

УДК 539.89 : 537.312.62

© 1993

ЭФФЕКТ ХОЛЛА В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ  $Al_{1-x}Si_x$ 

В. В. Бражкин, В. В. Глушков, С. В. Демисhev, Ю. В. Косичкин,  
Н. Е. Случанко, А. И. Шульгин

Исследованы гальваномагнитные свойства и  $Al$   $L_{II-III}$  рентгеновские эмиссионные спектры гцк твердых растворов замещения  $Al_{1-x}Si_x$ , синтезированных методом закалки в условиях высокого давления ( $p < 100$  кбар). Проанализировано изменение концентрации и подвижности носителей заряда в ряду  $Al_{1-x}Si_x$ . Обнаружено резкое изменение характеристик зоны проводимости для составов  $x > 1$  ат. % Si, а в интервале концентраций  $x > 8$  ат. % Si — заметное усиление дефектообразования.

Область растворимости кремния в алюминии, ограниченная при атмосферном давлении значением 1.6 ат. % Si, существенно расширяется при синтезе в условиях высокого давления [1, 2]. В частности, в [2] под давлением до 100 кбар были синтезированы гцк твердые растворы замещения  $Al_{1-x}Si_x$  с содержанием Si вплоть до 20 ат. %. Особый интерес к этим веществам обусловлен усилением сверхпроводящих свойств в метастабильных твердых растворах  $Al_{1-x}Si_x$ , для которых температура сверхпроводящего перехода в окрестности составов  $x_{Si} \approx 20$  ат. % достигает 11 К [2], превосходя практически на порядок величины значение  $T_c(Al) \approx 1.17$  К. В настоящее время до конца не выяснены причины столь резкого роста  $T_c$  в  $Al_{1-x}Si_x$ .

Целью данной работы явилось изучение характеристик зоны проводимости  $Al_{1-x}Si_x$  при изменении состава твердого раствора в пределах  $0 \leq x < 12$  ат. % Si. В работе исследовались гальваномагнитные (ГМ) свойства образцов в диапазоне температур 1.6—300 К в магнитном поле до 60 кЭ; для ряда составов на установке «Спектрозонд» ИМЕТ им. А. А. Байкова регистрировались  $L_{II-III}$  рентгеновские эмиссионные спектры. Образцы, отобранные для исследований, были синтезированы из сплавов Al—Si в камере «Тороид» ИФВД им. В. Ф. Верещагина [3].

Температурные зависимости удельного сопротивления твердых растворов  $Al_{1-x}Si_x$  во всем исследуемом диапазоне составов аналогичны наблюдавшимся в [4]. Отличия, связанные с особенностями поведения температурного коэффициента сопротивления, остаточного сопротивления образцов, будут обсуждаться в следующей публикации наряду с данными по низкотемпературной теплоемкости и магнитной восприимчивости твердых растворов  $Al_{1-x}Si_x$ .

Коэффициент Холла и магнитосопротивление алюминия подробно исследовались в 50—60-е годы (см., например, [5, 6]). В соответствии с современными представлениями о поверхности Ферми в Al для описания особенностей поведения ГМ-характеристик достаточно рассмотреть два типа носителей заряда. Соотношения, связывающие коэффициент Холла  $R$  и удельное сопротивление  $\rho$  в произвольном магнитном поле с парциальными значениями  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , приведены, например, в [7]

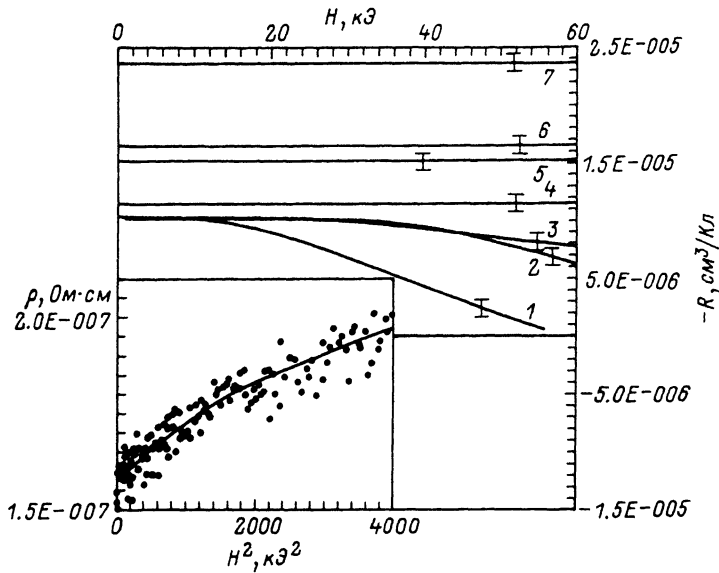


Рис. 1. Зависимости коэффициента Холла от магнитного поля  $R$  ( $H$ ,  $T = 4.2$  К) в твердых растворах  $Al_{1-x}Si_x$  различных составов.

1 —  $x = 0$ , 2 — 1 ат.% Si, 3 — 1.5 ат.% Si, 4 — 4.5 ат.% Si, 5 — 7.5 ат.% Si, 6 — 9.5 ат.% Si, 7 — 11.5 ат.% Si. На вставке в координатах  $\rho = f(H^2)$ ,  $T_0 = 4.2$  Кю приведена полевая зависимость удельного сопротивления образца Al.

$$R = \frac{R_1 \rho_2^2 + R_2 \rho_1^2 + R_1 R_2 (R_1 + R_2) H^2}{(\rho_1 + \rho_2)^2 + (R_1 + R_2)^2 H^2}, \quad (1)$$

$$\rho = \frac{\rho_1 \rho_2 (\rho_1 + \rho_2) + (\rho_1 R_2^2 + \rho_2 R_1^2) H^2}{(\rho_1 + \rho_2)^2 + (R_1 + R_2)^2 H^2}. \quad (2)$$

В изотропном случае при сильном вырождении в произвольном магнитном поле выполняются условия

$$\rho_1 = (en_1\mu_1)^{-1}, \quad \rho_2 = (en_2\mu_2)^{-1}, \quad (3)$$

а также

$$R_1 = (n_1 ec)^{-1}, \quad R_2 = (n_2 ec)^{-1}. \quad (4)$$

Используя выражения (1)–(4) и экспериментальные результаты (рис. 1, кривая 1 и вставка), получим значения концентрации электронов  $n_1 = n$  и дырок  $n_2 = p$ , близкие к ранее наблюдавшимся [5] (рис. 2, а). Отметим, что низкие значения подвижностей  $\mu_n^{Al}$ ,  $\mu_p^{Al} < 1000$  см<sup>2</sup>/В·с (рис. 2, б) обусловлены предварительной барической обработкой образца Al.

Далее, поскольку анализ в рамках (1)–(4) экспериментальных результатов для твердых растворов  $Al_{1-x}Si_x$ , начиная с  $x > 1.5$  ат.% Si, становится невозможным (рис. 1, кривые 4–7), используем дополнительное предположение

$$n(x_{Si}) = n(Al)(1 + x_{Si}). \quad (5)$$

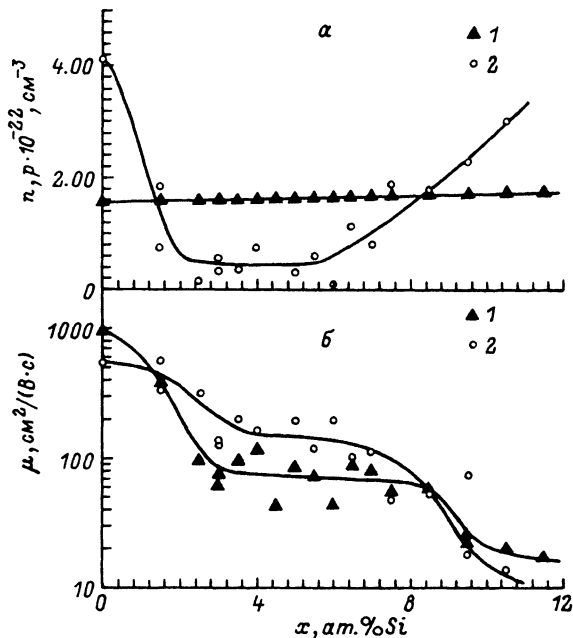


Рис. 2. Зависимость концентрации (а) и подвижности (б) носителей заряда от состава  $x$  в  $\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x$  ( $T = 4.2$  К).

1 — электроны, 2 — дырки.

Соотношение (5) предусматривает линейную зависимость концентрации электронов в  $\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x$  с ростом  $x_{\text{Si}}$  в интервале 0—0.12 и представляется достаточно естественным, поскольку при переходе от Al к Si в периодической системе достраивается внешняя  $3p$ -оболочка атома. В этой связи следует подчеркнуть также близость ионных радиусов  $r_{\text{Al}} = 1.432 \text{ \AA}$  и  $r_{\text{Si}} = 1.319 \text{ \AA}$  в металлическом состоянии для координационного числа 12 [2].

С целью проверки справедливости предположения (5) нами были исследованы рентгеновские эмиссионные Al  $L_{\text{II-III}}$  спектры ряда образцов  $\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x$ . Особенности  $L_{\text{II-III}}$  рентгеновской эмиссионной спектроскопии изложены в [8], параметры и конструкция установки «Спектросонд» приводятся в [9]. Спектр Al  $L_{\text{II-III}}$  рентгеновской эмиссии образца Al полностью эквивалентен [9]. Форма кривой  $I(E)$  в интервале энергий 62—74 эВ не меняется в пределах экспериментальной точности при изменении состава  $x$  в  $\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x$ . Окрестность верхней границы Al  $L_{\text{II-III}}$  спектра в  $\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x$  регистрировалась с привязкой по линии Zr ( $\lambda_{\text{Zr}} = 164.2 \text{ \AA}$ ). Далее кривая  $I(E)$  в интервале энергий 72—73 эВ аппроксимировалась полиномом и определялась точка перегиба  $E_F$  функции  $I(E)$  (рис. 3). На вставке к рис. 3 изображена зависимость  $E_F(x_{\text{Si}})$ . Следует подчеркнуть достаточно высокую точность методики, позволяющей обнаружить малые (0.02—0.05 эВ) изменения ширины зоны проводимости ( $\Delta_{\text{Al}} \sim 11$  эВ). Таким образом, экспериментальные данные (рис. 3) качественно подтверждают предположение (5).

Подчеркнем, что Al  $L_{\text{II-III}}$  рентгеновские спектры образцов исследовались при комнатной температуре, тогда как измерения коэффициента Холла и магнитосопротивления проводились при  $T = 4.2$  К. Кроме того, дополнительное усреднение спектра по зоне Бриллюэна при высоких энергиях возбуждения

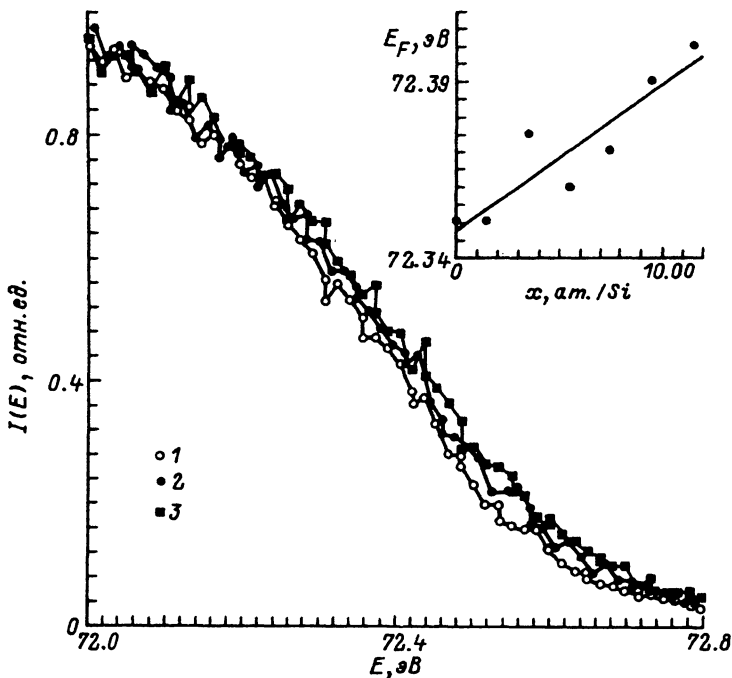


Рис. 3. Экспериментальные Al  $L_{II-III}$  спектры рентгеновской эмиссии (окрестность верхнего края зоны) в  $Al_{1-x}Si_x$ .

1 —  $x=0$ , 2 — 5.5 ат.% Si, 3 — 9.5 ат.% Si. На вставке представлена зависимость параметра  $E_F$  от состава.

связывается (см., например, [10]) с процессами рождения и аннигиляции фононов. Таким образом, высокая температура ( $T = 300$  К) и высокая энергия возбуждения (6 кВ) могут являться причинами отличия зонных параметров, регистрируемых используемыми нами методами.

Решая систему уравнений (1)–(5), находим искомые значения параметров  $\mu_p$ ,  $p$ ,  $\mu_n$  и  $n$  в твердых растворах  $Al_{1-x}Si_x$  ( $x < 12$  ат.% Si) (рис. 2, а, б). В интервале составов  $x \leq 3$  ат.% Si происходит резкое уменьшение концентрации дырок и подвижностей носителей обоих знаков (рис. 2). Последнее обстоятельство, очевидно, обусловлено появлением эффективного канала рассеяния на атомах Si в твердых растворах  $Al_{1-x}Si_x$ . Далее в интервале составов 3–7 ат.% Si подвижности  $\mu_p \approx 140$  и  $\mu_n \approx 80$   $cm^2/V \cdot s$  и концентрация дырок  $p \approx 4 \cdot 10^{21}$   $cm^{-3}$  сохраняются практически неизменными. В окрестности значения  $x_{Si} \approx 8$  ат.%, отвечающего появлению в гцк решетке  $Al_{1-x}Si_x$  заметного количества пар атомов Si—Si, происходит очередное резкое падение подвижности носителей заряда обеих групп, сопровождающееся усиленным дефектообразованием и ростом концентрации дырок (рис. 2). Возникновение нового типа дефектов в интервале составов  $x_{Si} \geq 8$  ат.% приводит к появлению дополнительного пика тепловыделения на кривых дифференциального термического анализа и заметному увеличению микротвердости образцов [3]. Концентрация дефектов при  $x_{Si} \geq 8$  ат.% оказывается сравнимой с исходной концентрацией дырок в Al, что, по-видимому, свидетельствует о существенном изменении зонных параметров в твердых растворах замещения  $Al_{1-x}Si_x$  в исследуемой области составов. Таким образом, замещение алюминия кремнием в системе  $Al_{1-x}Si_x$  уже при  $x \geq 1$  ат.% приводит к перестройке зоны про-

водимости, характерной для чистого Al. Резкое уменьшение концентрации носителей заряда в этом интервале составов сменяется усиленным дефектообразованием для  $x \geq 8$  ат.% Si.

Авторы благодарны С. В. Поповой за многочисленные полезные дискуссии, а также В. Г. Богданову за помощь в подготовке экспериментов на установке «Спектрозонд».

#### Список литературы

- [1] Mii H., Senoo M., Fujishiro I. // *Jap. J. Appl. Phys.* 1976. V. 15. N 5. P. 777—783.
- [2] Degtyareva V. F., Chipenko G. V., Belash I. T., Barkalov O. I., Ponyatovskii E. G. // *Phys. Stat. Sol. A.* 1985. V. 89. N 1. P. K127—K131.
- [3] Brazhkin V. V., Popova S. V., Voloshin R. N. // *High Pressure Research.* 1992. V. 6. N 2. P. 333—339.
- [4] Chevrier J., Pavuna D., Cyrot-Lackmann F. // *Phys. Rev B.* 1987. V. 36. N 17. P. 9115—9121.
- [5] Боровик Е. С. // *ЖЭТФ.* 1952. Т. 23. В. 1(7). С. 83—90.
- [6] Forsvoll K., Holwech I. // *Phil. Mag.* 1964. V. 10. N 7. P. 921—930.
- [7] Аскеров Б. М. *Электронные явления переноса в полупроводниках.* М., 1985. 320 с.
- [8] Немошкаленко В. В. *Рентгеновская эмиссионная спектроскопия металлов и сплавов.* Киев, 1972. 321 с.
- [9] Maslenkov S. B., Kozlenkov A. I., Filin S. A., Shulgin A. I. // *Phys. Stat. Sol. B.* 1984. V. 123. N 5. P. 605—609.
- [10] Shevchik N. J. // *J. Phys. C.* 1977. V. 10. N. 4. P. L555—L557.

Институт общей физики РАН  
Москва

Поступило в Редакцию  
14 октября 1992 г.