

В. М. Пудалов, С. Г. Семенчинский, В. С. Эдельман. Заряд и потенциал инверсионного слоя МДП-структуры в квантующем магнитном поле. При подаче напряжения U_g на затвор Si — МДП-структуры вблизи поверхности полупроводника возникает двумерный проводящий слой носителей заряда. Концентрацией n_s носителей, а тем самым, и их уровнем Ферми можно управлять, изменяя U_g . Если такая структура помещена в магнитное поле, то можно наблюдать обратный эффект: изменение U_g при квантовых осцилляциях уровня Ферми при фиксированном заряде слоя. Исследование таких осцилляций, обнаруженных в ^{1,2}, позволяет получить информацию об энергетическом спектре электронов в магнитном поле.

Нами проведены эксперименты с (001) Si — МДП-структурами с инверсионным электронным каналом. Структуры имели размеры $5 \times 0,8$ мм², электрическую емкость ~ 700 пФ и подвижность носителей $\sim 3,5 \cdot 10^4$ см²/В·с при $T \sim 1$ К. Измерения велись электрометром с входным током менее 10^{-14} А при отключенном от затвора источнике напряжения. Пример экспериментальных записей осцилляций напряжения затвор — контакт к каналу приведен на рис. 1.

Как известно, в магнитном поле в инверсионном электронном слое (001) Si — МДП-структуры каждый из уровней Ландау расщепляется на четыре подуровня из-за снятия долинного и спинового вырождения ³. До последнего времени не было надежных экспериментальных данных о значении долинного энергетического расщепления Δ_v , а данные об эффективном g -факторе получались из косвенных соображений ⁴. Наблюдение осцилляций уровня Ферми дало возможность прямо определить эти величины.

Для определения параметров спектра экспериментальные кривые сравнивались с зависимостью уровня Ферми от магнитного поля, полученной численным решением уравнения

$$\frac{eH}{ch} \sum \int_0^{\infty} D(\varepsilon - E_1, \Gamma) f(\varepsilon, E_F, T) d\varepsilon = n_s,$$

где $D = (\Gamma/\sqrt{\pi})^{-1} \exp[-(\varepsilon - E_1)^2/\Gamma^2]$ учитывает уширение уровней Ландау в реальном образце, $f(\varepsilon, E_F, T)$ — фермиевская функция распределения,

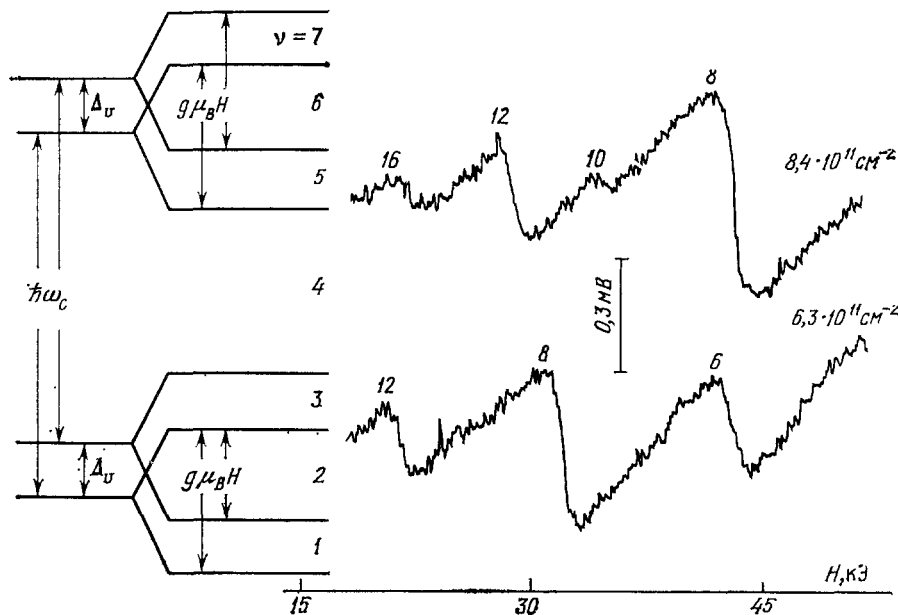


Рис. 1. Зависимость от магнитного поля H разности потенциалов между затвором и инверсионным слоем, при разной плотности электронов, указанной возле кривых. $T = 1$ К. Цифры над кривыми указывают число полностью заполненных уровней Ландау. Слева показана схема уровней в магнитном поле

а $E_1 = \hbar\omega_c (N + 1/2) \pm (g\mu_B H/2) \pm (\Delta_v/2)$, Δ_v — долиное расщепление, g — g -фактор, ω_c — циклотронная частота. Параметр Γ подбирался при расчете, исходя из наилучшего приближения расчетной зависимости к измеренной.

На рис. 2, а приведена зависимость $\Delta_v(H)$ (определенная по переходам $\nu = 3, 5, 7, \dots$, видимым при температуре более низкой, чем при записи кривых рис. 1). Видно, что Δ_v , если и зависит от n_s , то весьма слабо (что не согласуется с теорией; см. в 4), но зависит от H . Значения, полученные ранее в работе 5 и Каваяи и др. (цитируется в 4), хорошо согласуются с нашими данными, если их отложить в функции от H .

На рис. 2, б приведена зависимость от n_s максимального значения g -фактора, полученная из изменения уровня Ферми при переходах $\nu = 2, 6$ (предполагалось, что Δ_v не зависит от n_s). На том же рис. 2, б приведены значения g_{\min} , полученные исходя из переходов $\nu = 4, 8$ и считая $m^* = (0,21 \pm 0,01) m_e$ 4. Пунктирные линии соответствуют границам возможных значений g_{\max} по 6. Таким образом, получено доказательство осцилляций спинового расщепления, предсказанных теоретически (см. 4). Отметим, однако, что эта теория предсказывает сильную зависимость амплитуды осцилляций g -фактора от подвижности электронов. Но образцы, использовавшиеся в 6, имели

подвижность в 3 раза меньшую, чем в нашем случае, так что близость результатов заставляет критически относиться к предсказаниям ⁴.

Отметим, что экстраполяция к $H = 0$ значения Δ_v и спинового расщепления показывает, что и в нулевом поле сохраняется как долинное (с $\Delta_v \sim$

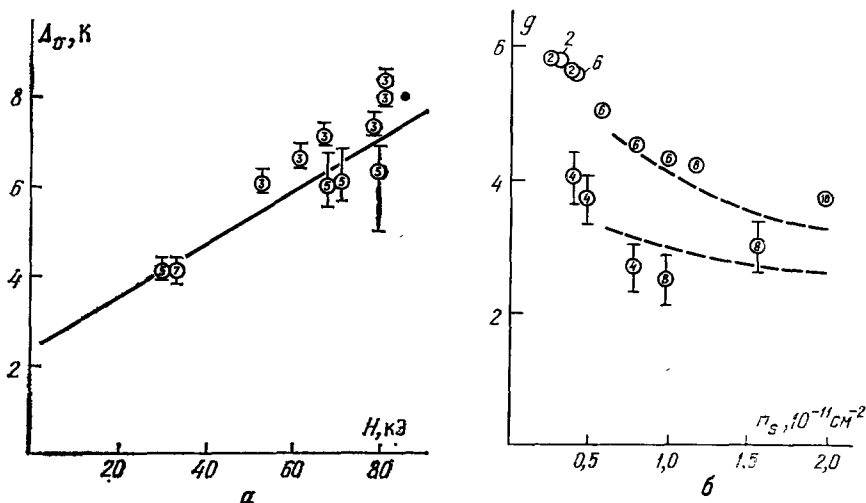


Рис. 2. а — Зависимость Δ_v от магнитного поля при разных числах заполненных уровней Ландау (● — данные ⁵); б — зависимость от концентрации n_s максимального (при $\nu = 2,6$) и минимального (при $\nu = 4,8$) эффективного g -фактора (штриховые кривые взяты из ⁶)

~ 2 K), так и спиновое ($\Delta_s \sim 4$ K) расщепление, обусловленное, по-видимому, нарушением инверсионной симметрии кристалла из-за наличия поверхности.]

Таким образом, исследование вариаций химического потенциала в магнитном поле позволило получить реалистические значения энергетических расщеплений в спектре электронов в магнитном поле без привлечения теоретических моделей и поставило новые вопросы перед теорией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пудалов В. М., Семенчинский С. Г., Эдельман В. С. — Письма ЖЭТФ, 1984, т. 39, с. 474.
2. Pudalov V. M., Semenchinsky S. G., Edel'man V. S. — Sol. State Comm., 1984, v. 51, p. 713.
3. Пудалов В. М., Семенчинский С. Г. — Поверхность, 1984, т. 4, с. 5.
4. Ando T., Fowler A. B., Stern F. — Rev. Mod. Phys., 1982, v. 54, p. 437.
5. Köller H. — Surf. Sci., 1980, v. 98, p. 378.
6. Kobayashi M., Komatsubara K. F. — Japan J. Appl. Phys., 1974, Suppl. 2, pt. 2, p. 343.