

Письма редактору

Новые моды связанных электрон-риплонных колебаний в вигнеровском кристалле в больших ведущих электрических полях

В. Е. Сивоконь, В. В. Доценко, Ю. З. Ковдря, В. Н. Григорьев

*Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины,
Украина, 310164, г. Харьков, пр. Ленина, 47
E-mail: sivokon@ilt.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 12 марта 1997 г.

Исследованы резонансные особенности в проводимости вигнеровского кристалла с поверхностной плотностью заряда $6 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ при температуре 75 мК в области частот 1–20 МГц в зависимости от амплитуды возбуждающего сигнала. Обнаружено, что при увеличении амплитуды сигнала появляются новые резонансы, которые, возможно, отвечают связыванию фононных мод электронного кристалла с возбуждаемыми в нелинейном режиме модами капиллярных волн.

Досліджено резонансні особливості провідності вигнерівського кристала з поверхневою густиною заряду $6 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ при температурі 75 мК в області частот 1–20 МГц в залежності від амплітуди збуджуючого сигналу. Знайдено, що при збільшенні амплітуди сигналу з'являються нові резонанси, які, можливо, відповідають зв'язуванню фононних мод електронного кристала з модами капілярних коливань, що збуджуються у нелінійному режимі.

PACS: 73.20.Dx, 67.90.+z

Поверхностные электроны, локализованные над жидким гелием, представляют собой квазидвумерную классическую систему с кулоновским взаимодействием. Эта система довольно интенсивно изучалась как теоретически, так и экспериментально [1]. Одним из наиболее ярких эффектов, проявляющихся в этой системе, является образование электронного кристалла, впервые обнаруженное в 1979 г. [2].

Специфическим свойством вигнеровского кристалла (ВК) в системе поверхностных электронов является возникновение связанных электрон-риплонных резонансов. Наблюдение таких резонансов дало первое экспериментальное свидетельство образования ВК [2]. Экспериментальное исследование спектра электрон-риплонных резонансов в малых ведущих электрических полях [3] подтвердило адекватность развитых в [4,5] теоретических представлений о природе этих резонансов. Представляют интерес исследования спектра таких резонансов в условиях больших ведущих полей, когда возможны нелинейные эффекты.

Это тем более интересно, что в последнее время обнаружен ряд новых ярких явлений в ВК в нелинейной области.

Нелинейное поведение вигнеровского кристалла в магнитном поле изучалось в работах [6–9], обнаружено, что начиная с некоторых значений ведущего электрического поля наблюдается резкое изменение продольной магнитопроводимости.

Нелинейные свойства ВК, проявившиеся в существенно немонотонной зависимости продольной проводимости от амплитуды ведущего поля, были найдены также в нулевом магнитном поле в работе [10]. Все упомянутые эффекты не имеют пока надежного теоретического объяснения.

Изменение спектра электрон-риплонных колебаний ВК в нелинейной области исследовано слабо. В принципе, в достаточно больших полях возможен перегрев электронов и плавление ВК. По-видимому, подобное явление наблюдалось в [11], где было обнаружено превращение оптической моды связанных электрон-риплонных

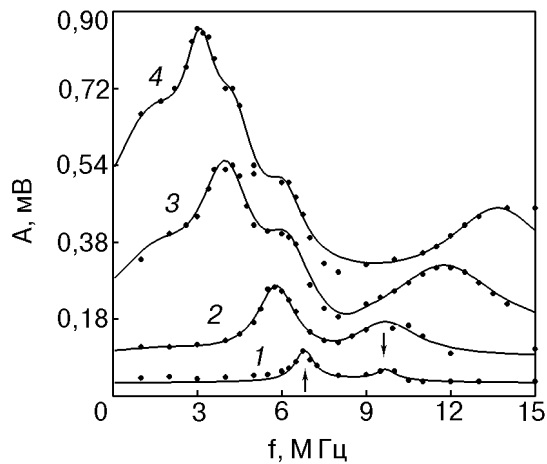


Рис. 1. Зависимости амплитуд сигнала-отклика от частоты возбуждающего сигнала при различных амплитудах возбуждения, мВ 0,3 (1); 1 (2); 5 (3); 10 (4). Для наглядности результаты разнесены по амплитуде: (2) на +0,05 мВ, (3) на +0,1 мВ, (4) на +0,2 мВ. Точки – экспериментальные данные, линии – результат аппроксимации суммой лоренцевских кривых.

колебаний в плазменную моду, характерную для жидкой фазы. В единственной известной нам теоретической работе, в которой рассматривается проблема нелинейного воздействия на ВК [12], предсказано появление в больших ведущих полях дополнительных так называемых демультипликационных резонансов, частоты которых связаны с резонансными частотами капиллярных волн на деформированной электронами поверхности гелия.

В настоящей работе изучено изменение спектра электрон-риплонных резонансов в зависимости от величины ведущего поля. Исследовался вигнеровский кристалл с поверхностной плотностью заряда $6 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ (температура плавления 0,54 К) при температуре гелиевой ванны 75 мК. Измерения проводились в диапазоне частот 1–20 МГц при амплитудах измерительного сигнала от 0,3 до 10 мВ. Ячейка находилась в тепловом контакте с камерой растворения рефрижератора и представляла собой плоский конденсатор диаметром 27 мм, в зазоре которого находился слой жидкого гелия высотой около 1 мм. Электроны напылялись на поверхность жидкого гелия при кратковременном включении нити накаливания и удерживались с помощью положительного потенциала, подаваемого на нижнюю пластину конденсатора. Верхняя пластина, находящаяся на расстоянии 2 мм от нижней, состояла из трех кольцевых измерительных электродов. Сигнал от высокочастотного генератора подавался на

внешний кольцевой электрод, отклик снимался с внутреннего, промежуточный электрод был заземлен. Подробно ячейка и измерительная схема описаны и проанализированы в [13].

Результаты измерений приведены на рис. 1 в виде частотных зависимостей амплитуд отклика измерительной ячейки на радиочастотные сигналы с различными амплитудами напряжения генератора. Амплитуда действующего в плоскости электронного слоя ведущего электрического поля пропорциональна амплитуде входного сигнала, но зависит от проводимости электронного слоя, частоты и изменяется вдоль радиуса электронного «пятна». Зависимости амплитуды выходного сигнала от частоты имеют резонансный вид и могут быть аппроксимированы суммой резонансных кривых. При обработке предполагалась лоренцевская форма резонансных кривых. Подбирались частоты, амплитуды и ширины резонансов с тем, чтобы суммарный расчетный сигнал соответствовал экспериментальным данным. Результаты обработки приведены на рис. 1 в виде сплошных линий.

При самых малых амплитудах сигнала (ведущего поля) частотная зависимость амплитуды отклика может быть представлена в виде суммы двух резонансных кривых. При увеличении амплитуды измерительного сигнала резонансная картина изменяется. Резонанс на частоте около 9 МГц заметно уширяется и смещается в область более высоких частот.

В низкочастотной области резонанс, соответствующий первой гармонике стоячих волн в ячейке, несколько смещается и затем появляются дополнительные низкочастотные резонансы, количество которых растет с увеличением амплитуды сигнала: начиная с амплитуды 0,5 мВ вблизи исходного резонанса появляется дополнительный резонанс, при сигнале 2 мВ появляется третий резонанс, а при 5 мВ – четвертый. Частота каждого нового резонанса отличается от предыдущего на величину около 1 МГц. На рис. 2 приведены зависимости положений этих резонансов от амплитуды возбуждения (ведущего поля). Проведено несколько серий измерений с целью проверки воспроизводимости результатов.

Теоретический анализ резонансных свойств ВК над жидким гелием выполнен в работах [4, 12, 14]. В отсутствие связи электронов с риплонами спектр продольных плазменных колебаний в электронном слое с учетом экранирующего влияния электродов имеет вид

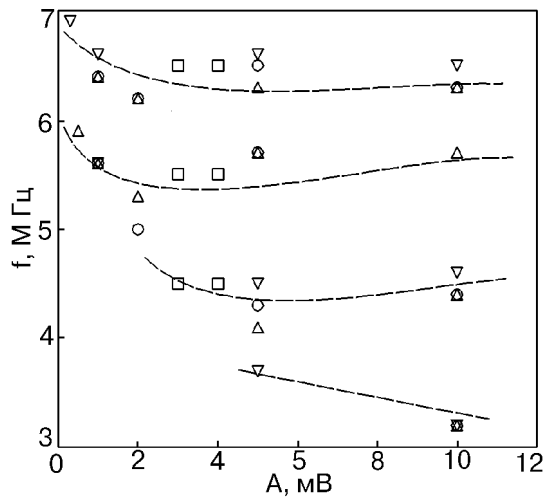


Рис. 2. Зависимости частот резонансов, появляющихся в низкочастотной области, от амплитуды возбуждающего сигнала. Различные значки соответствуют различным сериям измерений. Пунктирные линии проведены для более наглядной иллюстрации наблюдаемых зависимостей.

$$\omega_l^2 = \frac{4\pi n_s e^2 k \operatorname{sh} kd \operatorname{sh} k(H-d)}{m \operatorname{sh} kH}, \quad (1)$$

где n_s — поверхностная плотность электронов; m и e — масса и заряд электрона; H — зазор между измерительным и прижимающим электродами; d — высота уровня жидкого гелия по отношению к прижимающему электроду; k — волновой вектор, определяемый из условия нулевого тока на границе электронного слоя.

Наличие электронного кристалла ведет к локализации электронов и появлению статической деформации поверхности жидкого гелия. Появляется возможность резонансного возбуждения капиллярных волн [15,16] с частотами

$$\omega_n = (\alpha/\rho)^{1/2} g_n^{3/2}, \quad (2)$$

где α и ρ — коэффициент поверхностного натяжения и плотность жидкого гелия; g_n — вектор обратной решетки кристалла. При учете электрон-риплонного взаимодействия возникают связанные электрон-риплонные колебания, частоты которых для первого резонанса определяются соотношением

$$\omega^2(k) = \frac{\omega_1^2 \omega_l^2(k)}{C_1 \omega_1^2 + \omega_l^2(k)}, \quad (3)$$

где ω_1 — первая мода из набора (2); C_1 — коэффициент связи электронов и риплонов, соответствующий первой моде. На рис. 1 стрелками отмечены положения двух гармоник стоячих волн,

следующие из (3), если для C_1 использовать значение, вычисленное в рамках самосогласованной теории [5], и учесть также влияние примеси ^3He на коэффициент поверхностного натяжения. Как видно, имеется хорошее соответствие между теорией и экспериментом при самых малых значениях ведущего поля.

В работе [12] было предсказано появление при больших ведущих полях в спектре колебаний так называемых демультипликационных резонансов (или резонансов деления) на частотах $\omega_2/3$, $\omega_3/3 \dots$. Вопрос о том, как будут проявляться такого рода резонансы при измерениях в конкретной ячейке, до конца не ясен, но тот факт, что учет нелинейности приводит к появлению дополнительных низкочастотных резонансов, коррелирует с описанными выше экспериментальными результатами. Возможно, наблюдаемые нами низкочастотные нелинейные резонансы отвечают связыванию фононных мод электронного кристалла с дополнительными низкочастотными модами, описанными в [12].

Таким образом, в настоящей работе исследовались электрон-риплонные резонансы в вигнеровском кристалле при больших значениях амплитуд возбуждающего сигнала. Впервые обнаружено, что в больших ведущих электрических полях возникают новые моды колебаний вигнеровского кристалла на поверхности сверхтекучего гелия. Частоты этих мод оказываются ниже частот линейных резонансов. Эксперименты будут продолжены в области больших концентраций и температур, близких к температуре плавления вигнеровского кристалла.

1. В. Б. Шикин, Ю. П. Монарха, *Двумерные заряженные системы в гелии* Наука, Москва (1989).
2. C. C. Grimes and G. Adams, *Phys. Rev. Lett.* **42**, 795 (1979).
3. В. Е. Сивоконь, В. В. Доценко, Ю. З. Ковдря, В. Н. Григорьев, *ФНТ* **22**, 1107 (1996).
4. D. S. Fisher, B. L. Halperin, and P. M. Platzman, *Phys. Rev. Lett.* **42**, 798 (1979).
5. Ю. П. Монарха, В. Б. Шикин, *ФНТ* **9**, 913 (1983).
6. I. Wilen and R. Giannetta, *Jpn. J. Appl. Phys.* **26**, Suppl. 26-3, 2105 (1987).
7. K. Shirahama and K. Kono, *Tehn. Rep. ISSP*, ser. A, N 2852 (1994).
8. K. Shirahama and K. Kono, *JLTP* **104**, N 3/4, 237 (1996).
9. A. Blackburn, K. Djerfi, M. I. Dykman, C. Fang-Yen, P. Fozooni, A. Kristensen, M. J. Lea, P. J. Richardson, A. Santrich-Badal, and R. W. van der Heijden, *Czech. J. Phys.* **46**, S6, 3056 (1996).
10. В. Е. Сивоконь, В. В. Доценко, Ю. З. Ковдря, В. Н. Григорьев, *ФНТ* **21**, 782 (1995).

-
11. S. Yusel, L. Menna, and E. Y. Andrei, *Phys. Rev.* **B47**, 12672 (1993).
 12. Ю. П. Монарха, *ФНТ* **6**, 685 (1980).
 13. В. Е. Сивоконь, В. В. Доценко, С. С. Соколов, Ю. З. Ковдря, В. Н. Григорьев, *ФНТ* **22**, 715 (1996).
 14. Ю. П. Монарха, *ФНТ* **7**, 692 (1981).
 15. В. Б. Шикин, *Письма в ЖЭТФ* **19**, 647 (1974).
 16. Ю. П. Монарха, В. Б. Шикин, *ЖЭТФ* **B68**, 1423 (1975).

**New modes of coupled electron-rippion
oscillations in a Wigner crystal in high electrical
driving fields**

V. E. Sivokon', V. V. Dotsenko, Yu. Z. Kovdrya,
and V. N. Grigor'ev

Resonance peculiarities in conductivity of a Wigner crystal with a surface charge density of $6 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ are studied in relation to amplitude of an exciting signal at temperature 75 mK in the frequency range 1–20 MHz. It is found that new resonances are initiated with increasing amplitude. The resonances seem to be due to the coupling between phonon modes of the Wigner crystal and capillary waves ones excited in the nonlinear regime.