

## НИЗКОЧАСТОТНЫЕ МАГНИТОПЛАЗМЕННЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ В GaAs/AlGaAs КВАНТОВЫХ ПРОВОЛОКАХ

*И.М.Гродненский, А.С.Руденко, А.Ю.Камаев, Е.П.Красноперов<sup>+</sup>,  
Д.Хайтман\*, К.Клитцинг\*, К.Плуг\**

*Институт радиотехники и электроники РАН  
103907 Москва, Россия*

*<sup>+</sup> Российский научный центр "Курчатовский институт"  
123182 Москва, Россия*

*\* Max-Planck-Institut für Festkörperforschung  
D-7000 Stuttgart 80, Germany*

Поступила в редакцию 2 июня 1993 г.

В структурах с квантовыми проволоками (КП) обнаружены плазменные резонансы в радиочастотном (РЧ) диапазоне, в сильном магнитном поле вблизи целых значений фактора заполнения уровней Ландау ( $\nu = 2$  и  $\nu = 4$ ). Установлено, что их частота при  $\nu = 2$  меньше, чем при  $\nu = 4$ , а добротность уменьшается при повышении температуры и (или) удалении от целого  $\nu$ . Результаты измерений позволяют связать резонансы с возбуждениями, подобными краевым магнито-плазмонам (КМП) в обычной двумерной (2D) системе.

В последнее время интенсивно исследуются решетки КП, изготовленные на основе структур с 2D-электронным газом. Электронный энергетический спектр в них имеет квазиодномерный характер вследствие квантования поперечного движения электронов проводимости в образующихся рядом с гетерограницей проволочных инверсионных слоях шириной порядка 100 нм [1-3]. Одномерные подзоны обычно располагаются квазиэквидистантно с характерным расстоянием 1–5 мэВ ( $\hbar\Omega$ ). В перпендикулярном гетеропереходу сильном магнитном поле ( $\omega_c \gg \Omega$ ,  $\omega_c$  – циклотронная частота) движение электронов в проволоках двумеризуется и они представляют собой 2D-полоски с неоднородной по ширине электронной плотностью [3,4]. Динамический отклик КП на внешнее электрическое поле экспериментально исследовался по поглощению дальнего инфракрасного (ДИК) излучения или рамановскому рассеянию [5–7]. В отсутствие магнитного поля поглощение поперечного излучения наблюдается на частоте  $\Omega_{\perp}$ , обычно превышающей  $\Omega$ , и отвечает возбуждению основной внутриволоочной поперечной плазменной моды [5–7]. В магнитном поле частота поглощения возрастает  $\Omega_{\perp}^2(B) = \Omega_{\perp}^2(0) + \omega_c^2$  [5,7]. 1D-плазмон в проволоках также был обнаружен в ДИК области по рамановскому рассеянию света [6], а его дисперсия от магнитного поля, измеренная по поглощению [7], оказалась отрицательной, что является особенностью, характерной для КМП возбуждений в 2D-системах [8-10]. Все обнаруженные до сих пор проволочные возбуждения находятся в диапазоне  $\omega\tau \gg 1$ , где  $\tau$  – характерный параметр примесного уширения уровней Ландау в квантующих ( $\omega_c\tau \geq 1$ ) магнитных полях. В настоящей работе содержатся первые результаты исследования динамического отклика КП в РЧ диапазоне,  $\omega\tau \ll 1$ .

Образцы представляли собой периодические решетки КП, приготовленные на поверхности гетероструктуры, состоящей из покрывающего предохранительного слоя GaAs (толщиной 10 нм), легированного слоя AlGaAs (50 нм), неле-

гированного слоя AlGaAs (спейсера, 25 нм), слоя GaAs (1 мкм) и подложки из GaAs (0,4 мм). Фоторезистивная полосковая маска была приготовлена методом голографической литографии, а плазмохимическим травлением открытой поверхности на глубину 200 нм (через 2D-слой) были сформированы полосы [6,7] с периодом  $a = 1000$  нм и шириной  $t = 540$  нм. Их численность составляла  $\approx 7000$ , а длина  $L = 4,5$  мм. Электронная проводимость, отсутствовавшая при охлаждении до 4 К, увеличивалась путем подсветки за счет механизма замороженной фотопроводимости. Из-за образования боковых обедненных слоев (толщиной 100–120 нм [6,7]) ширина получавшихся электронных проволоочных каналов  $W$  была меньше размера  $t$ .

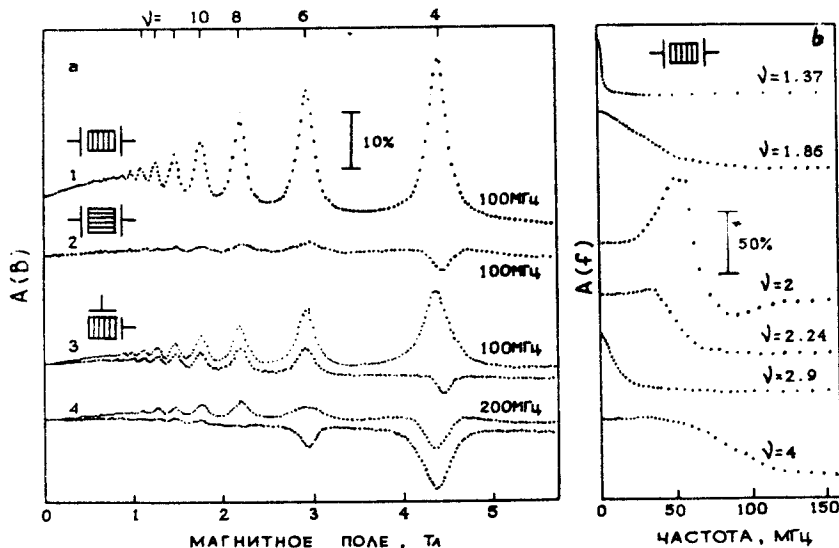


Рис.1. а - Магнитополевые зависимости отклика  $A(B)$  для нескольких расположений электродов относительно образца, нормированные к единице при  $B = 0$ : 1 - внешнее электрическое поле направлено поперек проволок, 2 - вдоль проволок, 3, 4 - несимметричное расположение электродов. б - Частотные зависимости  $A(f)$ , нормированные на отклик от подложки

Для измерения динамического отклика КП применялась нерезонансная РЧ измерительная ячейка [10], в которой образец помещался между возбуждающим и приемным электродами. Измерение отклика проводилось для нескольких расположений электродов относительно образца (рис.1), позволяя воздействовать электрическим полем на проволоки в разных направлениях. Мы измеряли магнитополевые и частотные зависимости отклика  $A(B)$  и  $A(f)$ , где  $A(B) = U(f = \text{const}, B) / U(f = \text{const}, B = 0)$  и  $A(f) = U(f, B = \text{const}) / \bar{U}(f, B = 0)$  ( $U$  - амплитуда напряжения на приемном электроде при постоянной амплитуде на возбуждающем, а  $\bar{U}$  отвечает ситуации, когда в ячейку вместо образца помещалась подложка из чистого GaAs).

Исследование показало, что существуют две области магнитных полей. В первой, представляющей собой окрестности  $\nu = 2$  и  $\nu = 4$ , в КП нами были обнаружены возбуждения с  $f_p > \gamma_p$  ( $\omega_p / 2\pi = f_p - i\gamma_p$ ), а во второй области, являющейся дополнением к первой, наблюдались сильнозатухающие возбуждения ( $f_p < \gamma_p$ ). Различие между добротностями возбуждений в обеих областях

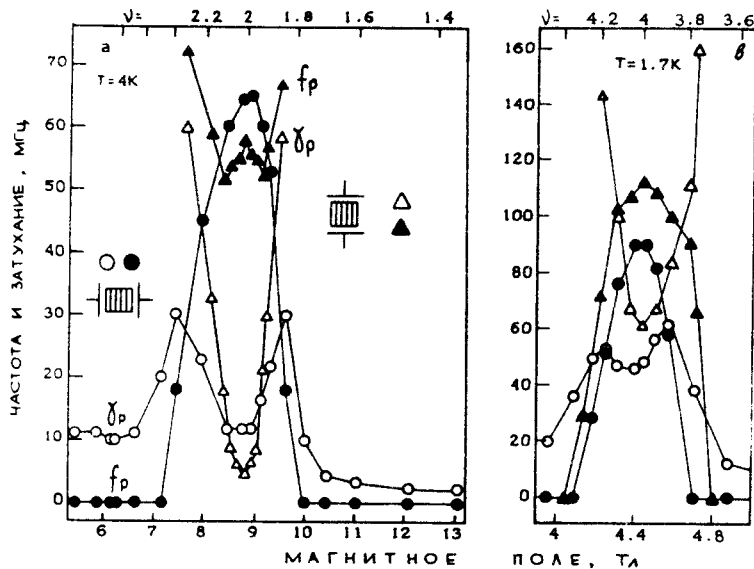


Рис.2. Собственная частота  $f_p(B)$  и декремент затухания  $\gamma_p(B)$  возбуждений, наблюдаемых в продольном (о, •) и поперечном ( $\Delta$ ,  $\Delta$ ) внешнем электрическом поле: а - в окрестности  $\nu = 2$  при  $T = 4\text{K}$ ; б - в окрестности  $\nu = 4$  при  $T = 1,7\text{K}$

наглядно показывают частотные зависимости отклика (рис.1,б). Сравнение с расчетом в приближении линейного осциллятора [11] позволило восстановить для обнаруженных резонансов полевые зависимости  $f_p(B)$  и  $\gamma_p(B)$  (рис.2). В первой области магнитных полей эти зависимости для двух различных ориентаций проволок относительно электродов ведут себя одинаково (рис.2). При удалении от целого  $\nu$  собственная частота падает, а затухание возбуждения растет. Некоторое отличие их друг от друга по абсолютной величине мы связываем с различным "экранирующим" влиянием электродов в обоих случаях измерений.

Обнаруженные нами в первой области магнитных полей резонансы следует связывать с КМП-подобными возбуждениями (их частный случай - локализованные у края  $2D$ -системы КМП). Действительно, единственными известными в  $2D$ -системе низкочастотными ( $\omega < \omega_c$ ) магнитоплазменными возбуждениями, которые могут слабо затухать, даже когда  $\omega\tau \ll 1$ , являются КМП-подобные возбуждения, локализованные на неоднородности и характеризующиеся в случае ограниченной неоднородности "вращением" в плоскости  $2D$ -слоя в направлении, задаваемом ориентацией магнитного поля [8,11]. Низкочастотная область возбуждений налицо, а КМП-подобный "вращательный" характер указывается следующим фактом.

На рис.1,а представлены осциллирующие при изменении магнитного поля зависимости  $A(B)$ . При несимметричном расположении электродов относительно образца зависимости  $A(B)$  и  $A(-B)$ , измеренные для противоположных направлений магнитного поля, сильно различаются в первой области магнитных полей (рис.1,а, кривые 3 или 4), а при симметричном расположении они везде совпадают (рис.1,а, кривые 1 или 2). Такое поведение отклика, обнаруженное на разных образцах, следует ожидать для внутрипроволочных возбуждений, характеризующихся "вращением" в плоскости  $2D$ -слоя в задаваемом

ориентацией магнитного поля направлении, что согласуется с интерпретацией обнаруженных резонансов в виде КМП-подобных возбуждений.

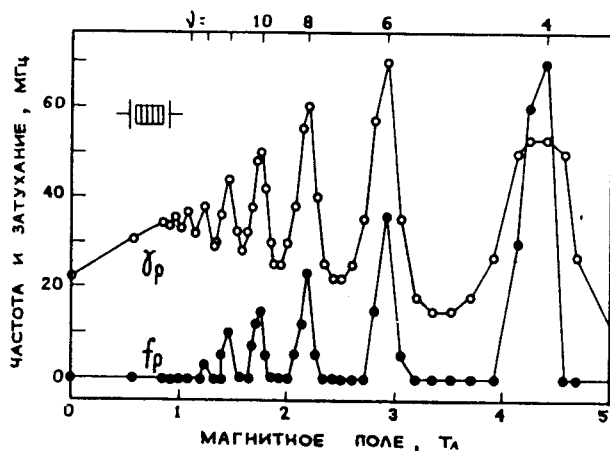


Рис.3. Собственная частота  $f_p(B)$  и декремент затухания  $\gamma_p(B)$  возбуждений, наблюдаемых во внешнем поперечном электрическом поле при  $\nu \geq 4$  ( $T = 4$  К)

Уменьшение добротности возбуждений при удалении от целого  $\nu$  и (или) повышении температуры от  $T = 1,7$  до  $4$  К (рис.2, 3) можно объяснить возрастанием  $\text{Re}\sigma_{xx}$ , а падение собственной частоты при уменьшении целого  $\nu$  (рис.2) – уменьшением  $\sigma_{xy}$ . Например, в  $2D$ -системе при  $\text{Re}\sigma_{xx} \ll \text{Im}\sigma_{xx}$  расчет дает выражение для собственной частоты КМП, пропорциональное бездиссипативной компоненте  $\sigma_{xy}$ , а для декремента затухания – отношению  $\text{Re}\sigma_{xx}/\text{Im}\sigma_{xx}$  [8]. Похожие зависимости имеют собственные частоты и затухания возбуждений, обнаруженных в настоящей работе в КП в диапазоне  $\omega\tau \sim 0,005$ . Оценка диапазона сделана на основании появления первой ( $\omega_c\tau \sim 1$ ) осцилляции отклика при  $B \sim 1$  Тл ( $T = 4$  К). Причем, использовался тот факт, что подавление осцилляций связано, в основном, с  $\tau$ -уширением уровней Ландау, а не температурой (при существенно меньшей температуре  $T = 1,7$  К полевые зависимости  $A(B)$  показали появление первой осцилляции фактически при том же значении магнитного поля  $\sim 0,8$  Тл). Таким образом, осциллирующий характер собственной частоты и затухания возбуждений при изменении  $\nu$  (рис.2), не похожих на монотонные зависимости в ДИК области [7], в нашем случае определяется частотным диапазоном  $\omega\tau \ll 1$ .

Для характера распределения возбуждений внутри проволок имеются две возможности. Первая – возбуждение локализовано у краев проволок на длине, много меньшей их ширины (например, в [12] определили глубину локализации КМП у края обычного  $2D$ -образца заведомо меньше полуширины проволок). В этом случае резонансы следует связывать с возбуждением моды, представляющей собой синфазное распространение вдоль периметров всех проволок КМП с длинами волн, равными  $2L$ . Вторая возможность – возбуждение внутри проволок, напротив, имеет объемный характер распределения и резонансы связываются с модой, характеризуемой синфазными "вращениями" в проволоках вектора электрического поля, эллиптически поляризованного в плоскости  $2D$ -слоя [13]. Вопрос о характере распределения возбуждения представляет интерес для дополнительного исследования.

Во второй области магнитных полей наблюдается сильное падение добротностей резонансов и возникновение значительного различия между декрементами

затухания для двух направлений внешнего электрического поля, что связывается с ростом  $\text{Re}\sigma_{xx}$ . В обычной 2D-системе в случае сильного затухания КМП ее отклик выражен модами растекания 2D-заряда [14], поэтому возбуждаемые в решетке КП низкооборотные резонансы мы связываем с растеканием. На рис.3 даны осциллирующие при изменении  $\nu$  зависимости  $f_p(B)$  и  $\gamma_p(B)$  для моды растекания, возбуждаемой поперечным электрическим полем. При целых  $\nu$  обе зависимости имеют локальные максимумы, амплитуда которых растет при увеличении магнитного поля, что напоминает осцилляции величины  $1/\rho_{xx}$ . Для растекания с более сильным затуханием, возбуждаемого продольным электрическим полем,  $f_p$  и  $\gamma_p$  удалось определить на краях окрестностей  $\nu = 2$  и  $\nu = 4$  (рис.2), в которых при приближении к целому  $\nu$  величина  $\gamma_p$  сильно падает, напоминая поведение  $\text{Re}\sigma_{xx}$ .

В [13] сделаны оценки декрементов затухания обеих мод. Для моды растекания, возбуждаемой холловскими токами, индуцированными внешним поперечным электрическим полем, получено выражение  $\omega_p \sim -i \cdot 8\delta/\epsilon L\rho_{xx}$ , где  $\delta = W/a$  и  $\epsilon = (1 + \epsilon_{GaAs})/2$ , а для другой моды, возбуждаемой продольным электрическим полем, получено выражение, дающее более сильное затухание  $\omega_p \sim -i \cdot 8\sigma_{xx}/\epsilon W$ . Зависимость обоих выражений от магнитного поля согласуется с результатами эксперимента. Следовательно, обнаруженные во второй области магнитных полей в решетках КП низкооборотные возбуждения действительно связываются с основными модами продольного и поперечного растекания объемного 2D-заряда.

Таким образом, в работе впервые обнаружены в КП в РЧ диапазоне резонансы, связывающиеся с КМП-подобными возбуждениями, трансформирующимися при увеличении температуры и (или) удалении от целочисленного  $\nu$  ( $\nu = 2$  или  $\nu = 4$ ) в релаксационные моды растекания 2D-заряда.

Авторы благодарны С.А.Михайлову и В.А.Волкову за обсуждение работы и полезные замечания.

- 
1. A.C.Warren, D.A.Antoniadis, and H.I.Smith, Phys. Rev. Lett. **56**, 1858 (1986).
  2. K.F.Berrgren, T.J.Thornton, D.J.Newson, and M.Pepper, Phys. Rev. Lett. **57**, 1769 (1986).
  3. И.М.Гродненский, Ю.М.Дикаев, А.С.Руденко и др., ФТП **26**, 1521 (1992).
  4. В.Б.Шикин, Т.Демель, Д.Хайтман, ЖЭТФ **96**, 1406 (1987).
  5. W.Hansen, M.Horst, J.P.Kotthaus, et al., Phys. Rev. Lett. **58**, 2586 (1987).
  6. T.Egeler, G.Abstreiter, G.Weimann, et al., Phys. Rev. Lett. **65**, 1804 (1990).
  7. T.Demel, D.Heitmann, P.Grambow, and K.Ploog, Phys. Rev. Lett. **66**, 2657 (1991).
  8. В.А.Волков, С.А.Михайлов, ЖЭТФ **94**, 217 (1988).
  9. С.А.Говорков, М.И.Резников, А.П.Сеничкин, В.И.Тальянский, Письма в ЖЭТФ **44**, 380 (1986).
  10. В.А.Волков, Д.В.Галченков, Л.А.Галченков, и др., Письма в ЖЭТФ **44**, 510 (1986).
  11. Л.А.Галченков, И.М.Гродненский, А.Ю.Камаев, ФТП **21**, 2197 (1987).
  12. I.M.Grodnensky, D.Heitman, and K.Klitzing, Phys. Rev. Lett. **67**, 1019 (1991).
  13. С.А.Михайлов, Письма в ЖЭТФ **57**, (1993).
  14. А.О.Говоров, А.В.Чаплик, Поверхность **12**, 5 (1987).