

Электрические свойства пленок хрома

© Г.М. Абрамова, Н.И. Киселев*, Г.С. Патрин, Г.А. Петраковский*

Красноярский государственный университет,
660041 Красноярск, Россия

* Институт физики им. Л.В. Киренского,
660036 Красноярск, Россия

E-mail: pat@iph.krasnoyarsk.ru

(Поступила в Редакцию 17 июля 1998 г.
В окончательной редакции 3 сентября 1998 г.)

Экспериментально исследовано влияние постоянного электрического тока на величину и температурную зависимость электросопротивления пленок хрома, полученных методом вакуумно-термической конденсации. Результаты интерпретируются в рамках модели фрелиховской проводимости.

В последние годы большой интерес вызывает изучение когерентных состояний электронов проводимости в твердых телах, в частности явление фрелиховской проводимости [1], наблюдаемое в области скольжения волн зарядовой (ВЗП) и спиновой (ВСП) плотностей и проявляющееся в нелинейном росте проводимости в электрических полях E , больших некоторого порогового значения E_c . Для этого механизма, как следует из [2], критическое поле E_c можно приближенно оценить по формуле

$$eE_c(2\pi/Q) = (\Sigma^2/E_F)\varepsilon^4 10^6, \quad (1)$$

где e — заряд электрона; Q — волновой вектор ВЗП (ВСП); E_F — энергия Ферми; Σ — диэлектрическая щель ВЗП (ВСП); $\varepsilon \sim 1$. Оценки критического поля срыва ВСП для хрома (температура Нееля $T_N \cong 312$ К [3]), проведенные по формуле (1), дают величину $E_c \sim 16$ мВ/см. Величина критического тока срыва, соответствующая E_c , определяется как

$$I_c = (l/R)E_c, \quad (2)$$

где l — расстояние между контактами, R — сопротивление металла. Для объемных образцов хрома $R \sim 10^5 \Omega$ и для $l \approx 0.5$ см ток срыва $I_c \approx 800$ А. Однако в пленках хрома величина электросопротивления R возрастает на несколько порядков с уменьшением толщины пленки [4]. В связи с этим можно ожидать, что в пленках хрома при реально достижимых значениях транспортного тока реализуется режим фрелиховской проводимости. Например, для $R = 50 \Omega$ получается $I_c = 1.28 \cdot 10^{-4}$ А.

В настоящей работе сообщаются результаты исследований электрических свойств пленок хрома в зависимости от величины транспортного тока, протекающего через образец.

Пленки хрома толщиной $d = 700$ и 1040 \AA были получены методом вакуумно-термической конденсации на стеклянную подложку. Температура подложки составляла $T = 180^\circ\text{C}$. Использовался электролитический хром чистоты не менее 99.99%. Электросопротивление измерялось четырехконтактным потенциометрическим методом на постоянном токе в диапазоне температур

$T = 77\text{--}350$ К и токов $I = 10^{-5}\text{--}10^{-1}$ А с точностью $\pm 10^{-6} \Omega$. Температура образцов контролировалась хромель-алюмелевой термопарой. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) при температурах $T = 78$ и 300 К были измерены в режиме заданного тока в диапазоне $I = 10^{-5}\text{--}7 \cdot 10^{-3}$ А. Толщина пленки и ее химический состав определялись методом рентгенофлуоресцентного анализа, а параметры решетки и фазовый состав — методом рентгеноструктурного анализа.

На рис. 1 представлены температурные зависимости электросопротивления ($R(T)$), измеренные при разных значениях постоянного тока, для пленки хрома толщиной $d = 1040 \text{ \AA}$. Точки, приведенные на вставке рис. 1 для $T = 78$ К, взяты из зависимостей ВАХ. Результаты измерений $R(T)$ для токов $I = 10^{-3}$ А в области $T = 200\text{--}300$ К (вставка на рис. 1) согласуются

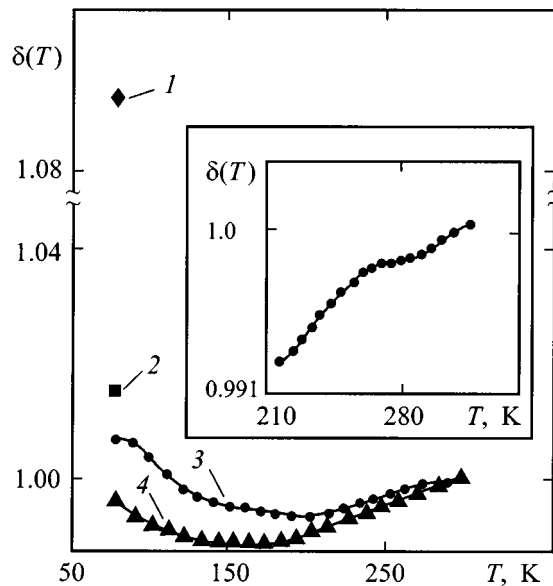


Рис. 1. Температурные зависимости относительного электрического сопротивления $\delta(T) = R(T)/R(T = 300 \text{ К})$ при разных значениях транспортного тока. I (А): 1 — 10^{-4} , 2 — $4 \cdot 10^{-4}$, 3 — 10^{-3} , 4 — $7 \cdot 10^{-2}$. На вставке приведена зависимость $\sigma(T)$ при $I = 10^{-3}$ А в области высоких температур.

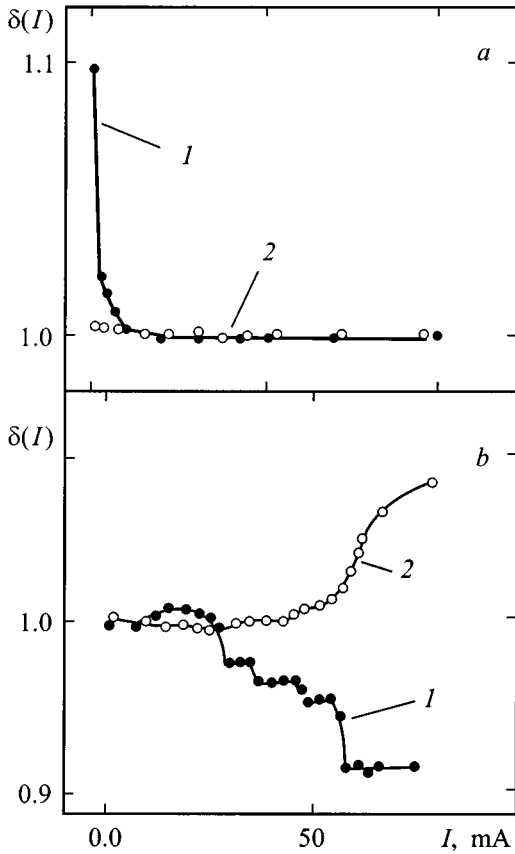


Рис. 2. Зависимость относительного электрического сопротивления $\delta(I) = R(I)/R(I = 10^{-3} \text{ A})$ от величины транспортного тока. $I = 10^{-5} - 10^{-3}$ (a) и $10^{-3} - 8 \cdot 10^{-2}$ А (b). $T = 300$ (1) и 78 К (2).

с литературными данными для тонких пленок хрома [4] ($d = 14 - 50 \text{ \AA}$) и объемных образцов [5]. Слабовыраженная аномалия $R(T)$ наблюдается в районе $T_{an} = 280$ К. Ниже $T = 200$ К температурный ход электросопротивления изучаемых пленок хрома существенно отличается от зависимостей электросопротивления объемных образцов [5], но подобен наблюдаемому в сплавах хрома (например, Cr-Fe или Cr-V [6]). Из рис. 1 видно, что величина и температурный ход электросопротивления пленок хрома в области температур $T \sim 78$ К существенно зависят от величины тока, при котором производились измерения. Для токов $I < 10^{-3}$ А величина электросопротивления $R(T = 78 \text{ K})$ превосходит $R(T = 300 \text{ K})$ почти на 10%. Так, для $I = 10^{-5}$ А отношение $R(T = 78 \text{ K})/R(T = 300 \text{ K}) = 1.095$.

На рис. 2 представлены зависимости электросопротивления от величины транспортного тока, вычисленные из зависимостей ВАХ. Установлено, что ВАХ изучаемых пленок хрома при $T = 300$ К подчиняется закону Ома до $I \approx 4 \cdot 10^{-2}$ А и имеет безгистерезисный характер. Соответствующие данной ВАХ зависимости $R(I)$ представлены кривыми 1 на рис. 2. Как следует из эксперимента, рост электросопротивления при более высоких токах

связан с джоулевым нагревом образца. При температуре $T = 78$ К с увеличением тока сопротивление скачком понижается в области $I = 10^{-4} - 10^{-3}$ А почти на 9% (кривая 2 на рис. 2, a), затем вплоть до $I \sim 10^{-1}$ А наблюдается ступенчатое понижение сопротивления не более чем на 1% (кривая 2 на рис. 2, b). Поведение ВАХ и $R(I)$ не зависело от полярности тока, однако в цикле "увеличение-понижение" тока наблюдался гистерезис. Эти результаты измерений воспроизводились во всех последующих экспериментах.

Экспериментальное значение тока, при котором наблюдался скачок $R(I)$, составляло $I_j = 10^{-4}$ А, более плавное уменьшение $R(I)$ наблюдалось до $I = 3.4 \cdot 10^{-2}$ А, затем сопротивление слабо возрастало и оставалось постоянным до $I \approx 10^{-3}$ А. Выше этого значения вновь наблюдался спадающий участок $R(I)$ (рис. 2, b). Оценки, проведенные по формуле (1) для изучаемых пленок, дают величину $I_c = 6.8 \cdot 10^{-2}$ А, сравнимую с экспериментальным значением I_j .

Проведенный рентгеноструктурный анализ полученных пленок показал наличие ультрадисперсной фазы окисей хрома. Пленки хрома фазового состава подобного типа, полученные ранее методом вакуумно-дугового напыления, обсуждались в [7,8]. Заметим, что проблеме образования окисного слоя на поверхности пленок хрома посвящено достаточно много работ (см., например, [7-9]). По данным этих работ, поверхностный слой пленок представляет смесь металлического хрома и его окислов. Толщина такого слоя в зависимости от технологии приготовления составляет $t = 15 - 150 \text{ \AA}$. Сопротивление поверхностного слоя задается соотношением

$$(1/\sigma_0) = \rho_m^0 C_m^0 \{1 - (\mu_f/\mu_c)^n\}^{-1}, \quad (3)$$

где ρ_m^0 — сопротивление металла; C_m^0 — концентрация металла в слое; μ_f — концентрация окисной фазы; μ_c — критическая концентрация окисла для перколяционного механизма проводимости; параметр $n \sim 1 - 2$ [8].

Известно [10], что для четырехзондового метода измерения проводимость образца определяется как

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_v Z. \quad (4)$$

Здесь Z — расстояние от поверхности образца вглубь; σ_0 — поверхностная проводимость (в данном случае она определяется формулой (3)); σ_v — объемная проводимость. Поскольку толщина проводящего слоя, в котором сохраняется однородность электрического поля и плотности тока, много больше, чем толщина пленки ($t \sim 0.2 \text{ см}$ [11]), можно считать, что весь объем пленки ($d = 1040 \text{ \AA}$) вносит вклад в проводимость, а температурный ход сопротивления в основном определяется электропроводностью металлического хрома. В пользу этого свидетельствует зависимость, представленная на вставке к рис. 1.

В [8] показано, что присутствие 15-20% окисной фазы в пленках Ni-Cr увеличивает величину электросопротивления в два раза по сравнению со значением,

характерным для металла. (К сожалению, в работах, посвященных исследованию электрических свойств пленок хрома, не указано значение тока, при котором проводились измерения.) В нашем случае электросопротивление пленки при $T = 300$ К и токе $I = 10^{-3}$ А составляло $R = 1.225 \cdot 10^{-4}$ Ω , что на два порядка превосходит величину электросопротивления объемных образцов хрома.

Поскольку при температурах выше температуры аномалии электросопротивления (рис. 2, *a*) заметного изменения его величины для пленок в зависимости от величины тока не обнаружено, то природу обнаруженных нелинейных эффектов в области низких температур можно связать с наличием состояния ВСП, например как проявление фрелиховской проводимости за счет скольжения волны спиновой плотности [1].

Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод, что электрические свойства пленок данной толщины существенно зависят от величины транспортного тока. Для однозначного вывода о механизмах, ответственных за наблюдаемые особенности электропроводимости пленок хрома, необходимо детальное исследование электрических свойств как от толщины, так и от условий приготовления.

Авторы выражают благодарность Г.В. Бондаренко за рентгенофлуоресцентный анализ и А.Д. Васильеву за рентгеноструктурные измерения исследованных образцов.

Список литературы

- [1] С.Н. Артеменко, А.Ф. Волков. УФН **166**, 4, 434 (1996).
- [2] P.A. Lee, T.M. Rice. Phys. Rev. **B19**, 8, 3970 (1979).
- [3] Н.И. Куликов, В.В. Тугушев. УФН **144**, 4, 643 (1984).
- [4] J.A.J. Lourens, S. Arajs, H.F. Helbig, L. Cheriet, El-Sayed A. Mehanna. J. Appl. Phys. **63**, 8, 4282 (1988).
- [5] Y. Ishikova, S. Ikeda, Ch. Akiba. J. Phys. Soc. Jap. **39**, 3, 823 (1975).
- [6] В.Ю. Галкин. ФММ **77**, 2, 5 (1994).
- [7] А.Я. Вовк, А.В. Филатов. Металлофизика и новейшие технологии **20**, 1, 17 (1998).
- [8] H. Bartuch, H. Dintner, A. Nimmrichter. Thin Solid Films **116**, 3, 211 (1984).
- [9] K. Shanker, P.H. Holloway. Thin Solid Films **105**, 4, 293 (1983).
- [10] Н.Ф. Ковтонюк, Ю.А. Концевой. Измерение параметров полупроводниковых материалов. Металлургия, М. (1970). 429 с.
- [11] H.R. Kokabi, I. Provost, G. Desgardin. Rev. Sci. Instrum. **64**, 6, 1549 (1993).