

НАБЛЮДЕНИЕ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ФОТООТКЛИКА В УСЛОВИЯХ КВАНТОВОГО ЭФФЕКТА ХОЛЛА

Н.Б.Житенев, В.Т.Долгополов

В МДП-структурах на основе Si – (100) обнаружен зависящий от частоты микроволнового излучения фотоотклик двумерного электронного газа в условиях квантового эффекта Холла, свидетельствующий о возможности фотовозбуждения термоактивированных электронов на порог подвижности. Различное поведение фотоотклика на исследованных образцах связывается с характером потенциального рельефа.

Строение квантовых уровней двумерного электронного газа в условиях квантового эффекта Холла (КЭХ) является одним из центральных вопросов для понимания этого явления. В ряде работ (см., например, недавние ^{1, 2}) считается, что потенциальный рельеф медленно меняется на размере магнитной длины $l_B = (\hbar c/eB)^{1/2}$. Существуют экспериментальные данные, которые не объясняются в рамках такой модели, например, сильное отличие энергии активации, определяемой из анализа температурной зависимости минимума проводимости, от $\hbar \omega_c / 2$, где $\omega_c = eB/mc$ — циклотронная частота. Для выяснения характеристик распределения потенциала в условиях КЭХ может оказаться полезным изучение фотоотклика двумерного электронного газа на электромагнитное излучение с энергией кванта, сравнимой с величиной активационной энергии.

Исследования фотоотклика проводились ранее как на Si МДП-структурах ^{3, 4}, так и на гетеропереходах GaAs – Al_xGa_{1-x}As ⁵⁻⁸. Во всех работах отмечалось, что зависимости фотопроводимости от магнитного поля похожи на зависимости производной проводимости по температуре и отличаются резким увеличением сигнала или в области циклотронного резонанса ³⁻⁸, или в области электронного спинового резонанса ⁵. При целочисленном заполнении в больших магнитных полях (в условиях КЭХ) сигнала фотопроводимости не наблюдалось. В работе ⁸ ставилась задача изучения режима дробного КЭХ с помощью фотоотклика, но авторам также не удалось наблюдать изменения проводимости, качественно отличающегося от получаемого нагреванием.

В настоящей работе изучалась фотопроводимость двумерного электронного газа в Si – (100) МДП-структуре. Измерения проводились на 4 образцах холловской геометрии, основные параметры которых приведены в таблице. Все образцы имели полупрозрачный затвор из Ti. Источником излучения была ЛОВ, позволяющая работать в области длин волн от 1,16 мм до 1,90 мм. Излучение прерывалось на частоте 210 Гц механическим модулятором. Изменение сопротивления образца регистрировалось с помощью фазочувствительного усилителя по четырехточечной схеме, с последующим оцифровыванием и хранением в памяти ЭВМ. Наряду с сигналом, зависящим от тока, присутствовала фотоэдс, которая обычно была мала и просто вычиталась (с учетом фазы).

№№ пп	Тип под- ложки	Размер канала, мм ²	Максимальная подвижн. см ² /В·с (T = 4,2 К)	Энергия активации $E_A / k_B, K^\circ$ (B = 7,5 Т, i = 4)	Размер потенциала, А (согласно ⁹)
1	n	1,2 × 0,4	17700	19,1	70
2	n	1,2 × 0,4	15300	12,8	77
3	p	2,5 × 0,25	10100	12,0	—
4	p	1,2 × 0,4	6900	10,7	—

Чтобы убедиться, что излучение действительно достигает и взаимодействует именно с двумерными электронами, мы наблюдали циклотронный резонанс, проявляющийся в увеличе-

нии сигнала фотопроводимости 3^{-8} . На рис. 1 (верхний график) показан типичный фототклик на одном из образцов (№2). В средней части рис. 1 изображена термопроизводная сопротивления $\partial\rho_{xx}/\partial T$, полученная вычитанием зависимостей ρ_{xx} от магнитного поля B при температурах $T_1 = 1,95$ К и $T_2 = 1,65$ К. В нижней части рис. 1 представлена величина ΔT , полученная делением экстремумов в $\Delta\rho_{xx}$ на верхнем графике на термопроизводную в соответствующих точках ⁶. Результат такой обработки, по нашему мнению, пропорционален изменению электронной температуры под воздействием поглощаемого излучения. (Светлые точки отвечают минимумам $\rho_{xx}(B)$, темные — максимумам). Стрелкой отмечено резонансное поле на данной частоте излучения. При изменении частоты максимум в зависимости ΔT от B соответственно меняет свое положение.

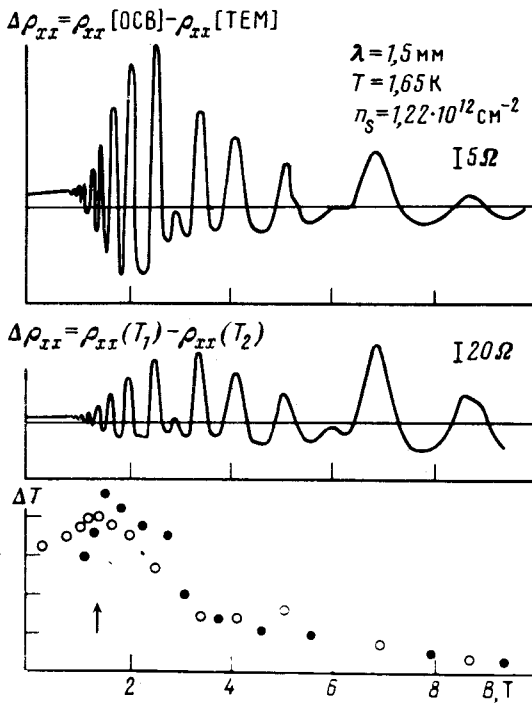


Рис. 1. Экспериментальные результаты на образце № 2

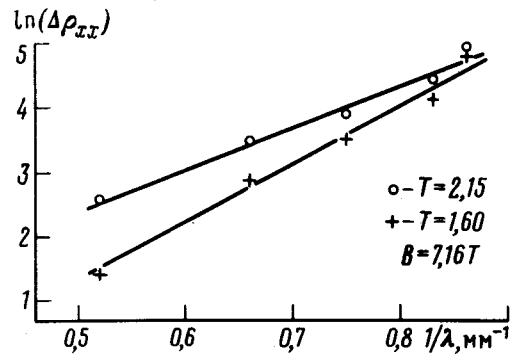


Рис. 2

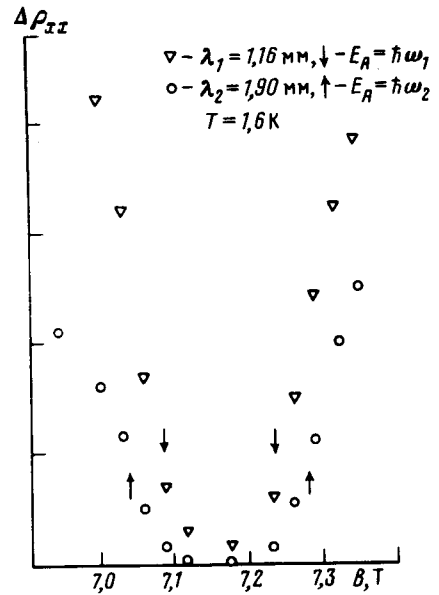


Рис. 3

Рис. 2. Частотная зависимость фототклика $\Delta\rho_{xx}$ на образце № 1 в минимуме проводимости. Фактор заполнения $i = 4$

Рис. 3. Зависимость фототклика на образце № 1 от магнитного поля в окрестности $i = 4$. Стрелками отмечены величины поля, в которых энергия активации совпадает с энергией кванта излучения

В настоящей статье сообщается о наблюдении частотно-зависимого фототклика в условиях КЭХ, имеющего не нагревательную природу. На рис. 2 изображена зависимость фототклика $\Delta\rho_{xx}$ от частоты микроволнового излучения при двух разных температурах для образца № 1. Фактор заполнения равен 4. Прямые соответствуют зависимостям $\Delta\rho_{xx} \sim \exp(\hbar\omega/k_B T)$. Ток через образец составлял 4 мкА, линейность по току проверялась.

Разброс экспериментальных точек связан с трудностями достаточно точного определения интенсивности излучения на образце с размерами, сравнимыми с длиной волны излучения. Тем не менее, точки достаточно хорошо ложатся на экспоненциальную зависимость. Аналогичная зависимость $\Delta\rho_{xx} \sim \exp(\hbar\omega/k_B T)$ с уменьшающимся предэкспоненциальным фактором наблюдается в больших магнитных полях при постоянном факторе заполнения.

На рис. 3 показана зависимость фотоотклика $\Delta\rho_{xx}$ от магнитного поля в окрестности фактора заполнения $i = 4$ для двух частот излучения. Стрелками показаны величины магнитного поля, в которых энергия активации равнялась соответствующей энергии кванта излучения.

На образце №4 энергия активации в максимально достигаемом поле $B = 10$ Т составляла $E_A/k_B = 15$ К. Наблюдался рост фотоотклика с частотой от $\lambda = 1,90$ мм до $\lambda = 1,16$ мм в 4 раза. Это качественно согласуется с результатами на образце № 1 (на рис. 3 при $E_A/k_B = 15$ К рост в 6 раз).

Образец №2 по своим параметрам в нулевом магнитном поле близок к образцу №1. Но энергия активации (см. таблицу) в поле $B = 7,5$ Т сильно меньше как величины $\hbar\omega_c/2$, так и энергии активации на образце № 1. Фотоотклик в этом поле не зависел от частоты с нашей точностью, а в поле $B = 10$ Т (экстраполированная энергия активации $E_A/k_B = 18$ К) фотоотклик не наблюдался. Такое же качественно поведение фотопроводимости наблюдалось и на образце № 3.

Для объяснения результатов будем считать, что проводимость в минимуме описывается соотношением $\sigma \sim \exp(-E_A/k_B T)$ с активацией на порог подвижности, где E_A — расстояние по энергии от уровня химического потенциала до порога подвижности. При подсветке в системе есть некоторое количество носителей, возбужденных над уровнем химического потенциала на $\hbar\omega$. В случае, когда $\hbar\omega/k_B T \gg 1$ проводимость при подсветке определяется этими носителями, и для зависимости фотоотклика имеем: $\Delta\rho_{xx} \sim \exp[-E_A + \hbar\omega/k_B T]$. Возможна и другая последовательность событий: фотозаброс на порог подвижности термоактивированных электронов. В любом случае необходимым условием фотовозбуждения является наличие подходящих по энергии состояний ($\Delta E = \hbar\omega$) на размере порядка магнитной длины l_B . В случае крупномасштабных флуктуаций потенциала, т. е. когда потенциал мало изменяется на размере l_B , фотовозбуждения квантами с $\hbar\omega < E_A$ не будет. Именно с характерными размерами неоднородностей мы связываем различие в поведении фотоотклика на образцах № 1 и № 2. Были предприняты попытки связать характерный размер потенциала в квантующем магнитном поле с характеристикой потенциала в нулевом магнитном поле, определенном по температурной зависимости проводимости согласно ⁹. Как видно из таблицы, образцы не очень сильно отличались по этому параметру.

Авторы выражают глубокую благодарность Е.А.Виноградову, за помощь в освоении техники миллиметрового диапазона и техническое содействие, И.Е.Неизвестному, З.Д.Квону, Г.М.Гусеву, предоставившим образцы с полупрозрачным затвором, М.С.Нунупарову за техническую помощь.

Литература

1. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Письма в ЖЭТФ, 1986, **44**, 520.
2. Кукушкин И.В., Тимофеев В.Б. ЖЭТФ, 1987, **93**, 1088.
3. Neppi F., Kotthaus J.P., Koch J.F. Phys. Rev., 1979, **B19**, 5240.
4. Lavine C.F., Wagner R.J., Tsui D.C. Surface Sci., 1982, **113**, 112.
5. Stein D., Ebert G., von Klitzing K. Surface Sci., 1984, **142**, 406.
6. Horstman R.E., van der Broek E.D., Wolter D. et al. Sol. St. Comm., 1984, **50**, 753.
7. Rikken G.L.J.A., Wyder P., Ploog K. et al. Proc. of EP₂DS-VII, Santa Fe, 1987, 623.
8. Guldner Y., Voos M., Vieren D.P. et al. Phys. Rev., 1987, **B36**, 1266.
9. Выродов Е.А., Долгополов В.Т., Дорожкин С.И., Житенев Н.Б. ЖЭТФ, 1988, **94**