Физика низких температур, 1997, т. 23, № 3, с. 355–357

Письма редактору

Положительный эффект Холла в аморфном сплаве, не содержащем переходный металл

В. М. Кузьменко, В. И. Мельников

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»
Украина, 310108, г. Харьков, ул. Академическая, 1

Статья поступила в редакцию 17 октября 1996 г., после переработки 4 декабря 1996 г.

При 10 K < T < 50 K исследован эффект Холла стабилизированных примесью водорода гомогенных аморфных пленок бериллия толщиной 25–100 нм. Полученное значение коэффициента Холла $R_H = +(1,1\pm0,2)\cdot10^{-10}$ м^3/Кл не зависит от температуры и толщины образцов. Это первое стабильно воспроизводимое наблюдение положительного эффекта Холла в гомогенном непереходном аморфном металле. Наблюдаемое явление противоречит предсказаниям теории о том, что для непереходных аморфных металлов эффект Холла должен быть отрицательным.

При 10 K < T < 50 K досліджено ефект Холла стабілізованих домішкою водня гомогенних аморфних плівок берілію товщиною 25–100 нм. Знайдене значення коефіцієнта Холла $R_H = +(1,1\pm0,2)\cdot10^{-10}$ м^3/Кл не залежить від температури та товщини зразків. Це перше стабільно відтворюване спостереження позитивного ефекту Холла в гомогенному неперехідному аморфному металі. Знайдене явище суперечить передбаченню теорії в тому, що для неперехідних аморфних металів ефект Холла повинен бути негативним.

PACS: 71.55.Jv, 72.15.Gd

Исследован эффект Холла в аморфной системе бериллий — водород (a-Be(H)). Гомогенные аморфные пленки a-Be(H) толщиной 25–100 нм получены низкотемпературной конденсацией в сверхвысоком (по всем компонентам воздуха) вакууме при парциальном давлении водорода $4,67\cdot10^{-5}$ Па [1]. По нашим оценкам, эти пленки содержали ~ 1 ат.% водорода. Значение температуры их перехода в сверхпроводящее состояние T_c составляло около 10 K*. Ширина перехода ΔT_c, определенная по изменению электросопротивления от 10 до 90% его полного значения в нормальном состоянии, равна 0,1–0,3 K. Переход a-Be(H) в стабильную ГПУ фазу происходит при отогреве образцов до температуры T_{cr} = 60–70 K и завершается в основном при $T \approx 100$ K.

Пленки a-Be(H) обладают одним из наиболее высоких значений удельного электросопротивления ρ среди аморфных металлических сплавов, не содержащих переходный металл. Значение ρ для них составляет 250±30 мкОм·см (при 13 K), что в рамках классической теории соответствует средней длине свободного пробега электронов l порядка межатомных расстояний a [3]. При столь сильном рассеянии можно было ожидать существенных отклонений от теорий эффекта Холла, базирующихся на больцмановских представлениях.

Исследование эффекта Холла в нашей работе проводилось по классической методике. Магнитное поле с индукцией B до 1,6 Тл создавалось с помощью сверхпроводящего соленоида и накладывалось перпендикулярно плоскости прямоугольной пленки ($\mathbf{B} \perp \mathbf{j}$, где $\mathbf{j}$ — плотность измерительного тока). Полярности потенциалов электрического поля в направлении вектора $\mathbf{j}$ и электрического поля Холла $\mathbf{E}_H$ (в направлении, перпендикулярном векторам $\mathbf{j}$ и $\mathbf{B}$) определялись непосредственно на каждом образце с помощью тестера. Во всех случаях векторы $\mathbf{j}$, $\mathbf{E}_H$ и $\mathbf{B}$ образуют правовинтовую систему прямоугольных координат (рис. 1), что соответствует положительному знаку коэффициента Холла R_H (так как $\mathbf{E}_H = R_H[\mathbf{B}, \mathbf{j}]$). Напряжение Холла U_H измеряли с помощью потенциометра Р-363. Значения коэффициента Холла рассчитывались по формуле

* Для кристаллического ГПУ бериллия $T_c \approx 0,026$ K [2].

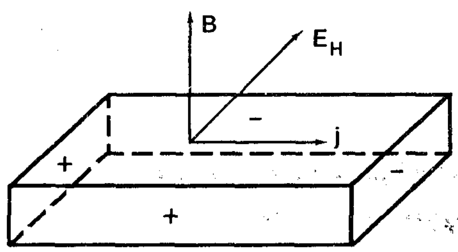

Рис. 1. Расположение векторов j, B и E_H относительно пленки a-Be(H), характеризующее проявление в ней положительного эффекта Холла.

$R_H = U_H\,d/(BI)$, где d — толщина пленки; I — сила измерительного тока.

Найдено, что для гомогенных пленок a-Be(H) $R_H = +(1{,}1 \pm 0{,}2)\cdot 10^{-10}$ м^3/Кл и не зависит от температуры (в интервале от T_c до T_{cr}), магнитного поля (от 0 до 1,6 Тл) и толщины слоев (в интервале 25–100 нм). В процессе кристаллизации при $T = T_{cr}$ значение R_H возрастает более чем в четыре раза, а после отогрева образцов до $T \approx 650$ K значение $R_H \approx 7\cdot 10^{-10}$ м^3/Кл (при 13 K) и близко к величине R_H для массивного поликристаллического бериллия [4].

Согласно современным представлениям [3], если средняя длина свободного пробега электронов в аморфном металле достаточно велика, так что $k_F l \gg 1$, то волновой вектор k_F все еще является хорошим квантовым числом, и поверхность Ферми еще можно определить. Причем, поскольку аморфный металл не имеет выделенных осей симметрии, поверхность Ферми должна быть сферической, а свойства металла должны описываться теорией свободных электронов. В этом случае коэффициент Холла должен определяться классическим выражением

$$R_H = \frac{1}{ne}\,, \tag{1}$$

здесь e — заряд электрона; $n = z/\Omega$, z — валентность, Ω — атомный объем.

Действительно, для непереходных низкорезистивных ($\rho < 50$ мкОм·см) жидких и твердых аморфных металлов (сплавов) экспериментально определенные коэффициенты Холла являются отрицательными и практически точно соответствуют выражению (1) [5,6]. Отклонения наблюдаются только для тех жидких [5] или твердых аморфных [6] металлов, для которых значение l сравнительно мало. При этом, чем меньше значение l, тем большие отклонения имеют место. Если расстояние так велико, что $l \approx a$, и уровень Ферми находится в псевдозапрещенной зоне (псевдощели), то коэффициент Холла может в некоторых случаях удовлетворительно описываться формулой Фридмана (см. [3]):

$$R_H = \frac{0{,}7}{neg}\,, \tag{2}$$

где $0{,}3 < g < 1$ характеризует глубину псевдощели в аморфном полуметалле. Однако все поправки, вводимые в классическое выражение для коэффициента Холла, изменяют только его величину, оставляя неизменным отрицательный знак.

В настоящее время получено объяснение положительного эффекта Холла, обнаруженного сначала в жидких [7] и аморфных [8] переходных металлах, а в дальнейшем и в большинстве высокорезистивных аморфных сплавов, содержащих переходный металл [9].

Коэффициент Холла для немагнитных металлов со сферической поверхностью Ферми и изотропным рассеянием может быть описан выражением [10]

$$R_H = \frac{\alpha}{ne}\,, \tag{3}$$

где

$$\alpha = \frac{\partial E}{\partial k}\left|\frac{\partial E}{\partial k}\right|^{-1}. \tag{4}$$

Здесь E — энергия электронов; k — волновой вектор. Согласно уравнениям (3), (4), для свободных электронов знак коэффициента Холла противоположен знаку групповой скорости электронов.

Понимание положительного эффекта Холла в случае жидких и аморфных переходных металлов достигнуто на основе исследования s-d-гибридизации электронной структуры [9]. Большинство успешных объяснений положительного эффекта Холла было основано на учете влияния s-d-гибридизации на динамику модифицированной s-зоны. Показано [9], что s-d-гибридизация должна привести к S-образному дисперсионному соотношению $E(k)$ для модифицированных s-состояний, так что при энергии Ферми E_F скорость электронной группы отрицательна и, следовательно, согласно (3) и (4), коэффициент Холла положителен. Однако для объяснения положительного эффекта Холла в пленках a-Be(H), не содержащих переходный металл, такое объяснение не подходит. Поэтому вопрос о механизме положительного эффекта Холла в высокорезистивных непереходных аморфных металлах, первым примером которых являются гомогенные аморфные пленки a-Be(H), остается открытым и требует дальнейшего развития теории.

В однозонной модели усредненное значение коэффициента Холла пленок a-Be(H) ($+1{,}1 \cdot 10^{-10}$ м^3/Кл) соответствует примерно 0,5 носителя заряда на атом бериллия и плотности состояний (для двух направлений спина) $N(E_F)_{R_H} \approx \approx 1{,}0 \cdot 10^{47}$ Дж$^{-1}\cdot$м$^{-3}$. Это значение соответствует так называемой «bare» плотности состояний [11], не учитывающей электрон-фононного взаимодействия. За счет электрон-фононного взаимодействия плотность состояний при низких температурах увеличивается в $(1 + \lambda)$ раз (где λ — параметр электрон-фононного взаимодействия). Это уже «dressed» плотность состояний [11]. Поскольку для a-Be(H) $\lambda \approx 0{,}5$ [12], значение «dressed» плотности состояний будет составлять примерно $1{,}5 \cdot 10^{47}$ Дж$^{-1}\cdot$м$^{-3}$. Последнее близко к значению $1{,}63 \cdot 10^{47}$ Дж$^{-1}\cdot$м$^{-3}$, найденному ранее [1] для таких же пленок a-Be(H) по верхнему критическому магнитному полю (в рамках теории ГЛАГ — Гинзбурга—Ландау—Абрикосова—Горькова)*. Близость значений плотности состояний, полученных из двух независимо определенных физических параметров: коэффициента Холла и верхнего критического магнитного поля, свидетельствует, по-видимому, в пользу применимости однозонной модели (и формул (3), (4)) для аморфной системы бериллий — водород. Адекватно объяснить отрицательное значение групповой скорости электронов при E_F в этой системе пока что не представляется возможным.

В заключение заметим, что положительный эффект Холла для чистых низкотемпературных конденсатов бериллия наблюдался и раньше [13,14]. Однако эти конденсаты были негомогенны и кроме аморфной фазы содержали возрастающую с толщиной пленок концентрацию ГПУ Be. Поэтому значение коэффициента Холла таких пленок круто возрастало с увеличением их толщины, приближаясь к значению R_H для ГПУ Be. В этом случае положительное значение R_H легко объяснимо и не представляет особого интереса.

1. В. М. Кузьменко, В. И. Мельников, Т. П. Черняева, В. В. Брык, *ФММ*, № 8, 41 (1990).
2. R. L. Falge, *Phys. Lett.* **A24**, 579 (1967).
3. Н. Мотт, Э. Дэвис, *Электронные процессы в некристаллических веществах*, т. 1, Мир, Москва (1982).
4. Е. С. Боровик, *ЖЭТФ* **23**, 83 (1952).
5. В. А. Алексеев, А. А. Андреев, В. Я. Прохоренко, *УФН* **106**, 393 (1972).
6. G. Bergmann, *Z. Phys.* **255**, 76 (1972).
7. G. Busch, H.-J. Güntherodt, H. U. Künzi, H. A. Meier, L. Schlapbach, and J. Keller, *J. Phys. (Paris)* **35**, suppl. No 5, C4–329 (1974).
8. В. М. Кузьменко, Б. Г. Лазарев, В. И. Мельников, А. И. Судовцов, *ЖЭТФ* **67**, 801 (1974).
9. M. A. Howson and B. L. Gallagher, *Phys. Rept.* **170**, 265 (1988).
10. J.-P. Jan, *A. J. Phys.* **30**, 497 (1962).
11. G. Bergmann, *Phys. Rev.* **B7**, 4850 (1973).
12. В. М. Кузьменко, *Дисс...докт. физ.-мат. наук*, ФТИНТ АН Украины, Харьков (1992).
13. Б. Г. Лазарев, В. М. Кузьменко, А. И. Судовцов, В. И. Мельников, *ФММ* **33**, 984 (1972).
14. K. Yoshihiro and R. E. Glover, *Abstracts of Papers Presented at the 13th Int. Conf. of L.T.Ph.*, Colorado (USA) (1972).

Positive Hall effect in a transition metal-free amorphous alloy

V. M. Kuz'menko and V. I. Mel'nikov

The Hall effect of hydrogen-impurity-stabilized homogeneous amorphous Be films of 25 to 100 nm in thickness is investigated at 10 K < T < 50 K. The value of the Hall coefficient estimated $R_H = +(1.1 \pm \pm 0.2) \cdot 10^{-10}$ m^3/C is found to be independent of temperature and sample thickness. This is the first, consistently repeatable observation of the positive Hall effect in a homogeneous nontransition amorphous metal. The effect observed is contradictory to the predictions that the Hall effect in nontransition amorphous metals is negative.

* При таком определении плотности состояний электрон-фононное взаимодействие учитывается, в отличие от $N(E_F)_{R_H}$.