронов в GaAs до подсветки ( $n_s$ ) и после подсветки до насыщения ДФ ( $\bar{n}_s$ ). Кривая  $(\bar{n}_e + \bar{n}_s)$ -суммарная плотность электронов на единицу поверхности в 2D-слое в GaAs и в  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$  в условиях насыщения ДФ

Рис. 3. Энергетические схемы для структуры  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  ( $x \approx 0,3$ ) при  $P = 0$  (а) и  $P = 10$  кбар (б) до подсветки (слева) и в условиях насыщения ДФ (справа). Положения электронных долин, глубоких донорных уровней и уровня Ферми обозначены, соответственно,  $\Gamma$ ,  $L$  или  $X$ ;  $L^*(X^*)$  и  $E_F$

4. Из сказанного выше вытекает следующий механизм ДФ в структурах  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ . Часть горячих электронов, фотовозбужденных светом ( $\hbar\omega \sim 1,5$  эВ) в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с глубоких доноров, релаксируют в  $\Gamma$ -минимум. Благодаря малым временам туннелирования легких  $\Gamma$ -электронов через узкий потенциальный барьер на границе  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  системы электронов в  $\text{GaAs}$  (2D) и в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (3D) находятся в квазиравновесии. Поэтому при подсветке ДФ прежде всего возникает в 2D-слое в  $\text{GaAs}$ . ДФ в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  появляется позднее — после того как квазиуровень Ферми в системе поднимется выше дна  $\Gamma$ -минимума в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Уменьшение концентрации электронов в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с ростом давления обусловлено появлением у  $\Gamma$ -электронов возможности релаксировать в опустившиеся ниже их уровня Ферми боковые минимумы  $L$  или  $X$  в зоне проводимости. Это следует из того, что положения энергии Ферми в засвеченных образцах при различных давлениях, найденные по измеренным значениям  $n_s$ , всегда близки к положению дна этих минимумов. В свете сказанного выше существование ДФ в 2D-слое в  $\text{GaAs}$  при  $P > 8,5$  кбар, когда исчезает ДФ в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , очевидно, объясняется тем, что при исследованных давлениях ( $P < 16$  кбар)  $\Gamma$ -минимум в  $\text{GaAs}$  еще не поднялся выше  $X$ -минимума в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (рис. 3). В построенной выше модели ДФ остается существенным еще один вопрос, связанный с временами захвата на глубокие центры электронов из  $X$  ( $L$ -) долин. Исчезновение ДФ в  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$  при  $P \gtrsim 8,5$  кбар, когда  $X$ -долины опускаются ниже  $\Gamma$ -экстремума, однозначно свидетельствует о том, что захват электронов из боковых долин происходит за достаточно малые времена (заведомо меньше 1 с), в отличие от случая захвата  $\Gamma$ -электронов ( $\tau > 10^6$  с).

Таким образом, использование всестороннего сжатия структур  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  позволило понять природу ДФ как в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , так и в двумерном канале в  $\text{GaAs}$ . В работе впервые показано, что ДФ в структурах  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  может иметь место и при ее отсутствии в слое  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Остаются пока непонятными причины очень большого ( $> 6$  порядков) различия во временах захвата на относительно глубокий донорный центр  $X$ - и  $\Gamma$ -электронов.

В заключение мы выражаем благодарность Е.С.Ицкевичу, И.В.Кукушкину и В.Б.Тимофееву за помощь в работе и полезные обсуждения.

#### Литература

1. Luryi S., Kastalsky A. Appl. Phys. Lett., 1984, 45, 164.
2. Schubert E.F., Knecht J., Ploog K. J. Phys. C, 1985, 18, L215.
3. Schubert E.F., Ploog K. Phys. Rev., 1984, B30, 7021.
4. Lang D.V., Logan R.A. Proceed. of the 14th Intern. Conf. on the Physics of Semiconductors, Edinburgh, 1978, Ed. by Wilson B.L.H., Bristol, 1979, 433.
5. Ицкевич Е.С. ПТЭ, 1963, № 4, 148.
6. Ицкевич Е.С., Вороновский А.Н., Гаприлов А.Ф., Сухонаров В.А., ПТЭ, 1966, № 6, 161.
7. Tsui D.C., Störmer H.L., Gossard A.C. Phys. Rev. Lett., 1982, 48, 1559.
8. Ando T., Fowler A.B., Stern F. Rev. Mod. Phys., 1982, 54, 437.
9. Lifshitz N., Jayaramann A., Logan R.A., Card H.C. Phys. Rev., 1980, B21, 670.

Институт физики твердого тела  
Академии наук СССР

Институт физики высоких давлений  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
15 июля 1985 г.

После переработки  
9 октября 1985 г.