

УДК 621.32

PACS number(s): 71.20.Gj, 72.10.Di

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТОНКОЇ СТРУКТУРИ СПЕКТРАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ ЕЛЕКТРОН- ФОНОННОЇ ВЗАЄМОДІЇ У МОЛІБДЕНІ

**Б. Конопацький<sup>1</sup>, С. Морлок<sup>2</sup>, А. Хоткевич<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна  
НАН України

відділ мікроконтактної спектроскопії  
пр. Леніна, 47, 61103 Харків, Україна

e-mail: konopatsky\_boris@list.ru

<sup>2</sup>Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"  
кафедра технічної кріофізики  
вул. Фрунзе, 21, 61002 Харків, Україна

Виміряно електричні характеристики точкових контактів з молібдену, одержаних під час скручування дротових електродів. Відновлено спектральну функцію електрон-фононої взаємодії (ЕФВ). Спостерігалася тонка структура низькочастотного максимуму цієї функції, зумовлена аномаліями закону дисперсії фононів. Обчислено інтегральні характеристики спектра ЕФВ. Результати добре узгоджуються зі щільністю фононних станів і даними електронної теплоємності.

*Ключові слова:* мікроконтактна спектроскопія, електрон-фононна взаємодія, молібден.

На сьогодні мікроконтактна спектроскопія [1, 2] є єдиним експериментальним методом, практично придатним для визначення спектральних функцій електрон-фононої взаємодії (ЕФВ) у металах зі слабкою ЕФВ. (Відомі дані щодо функцій ЕФВ і щільності фононних станів у металевих елементах систематизовані у бібліографічному вказівнику [3]).

У статті за низьких температур досліджено потенціал нового методу одержання зразків шляхом скручування (звивання) електродів з металевих дротів, запропонованого нещодавно [4] для аналізу газових середовищ за кімнатної температури за допомогою точкових контактів. Виміряно докладні мікроконтактні спектри ЕФВ (залежності других похідних вольт-амперних характеристик (ВАХ) контактів від напруги) у молібдені – ОЦК перехідному металі зі слабким ЕФВ, які містять тонку структуру, що раніше на спектрах точкових контактів із цього металу не простежувалися [1, 5].

З метою одержання контактів два ізольованих один від одного паралельно розташованих і закріплених на кінцях металевих електроди у вигляді дротів скручувалися під час послідовного взаємного обертання й зближення протилежних місць закріплення електродів до появи електричного

контакту. При цьому, як бачимо, в одній серії вимірювань можуть бути отримані контакти між новими ділянками бічних поверхонь кожного з електродів. Маніпуляції електродами у рідкому гелії виконували за допомогою спеціально розробленого механічного пристрою. Перед монтажем у криостат молібденові електроди із дротів  $\varnothing$  0,25 або 0,8 мм відпалювали у вакуумі при 1250 °С і електрохімічно полірували як у [6]. За температури 1,5 К визначали величину опору контакту, а також реєстрували залежності напруг першої й другої гармонік модулюючого сигналу, пропорційні першій і другій похідним ВАХ  $V_1(V) \sim dV/dI(V)$  і  $V_2(V) \sim d^2V/dI^2(V)$ . Схема вимірювання напруги другої гармоніки давала змогу детектувати сигнали субмікроевольтового рівня. Умови вимірювання мікроконтактних спектрів ЕФВ (величина температурного й модуляційного розмиття) відповідали розрізненню 1 меВ за енергією. Відновлювали функції ЕФВ з експериментальних даних відповідно до основних співвідношень теорії мікроконтактної спектроскопії, яке можна записати як [7].

$$C \cdot \tilde{V}_2(eV) \cdot V_{1,0}^{-2} \cdot R_o^{1/2} = g_{pc}(\omega) + B(\omega) \quad (1)$$

і охоплювало перетворення експериментальних залежностей  $V_2(V) \sim d^2V/dI^2(V)$  до вигляду  $\tilde{V}_2(V) \sim d^2I/dV^2(V)$  і виключення фону з  $\tilde{V}_2(V)$ . У цьому співвідношенні  $e$  – елементарний заряд,  $V_{1,0}$  і  $R_o$  – низькочастотний сигнал, що модулює, і опір контакту при  $V = 0$ ,  $C$  – розмірна константа, що містить електронні характеристики металу,  $g_{pc}(\omega)$  – мікроконтактна функція ЕФВ,  $\omega$  – кругова частота фонона, а функція фону  $B(\omega)$  відбиває той факт, що експериментально визначені другі похідні ВАХ при  $V > \hbar \omega_{max}/e$  (де  $\omega_{max}$  – максимальна частота однофононої частини спектра) відмінні від нуля, тоді як функція ЕФВ дорівнює нулю за межею фононного спектра.

Були одержані чисті стабільні контакти з відтворюваними у деталях другими похідними ВАХ. Експериментальні дані для одного з таких контактів показано на рис. 1. Мікроконтактний спектр ЕФВ у молібдені характеризується наявністю двох головних максимумів приблизно 22 і 32 меВ, пов'язаних з розсіюванням електронів, відповідно, на поперечних (Т) і поздовжніх (L) акустичних фононах. Уперше виявилось можливим спостерігати також особливості тонкої структури у вигляді “плечей” або зломів Т-максимуму мікроконтактних спектрів і відновленого з них графіка функції ЕФВ близько 15, 24 і 28 меВ (рис. 1, 2). Схожі особливості властиві також найбільш достовірній щільності фононних станів  $F(\omega)$  [8, 9] (рис. 2) – функції спорідненої  $g_{pc}(\omega)$ . На рис. 2 частотні розподіли показано в одиницях щільності фононних станів (площі, що під кривими, дорівнюють одиниці). Тому запропоновану на рис. 2 функцію ЕФВ можна використовувати як експериментально визначене наближення для щільності фононних станів. Спостережувана тонка структура частотних розподілів пов'язана з аномаліями закону дисперсії фононів у внутрішніх областях зони Брілюена [9]. Цілком закономірно, що на мікроконтактних спектрах тонка структура простежена саме для низькочастотного головного максимуму. Як відомо [1, 2], мікроконтактна функція ЕФВ відрізняється від термодинамічної функції ЕФВ (функції Еліашберга) наявністю формфактора, роль якого проявляється для металів з кубічними кристалічними ґратками у збільшенні

відносної інтенсивності Т-максимуму. Тому аномалії закону дисперсії фононів найчіткіше видно саме в низькочастотній частині функції  $g_{pc}(\omega)$ .

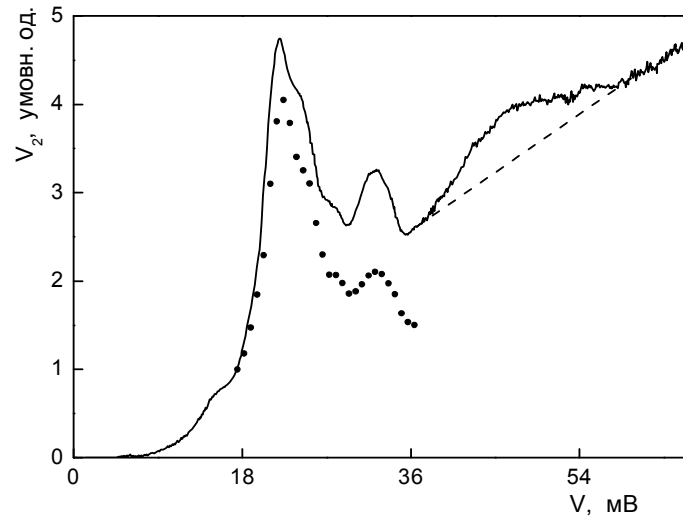


Рис. 1. Мікроконтактний спектр ЕФВ:  $R_0=0,75$  Ом,  $V_{1,0}=471$  мкВ,  $V_{2max}=1,23$  мкВ. Штриховою лінією виділено двофононну частину спектра. Крпки –  $-\tilde{V}_2(V)$

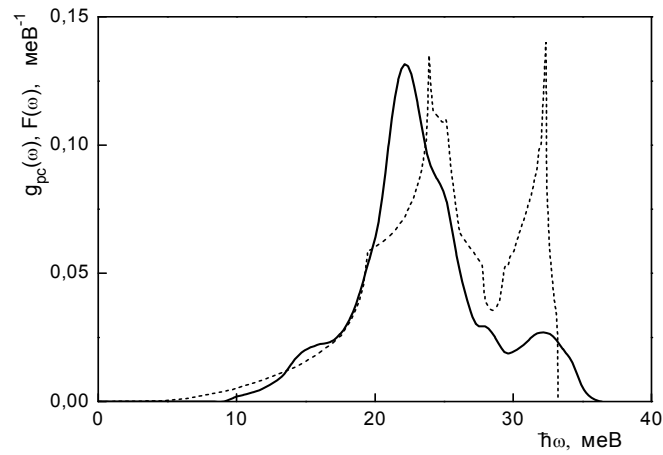


Рис. 2. Мікроконтактна функція ЕФВ (суцільна лінія), відновлена з мікроконтактного спектра на рис. 1, і щільність фононних станів, розрахунок [8] (штрихову лінію, показано за довідником [9])

На підставі експериментальних даних прямим розрахунком визначені середня й середньоквадратична частоти фононів  $\langle\omega\rangle = 22,9 + 0,02$  меВ і  $\langle\omega^2\rangle^{1/2} = 23,1 + 0,02$  меВ, які дають змогу підрахувати різні термодинамічні характеристики. Тут наведено значення середнього арифметичного, отримані усередненням за п'яти зразками, і помилка середнього, котра характеризує розкид даних, а не точність у визначенні абсолютних величин. Варто особливо підкреслити, що середні частоти фононів не залежать від нормування функції ЕФВ і можуть бути визначені з даних мікроконтактної спектроскопії з високою точністю [7]. Прямий розрахунок константи ЕФВ  $\lambda$  у молібдені, керуючись отриманою функцією  $g_{pc}(\omega)$ , ускладнюється тим, що константа  $C$  у співвідношенні (1) може бути визначена сьогодні лише в наблизенні квадратичного ізотропного закону дисперсії електронів, що для перехідних металів не можна визнати виправданим. Тому значення  $\lambda$ , що становить 0,43, отримано з формули Макмілана для температури надпровідного переходу  $T_c$  за вказаним значенням  $\langle\omega\rangle$  і величині  $T_c = 0,92$  К для молібдену [5]. Наведені чисельні характеристики  $\langle\omega^2\rangle^{1/2}$  і  $\lambda$  дуже добре узгоджуються з величинами, відповідно, 23,1 і 0,44 меВ, відомими з літератури [5], але визначеними непрямим шляхом за даними електронної теплоємності.

1. *Khotkevich A. V., Yanson I. K.* Atlas of point contact spectra of electron-phonon interactions in metals, Kluwer Academic Publishers, Boston-Dordrecht-London. 1995. 151 p.
2. *Naidyuk Yu. G., Yanson I. K.* Point-contact spectroscopy. Springer, New York. 2004. 300 p.
3. *Хоткевич А. В.* Плотность фононных состояний и спектральные функции электрон-фононного взаимодействия в металлах (библиографический указатель) // Препринт ФТИНТ АН УССР N 24-89. Харьков, 1989. 42 с.
4. *Александров Ю. Л., Камарчук Г. В., Хоткевич А. В., Фисун В. В.* Приватне повідомлення. Харків, 2007.
5. *Вольф Е. Л.* Принципы электронной туннельной спектроскопии. К.: Наукова думка, 1990. 455 с.
6. *Попилов Л. Я., Зайцева Л. П.* Электрополирование и электротравление металлических шлифов. М.: Metallurgizdat, 1963. 410 с.
7. *Хоткевич А. В.* Спектроскопия электрон-фононного взаимодействия в нормальных и сверхпроводящих металлических микроконтактах // Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Харьков, 1990. 323 с.
8. *Powell B. M., Martel P., Woods A.D.B.* Phonon properties of niobium, molybdenum and their alloys // Can. J. Phys. 55, N 18. 1977. P. 1601–1612.
9. *Schober H. R., Dederichs P. H.* Phonon dispersion, frequency spectra, and related properties of metallic elements. In: Landolt-Börnstein. Numerical data and functional relationships in science and technology. New series. Ed. K.-H. Hellwege. - Group III: Crystal and solid state physics. Vol. 13. Metals: Phonon states, electron states and Fermi surface. Subvol. a: Phonon states of elements, electron states and Fermi surface of alloys. Berlin-Heidelberg-New York: Springer. 1981. P. 1–191.

**EXPERIMENTAL SUPERVISION OF THIN STRUCTURE SPECTRAL  
FUNCTION OF ELECTRON-PHONON INTERACTION IN  
MOLYBDENUM**

**B. Konopatskyi<sup>1</sup>, S. Morlok<sup>2</sup>, A. Khotkevich<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Boris Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering  
Department of Microcontact Spectroscopy  
47 Lenin Ave., Kharkov 61103, Ukraine  
e-mail: konopatsky\_boris@list.ru*

<sup>2</sup>*National Technical University "Kharkov Polytechnical Institute"  
Physicotechnical department  
Frunze Str., 21, Kharkov 61002, Ukraine*

Electric characteristics of point contacts from the molybdenum, the wire electrodes received at twisting, are measured. Spectral function of electron-phonon interactions (EPI) is restored. The thin structure of a low-frequency maximum of this function, caused by anomalies of the law of a dispersion of phonons was observed. Integrated characteristics of spectrum of EPI are counted up. Results will well be coordinated to density of phonon conditions and the data on an electronic thermal capacity.

*Key words:* point-contact spectroscopy, electron-phonon interaction, molybdenum.

Стаття надійшла до редколегії 18.06.2007  
Прийнята до друку 08.07.2008