Физика низких температур, 1995, т. 21, № 4, с. 394–396 УДК 532, 132

Магнитоплазмоны в системе поверхностных электронов в гелии на границе между областями с различной плотностью зарядов

О. И. Киричек, И. Б. Беркутов

Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины, Украина, 310164, г. Харьков, пр. Ленина, 47

Статья поступила в редакцию 31 октября 1994 г., после переработки 16 ноября 1994 г.

Экспериментально исследованы плазменные колебания типа краевых магнитоплазмонов на границе между двумя областями с различными концентрациями поверхностных электронов, локализованных над сверхтекучим гелием. Измерения проведены при температуре 1,1 К в магнитных полях до 0,2 Тл. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическим предсказанием линейной зависимости скорости граничных магнитоплазмонов от разности концентраций электронов, тогда как добротность магнитоплазменного резонанса нелинейно зависит от нее.

Експериментально досліджено плазмові коливання типу крайових магнітоплазмонів на межі між двома областями з різними концентраціями поверхневих електронів, локалізованих над надплинним гелієм. Вимірювання були зроблені при температурі 1,1 К у магнітних полях до 0,2 Тл. Експериментальні результати добре збігаються з теоретично передбаченою лінійною залежністю швидкості крайових магнітоплазмонів від різниці концентрацій електронів, тимчасом як добротність магнітоплазмового резонансу нелінійно залежить від неї.

Хорошо известно, что существование границы у двумерного слоя электронов приводит к возникновению особой ветви плазменных колебаний — краевых магнитоплазмонов (КМП), наблюдаемых при наличии магнитного поля, перпендикулярного слою электронов [1,2]. Эти колебания локализуются возле границы слоя электронов, и направление их распространения зависит от знака приложенного магнитного поля.

В настоящее время КМП активно изучаются в различных физических системах, таких как гетероструктуры в полупроводниках, металл–диэлектрик–полупроводник структуры, криогенные транзисторы, поверхностные электроны (ПЭ), локализованные над сверхтекучим гелием [3–5]. Наиболее полные экспериментальные данные в этой области, хорошо согласующиеся с теоретическими результатами, были получены для ПЭ в [1–3,6].

При исследовании полупроводниковых структур большой интерес вызывает поведение КМП в режиме квантового эффекта Холла (КЭХ). В этом случае существуют области с различными концентрациями электронов («озера» и «холмы»), на границах которых степень заполнения уровней Ландау меняется скачком [7]. В [6] рассматривается возможность существования КМП подобных плазменных возбуждений, распространяющихся по периметру этих областей. Очевидно, что наличие таких граничных магнитоплазмонов (ГМП) способно сильно изменить физические характеристики системы в условиях КЭХ. Экспериментальное изучение ГМП в полупроводниковых структурах сильно усложняется отсутствием надежной информации о концентрациях электронов в областях «озер» и «холмов» и о геометрических характеристиках этих областей. Можно надеяться, что более удобным экспериментальным объектом для изучения ГМП окажется слой ПЭ, локализованных на поверхности сверхтекучего гелия, где можно получить контролируемые значения плотности электронов на различных участках образца.

В настоящей работе сообщается о результатах экспериментального изучения плазменных колебаний типа КМП, возбуждаемых на границе между двумя областями ПЭ на поверхности сверхтекучего гелия с различными концентрациями зарядов. Измерения проводились при температуре 1,1 К в магнитных полях до 0,2 Тл.

Экспериментальная ячейка представляет собой плоский конденсатор, между пластинами которого (зазор составлет 1,5 мм) на высоте 0,5 мм от нижней пластины расположен уровень жидкого гелия. Нижняя пластина (1,5 × 1 см) состоит из четырех электродов, на каждый из которых может независимо подаваться прижимающий потенциал, определяющий концентрацию ПЭ n_s над данным электродом. Схема электродов представлена на рис. 1. Каждая из пар электродов A, D и B, C соединена со своим источником постоянного тока. Таким образом, над электродами B и C можно создать слой ПЭ с концентрацией n_{s2}, который граничит со слоями

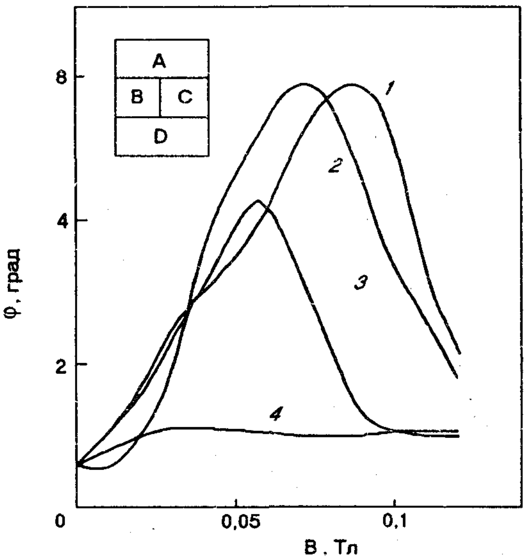

Рис. 1. Зависимость фазы измеряемого сигнала φ от величины магнитного поля для различных концентраций n_{s1}, м$^{-2}$: 0 (*1*); $1\cdot10^{12}$ (*2*), $2\cdot10^{12}$ (*3*), $3\cdot10^{12}$ (*4*). На вставке изображена схема электродов.

над электродами A и D с концентрациями над ними $n_{s1} = n_{sA} = n_{sD}$. В экспериментах изучались плазменные колебания, распространяющиеся вдоль периметра слоя электронов над электродами B и C. В качестве источника электронов использовалась вольфрамовая нить накаливания, находившаяся под отрицательным потенциалом и расположенная в верхней части ячейки.

Возбуждающий сигнал с частотой 1–5 МГц и амплитудой 10 мВ подавался на электрод B, электрод C был соединен со входом фазочувствительного детектора. В опыте измерялась фаза сигнала φ в зависимости от величины магнитного поля H при постоянной частоте возбуждающего сигнала. Результаты измерений приведены на рис. 1. Кривые соответствуют различным концентрациям электронов над электродами n_{s1}. Концентрация зарядов над электродами B и C составляла $n_{s2} = 4{,}2\cdot10^{12}$ м$^{-2}$. Как видно, магнитное поле, при котором наблюдается резонанс ГМП, уменьшается при уменьшении $\Delta n_s = n_{s2} - n_{s1}$. Добротность резонанса слабо изменяется в диапазоне концентраций $n_{s1} = 0$–$2\cdot10^{12}$ м$^{-2}$, однако при дальнейшем увеличении n_{s1} наблюдается резкое уменьшение добротности, и при концентрации $n_{s1} \simeq 2{,}7\cdot10^{12}$ м$^{-2}$ резонанс исчезает. При дальнейшем увеличении концентрации n_{s1} появляется резонанс обычных КМП, распространяющихся вдоль всего периметра нижней пластины.

Для количественного анализа результатов следует учесть, что при распространении магнитоплазмонов вдоль границы слоя ПЭ над электродами B и C около $2/3$ периметра этого слоя проходится ими вдоль границы областей с различными плотностями зарядов. Оставшуюся треть пути составляет граница между слоем ПЭ и вакуумом. Время, за которое магнитоплазмон обходит периметр слоя ПЭ над электродами B и C, есть $t_p = t_0 + t_b$, где t_0 — время прохождения магнитоплазмоном отрезка L_0 вдоль границы слоя ПЭ с вакуумом, t_b — время прохождения магнитоплазмоном отрезка L_1 вдоль границы между областями с различной концентрацией. Время t_0 можно определить, зная расстояние L_0 и скорость распространения КМП V_0 [6]:

$$t_0 = L_0/V_0 = \frac{L_0\,\varepsilon_0\,\varepsilon_g}{\alpha\,\sigma_{xy}}\,, \tag{1}$$

где ε_0 — диэлектрическая постоянная вакуума; ε_g — диэлектрическая проницаемость гелия; σ_{xy} — поперечная магнитопроводимость ПЭ; α — численный коэффициент, определяемый экспериментально и зависящий от геометрии системы.

Резонансная частота ГМП (измеряемая экспериментально) равна $f_R = 1/t_p$. Используя (1) и это соотношение, мы можем получить выражение для скорости ГМП:

$$V_1 = L_1\left(\frac{1}{f_R} - \frac{L_0\,\varepsilon_0\,\varepsilon_g}{\alpha\,\sigma_{xy}}\right)^{-1}. \tag{2}$$

Полученные значения скорости граничных магнитоплазмонов представлены на рис. 2. При $n_{s1} = 0$ наблюдается резонанс обычных краевых магнитоплазмонов. В случае $n_{s1} > 0$ с увеличением n_{s1} скорость ГМП уменьшается, при этом пропорционально уменьшается их частота. Эти результаты хорошо совпадают с полученной ранее теоретической зависимостью скорости ГМП от разности концентраций [6], которая нанесена на график в виде прямой линии. Отметим также, что полученные в эксперименте зависимости добротности резонансов от Δn_s, в отличие от теоретических данных [6], имеют нелинейный характер. Добротность достаточно высока в области $0 \le n_{s1}/n_{s2} < 0{,}7$, а для больших n_{s1}/n_{s2} магнитоплазмоны сильно затухают. При анализе результатов следует учесть, что в угловых областях слоя ПЭ над электродами B и C ГМП трансформируются в КМП и наоборот. При этом добротности резонансов могут сильно зависеть от согласованности волновых векторов магнитоплазменных колебаний обоих типов. Однако количественный анализ добротности резонансов в этом случае сильно затруднен, так как отсутствует

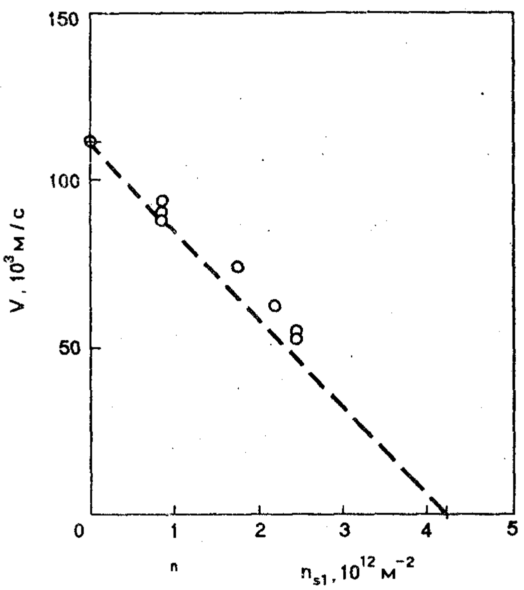

Рис. 2. Зависимость скорости ГМП от концентрации электронов n_{s1} над электродами *A*, *D*. Прямая линия соответствует зависимости $V(n_{s1})$, рассчитанной в соответствии с теорией [7].

информация о неоднородностях полей и плотностях зарядов в угловых областях. Возможно более информативными в этом отношении могли бы оказаться эксперименты с использованием круговой геометрии электродов.

Одновременно с нашими экспериментами подобные исследования проводились в Эйндховенском Технологическом университете с использованием круговой геометрии слоя электронов, где также была обнаружена линейная зависимость частоты ГМП от разности концентраций [8].

В заключение авторы выражают благодарность В. Н. Григорьеву, Ю. З. Ковдре и Ю. П. Монархе за обсуждение результатов, а также С. С. Соколову и В. Е. Сивоконю за помощь в работе.

Работа частично была поддержана Государственным комитетом Украины по вопросам науки и технологий (2.3/587).

1. D. B. Mast, A. J. Dahm, and A. L. Fetter, *Phys. Rev. Lett.* **54**, 1706 (1985).
2. D. C. Glattli, E. Y. Andrei, G. Deville, J. Poitrenaud, and F. I. B. Williams, *Phys. Rev. Lett.* 54, 1710 (1985).
3. P. K. H. Sommerfeld, P. J. M. Peters, H. F. W. J. Vorstenbosch, R. W. van der Heijden, A. T. A. M. de Waele, and M. J. Lea, *Physica* B194–196, 1311 (1994).
4. V. A. Volkov, D. V. Galchenkov, L. A. Galchenkov, I. M. Grodnenskii, O. R. Matov, and S. A. Mikhailov, *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **44**, 510 (1986).
5. R. C. Ashoori, H. L. Stormer, L. N. Pfeiffer, K. W. Baldwin, and K. West, *Phys. Rev.* **B45**, 3894 (1992).
6. V. A. Volkov and S. A. Mikhailov, *Sov. Phys. JETP* **67**, 1639 (1988).
7. V. Iordansky, *Solid State Commun.* **43**, 1 (1982).
8. P. K. H. Sommerfeld, P. P. Steijaert, P. J. M. Peters, R. W. van der Heijden, and A. T. A. M. de Waele, to be published.

Magnetoplasmons in surface electron system on helium at border between regions with different charge density

O. I. Kirichek and I. B. Berkutov

Edge magnetoplasmons-like excitations between two regions having different densites of surface electrons on the superfluid helium were studied experimentally. Measurement was performed at the temperature 1.1 K and magnetic fields up to 0.2 T. The experimental results are in good agreement with the theoretically predicted linear dependences of border magnetoplasmon velocity vs density difference; the quality of magnetoplasmon resonanse is a nonlinear function of density difference.