

ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯДОВ В ОЦК ${}^4\text{He}$

А.И.Голов, В.Б.Ефимов, Л.П.Межов-Деглин

Измерены подвижности зарядов в образцах ОЦК ${}^4\text{He}$. Сравнение подвижностей и характерных энергий активации диффузии зарядов в образцах ОЦК и ГПУ ${}^4\text{He}$ близкого молярного объема, а также в образцах ОЦК ${}^3\text{He}$, указывает, что свойства зарядов в гелиевых кристаллах, выращенных при малых давлениях в первую очередь определяются структурой кристаллической решетки образцов.

Ниже приведены результаты измерений подвижностей положительных μ_+ и отрицательных μ_- зарядов, а также рассчитанных по температурным зависимостям $\mu_+(T)$ и $\mu_-(T)$ характерных энергий активации диффузии зарядов в образцах ОЦК и ГПУ ${}^4\text{He}$ близкого молярного объема. Предположение о том, что структура кристаллической решетки может су-

щественно влиять на свойства введенных в твердый гелий зарядов было высказано давно¹. В литературе сообщалось о наблюдениях скачков токов в ^3He ¹ или подвижностей зарядов в ^4He ² в окрестности линии фазового ОЦК – ГПУ перехода. Однако подробные исследования движения зарядов были проведены только на образцах из ГПУ ^4He ³ или ОЦК ^3He ^{2,4}. Температурные зависимости подвижности зарядов в ОЦК ^4He удалось измерить впервые.

Эксперименты выполнены на установке, описанной в работе⁴. Измерительная ячейка – плоский диод, состоящий из источника зарядов (β – активная мишень) и металлического коллектора размерами $6 \times 40 \text{ mm}^2$. Ячейка располагалась внутри цилиндрической ампулы, в которой выращивали гелиевые кристаллы. Зазор источник – коллектор составлял $d = 0,3 \text{ mm}$. Кристаллы ГПУ фазы растили из сверхтекучей жидкости при давлении в $\sim 26 \text{ atm}$. Соотношение между молярными объемами ГПУ и ОЦК фаз твердого ^4He и жидкости на линии плавления таково, что при медленном отогреве ГПУ образца в замкнутой ампуле удается двигаться практически вдоль линии фазового ГПУ – ОЦК перехода на P - T -диаграмме⁵. Это значительно расширяет температурный интервал измерений подвижности в ОЦК фазе. Температуры переходов ГПУ – ОЦК – ГПУ фаза в наших экспериментах определявшиеся по скачкам токов, или подвижностей зарядов на соответствующих температурных зависимостях оказались близкими к положениям нижней и верхней тройных точек на равновесной P - T -диаграмме⁵.

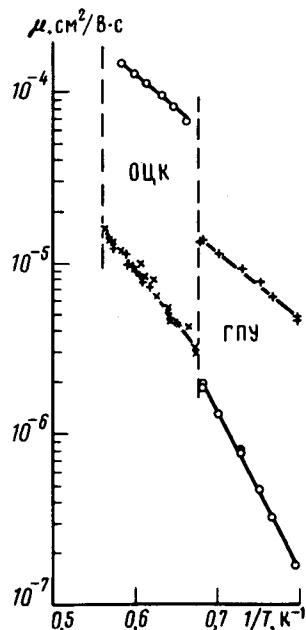
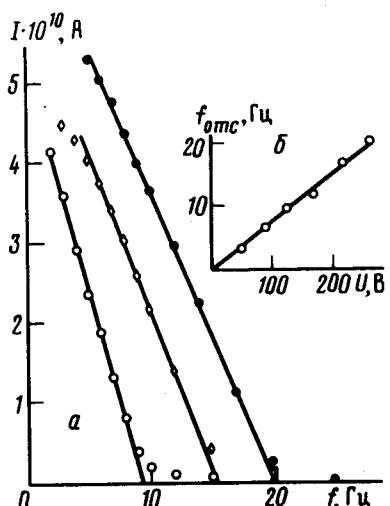


Рис. 1. *a* – Зависимость коллекторного тока от частоты повторения импульсов амплитудой $\pm 260 \text{ V}$ при температурах: $\circ - 1,63 \text{ K}$, $\diamond - 1,63 \text{ K}$ и $\bullet - 1,72 \text{ K}$. Образце 179. Прямые указывают положение $f_{\text{отс}}$; *б* – зависимость частоты отсечки от напряжения при $T = 1,72 \text{ K}$

Рис. 2. Зависимости подвижности положительных (+) и отрицательных (o) зарядов в образце 179 от обратной температуры. Крестики – положительные заряды в образце 176. Пунктиром отмечена область существования ОЦК фазы

Подвижности зарядов обоих знаков в ГПУ фазе, а также положительных зарядов в ОЦК фазе рассчитывались, как и ранее⁴, по времени прихода фронта заряженных частиц на коллектор, т.е. по положениям максимумов на кривых $I(t)$, описывающих зависимость коллекторного тока от времени при ступенчатом включении напряжения U . Измерения проводили в малых полях средней напряженностью $E = U/d \leq 8 \cdot 10^3 \text{ V/cm}$, где время пролета обратно пропорционально полю. Однако разрешение по времени этой методики оказалось недостаточным для измерения подвижности отрицательных зарядов в ОЦК фазе: в точке

фазового перехода μ_- скачком возрастает в ~ 30 раз и далее увеличивается с повышением температуры (величина μ_+ при переходе падает в два – три раза).

Большая разница в подвижностях зарядов в ОЦК фазе $\mu_- \gg \mu_+$ позволила воспользоваться модуляционной методикой, которую применяли в первых измерениях подвижностей зарядов в твердом гелии⁶ в ячейке с промежуточной управляющей сеткой. Время пролета отрицательными зарядами базы источник – коллектор определяли по положению точки отсечки $f_{\text{отс}}$ на зависимости коллекторного тока $I_{\text{от}}$ от частоты повторения f приложенных к источнику прямоугольных электрических импульсов (прямоугольный меандр амплитудой $\pm U$). Зависимости $I_{\text{от}}(f)$ при различных температурах приведены на рис. 1 (напряжение $U = \pm 260$ В). Отдельно показана зависимость $f_{\text{отс}}$ от напряжения при $T = 1,72$ К в том же образце № 179. Видно, что в пределах погрешности оценок ($\pm 5\%$) величина $f_{\text{отс}}$ растет пропорционально U , т.е. подвижность μ_- не зависит от поля.

Результаты измерений подвижностей зарядов в этом образце в ГПУ и ОЦК фазах показаны на рис. 2 (кружки – μ_- , прямые крестики – μ_+). В ОЦК фазе систематические различия в значениях μ_+ и μ_- при термоциклировании (ОЦК – ГПУ – ОЦК переход) или в различных образцах (прямые и косые крестики на рис. 2) не превосходили $\pm 20\%$. Сильная анизотропия свойств ГПУ решетки проявлялась в том, что в тех же условиях в ГПУ фазе значения подвижностей могли систематически различаться более, чем в два раза. Соответственно в ГПУ фазе наблюдался и больший разброс в значениях эффективных энергий активации зарядов от образца к образцу. Величины Δ_+ и Δ_- рассчитывались по наклонам прямых $\ln \mu = f(1/T)$, проводимых через экспериментальные точки. Средние значения энергий активации в ГПУ фазе $\Delta_+ = 9$ К, $\Delta_- = 22,5$ К совпадают с полученными в работе³. В ОЦК фазе $\Delta_+ = 15$ К, $\Delta_- = 10$ К.

Напомним, что в ГПУ фазе измерения проводятся при постоянном молярном объеме $V_m = 20,9$ см³/моль, а в ОЦК фазе при движении вдоль кривой фазового перехода V_m уменьшается с повышением температуры от 21,1 до 20,8 см³/моль⁵. Но при качественном рассмотрении этим изменением можно пренебречь, так как соотношения между подвижностями зарядов разных знаков и соответствующими энергиями активации в образцах ГПУ и ОЦК⁴Не близких молярных объемов противоположны: в ГПУ кристаллах $\mu_+ \gg \mu_-$, $\Delta_+ < \Delta_-$, а в ОЦК $\mu_+ < \mu_-$, $\Delta_+ > \Delta_-$. Эту разницу нельзя объяснить скачкообразным ростом молярного объема при ГПУ – ОЦК переходе (от 20,9 до 21,1 см³/моль в нижней тройной точке). Действительно, в ГПУ⁴Не согласно измерениям³ и нашим данным при малых давлениях затвердевания (давления менее 30 атм, $V_m \geq 20,6$ см³/моль) с ростом V_m разница между μ_+ и μ_- при постоянной температуре и значениями энергий активации только увеличивается и, например, при $V_m = 21$ см³/моль $\Delta_+ \approx 1/3 \Delta_-$.

Сравнение полученных данных с результатами измерений подвижности зарядов в³Не в том же приборе⁴ показало, что соотношение между подвижностями и энергиями активации зарядов в ОЦК⁴Не аналогично наблюдавшемуся в образцах ОЦК³Не при малых давлениях. Таким образом, свойства зарядов в кристаллах⁴Не и³Не, выращенных при малых давлениях, определяются в первую очередь структурой их кристаллической решетки. Изменение структуры решетки существенно изменяет подвижности и энергию активации диффузии зарядов в образцах близкого молярного объема в области термоактивированного движения и в то же время, как указывают авторы работы⁷, практически не сказывается на энергии активации вакансий. Учет этих результатов при теоретических исследованиях может привести к пересмотру существующих представлений о строении и механизмах диффузии индуцированных зарядов в квантовых кристаллах.

Литература

1. Иффт Э, Межов-Деглин Л.П., Шальников А.И. Труды X-й Международной конференции по физике низких температур. Москва, 1967, т. I, 224.

2. *Marty D., Williams F.I.B.* J. de Phys., 1973, 34, 988.
3. Кешишев К.О. ЖЭТФ, 1977, 72, 521.
4. Ефимов В.Б., Межов-Деглин Л.П. ФНТ, 1978, 4, 397.
5. *Grilly E.R.* J. Low Temp. Phys., 1973, 11, 33.
6. Кешишев К.О., Межов-Деглин Л.П., Шальников А.И. Письма в ЖЭТФ, 1970, 12, 234.
7. *Fraass B.A., Heald S.M., Simmons R.O.* Proc. Int. Quantum Crystals Conference, Colorado, 1977, 73.

Институт физики твердого тела
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
6 августа 1984 г.