

АНИЗОТРОПИЯ МАГНЕТСОПРОТИВЛЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ 2D-ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДСИСТЕМОЙ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА GaAs/AlGaAs

В.А. Волков, Д.В. Галченков, И.М. Гродненский,
К.В. Старостин

Впервые исследованы эффекты сосуществования 2D- и 3D-электронов в структуре GaAs/n-AlGaAs при $T = 4,2 - 300\text{K}$. Угловую зависимость магнетосопротивления предложено использовать в качестве нового теста на двумерность электронной подсистемы, который в отличие от эффекта Шубникова – де Гааза работает в широком интервале T и H .

Орбитальное движение двумерных (2D) электронов в магнитном поле \mathbf{H} определяется только его нормальной компонентой. Поэтому обычно 2D-электронную систему обнаруживают по угловой зависимости периода квантовых осцилляций магнетосопротивления $\Delta\rho_{xx}(H)$ (классическое $\Delta\rho_{xx} = 0$ в вырожденном изотропном случае). При наличии же двух электронных подсистем, одна из которых двумерна, уже в классических H следует ожидать характерной анизотропии $\Delta\rho_{xx}(\mathbf{H})$.

Нами впервые обнаружена зависимость $\Delta\rho_{xx}$ от ориентации неквантующего \mathbf{H} в гетероструктуре (ГС) GaAs/n-Al_xGa_{1-x}As.

Электронный 2D-канал на границе раздела ГС образуется из-за сильного изгиба зон вследствие селективного легирования (донорами легируется только Al_xGa_{1-x}As)¹. Уникальной особенностью таких ГС является очень слабое (по сравнению с инверсионными слоями в Si)

рассеяние $2D$ -электронов при низких T : примесное рассеяние подавлено из-за пространственного разделения электронов и породивших их доноров, а поверхностное — из-за хорошего соответствия решеток в ГС. Это обстоятельство использовано, например, в ² для рекордно точного измерения постоянной тонкой структуры с помощью квантового эффекта Холла.

Измерены магнетосопротивление, эффекты Холла и Шубникова — де Гааза в выращенных методом жидкофазной эпитаксии ГС вида: полуизолирующая подложка (100) GaAs — слой GaAs толщиной 20 — 30 мкм — легированный (Sn) слой $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ толщиной ~ 1 мкм при концентрации $Sn \lesssim 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Для сравнения на той же подложке выращивались "спутники" — слои GaAs. Образцы имели 4-зондовую хондовскую геометрию и омические контакты из In. Граница раздела ГС находится в плоскости OXY ; ток направлен по оси OX , измеряемое холловское поле — по оси OY , магнитное поле — в плоскости OYZ , $\mathbf{H} = (0, H \sin \theta, H \cos \theta)$, $\theta = 0 - 90^\circ$, $H \leq 53 \text{ кЭ}$.

Из дальнейшего следует, что в исследованных ГС существуют две электронные подсистемы; двумерная на границе раздела и трехмерная ($3D$) в объеме GaAs. $3D$ -электроны, обусловленные остаточными примесями, распределены, как это следует из $C - V$ измерений, неоднородно по толщине слоя GaAs: их объемная концентрация $n_{3D} \lesssim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в области канала и возрастает при приближении к подложке, причем среднее по толщине $n_{3D} = (1 \div 3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

№№ пп	$\mu_{эфф}$ $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$n_{эфф}$ 10^{13} см^{-2}	n_{2D} 10^{11} см^{-2}	μ_{2D} $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	n_{3D} 10^{13} см^{-2}	μ_{3D} $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$n_{сп}$ 10^{13} см^{-2}	$\mu_{сп}$ $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$
1	5860	0,86	6,2	20200	3,37	1100	3,3	900 — 1200
2	4000	1,0	6,6	14050	3,25	960	3,3	900 — 1200

В таблице приведены характеристики (концентрация n_i и подвижность μ_i) типичных образцов при $T = 4,2\text{К}$. Эффективные параметры ГС $\mu_{эфф}$, $n_{эфф}$ и "спутников" $\mu_{сп}$, $n_{сп}$ определены из холловских измерений в слабых полях, n_{2D} — из эффекта Шубникова — де Гааза, n_{3D} , μ_{3D} , μ_{2D} — из полевой зависимости константы Холла $R(H)$ и сопротивления ГС при $H = 0$.

На рис. 1 показана вторая производная сопротивления ГС ρ_{xx} в квантующих H . Период осциллирующий по обратному полю $\Delta(H^{-1})$ линейен по $\cos \theta$, что однозначно доказывает существование в ГС вырожденного $2D$ -электронного газа с концентрацией $n_{2D} = e \cos \theta / \pi \hbar \Delta(H^{-1})$. Наблюдение одного периода указывает на заполнение лишь основной $2D$ -подзоны. В "спутниках" эффект Шубникова — де Гааза не наблюдается.

Зависимость $R = \rho_{xy}/H$ от H , рис. 2, существенна для ГС (кривая 2) в отличие от "спутника" (кривая 1) уже при малых H , что обусловлено вкладом $2D$ -подсистемы. Эксперимент при $H < 15 \text{ кЭ}$ хорошо описывается классической зависимостью $R(H)$ для двух типов носителей ($2D$ - и $3D$ -электроны) с помощью единственного подгоночного параметра n_{3D} . Извлеченные таким способом значения n_{3D} , μ_{3D} , см. таблицу, разумно согласуются с данными для "спутника".

При всех H магнетосопротивление $\Delta \rho_{xx}$ для ГС в отличие от "спутников" зависит от угла наклона \mathbf{H} к границе раздела ГС, рис. 2. При $\theta = 90^\circ$ магнитное поле не действует на $2D$ -электроны, поэтому $\Delta \rho_{xx}(H)$ для ГС и "спутников" качественно совпадают (отрицательный знак $\Delta \rho_{xx}$ при $T = 4,2\text{К}$ часто наблюдается в неупорядоченных $3D$ -системах и здесь обсуждаться не будет). При уменьшении θ $2D$ -вклад в $\Delta \rho_{xx}$ возрастает и может даже изменить знак $\Delta \rho_{xx}$ (кривая 3). Анизотропия $\Delta \rho_{xx}$ от θ обнаружена только в тех ГС, где наблюдается $2D$ -эффект Шубникова — де Гааза, и выражена тем ярче, чем больше μ_{2D}/μ_{3D} . Эффект имеет классическое происхождение и потому не мал. Он обусловлен наличием двух электронных подсистем (для одной группы вырожденных носителей классическое $\Delta \rho_{xx} = 0$) и

наблюдается не только при 4,2 К, но и при 77К, рис. 2 (кривые 4, 5), а для отдельных ГС с высокими μ даже при 300К. Это позволяет использовать эффект угловой анизотропии $\Delta\rho_{xx}$ для обнаружения 2D-подсистемы в широком интервале T и H .

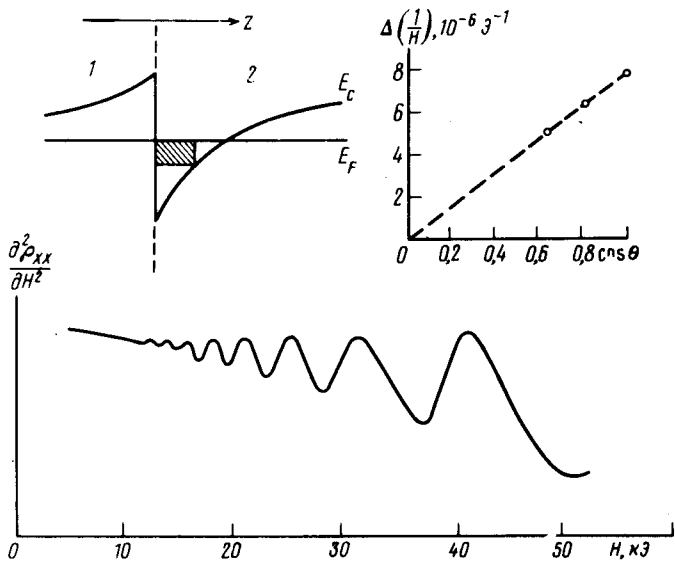


Рис. 1. Осцилляции Шубникова – де Гааза в ГС №1; $T = 4,2\text{К}$; $\theta = 0^\circ$; на вставках слева – энергетическая схема вблизи границы раздела, справа – угловая зависимость периода осцилляций; 1 – $n = \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, 2 – GaAs, E_C – дно зоны проводимости, E_F – уровень Ферми

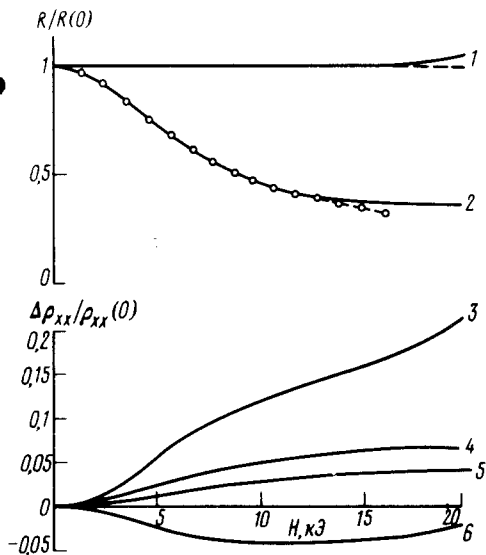


Рис.2

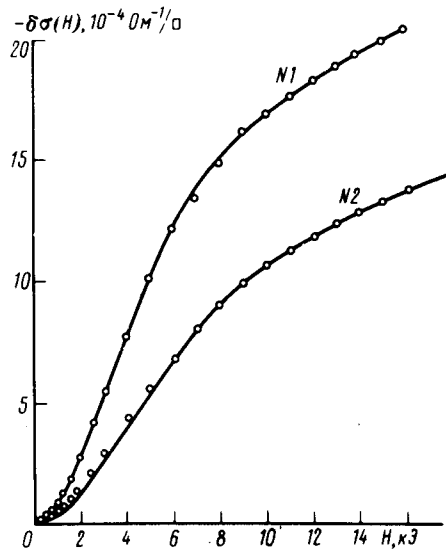


Рис.3

Рис. 2. Зависимость константы Холла (1, 2) и магнетосопротивления (3 – 6) от H для структуры №1 (2–6) и "спутника" (1); $T = 4,2\text{К}$ – 1, 2, 3, 6; $T = 77\text{К}$ – 4,5; $\theta = 0^\circ$ – 1, 2, 3, 4; $\theta = 90^\circ$ – 5, 6; сплошная линия – эксперимент, точки – теория

Рис. 3. Функция анизотропии проводимости $\delta\sigma(H)$, для ГС №1 и №2, $T = 4,2\text{К}$; точки – эксперимент; сплошная линия – теория (2)

Количественное описание эффекта проведем для функции $\delta\sigma(H) \equiv \sigma_{xx}(H, \theta = 0^\circ) - \sigma_{xx} \times (H, \theta = 90^\circ)$, которая является мерой угловой анизотропии проводимости. Безмодельное вычисление $\delta\sigma(H)$ дает:

$$\delta\sigma(H) = \left(\frac{\rho_{xx}}{\rho_{xx}^2 + \rho_{xy}^2} \right)_{\theta=0^\circ} - \left(\frac{1}{\rho_{xx}} \right)_{\theta=90^\circ} = \left[\Delta\sigma_{xx}^{2D} - \frac{(\sigma_{xy}^{3D})^2}{\sigma_{xx}^{3D}} \right]_{\theta=0^\circ}, \quad (1)$$

где введена магнетопроводимость $2D$ -подсистемы $\Delta\sigma_{xx}^{2D} = \sigma_{xx}^{2D}(H) - \sigma_{xx}^{2D}(0)$. В классической модели вырожденного электронного газа

$$\delta\sigma(H) = (\Delta\sigma_{xx}^{2D} + \Delta\sigma_{xx}^{3D}) = - \sum_i^{2D, 3D} \frac{\sigma_{xx}^i(0) \mu_i^2 H^2}{1 + \mu_i^2 H^2}. \quad (2)$$

Точки на рис. 3 показывают значения $-\delta\sigma(H)$, вычисленные с помощью (1) по измеренным значениям ρ_{ij} . Для структуры №1 результат отлично согласуется с классической моделью (2). Для структуры №2 с меньшим значением μ_{2D} в слабых полях наблюдается расхождение, которое не удается объяснить экспериментальной ошибкой. Одна из возможных причин – квантовые эффекты локализации и межэлектронного взаимодействия^{3,4}. Этот вопрос требует более тщательного изучения.

Наблюдался также эффект замороженной фотопроводимости¹, с помощью которого можно управлять параметрами $2D$ -канала. При освещении ГС №1 при 4,2К μ_{2D} увеличивалась на 24%, n_{2D} – на 23%, а n_{3D} почти на 100%.

Авторы благодарны М.И.Елинсону и В.Б.Сандомирскому за поддержку и стимулирующие обсуждения.

Литература

1. Störmer H.L., Dingle R., Gossard A.C., Wiegmann W., Sturge M.D. Sol. St. Comm., 1979, 29, 705.
2. Tsui D.C., Gossard A.C., Field B.F., Cage M.E., Dziuba R.F. Phys. Rev. Lett., 1982, 48, 3.
3. Альтшулер Б.Л., Аронов А.Г., Ларкин А.И., Хмельницкий Д.В. ЖЭТФ, 1981, 81, 768.
4. Pool D.A., Pepper M., Glew R.W. J. Phys. C., 1981, 14, L995.