

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ КВАНТОВАНИЯ ФАРАДЕЕВСКОГО ВРАЩЕНИЯ В ДВУМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ

*В.А.Волков, Д.В.Галченков, Л.А.Галченков,  
И.М.Гродненский, О.Р.Матов, С.А.Михайлов,  
А.П.Сеничкин, К.В.Старостин*

Впервые экспериментально обнаружено квантование СВЧ эффекта Фарадея в двумерной (2D) электронной системе, находящейся в режиме целочисленного квантового эффекта Холла (КЭХ).

Угол фарадеевского вращения  $\theta$  плоскости поляризации электромагнитной волны с частотой  $\omega$  ( $\omega < \omega_0$ ,  $\hbar\omega_0$  – характерная амплитуда примесного потенциала), прошедшей через 2D электронный слой, находящийся в режиме КЭХ, должен квантоваться, причем квант  $\Delta\theta = e^2/\hbar c = 1/137$  рад. <sup>1</sup> Рассмотренный в <sup>1</sup> эффект привлекателен возможностью получения информации, не извлекаемой непосредственно из КЭХ.

В настоящей работе впервые сообщается о наблюдении квантования СВЧ эффекта Фарадея в 2D электронной системе, выражающегося в существовании последовательности плато в зависимости угла фарадеевского вращения от магнитного поля  $B$ . Плато наблюдаются при целых значениях фактора заполнения уровня Ландау  $\nu = 2\pi\hbar c n_{2D}/eB$ , где  $n_{2D}$  – концентрация 2D электронов, а величина  $\theta$  на плато пропорциональна соответствующему значению  $\nu$ .

Использовались образцы гетероструктур GaAs/AlGaAs прямоугольной формы двух типов, изготовленные методами жидкофазной и молекулярно-лучевой эпитаксии. Параметры структур контролировались на постоянном токе с помощью фотолитографированных холловских мостиков (образцы первого типа) и по методу Ван-дер-Пау (образцы второго типа). Параметры 2D электронного газа составляли: 1-й тип –  $n_{2D} = 3,6 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>, подвижность  $\mu = (0,5 - 0,55) \cdot 10^5$  см<sup>2</sup>/В·с; 2-й тип –  $n_{2D} = (5,7 - 6,2) \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup> и  $\mu = (1 - 1,2) \cdot 10^5$  см<sup>2</sup>/В·с.

Образцы помещались в отрезок цилиндрического волновода, включенного между двумя соосными прямоугольными волноводами, вращающимися друг относительно друга. Измерения проводились при температуре 4,2 К на частоте 30 ГГц, электрическое поле электромагнитной волны в плоскости образца составляло 1 – 10 мВ/см. Измерялась мощность прошедшего через образец излучения, поляризованного нормально ( $P_{\perp}$ ) и параллельно ( $P_{\parallel}$ ) плоскости поляризации падающего излучения в зависимости от  $B$ . Скорость развертки  $B$  не превышала 0,1 Тл/мин. Измерения показали, что в пределах  $\lesssim 5\%$  величина  $P_{\parallel}$  от  $B$  не зависит. Так как  $\text{tg } \theta$  с точностью до некоторого постоянного множителя (из-за неполного перекрытия образцом поперечного сечения цилиндрического волновода) есть  $\sqrt{P_{\perp}/P_{\parallel}}$ , то, следовательно, основная информация о поведении  $\theta(B)$  содержится в  $P_{\perp}(B)$ .

На рис. 1 показаны образцы записи зависимости  $P_{\perp}(B)$ . Наибольшее значение  $P_{\perp}$  находится при  $B \cong c/\mu$  (для образцов 1-го типа  $B \cong 0,02 - 0,025$  Тл, 2-го типа  $\cong 0,01$  Тл), после достижения максимума монотонно спадает. При тех значениях  $B$ , для которых в холловском сопротивлении наблюдаются плато (на постоянном токе), в поведении  $P_{\perp}(B)$  также появляются особенности. Эти особенности, как следует из вставки на рис. 1, периодичны по  $B^{-1}$ , причем значение периода  $\Delta(B^{-1})$  совпадает с периодом эффекта Шубникова – де Гааза. Стрелками на рис. 1 отмечены значения  $B$  для которых  $\nu$  принимает целые значения. Видно, что в пределах точности эксперимента стрелки находятся в серединах особенностей, которые с увеличением  $B$  растягиваются в плато.

Рис. 2 демонстрирует другую важную закономерность наблюдаемого эффекта. Из приведенных на нем экспериментальных кривых на вставке построена зависимость величины  $P_{\perp}$  в области плато от  $\nu^2$ . Плато при  $\nu = 16$  и 18 видны при большем усилении измерительной схемы. Линейная зависимость  $P_{\perp}(\nu^2)$  доказывает выполнение на плато условия  $\text{tg } \theta \cong \theta = \beta\nu$ , где  $\beta$  не зависит от  $B$ .

При малом поглощении СВЧ излучения  $\text{tg } \theta = 2\pi\sigma_{xy}(\omega)/c$ , где  $\sigma_{xy}(\omega)$  — динамическая холловская проводимость<sup>1</sup>, поэтому исследованный эффект можно использовать для измерений  $\sigma_{xy}(\omega)$ . Восстановленная таким образом динамическая проводимость  $\sigma_{xy}(\omega) \sim (P_{\perp})^{1/2}$  на частоте 30 ГГц показана на рис. 3, кривая 2.

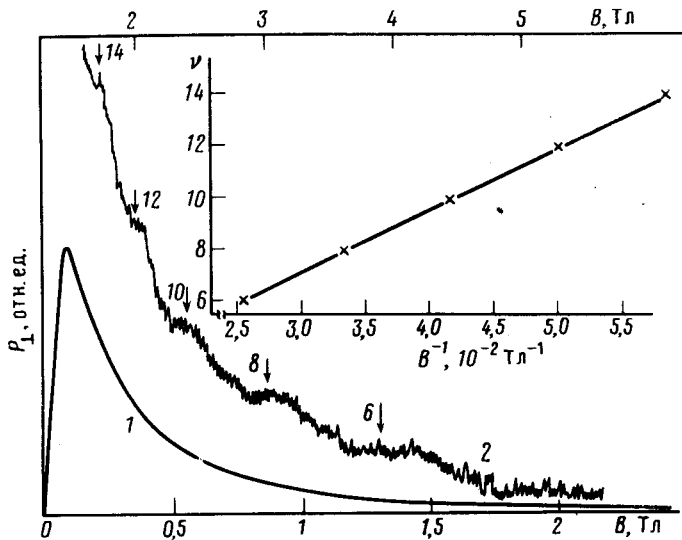


Рис. 1. Зависимости  $P_{\perp}$  от величины  $B$  при разном усилении измерительной схемы. Кривые 1 и 2 относятся к шкалам  $B$ , нанесенным внизу и сверху рисунка. Стрелками отмечены положения особенностей в  $P_{\perp}$ , цифры у стрелок — значения  $\nu$ . На вставке построена зависимость  $\nu$  от  $B^{-1}$  для этих особенностей; образец 2-го типа,  $n_2D = 5,8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$

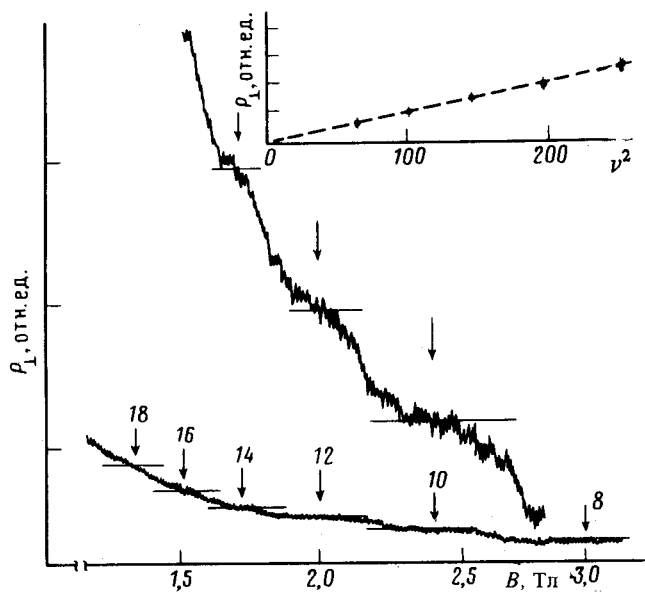
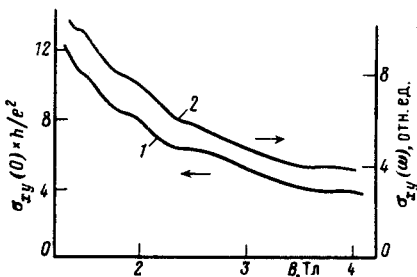


Рис. 2. Зависимости  $P_{\perp}$  от  $B$  для того же образца, что на рис. 1, при разном усилении измерительной схемы. Цифры у стрелок обозначают величины  $\nu$ . На вставке построена зависимость величины  $P_{\perp}$  в области плато от  $\nu^2$

Рис. 3. Зависимости  $\sigma_{xy}(0)$  и  $\sigma_{xy}(\omega)$  от  $B$  для образца 1-го типа, кривые 1 и 2, соответственно. Кривая 1 извлечена из измерений КЭХ на постоянном токе, кривая 2 получена сглаживанием экспериментальной зависимости  $P_{\perp}(B)$  по методу наименьших квадратов



В<sup>2,3</sup> измерен КЭХ на переменном токе и обнаружено разрушение целочисленных и появление дробных плато на частотах, существенно меньших, чем в настоящей работе. Нами не обнаружены новые плато в динамической холловской проводимости по сравнению со статической.

В данной схеме измерений определение абсолютной величины  $\theta$  сопряжено с большой погрешностью, однако по порядку величины полученные значения  $\theta$  совпадают с предсказанными

ми в <sup>1</sup>. Авторы благодарны И.В.Алтухову и С.Г.Гелаховой за содействие при подготовке эксперимента, М.И.Елинсону за поддержку работы, а В.Б.Сандомирскому за плодотворное обсуждение.

### Литература

1. Волков В.А., Михайлов С.А. Письма в ЖЭТФ, 1985, 41, 389.
2. Long A.P., Myron H.W., Pepper M.J. Phys. C., 1984, 17, L433.
3. Mc Fadden, Long A.P., Myron H.W., Pepper M., Davies G.J., Andrews D. J.Phys. C., 1984, 17, L439.

Институт радиотехники и электроники  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
16 января 1986 г.

---