

ПАДЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯДОВ В КРИСТАЛЛАХ ${}^4\text{He}$ В СИЛЬНЫХ ПОЛЯХ

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

Обнаружено, что в совершенных кристаллах ${}^4\text{He}$, выращенных при давлении в 31 атм, скорость движения положительных зарядов в сильных полях $E \geq 5 \cdot 10^4$ В/см падает с увеличением поля.

Первые измерения движения зарядов в твердом гелии были проведены Шальниковым ¹ более двадцати лет назад. Экспериментальным и теоретическим исследованиям свойств зарядов пробных заряженных микрочастиц, введенных в решетку квантового кристалла, были посвящены работы ряда авторов (см. обзоры ^{2, 3}), однако до сих пор структура и механизмы движения зарядов в твердом гелии однозначно не установлены.

Как следует из экспериментов ⁴ в кристаллах ОЦК ${}^3\text{He}$, выращенных при давлениях $P \geq 35$ атм, зависимости скорости от температуры T и приложенного электрического поля E в полях до 10^5 В/см могут быть описаны выражениями вида $v(T, E) \sim \exp(-\frac{\Delta}{T}) \cdot \text{sh}(eEb/kT)$, где Δ и b – константы, т.е. основную роль играет термоактивированная диффузия через барьер (величина $b \sim 10^{-8}$ см). Более сильную, чем линейную зависимость $v(E)$ ранее наблюдали и в образцах ГПУ ${}^4\text{He}$ при давлениях $P \geq 30$ атм ⁵, однако здесь диапазон измерений был ограничен полями $E \leq 5 \cdot 10^4$ В/см. Целью данной работы было изучение зависимостей $v(T, E)$ в кристаллах ${}^4\text{He}$ в широком диапазоне полей ($E = 10^3 \div 1,3 \cdot 10^5$ В/см) и температур (до 0,4 К).

Зависимости скорости движения положительных v_+ и отрицательных v_- зарядов от приложенного напряжения U в одном из совершенных кристаллов, выращенных при 31 атм, показаны ниже на рис.1 и рис.2. Конструкция прибора и методика измерений аналогичны применявшимся ранее ⁴. Источник зарядов (β -активная мишень) и коллектор – пластины размерами 6×35 мм² располагались внутри металлической амплитуды диаметром $\varnothing 8$ мм и длиной 60 мм. Зазор источник – коллектор в данных измерениях составлял $d = 0,3$ мм. Гелиевые кристаллы выращивали охлаждением сжатой жидкости при постоянном давлении. Среднюю скорость движения зарядов рассчитывали 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 . Среднее значение ускоряющего поля в таком диоде близко к $E = U/d \approx 33 U$ В/см. Рабочий диапазон напряжений $U = 30 \text{ В} \div 4 \text{ кВ}$. Ток насыщения мишени $I_{\text{нас}} = 3 \cdot 10^{-8}$ А. Рабочие токи в экспериментах $I = 10^{-9} - 10^{-13}$ А были значительно меньше $I_{\text{нас}}$. Разрешение регистрирующей аппаратуры сверху ограничивалось инерционностью электрометрического усилителя ($\geq 0,3$ с), а снизу – стабильностью его нуля при записи кривых $I(t)$ ($\leq 3 \cdot 10^3$ с), так что диапазон регистрируемых скоростей был от 10^{-1} до 10^{-5} см/с. Для поддержания и регулировки температуры образца использовали электронный стабилизатор, что позволяло при записи кривых $I(t)$ поддерживать заданную среднюю температуру образца с точностью до мК. В экспериментах регистрировали как время прихода фронта τ , так и стационарные значения тока при $t \geq \tau$. Это позволяло судить о степени совершенства образца. В дефектных образцах фронты более пологие, а стационарные значения токов в несколько раз меньше, чем в точке максимума из-за захвата зарядов дефектами. В сильных полях в таких образцах ток нестабилен. Далее мы обсуждаем результаты измерений только в совершенных кристаллах.

Наиболее интересный и неожиданный результат измерений – падение скорости движения положительных зарядов в поле выше некоторого критического (рис.1): с увеличением при-

кладываемого напряжения линейная зависимость $v_+(U)$ при $U \leq 300$ В сменяется близкой к экспоненциальной при $U \geq 1$ кВ (как и в ${}^3\text{He}^4$). Скорость v_+ достигает максимума при $U \approx 1,6$ кВ, затем уменьшается в $1,5 \div 3$ раза в сравнительно узком диапазоне полей и вновь постепенно возрастает при напряжениях, близких к максимальному. С понижением температуры точка максимума сдвигается в сторону меньших полей. Следует отметить, что последующий рост скорости v_+ частично может быть обусловлен и перегревом рабочей области кристалла между обкладками диода джоулевым теплом, так как в процессе измерений стабилизируется средняя температура образца. Крестиками на рис.1 показана зависимость стационарного тока от поля $I(U)$ при температуре в 0,67 К (правая шкала по оси ординат). Видно, что падение скорости приводит только к изменению наклона кривой $I(U)$. Подобные результаты были воспроизведены на 5 образцах.

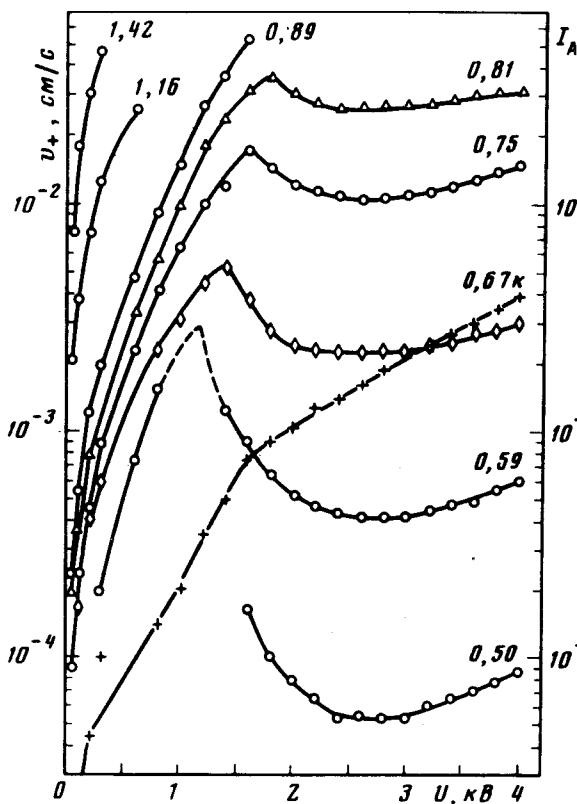


Рис.1

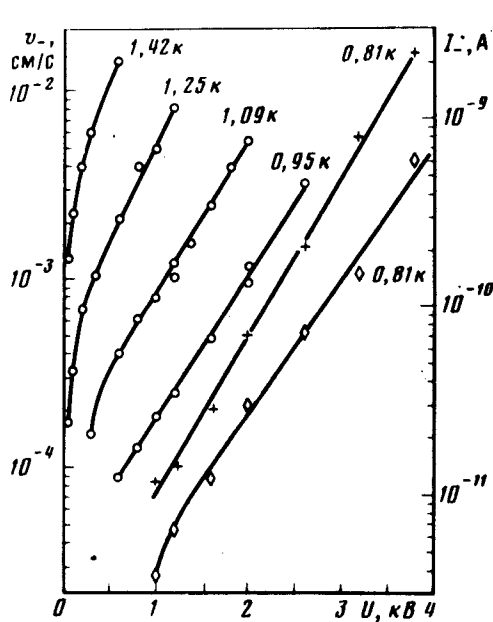


Рис.2

Зависимости средней скорости движения положительных (рис.1) и отрицательных (рис.2) зарядов от разности потенциалов, приложенных к электродам диода U при разных температурах. Крестиками нанесены зависимости $I(U)$ для одной из температур ($I_+(U)$ при $T = 0,67$ К, $I_-(U)$ при $T = 0,81$ К)

На рис.2 показаны зависимости скорости $v_-(U)$ и тока $I_-(U)$ (при 0,81 К) от поля в том же образце. Из-за значительной разницы в характерных энергиях активации диффузии положительных $\Delta_+ \approx 9$ К и отрицательных $\Delta_- \approx 16,4$ К зарядов, скорости движения отрицательных зарядов быстро уменьшаются с понижением температуры, так что измерения удалось провести только при температурах $T \geq 0,8$ К. Измерениям v_- при низких температурах мешает и более сильный захват отрицательных зарядов дефектами в ГПУ кристаллах. В исследованном диапазоне полей и температур скорость v_- монотонно возрастает с ростом поля.

Уменьшение скорости движения зарядов в твердом гелии с ростом поля наблюдается впервые. Ранее подобный эффект наблюдали в сверхтекучем гелии, что связано с рождением вихревых колец в жидкости при скорости выше критической и захватом зарядов этими кольцами⁶. По аналогии с жидкостью можно предполагать, что в твердом гелии в полях выше некоторого порогового вокруг заряда образуются дислокационные петли, способные захватывать заряд и двигаться вместе с ним. Впервые на возможность рождения таких петель движущимися зарядами обратили внимание Носанов и Титус⁷, которые показали, что энергия рождения вихревых колец и петель одинаковой длины близки по порядку величины. Однако они полагали, что подвижность дислокаций очень мала, так что для наблюдения движения такого связанного комплекса необходимо приложить большие механические напряжения. Результаты проведенных недавно в нашей лаборатории экспериментов⁸ показали, что в отличие от ротовых дефектов свежевведенные дислокации в кристаллах⁴ не обладают высокой подвижностью при $T \leq 1$ К, а характерные энергии активации дислокаций близки к энергиям активации точечных дефектов. Это указывает на правдоподобность предлагаемой модели.

Литература

1. Шальников А.И. ЖЭТФ, 1961, 41, 1059.
2. Андреев А.Ф. УФН, 1976, 118, 251.
3. Шикин В.Б. УФН, 1977, 121, 457.
4. Ефимов В.Б., Межов-Деглин Л.П. Письма в ЖЭТФ, 1981, 33, 537.
5. Кешишов К.О. ЖЭТФ, 1977, 72, 521.
6. Careri G., Cunsolo S., Mazzoldi P. Phys. Rev., 1964, 136, A303.
7. Nosanov J.H., Titus W.J. J. Low Temp. Phys., 1969, 1, 2, 73.
8. Левченко А.А., Межов-Деглин Л.П. Письма в ЖЭТФ, 1983, 37, 173.