

ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ХОЛЛОВСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ДВУМЕРНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА

Л.А.Галченков, И.М.Гродненский, М.В.Костовецкий,
О.Р.Матов

Впервые экспериментально найдена частотная зависимость квантового эффекта Холла (КЭХ). Изменения в поведении холловской проводимости, вызванные увеличением частоты электрического поля, схожи с теми изменениями, которые наблюдаются при повышении температуры.

Несмотря на достаточное время, прошедшее с момента обнаружения¹, целочисленный КЭХ продолжает оставаться предметом интенсивного экспериментального и теоретического исследования². Объясняется это тем, что не все свойства двумерной системы известны, и микроскопическая теория, которая описывала бы эффект в реальных экспериментальных условиях, отсутствует. До сих пор не известна частотная зависимость КЭХ, которая может содержать важную информацию об эффекте. Так, если при описании КЭХ пользоваться переколяционной моделью^{3, 4}, то при совпадении частоты внешнего поля ω с характерной частотой ω_i , с которой электрон движется по замкнутой траектории в поле случайного потенциала примесей, эффект долженискажаться. Разрушение КЭХ в такой модели следует ожидать при $\omega > \omega_i$ ^{5, 6}. Таким образом, частотную зависимость эффекта, вероятно, можно использовать для изучения свойств случайного потенциала. Важным также представляется сравнение изменений в КЭХ, которые происходят при изменении частоты, с теми изменениями, которые вызываются другими физическими воздействиями.

В^{7, 8} на низких частотах ($\omega/2\pi \lesssim 10^6$ Гц) наблюдалась искажения и разрушение целочисленного КЭХ. Такое поведение обусловлено емкостной связью между двумерным слоем и затвором в исследуемых образцах^{9, 10} и не имеет отношения к физической природе эффекта.

В работе впервые изучено поведение целочисленного КЭХ в зависимости от частоты. Изменения в эффекте, происходящие при возрастании частоты внешнего электрического поля,

схожи с теми изменениями, которые вызываются повышением температуры. Увеличение ω приводит к сокращению плоского участка (плато) в зависимости холловской проводимости $\sigma_{xy}(\omega, H)$ от магнитного поля H , при некоторой граничной частоте ω_0 плато исчезает. При дальнейшем возрастании частоты $\sigma_{xy}(\omega, H)$ стремится к холловской проводимости в беспримесной системе $\sigma_{xy}(H) \sim H^{-1}$. Плато с большим значением фактора заполнения ν уровней Ландау разрушается при меньших ω .

$\sigma_{xy}^2(0)$, отн. ед.

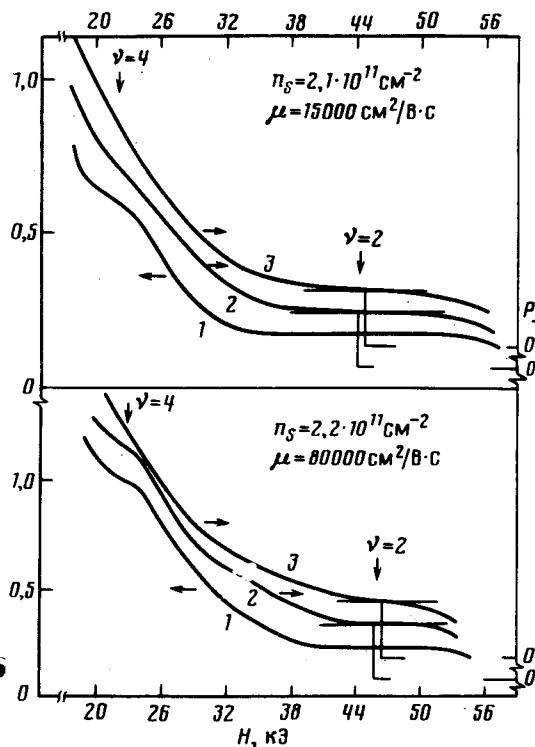


Рис. 1

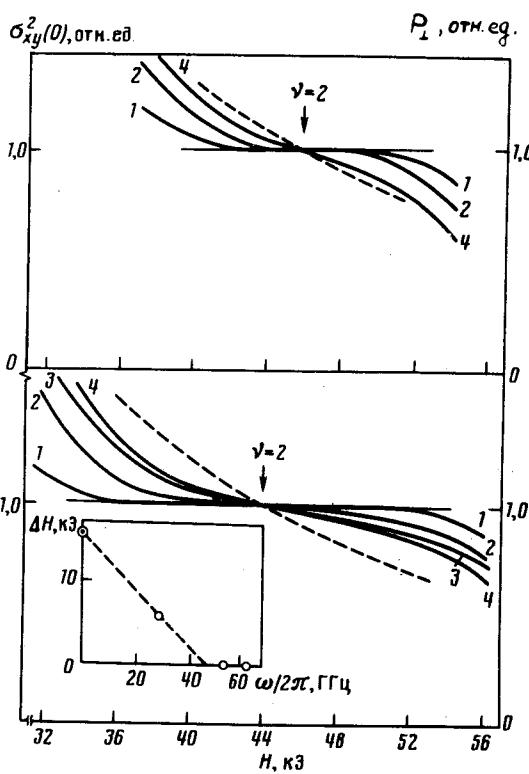


Рис. 2

Рис. 1. Зависимости $\sigma_{xy}^2(\omega, H)$, полученные на разных частотах для двух образцов: сверху – подвижность электронов $1,5 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, концентрация $2,1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$; снизу – соответственно $8,0 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и $2,2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Частота СВЧ излучения: 1 – 0 ГГц, 2 – 30 ГГц, 3 – 62 ГГц

Рис. 2. Зависимости $\sigma_{xy}^2(\omega, H)$ в области плато $\nu = 2$ для тех же образцов, что и на рис. 1. Частота: 1 – 0 ГГц, 2 – 28 ГГц, 3 – 53 ГГц, 4 – 62 ГГц. Пунктиром проведена зависимость $\sim H^{-2}$

Исследовался двумерный электронный газ в полупроводниковых гетеропереходах GaAs – AlGaAs. Концентрация электронов менялась в интервале $(2 – 4) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, подвижность – в интервале $(0,15 – 1,0) \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Измерения проводились при температуре 4,2 К в геометрии Фарадея ¹¹. Образец располагался в цилиндрическом волноводе, соединяющим два соосных прямоугольных волновода, которые в условиях гелиевых температур могли плавно вращаться вокруг общей оси. Измерялась полевая зависимость мощности $P_\perp(H)$ СВЧ излучения, прошедшего через образец при 90° -ной разориентации волноводов. Параметры волноводного тракта подбирались таким образом, чтобы во всем исследуемом диапазоне частот 24 – 70 ГГц в цилиндрическом волноводе возбуждалась только основная мода TE_{11} . Измеряемый сигнал $P_\perp(H)$ пропорционален $|\sigma_{xy}(\omega, H)|^2$. Однако, как показали специальные эксперименты, эта пропорциональность может нарушаться из-за механического несовершенства волноводного тракта и различных неоднородностей в исследуемых образцах. В принципе это может приводить к существенному искажению зависимости $\sigma_{xy}(\omega, H)$.

Достоверными считались результаты, полученные при выполнении следующих условий: 1) отношение $P_{\perp}(H=0)/P_{\parallel}(H=0)$ не превышает 10^{-4} , $P_{\parallel}(H)$ – сигнал при нулевой разориентации волноводов; 2) результат не зависит от положения образца в волноводе и от размеров образца, исследовались образцы с размерами от 6×6 до $2 \times 2 \text{ мм}^2$; 3) отношение величин $P_{\perp}(H)$ в центрах холловских плато ($\nu = 2$ и 4) совпадает с отношением квадратов соответствующих факторов заполнения; 4) результаты, полученные на одном образце до и после уменьшения толщины подложки, совпадают; начальная толщина составляла 400 мкм, конечная – 180 мкм.

Рис. 1, 2 демонстрируют частотное поведение КЭХ в широком интервале изменения H и в области плато $\nu = 2$ для двух образцов с практически одинаковой концентрацией, но разной подвижностью электронов. На вставке на рис. 2 показана частотная зависимость ширины плато ΔH , измеренной по отклонению 3%. Точность определения ΔH на частотах $35 \text{ Гц} < \omega/2\pi < 50 \text{ ГГц}$ была низкой, поэтому данные для них не приводятся. Пересечение пунктирной прямой с осью абсцисс дает приближенное значение граничной частоты существования КЭХ $\omega_0/2\pi \approx 45 \text{ ГГц}$. Измерения на образцах с близкими параметрами показали, что плато существует до частот $\sim 35 \text{ ГГц}$, что дает нижнюю границу для $\omega_0/2\pi$; верхняя граница 53 ГГц определяется возможностью измерений. Существует, однако, уверенность, что интервал для $\omega_0/2\pi$ уже указанного значения.

Следует отметить, что в пределах точности эксперимента характер частотного изменения КЭХ и граничная частота существования эффекта не зависят от величины подвижности электронов. С увеличением концентрации и, соответственно, с перемещением плато в область больших H , граничная частота также возрастает. Так, при нахождении плато в полях $\sim 60 \text{ к} \cdot \text{Э}$ плоский участок еще наблюдается при $\omega/2\pi = 62 \text{ ГГц}$. Результаты не зависят от мощности падающего на образец СВЧ излучения, которая могла меняться в интервале 0,1 – 100 мкВт (на входе в цилиндрический волновод).

Перечисленные особенности частотного поведения КЭХ, как уже отмечалось, схожи с теми изменениями эффекта, к которым приводит повышение температуры. Это подтверждается результатами температурных измерений холловской проводимости, выполненных на постоянном токе в образцах с теми же параметрами, что и частотные эксперименты на рис. 1 и на рис. 2.

Авторы благодарны Д.Е.Хмельницкому за полезное обсуждение полученных результатов.

Литература

1. Von Klitzing, Dorda G., Pepper M. Phys. Rev. Lett., 1980, **45**, 494.
2. Рашиба Э.И., Тимофеев В.Б. ФТП, 1986, **20**, 977.
3. Jordansky S. V. Sol. St. Comm., 1982, **43**, 1.
4. Kazarinov R.F., Luryi. S. Phys. Rev., 1982, **B25**, 7620.
5. Joint R. J. Phys. C., 1985, **18**, 331.
6. Апенко С.М., Лозовик Ю.Е. ЖЭТФ, 1985, **89**, 573.
7. Pepper M., Wakabayashi J. J. Phys. C., 1983, **16**, L113.
8. Long A.P., Myron H.W., Pepper M. J. Phys. C., 1984, **17**, L433.
9. Долгополов В.Т., Дорожкин С.И. Поверхность, 1985, **2**, 5.
10. Goldberg B.B., Smith T.P., Heiblum M., Stiles P. J. Surf. Sci., 1986, **170**, 180.
11. Волков В.А., Галченков Д.В., Галченков Л.А. и др. Письма в ЖЭТФ, 1986, **43**, 255.