

**О ЗАТУХАНИИ МАГНИТОПЛАЗМЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ (МК)
В ДВУМЕРНОМ ЭЛЕКТРОННОМ КАНАЛЕ
В РЕЖИМЕ КВАНТОВОГО ЭФФЕКТА ХОЛЛА (КЭХ)**

*С.А.Говорков, М.И.Резников, Б.К.Медведев,
В.Г.Мокеров, А.П.Сеничкин, В.И.Тальянский*

Измерена ширина линии МК в 2D-канале гетероструктуры GaAs – AlGaAs в поперечном магнитном поле, соответствующем квантованному значению холловской проводимости ($\sigma_{xy} = e^2 i / h = (12,9 \text{ кОм})^{-1}; i = 2$).

МК (или точнее краевые МК) в 2D электронных каналах интенсивно изучаются в последнее время экспериментально и теоретически ¹⁻⁶. В ⁶ показано, что в гетероструктурах GaAs – AlGaAs МК можно наблюдать на низких ($10^8 - 10^9$ Гц) частотах. Естественно предположить, что на низких частотах электропроводность 2D-канала такая же, как и на постоянном токе, где, как известно, ⁷, можно реализовать бездиссипативное протекание тока (режим КЭХ). Поэтому возникает вопрос о затухании МК в режиме КЭХ. Настоящая работа посвящена экспериментальному решению этого вопроса. Мы использовали образцы GaAs – AlGaAs с размерами 3 × 3 мм, подвижностью и концентрацией носителей при 4,2 К –

$10^5 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ и $\sim 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, соответственно. Образцы помещали в перестраиваемый (от 200 до 300 мГц) проходной СВЧ резонатор. СВЧ электрическое поле было направлено вдоль 2D-канала, а постоянное магнитное — перпендикулярно ему. Измеряли амплитуду прошедшей через резонатор СВЧ волны $A(B, \omega)$ при различных значениях магнитного поля B и частоты СВЧ поля ω . Все измерения проводились при 4,2 К. Если частота генератора совпадает с частотой резонатора (это условие всегда выполнялось в процессе измерений), то ⁸ :

$$A(B, \omega) \sim A_0 Q_H, \quad (1)$$

где A_0 — амплитуда падающей волны, Q_H — нагруженная добротность резонатора с образцом и коэффициент пропорциональности не зависит от B и ω . Если потери энергии в резонаторе определяются в основном образцом (т.е. $A(B, \omega) \ll A(B=0, \omega)$), то (1) сведется к $A(B, \omega) \sim A_0 \Pi^{-1}(B, \omega)$. Функцию $\Pi(B, \omega)$ можно интерпретировать как мощность отбрасываемую образцом от электрического поля постоянной амплитуды и частоты ω . При ω близких к собственной частоте МК $\omega_0(B)$, функция $\Pi(B, \omega)$ имеет резонансный характер и содержит, фактически, всю информацию о МК. В приближении, когда 2D-канал заменяется сплюснутым проводящим эллипсоидом ⁵, собственная частота простейшего МК определяется компонентой σ_{xy} , а ширина линии — компонентой σ_{xx} :

$$\omega_0 = \frac{\pi^2 \sigma_{xy}(B)}{a}; \quad \frac{\Delta \omega}{\omega_0} = \frac{2 \sigma_{xx}(B)}{\sigma_{xy}(B)}; \quad \Pi(B, \omega = \omega_0) \sim \sigma_{xx}^{-1}(B) \quad (2)$$

a — диаметр образца. В данной работе мы подробно исследовали МК при значениях B ($\sim 6,5$ Т для использованного образца), соответствующих квантованному значению $\sigma_{xy} = 2e^2/h = (12,9 \text{ кОм})^{-1}$. Для такого значения σ_{xy} из (2) получаем $\omega_0 \sim 2\pi \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ или $f_0 \sim \sim 300$ мГц. Перейдем к описанию результатов измерений. На рис. 1 и 2 показаны зависимости $A(B)$, измеренные при различных фиксированных значениях ω . При $B \lesssim 4$ Т на кривых видны осцилляции Шубникова — де Гааза и все кривые практически одинаковы. При $B > 4$ Т наблюдается "провал", соответствующий увеличению поглощения энергии образцом. "Провал" возникает из-за возбуждения в образце МК, а минимум на кривой $A(B)$ (для какого-либо значения ω) достигается, когда B удовлетворяет условию

$$\omega_0(B) = \omega. \quad (3)$$

Так как ω_0 — убывающая функция B (см. (2)), то с уменьшением ω "провал" смещается в область больших B . Следует отметить важные особенности кривых на рис. 1 и 2: 1) минимальное значение A наблюдается при $\omega \sim 214$ мГц и $B \sim 6,5$ Т, 2) вид кривых $A(B)$ в интервале значений $B \sim 6 \div 7$ Т сильно изменяется при небольших изменениях ω вблизи 214 мГц. Обе эти особенности естественно объясняются формулами (2). Значение $B = 6,5$ Т соответствует режиму КЭХ и минимальному значению σ_{xx} . Это приводит (согласно (2)) к большому поглощению и малой ширине линии МК (и, следовательно, к сильной зависимости поглощения от ω). Таким образом, из кривых на рис. 1 и 2 следует, что квантованному значению $\sigma_{xy} = 2e^2/h$ соответствует частота МК $f_0 \cong 214$ мГц. Отличие этого значения от вычисленного по формуле (2) ($f_0 = 300$ мГц) может быть обусловлено несколькими причинами: приближенным характером формулы (2) для ω_0 , наличием деполяризующего действия подложки из GaAs и стенок резонатора (обсуждение аналогичного вопроса для краевых плазмонов проведено в ⁹). На рис. 3 показаны измеренные зависимости $A^{-1}(\omega) \sim \Pi(\omega)$ для некоторых фиксированных значений B . Видно, что при $B \sim 6,5$ Т МК является слабозатухающим возбуждением: $\Delta\omega/\omega_0 \sim 1/20$. Небольшие изменения B приводят к уширению линии МК (по-видимому, из-за увеличения σ_{xx}). Полученная в режиме КЭХ ширина линии МК ($\Delta f \sim 10$ мГц) оказалась существенно больше, чем можно было ожидать на основании (2) и значения σ_{xx} на постоянном токе. Для использованного образца минимальное значение σ_{xx} на постоянном токе в режиме КЭХ равно $\sim (1 \text{ Ом}/\square)^{-1}$. Подстановка этого значения в (2) дает $\Delta\omega/\omega_0 \sim 10^{-4}$. Причина такого несоответствия в настоящее время не ясна. Возможно

(2) является слишком грубым приближением для оценки ширины полосы МК, однако нельзя исключить и возможности того, что величина σ_{xx} на частоте измерения много больше, чем на постоянном токе. Исследование МК в режиме КЭХ было недавно проведено в ¹⁰. В ¹⁰ был сделан вывод о том, что ширина линии МК определяется компонентой σ_{xy} . Наши измерения не согласуются с этим выводом: как следует из рис. 3 небольшие изменения B

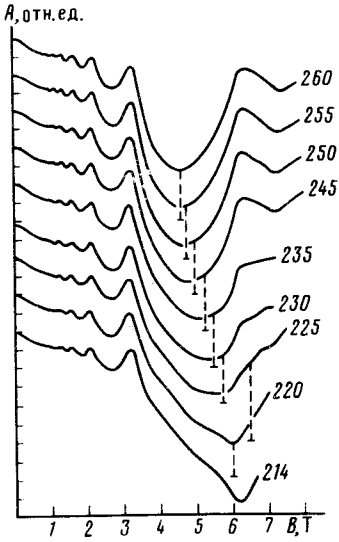


Рис. 1. Зависимости $A(B)$ (см. текст). Цифра возле кривой указывает частоту измерения в МГц. Кривые сдвинуты для удобства по вертикали (без изменения масштаба). Положение горизонтальной оси для каждой кривой (кроме нижней) указаны с помощью черты и вертикальной пунктирной линии

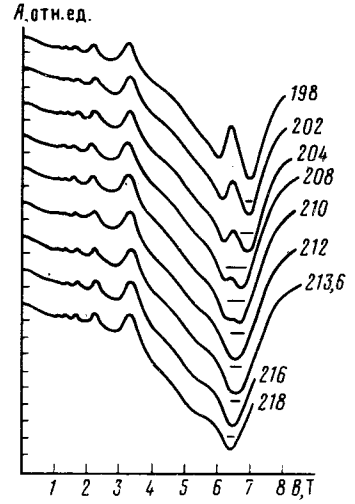


Рис. 2. То же, что и на рис. 1

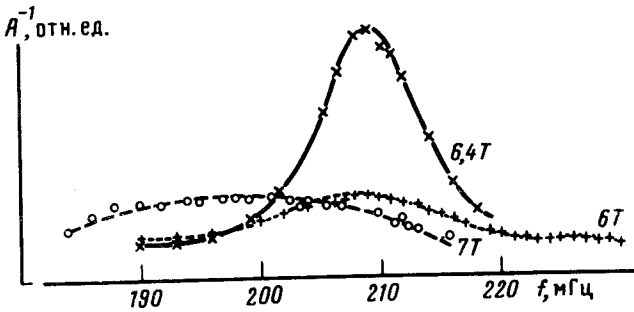


Рис. 3. Зависимости $A^{-1}(f)$ для различных B

приводят к значительному изменению затухания МК, хотя σ_{xy} при этом практически не изменяется. Кроме того, полученная в нашей работе ширина линии МК $\Delta f \sim 10$ МГц, по крайней мере на порядок меньше значения, полученного в ¹⁰. Возможно, расхождение результатов связано с различным качеством использованных гетероструктур.

Авторы благодарны С.В.Иорданскому и Д.Е.Хмельнищкому за полезные обсуждения, В.А.Тулину за поддержку работы и В.А.Волкову за предоставленную возможность ознакомиться с работой ¹⁰ до ее опубликования.

Литература

1. Mast D.B., Dahm A.J., Fetter A.L. Phys. Rev. Lett., 1985, 54, 1706.
2. Glatli D.C., Andrei E.Y., Deville G., Poitrenaud J., Williams F.I.B. Phys. Rev. Lett., 1985, 54, 1710.
3. Allen S.J., Jr., Störmer H.L., Hwang J.C.M. Phys. Rev., 1983, 28, 4875.
4. Волков В.А., Михайлов С.А. Письма в ЖЭТФ, 1985, 42, 450.
5. Тальянский В.И. Письма в ЖЭТФ, 1986, 43, 96.
6. Говорков С.А., Резников М.И., Сеничкин А.П., Тальянский В.И. Письма в ЖЭТФ, 1986, 44, 380.
7. K.von Klitzing, Dorã G., Pepper M. Phys. Rev. Lett., 1980, 45, 494.
8. Альтман Дж. Устройства СВЧ. М.: Мир, 1968, с. 268.
9. Leavitt R.P., Little J.W. Phys. Rev., 1986, B34, 2450.

10. *Волков В.А., Галченков Д.В., Галченков Л.А., Гродненский И.М., Матов О.Р., Михайлов С.А.* Письма
в ЖЭТФ, 1986, 44, 510.

Институт физики твердого тела
Академии наук СССР

Институт проблем технологии микроэлектроники
и особо чистых веществ Академии наук СССР

Поступила в редакцию
25 января 1987 г.
