

ПОДВИЖНОСТЬ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ЗАРЯДОВ В ОЦК ^3He НА КРИВОЙ ПЛАВЛЕНИЯ

Я.Е.Волокитин, А.И.Голов, Л.П.Межов-Деглин

Институт физики твердого тела РАН
142432, Черноголовка, Московская обл., Россия

Поступила в редакцию 22 октября 1992 г.

После переработки 6 ноября 1992 г.

Впервые измерена подвижность отрицательных зарядов на кривой плавления в кристаллах ОЦК ^3He в интервале давлений $P_{пл} = 60 - 29,5$ атм. Обнаружено, что подвижность постоянна выше 36 атм и резко убывает при меньших давлениях. Падение подвижности при малых давлениях может служить указанием на то, что концентрация вакансий на кривой плавления вблизи минимума на $P-T$ -диаграмме экспоненциально убывает с понижением температуры.

Электрон, помещенный в жидкий или твердый гелий локализуется в полости радиусом порядка 10\AA . Размеры, строение и механизм диффузии заряженной полости зависят от давления, структуры кристаллической решетки, и так далее (см. обзор ¹ и ссылки в нем, а также работу ²).

Из измерений подвижности зарядов в образцах постоянного молярного объема известно ¹, что в ОЦК ^3He при давлениях 40–60 атм, характерные энергии активации процесса диффузии отрицательных зарядов ϵ_- близки к энергиям активации процесса самодиффузии атомов ^3He ϵ_3 , измеренным в ЯМР экспериментах ^{3,4}, и к энергиям образования вакансий ϵ_v по данным рентгеновских измерений ⁵ и измерений теплоемкости ⁶. Это позволяет сделать вывод о том, что в кристаллах ОЦК ^3He при давлениях ниже 60 атм диффузия отрицательных зарядов, так же как и диффузия атомов матрицы, контролируется вакансионными механизмами, то есть по поведению подвижности зарядов можно судить о свойствах как самих заряженных дефектов, так и взаимодействующих с ними вакансий в квантовых кристаллах.

Результаты различных исследований ^{3-5,7} показывают, что в ОЦК ^3He при давлениях выше 45 атм ($T_{пл} \geq 1,2$ К) концентрация тепловых вакансий на кривой плавления $x_v(T_{пл})$ практически постоянна и составляет примерно 0,5%, что характерно и для обычных классических кристаллов. Однако в области малых давлений оценки x_v по данным разных экспериментов противоречат друг другу. Например, по данным рентгеновских измерений ⁵, концентрация вакансий на кривой плавления постоянна $x_v(T_{пл}) = 0,5\%$ вплоть до максимальных молярных объемов. Из прецизионных измерений вакансионного вклада в зависимость давления от температуры ⁷ следует, что x_v уменьшается от 0,04% при $T_{пл} = 0,7$ К до 0,004% при $T_{пл} = 0,37$ К. А по оценкам авторов ЯМР экспериментов ⁸, концентрация вакансий составляет 3,5% при $T_{пл} = 1$ К и возрастает до 19% при $T_{пл} = 0,3$ К. Видно, что оценки x_v вблизи P_{min} отличаются более чем на три порядка.

Поэтому представлялось интересным провести независимый эксперимент, позволяющий судить о свойствах зарядов и вакансий в области малых давлений. Отметим, что в литературе вообще нет сведений о поведении подвижности зарядов в ^3He при давлениях ниже 40 атм.

Эксперимент. Подвижность зарядов измерялась времяпролетной методикой, по переходным характеристикам замороженного в твердый гелий диода

с радиоактивным источником зарядов. Моменту прихода фронта заряженных частиц на коллектор при ступенчатом включении электрического напряжения соответствует пик тока на переходной характеристике диода. Зазор источник-коллектор равнялся 2 мм, диапазон рабочих полей составил $2 \cdot 10^2 - 10^4$ В/см.

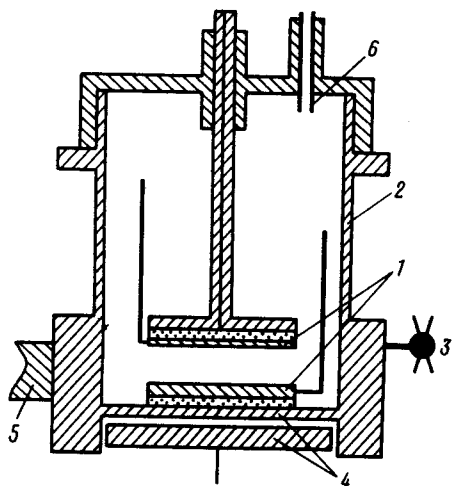


Рис.1. Схема экспериментальной ячейки: 1 - диод, состоящий из изолированных от земли радиоактивного источника зарядов (верхний электрод) и металлического коллектора (нижний электрод); 2 - ампула, 3 - угольный термометр, 4 - емкостной датчик давления, 5 - медный холодопровод, 6 - капилляр заполнения

Плоский диод 1, располагался внутри металлической ампулы 2 диаметром 14 и высотой 16 мм (рис.1). Температуру образца определяли по показаниям угольных термометров сопротивления 3, прикрепленных к внешней поверхности ампулы. Давление в объеме ампулы контролировали при помощи емкостного датчика давления 4 типа ⁹. Чувствительный элемент датчика давления был жестко соединен с коллектором, что позволило следить за изменением давления непосредственно в межэлектродном пространстве. Ампула охлаждается с помощью медного холодопровода 5, идущего от емкости с жидким ³He. Капилляр заполнения 6 соединяет ампулу с наружной системой высокого давления. Тепловой мост (на рисунке не показан) позволяет контролировать температуру капилляра и, при необходимости, блокировать ампулу со сжатой жидкостью.

Методика приготовления образцов несколько отличалась от традиционно используемых. Начиная с первых работ Шальникова ¹⁰, в большинстве экспериментов с зарядами в твердом гелии образцы выращивались из сжатой жидкости при постоянном давлении. Этот метод удобен при исследовании температурной зависимости подвижности в образцах постоянного молярного объема $V_m = \text{const}$. Нас интересовала зависимость подвижности от температуры на кривой плавления, то есть измерения при переменных давлении $P_{пл}$ и молярном объеме V_m . Попытки воспользоваться известной методикой заблокированного капилляра оказались неудачными: в кристаллах, выращенных при переменном давлении, начиная с первых измерений, наблюдался сильный захват зарядов дефектами. Наиболее удачным оказался промежуточный вариант. Первоначально кристалл рос при постоянном давлении и постепенно заполнял пространство между электродами. Это контролировали по величине коллекторного тока при постоянно включенном напряжении. После заполнения рабочего зазора, температура капилляра, соединяющего ампулу с внешней системой высокого давления, резко понижалась, и ампула блокировалась. Теперь, при изменении температуры ампулы изменяется соотношение между объемами жидкой и твердой фаз и, соответственно, давление на границе

раздела жидкость-твердое тело. В отличие от методики блокированного капилляра наш метод позволяет проводить измерения на образце с переменным молярным объемом, начиная с достаточно совершенных исходных образцов.

Оптимальным было бы перекрыть весь рабочий диапазон давлений двумя-тремя образцами. Однако оказалось, что по мере изменения давления в ампуле, качество кристалла заметно ухудшается. Из-за захвата зарядов дефектами (предположительно дислокационными стенками), переходные характеристики диода сильно искажаются по сравнению с исходными. Возникновение дефектов связано с релаксацией неоднородных механических напряжений в образце. Даже при скорости охлаждения ампулы 50 мК/ч, интервал давлений, который удавалось пройти на одном образце, был менее батм.

Рабочий интервал температур в данном эксперименте составил $T_{пл} = 1,6 - 0,4$ К ($P_{пл} = 60 - 29,5$ атм). Чтобы свести к минимуму влияние неоднородных механических напряжений, измерения были проведены на 20 образцах с различными начальными давлениями. О степени надежности полученных результатов можно судить, во-первых, по тому, что $P - T$ -диаграммы, которые были построены по измеряемым в ходе эксперимента давлению и температуре, отличались от равновесной $P - T$ -диаграммы ¹¹ менее чем на 20 мК. Во-вторых, подвижности, измеренные на кристаллах с разными начальными давлениями затвердевания, в области перекрытия ложатся на одну кривую, то есть относятся к образцам одинакового молярного объема.

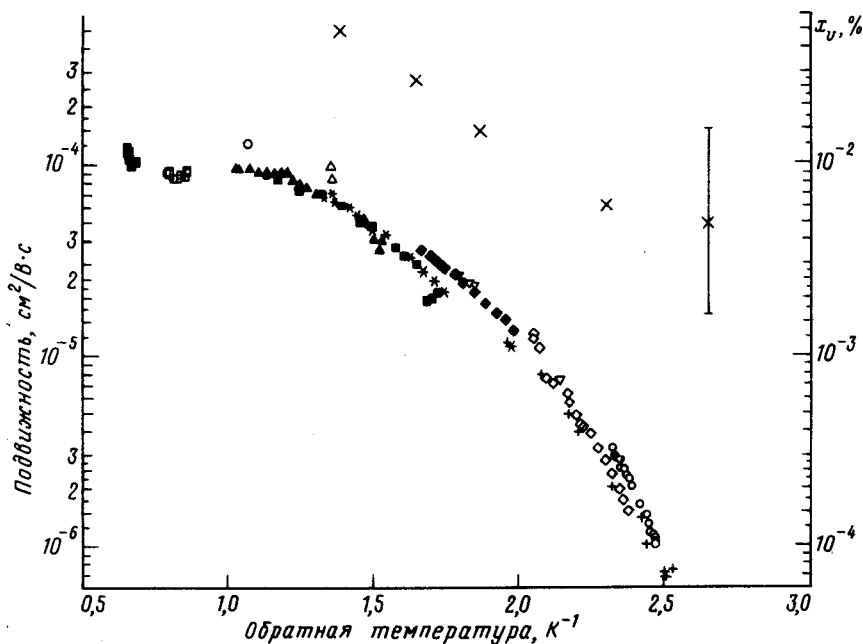


Рис.2. Зависимость подвижности отрицательных зарядов в ОЦК ^3He на кривой плавления от обратной температуры. Разные символы соответствуют образцам, выращенным при различных начальных давлениях. Крестиками показана концентрация вакансий на кривой плавления по оценкам работы ⁷, в %

Результаты и обсуждение. Зависимость подвижности отрицательных зарядов от температуры в ОЦК ^3He на кривой плавления показана на рис.2.

Видно, что в интервале температур (давлений) 0,8–1,6 К (35–60 атм) подвижность отрицательных зарядов μ_- практически постоянна и равна примерно 10^{-4} см²/В·с. Ниже 0,8 К подвижность резко уменьшается. Убывание составляет два порядка в интервале $T_{пл} = 0,8-0,4$ К. Если предположить, что характер убывания близок к экспоненциальному, то энергия активации этого процесса, оцениваемая по наклону прямой $\mu_-(1/T_{пл})$, составляет 6 ± 1 К.

Как можно объяснить подобную температурную зависимость? Рассмотрим сначала участок "плато", то есть часть кривой $\mu(T_{пл})$ выше 0,9 К. Коэффициент диффузии частицы атомных размеров в предположении вакансионного механизма диффузии записывается, как $D_i = A_i x_v D_v$, где x_v и D_v — соответственно концентрация и коэффициент диффузии вакансий, A_i — фактор, зависящий от конкретного механизма взаимодействия вакансии с частицей. Выше отмечалось, что в области плато концентрация вакансий $x_v(T_{пл})$ по данным различных экспериментов практически постоянна, а энергии активации процессов диффузии атомов матрицы ϵ_3 и зарядов ϵ_- в образцах постоянного молярного объема с точностью до ± 1 К совпадают с энергией рождения вакансий ϵ_v . Значит, произведение $A_i D_v$ при постоянном молярном объеме слабо зависит от температуры. Из ЯМР измерений ³ известно, что коэффициент самодиффузии атомов ³He $D_3 = A_3 x_v D_v$ на линии плавления при $P_{пл} > 52$ атм также слабо зависит от $T_{пл}$ и равен $D_3 = 10^{-7}$ см²/с. Таким образом, есть основания полагать, что и при переменном молярном объеме на линии плавления в области плато все три сомножителя A_i , x_v и D_v слабо зависят от температуры. Сравнение D_3 из ³ и D_- дает разумную оценку для фактора $A_- \approx 0,1 A_3$ (коэффициент диффузии отрицательных зарядов можно оценить из наших измерений, воспользовавшись соотношением Эйнштейна $D_- = \mu k T / e$).

Как мы отмечали ранее, при малых давлениях заключения о свойствах вакансий в ОЦК ³He по результатам различных экспериментов противоречивы. Если предположить, что при малых давлениях движение отрицательно заряженной полости по-прежнему контролируется взаимодействием с вакансиями, и свойства вакансий существенно не меняются, то есть множители A_i и D_v по-прежнему, слабо зависят от $T_{пл}$, то падение подвижности μ_- указывает на уменьшение концентрации вакансий на кривой плавления вблизи минимума на $P-T$ -диаграмме. Качественно такое поведение $x_v(T_{пл})$ согласуется с зависимостью $x_v(T_{пл})$ по данным изохорических измерений ⁷ (крестики на рис.2).

Близкое к экспоненциальному падение числа вакансий на линии плавления в ³He при малых давлениях может быть связано с особенностями фазовой $P-T$ -диаграммы квантового кристалла. В области относительно высоких давлений ($P > 40$ атм), где $P_{пл}$ и молярный объем кристалла V_m быстро меняются с температурой, концентрация вакансий $x_v(T_{пл})$ практически постоянна, как и в обычных кристаллах. Но, в отличие от обычных веществ, при нулевой температуре ³He затвердевает при давлении $P_{пл} \approx 29$ атм. При низких температурах на фазовой $P-T$ -диаграмме имеется пологий минимум. В этой области при движении вдоль кривой плавления молярный объем кристалла меняется слабо: например, при понижении $T_{пл}$ вдвое от 1,6 до 0,8 К, V_m возрастает от 22,0 до 24,1 см³/моль, а в области 0,6–0,4 К от 24,6 до 24,9 см³/моль. Известно ¹², что энергия образования тепловых вакансий ϵ_v зависит, в основном, от молярного объема образца V_m , и концентрация вакансий в образце постоянного объема $V_m = \text{const}$ с понижением температуры экспоненциально убывает

$x_v \sim \exp(-\epsilon_v/T_{пл})$. Таким образом, в области температур вблизи минимума, где движение вдоль линии плавления почти не отличается от движения по изохоре, можно ожидать, что концентрация тепловых вакансий вдоль линии плавления будет экспоненциально убывать с понижением $T_{пл}$.

Было бы интересно проверить пригодность наших рассуждений на линии плавления ГПУ ${}^4\text{He}$, где ниже 1К молярный объем также практически не меняется.

Авторы благодарны Е.Н.Соловьеву и А.В.Лохову за помощь в подготовке и проведении экспериментов.

-
1. A.J.Dahm, *Progress in Low Temp. Physics v. IX*. Ed D.F.Brewer, North-Holland, 1985.
 2. А.И.Голов, Л.П.Межов-Деглин, *Письма в ЖЭТФ* **56**, 527 (1992).
 3. H.A.Reich and W.A.Yu, *Phys. Rev.* **129**, 630 (1963).
 4. N.Sullivan, *Phys.Rev. B* **11**, 1858 (1975).
 5. S.M.Heald, D.R.Baer, and O.R.Simmons, *Phys. Rev. B* **30**, 2531 (1984).
 6. D.S.Greywall, *Phys. Rev. B* **15**, 2604 (1977).
 7. I.Iwasa and H.Susuki, *J. Phys. Soc. Jap.* **51**, 2116 (1987).
 8. M.Chapellier, M.Bassou, M.Devoret, et al., *Phys. Rev. B* **30**, 2940 (1984).
 9. G.C.Straty and E.D.Adams, *Rev. Sci. Instrum.* **40**, 1393 (1969).
 10. А.И.Шальников, *ЖЭТФ* **47**, 1727 (1964).
 11. E.R.Grilly, *J.Low Temp. Phys.* **4**, 615 (1971).
 12. H.A.Goldberg and R.A.Guyer, *J. Low Temp. Phys.* **28**, 449 (1977).