

УДК 539.292

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

ПРУЖНА МІКРОКОНТАКТНА СПЕКТРОСКОПІЯ ЕЛЕКТРОН- ФОНОННОЇ ВЗАЄМОДІЇ У ТВЕРДІЙ РТУТІ

С. Морлок¹, Б. Конопацький², Н. Хоткевич³

¹Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”
кафедра технічної кріофізики

вул. Фрунзе, 21, 61002 м. Харків, Україна, e-mail: serge_morlock@mail.ru

²Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України

відділ мікроконтактної спектроскопії

пр. Леніна, 47, 61103 м. Харків, Україна

³Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна

кафедра теоретичної фізики

пл. Свободи, 4, 61077 м. Харків, Україна

Експериментально вивчали нелінійну частину опору контактів з ртуті, а також контактів ртуть/нормальний метал для ртуті як у нормальному, так і в надпровідному стані. Простежено можливість досягнути балістичного характеру руху носіїв заряду в контакт. Визначено, що відновлена мікроконтактна функція електрон-фононої взаємодії відповідає відомим даним тунельного ефекту та щільності фононних станів. Отримано чисельні характеристики спектра фононів. Обчислено температуру Дебая. Надпровідні зразки використано для дослідження пружної компоненти струму через контакт.

Ключові слова: ртуть, електрон-фононна взаємодія, мікроконтактна спектроскопія.

Фундаментальні фізичні властивості металів багато в чому визначаються енергетичними спектрами систем електронів і фононів, які взаємодіють між собою. Енергетична спектроскопія металів займає одне з центральних місць у сучасній фізиці твердого тіла. Арсенал засобів спектральних досліджень включає метод мікроконтактної спектроскопії [1]. Експериментальні й теоретичні результати в цій галузі засвідчили, що за низьких температур мікроконтактні спектри (залежності других похідних вольт-амперних характеристик (ВАХ)) точкових мікроконтактів від напруги в нормальному стані відображають структуру функції електрон-фононої взаємодії (ЕФВ), спорідненої до щільності фононних станів (ЩФС). При цьому мікроконтактна спектроскопія як метод виявляється найефективнішою для систем з великою середньою довжиною вільного пробігу, тобто передусім для чистих металів. Серед усіх металевих елементів найбільше значення константи електрон-фононої взаємодії має кристалічна ртуть [2]. Спектр ЕФВ та ЩФС у цьому металі маловивчені та обмежуються даними праць [3, 4]. У нашій статті ЕФВ в ртуті експериментально досліджено методом мікроконтактної спектроскопії [1] у нормальному й надпровідному станах.

Точкові контакти створювалися в рідкому гелії між ртутними покриттями, нанесеними за кімнатної температури на металеві електроди-підкладки шляхом їхнього експонування в об'ємі ртуті. Електроди стикалися бічними поверхнями й потім взаємно зміщувались у площині зіткнення [1]. Використовували також інший спосіб [5], коли контакти одержували при скручуванні дротів або смужок фольги, змочених ртуттю. При одержанні гетероконтактів ртуть наносили тільки на один електрод. Використовували надчисту ртуть марки Р-0. Як матеріал електродів-підкладок застосовували метали й сплави з невисокою швидкістю розчинення у ртуті (Au, Cu, Zn, Cd, Sn, латунь та різні види бронз). Перед нанесенням ртутного покриття поверхні електродів хімічно або електрохімічно полірували. Використання електродів-підкладок з різних металів і сплавів, а також різні способи отримання контактів не впливали на результати вимірів. Товщину ртутного покриття визначали прямим виміром на оптичному мікроскопі, ваговим аналізом і шляхом розрахунку по формулах фізики змочування і становила 5–20 мкм. Отож, товщина покриття ртуті на електродах-підкладках була набагато більша від лінійного розміру ефективного об'єму генерації фононів у контакті [1], а також середньої довжини вільного пробігу носіїв заряду в контактній області. Тому відносно площини контакту ртутні плівки на кожному з електродів можуть розглядатися як масивний метал.

Експериментально визначали опір контактів у нормальному стані R_0 , що становив звичайно декілька Ом. Вимірювали вольт-амперні характеристики $I(V)$ і їх перші та другі похідні $dV/dI(V) \equiv R(V)$ (R – диференціальний опір) і $d^2V/dI^2(V)$ для нормального й надпровідного стану ртуті.

Для контактів Hg/Hg у надпровідному стані виміряли критичний струм Джозефсона I_c та величину надпровідної енергетичної щільності 2Δ . Для надпровідних контактів і контактів надпровідник/нормальний метал аналізували надлишковий струм $I_{exc}(V)$.

Відновлення мікроконтактної функції ЕФВ $g_{pc}(\omega)$ з експериментальних даних для точкових контактів Hg/Hg у нормальному стані (рис. 1) коли, як відомо, нелінійність ВАХ пов'язана з непружними процесами ЕФВ, проводили як в [1]. Використовували сучасну версію програмного забезпечення [6]. Наприклад, наведена функція ЕФВ Еліашберга за тунельними даними (рис. 1).

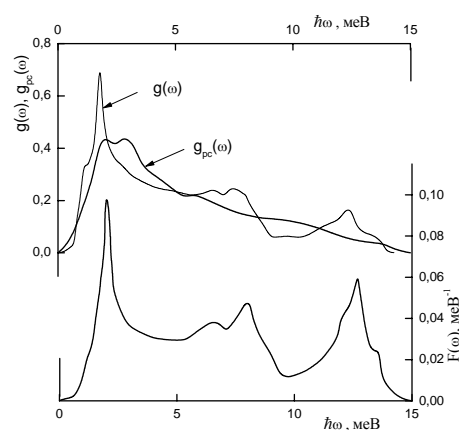


Рис. 1. Спектральні функції ЕФВ у твердій ртуті: мікроконтактна функція $g_{pc}(\omega)$, функція Еліашберга $g(\omega)$ [3], функція ЩФС [4]

Розходження функцій ЕФВ пояснюють впливом формфактора мікроконтактної функції ЕФВ [1]. Середні фонові частоти $\langle\omega\rangle = 3,3$ й $\langle\omega^2\rangle^{1/2} = 4,2$ меВ, обчислені для функції $g_{pc}(\omega)$, збігаються зі значеннями для $g(\omega)$ [3]. Отримана оцінка для константи ЕФВ $\lambda_{pc} = 1,55$ у наближенні квадратичного ізотропного закону дисперсії електронів близька до відомої величини $\lambda = 1,6$, визначеною в [3] з тунельних даних.

Нормована на одиницю функція $g_{pc}(\omega)$ може бути використана як гарне наближення для ЩФС у розрахунках термодинамічних характеристик твердої ртуті. Ми розрахували теплоємність ртуті та визначили відповідність розрахункової температурної залежності температури Дебая відомим калориметричним даним. Для низькотемпературної межі калориметричної температури Дебая одержано значення 73 К.

Експериментальне значення $2\Delta = 1,60$ меВ за температури $T = 1,5$ К було визначено прямим експериментальним методом за субгармонічною щільною структурою на похідних ВАХ надпровідних контактів Hg/Hg, пов'язаної з багаторазовим Андріївським відбиттям носіїв заряду в контакті [7]. Отримане значення наближається до $2\Delta_0 = 1,66$ меВ [8] поблизу $T = 0$.

Величину надлишкового струму для надпровідних контактів і гетероконтактів (рис. 2) обчислювали, відповідно, при $6\Delta_0$ і $3\Delta_0$. Експериментально спостерігалось, що при $T = 1,5$ К (критична температура надпровідного переходу в ртуті $T_c = 4,19$ К) величина добутку $I_c e R_0 / \Delta_0$ і добутку $I_{exc} e R_0 / \Delta_0$ (з області сталості I_{exc} за напруг $V > 2 \Delta_0/e$) становить 3 й 2,5, що виявляються близькими до теоретично очікуваних при $T = 0$ значень $\pi = 3,14$ й $8/3 = 2,67$ у чистій межі (див. табл. 3 в [1]). Для кращих гетероконтактів Hg/Cu $I_{exc} e R_0 / \Delta_0$ наближалася знизу до теоретичного значення $4/3$ для чистих контактів надпровідник/нормальний метал [1]. Тому результати для контактів із ртуті й гетероконтактів Hg/чистий нормальний метал засвідчує про можливість реалізації балістичного характеру руху носіїв заряду в контактній області.

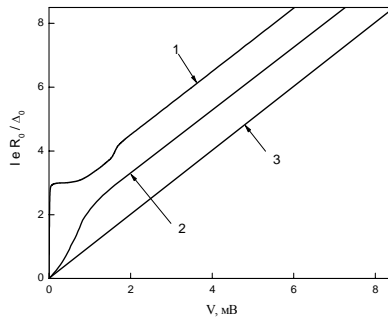


Рис. 2. Початкові ділянки вольт-амперних характеристик чистих контактів:
1 – надпровідний контакт Hg/Hg; 2 – контакт надпровідна ртуть/Cu;
3 – обидва ці контакти у випадку, коли ртуть у нормальному стані

У теорії [9] висвітлено нелінійне поведіння пружної компоненти струму точкового контакту надпровідник/нормальний метал внаслідок залежності функції енергетичної щільності надпровідника $\Delta(\omega)$ від частоти електрон-фононних переходів. Ґрунтуючись на вираз для провідності точкового контакту [9], ми виконали розрахунок похідних ВАХ точкового контакту надпровідна ртуть/нормальний метал. Були

використані таблиці [8] частотних залежностей реальної й уявної частин функції $\Delta(\omega)$ для ртуті. Залежність $\Delta(\omega)$ зумовлює складний характер особливостей на графіках похідних ВАХ (рис. 3, рис. 4).

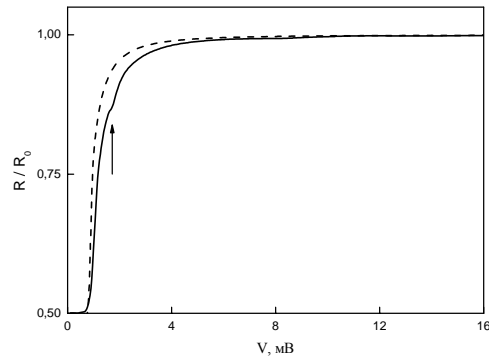


Рис. 3. Диференціальний опір точкового контакту надпровідна ртуть/нормальний метал: розрахунок з використанням комплексної функції $\Delta(\omega)$ [9] (суцільна лінія); розрахунок для $\Delta(\omega) = \Delta_0 = \text{const}$ (штрихова лінія)

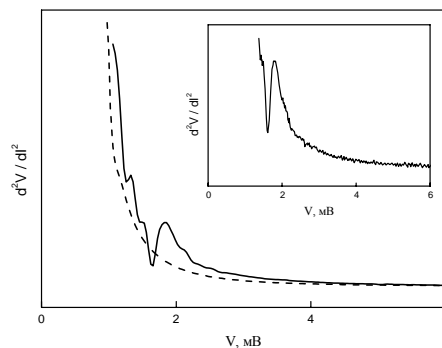


Рис. 4. Друга похідна ВАХ точкового контакту надпровідна ртуть/нормальний метал: розрахунок з використанням комплексної функції $\Delta(\omega)$ [9] (суцільна лінія); розрахунок для $\Delta(\omega) = \Delta_0 = \text{const}$ (штрихова лінія). На вставці: експериментальна залежність для контакту Hg/берилієва бронза

На першій похідній ВАХ виявляється мінімум при напругах, що відповідають максимуму функції ЕФВ у ртуті (стрілка на рис. 3). Форма експериментально зареєстрованої нелінійності на другій похідній ВАХ відповідає результатам обчислення (рис. 4).

Нормальним електродом при одержанні гетероконтактів була обрана берилієва бронза — сплав з малою імпульсною довжиною вільного руху електронів. Це дало змогу виключити внесок у провідність таких гетероконтактів непружних процесів ЕФВ і

виділити в чистому вигляді нелінійну частину опору, зумовлену проявом частотної залежності функції енергетичної щільності в пружній компоненті струму. Отже, експериментальні дані мікроконтактної спектроскопії надпровідників із сильним зв'язком можна використовувати для відновлення спектральної функції ЕФВ шляхом чисельного розв'язання рівнянь надпровідності Еліашберга.

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. *Wolf E.L.* Principles of electron tunneling spectroscopy. Oxford University Press. New York. 1985. 576 p.
3. *Hubin W.N., Ginsberg D.M.* Electron tunneling into superconducting mercury films at temperatures below 0,4K // *Phys. Rev.* 1969. Vol. 188. N 2. P.716–722.
4. *Kamitakahara W.M., Smith H.G., Wakabayashi N.* Neutron spectroscopy of low-frequency phonons in solid Hg // *Ferroelectrics.* 1977. Vol. 16. N 1–4. P. 111–114.
5. *Фісун В.В., Хоткевич А.В., Александров Ю.Л., Камарчук Г.В.* Патент на корисну модель 29170. Опубл. 10.01.2008. бюл. № 1.
6. *Хоткевич В.В., Хоткевич А.В.* Восстановление функции электрон-фононного взаимодействия по экспериментальным данным в методе микроконтактной спектроскопии // *Деп. ВИНТИ.* 1986. Т. В86. № 164. 74 с.
7. *Naidyuk Yu.G., Yanson I.K.* Point-contact spectroscopy. Springer. New York. 2004. 300 p.
8. *Rowell J.M., McMillan W.L., Dynes R.C.* A tabulation of the electron-phonon interaction in superconducting metals and alloys. Murray Hill. NJ.USA. 1973. 83 p.
9. *Омельянчук А.Н., Белобородько С.И., Кулик И.О.* Микроконтактная спектроскопия сверхпроводников с сильным электрон-фононным взаимодействием // *Физ. низ. температур.* 1988. Т. 14. № 11. С. 1142–1153.

ELASTIC POINT CONTACT SPECTROSCOPY ELECTRON-PHONON INTERACTION IN SOLID MERCURY

S. Morlok¹, B. Konopatskyj², N. Khotkevych³

¹*National Technical University “Kharkov Polytechnical Institute”
Physicotechnical department*

Frunze Str. 21, 61002 Kharkov, Ukraine,

²*Boris Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering
Department of Microcontact Spectroscopy*

Lenin Ave. 47, 61103 Kharkov, Ukraine

³*Karazin Kharkov National University,
Theoretical physics department*

Svobody Sq. 4, 61077 Kharkov, Ukraine

The nonlinear part of mercury contacts resistance and contacts mercury/normal metal, for mercury both in normal, and in a superconducting condition was experimentally studied. The possibility to achieve ballistic character of charge carriers movement in contact was observed.

It is established, that restored microcontact function electron-phonon interaction well answers the known data of tunnel effect and density phonon states. Numerical characteristics of a phonon spectrum are received. Debye temperature is counted up. Superconducting samples are used for research elastic components of a current through contact.

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

УПРУГАЯ МИКРОКОНТАКТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ЭЛЕКТРОН-ФОНОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ТВЕРДОЙ РТУТИ

С. Морлок¹, Б. Конопацкий², Н. Хоткевич³

¹Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”
кафедра технической криофизики
ул. Фрунзе, 21, 61002 Харьков, Украина

²Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины
отдел микроконтактной спектроскопии
пр. Ленина, 47, 61103 Харьков, Украина

³Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина
кафедра теоретической физики
пл. Свободы, 4, 61077 Харьков, Украина

Экспериментально изучалась нелинейная часть сопротивления контактов из ртути, а также контактов ртуть/нормальный металл для ртути как в нормальном, так и в сверхпроводимом состоянии. Наблюдалась возможность достичь баллистического характера движения носителей заряда в контакте. Определено, что восстановленная микроконтактная функция электрон-фононного взаимодействия отвечает известным данным туннельного эффекта и плотности фононных состояний. Получены численные характеристики спектра фононов. Вычислена температура Дебая. Сверхпроводимые образцы использованы для исследования упругой компоненты тока через контакт.

Ключевые слова: ртуть, электрон-фононное взаимодействие, микроконтактная спектроскопия.

Стаття надійшла до редколегії 19.05.2008

Прийнята до друку 20.07.2009