

ХИМИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ И g -ФАКТОР ДВУМЕРНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА В СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В.И.Нижанковский, Б.К.Медведев, В.Г.Мокеров

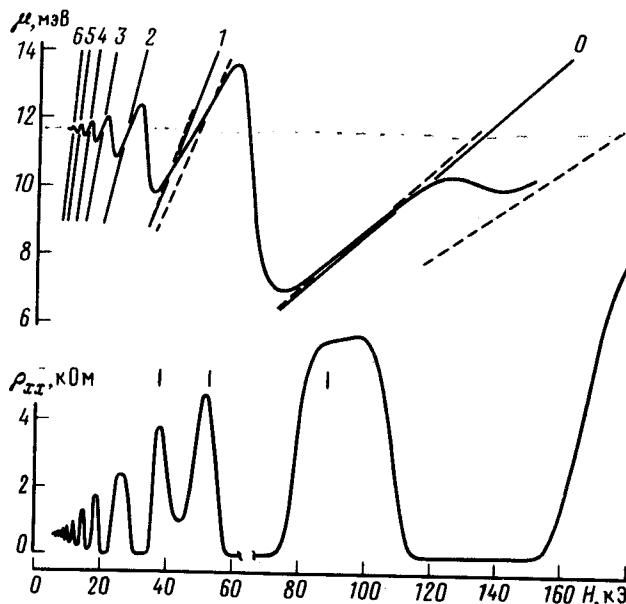
Из сравнения результатов измерений осцилляций химического потенциала и магнито-сопротивления гетероперехода $\text{GaAs} - \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в сильных магнитных полях получено значение эффективного g -фактора двумерного электронного газа.

В работе¹ сообщалось о наблюдении гигантского спинового расщепления уровней Ландау двумерного электронного газа в гетеропереходе $\text{GaAs} - \text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ в сильных магнитных полях (эффективный g -фактор достигал 20). Этот вывод был сделан на основе анализа результатов измерений осцилляций магнитосопротивления ρ_{xx} исходя из предположения, что при постоянной электронной концентрации N_s значения магнитного поля H_n^{\pm} , при которых химический потенциал μ пересекает расщепленные по спину подуровни Ландау ϵ_n^{\pm} (и наблюдаются максимумы ρ_{xx}) определяются условием $\mu(H_n^{\pm}) = \mu(0)$.

Проведенные нами измерения зависимостей химического потенциала $\mu(H)$ и магнитосопротивления $\rho_{xx}(H)$ двумерного электронного газа в гетеропереходе $\text{GaAs} - \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ не подтвердили этого предположения и дали значительно меньшие величины эффективного g -фактора ($\lesssim 3,5 \div 4$).

Метод измерений осцилляций химического потенциала был основан на определении изменения заряда измерительного конденсатора, составленного из исследуемого образца и бронзового электрода². Конструкция прибора была аналогична описанной в³. Для уменьшения шумов измерительный конденсатор и коаксиал, идущий к электрометру, помещались внутри герметичной нержавеющей трубы, заполненной газообразным гелием ($p \approx 200$ мм рт. ст. при $T = 300$ К). Образец имел форму пластины размерами $6 \times 8,5$ мм², в углах которой были припаяны токовые и потенциальные провода для измерений магнитосопротивления. Подвижность носителей составляла $41 \cdot 10^3$ см²/В·с, их концентрация, определенная из периода осцилляций магнитосопротивления, $N_s = 3,22 \cdot 10^{11}$ см⁻². Основные исследования проводились при температуре $T = 1,45$ К в магнитных полях до 150 кЭ, создававшихся сверхпроводящим соленоидом. Запись магнитосопротивления в диапазоне полей 150 – 180 кЭ сделана в водоохлаждающем магните биттеровского типа. Все измерения выполнены в Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур (г. Вроцлав, ПНР).

Результаты измерений осцилляций химического потенциала приведены на верхнем рисунке. Наклонными сплошными линиями с номерами $n = 0, 1, \dots$ показаны уровни Ландау $\epsilon_n = (n + 1/2)\hbar\omega_c$, вычисленные для $m^* = 0,0675 m_0$. Поскольку в эксперименте записывалось лишь приращение химического потенциала $\Delta\mu(H)$, положение измеренной зависимости на шкале энергий подбиралось из условия $\mu(H \rightarrow 0) = \pi\hbar^2 N_s / m^*$ (это значение $\mu(0)$ показано линией из точек).



Зависимости химического потенциала (верхняя кривая) и магнитосопротивления (нижняя кривая) двумерного электронного газа в гетеропереходе GaAs – Al_xGa_{1-x}As от магнитного поля при $T = 1,45$ К. Справа от разрыва кривой $\rho_{xx}(H)$ чувствительность загрублена в два раза

Запись осцилляций магнитосопротивления $\rho_{xx}(H)$ приведена на нижнем рисунке. Из него видно большое спиновое расщепление уровней Ландау $n = 0$ и 1 , незначительное расщепление уровня $n = 2$ (приводящее лишь к уширению соответствующего максимума ρ_{xx}) и практически полное отсутствие расщепления уровня $n \geq 3$. Из сопоставления зависимостей $\rho_{xx}(H)$ и $\mu(H)$ следует, что в то время как для $n \geq 2$ положения максимумов $\rho_{xx}(H_n)$ соответствуют условию $\mu(H_n) = \mu(0)$, для расщепленных по спину уровням Ландау $n = 0$ и 1 это условие явно не выполняется. При этом зависимость $\mu(H)$ в полях выше 30 кЭ сильно отличается от предполагавшейся в ¹. Это отличие, однако, связано не с нарушением условия $N_s = \text{const}$, а с тем, что условия $\mu(H_n^\pm) = \mu(0)$ вообще не существует. Действительно, если расщепленные по спину подуровни Ландау n^\pm не перекрываются, то максимум $\rho_{xx}(H_n^\pm)$ должен наблюдаться тогда, когда соответствующий подуровень Ландау заполнен ровно наполовину. Т. к. каждый подуровень вмещает $eH/c\hbar$ электронов, то это условие дает $H_n^\pm = c\hbar N_s / e(2n + 1 \pm 1/2)$. Вычисленные для $n = 0$ и 1 значения H_n^\pm показаны на нижнем рисунке вертикальными отрезками. Их положения хорошо согласуются с измеренными максимумами $\rho_{xx}(H)$, а небольшие смещения связаны, по-видимому, со слабым перекрытием соседних подуровней Ландау. Если же спиновое расщепление значительно меньше ширины уровня Ландау, то максимум $\rho_{xx}(H_n)$ должен наблюдаться тогда, когда заполнено нечетное число подуровней, т. е. $H_n = c\hbar N_s / e(2n + 1)$, что эквивалентно условию $\mu(H_n) = \mu(0)$.

Таким образом, величину спинового расщепления нельзя определить, располагая лишь зависимостью $\rho_{xx}(H)$, для этого необходимо знать зависимость $\mu(H)$. На верхнем рисунке штриховыми линиями показаны определенные из сопоставления зависимостей $\mu(H)$ и $\rho_{xx}(H)$ подуровни Ландау 0^\pm и 1^\pm . Видно, что подуровни расположены несимметрично относительно исходного уровня Ландау — смещение верхнего подуровня значительно меньше смещения нижнего. При этом для верхнего подуровня эффективный g -фактор $g \approx 0,5 \div 0,6$, а для нижнего — $g \approx 3,5 \div 4$. Такая асимметрия качественно соответствует предсказаниям^{5, 6}, учитывающим обменное взаимодействие в двумерном электронном газе, причем, в отличие от результатов¹, экспериментальная величина g -фактора не превышает теоретической оценки его максимально возможного значения (≈ 10).

В заключение отметим, что при измерениях зависимостей $\mu(H)$ в областях магнитного поля, соответствующих $\rho_{xx}(H) = 0$, мы наблюдали гистерезисные явления, аналогичные обнаруженным в инверсионных слоях на поверхности кремния⁷. Гистерезис столь быстро возрастал при понижении температуры, что при $T = 1,45$ К запись $\mu(H)$ в этих областях приходилось делать по точкам, периодически выключая развертку поля. При этом, в отличие от⁷, мы не обнаружили сколько-нибудь заметного уменьшения емкости измерительного конденсатора в этих областях. Причиной гистерезиса является эффект Холла на слабозатухающих токах Фуко, индуцированных в двумерном электронном газе при изменении магнитного поля⁸.

Литература

1. *Raymond A., Robert J.L., Bousquet C. et al.* Sol. St. Comm., 1985, **55**, 271.
2. *Нижанковский В.И., Мокеров В.Г., Медведев Б.К., Шалдин Ю.В.* ЖЭТФ, 1986, **90**, 1326.
3. *Алексеевский Н.Е., Нижанковский В.И.* ЖЭТФ, 1985, **88**, 1771.
4. *Muro K., Mori S., Narita S. et al.* Surface Sci., 1984, **142**, 394.
5. *Ando T., Uemura Y.* J. Phys. Soc. Jap., 1974, **37**, 1044.
6. *Uemura Y.* J. Appl. Phys., 1974, Sup. 2, Pt. 2, 17.
7. *Pudalov V.M., Semenchinsky S.G., Edelman V.S.* Sol. St. Comm., 1984, **51**, 713.
8. *Goodall R.K., Higgins R.J., Harrang J.P.* Phys. Rev., 1985, **B31**, 6597.