

III Международный семинар по микроконтактной спектроскопии Харьков, Украина, 8–11 сентября 2014 г.

К сорокалетию метода микроконтактной спектроскопии Янсона

В 1974 г. в «Журнале экспериментальной и теоретической физики» была опубликована статья И.К. Янсона «Нелинейные эффекты в электропроводности точечных контактов и электрон-фононное взаимодействие в нормальных металлах» [1]. Представленная работа заложила основы нового метода физических исследований, получившего в дальнейшем название микроконтактная спектроскопия (МКС). Суть метода заключается в том, что если размер точечного контакта становится меньше длины свободного пробега электронов проводимости, то, проходя через контакт, электроны приобретают избыточную энергию равную eV , где V — приложенное к контакту напряжение, e — заряд электрона. Энергизованные таким образом неравновесные электроны релаксируют, отдавая свою избыточную энергию решетке (т.е. фононам). Такое рассеяние электронов на фононах вызывает увеличение сопротивления контакта при характерных фононных энергиях и, соответственно, приводит к нелинейной вольт-амперной характеристике (ВАХ). Изучаемые И.К. Янсоном точечные контакты нужных размеров образовывались в диэлектрическом слое пленочного туннельного перехода. В результате, как было обнаружено И.К. Янсоном, вторая производная ВАХ таких контактов непосредственно отражает известную функцию электрон-фононного взаимодействия $\alpha^2 F(\epsilon)$, где $F(\epsilon)$ — плотность фононных состояний, а α^2 — некоторая более плавная зависимость, учитывающая силу взаимодействия электронов с той или иной группой фононов.

В следующем 1975 году И.К. Янсон доложил свои оригинальные результаты на Международной конференции по физике низких температур в г. Хельсинки (Финляндия). Доклад вызвал широкий резонанс, так

что в ряде зарубежных лабораторий заинтересовались данным методом. Здесь следует отметить группу голландских ученых во главе с президентом физического общества Нидерландов проф. Р. Wyder, который вместе со своим аспирантом А.Г.М. Jansen первыми для целей МКС применили метод создания точечных контактов из массивных электродов в геометрии игла-наковальня [2]. Этот метод значительно упростил методику создания точечных контактов, использованную И.К. Янсоном, и практически неограниченно расширил круг изучаемых объектов. В частности, это дало возможность использовать вместо поликристаллических пленок более совершенные монокристаллические образцы и изучать эффекты анизотропии [3].

Определяющий вклад в понимание процессов, происходящих в баллистических контактах, в становление и дальнейший прогресс метода МКС внесли пионерские исследования И.О. Кулика, А.Н. Омельянуца и Р.И. Шехтера, приведшие к созданию основополагающей теории МКС [4]. Последующим важным шагом в развитии теории МКС стало рассмотрение диффузионного режима протекания тока в точечных контактах [5]. Было показано, что МКС дает возможность получать спектральную информацию и для систем с малой упругой длиной свободного пробега электронов [6], что дало основание для применения метода МКС практически для всех проводящих сплавов и соединений. Независимо свою версию теории МКС предоставил А.Р. van Gelder [7] из уже упомянутой голландской группы, что в конечном итоге привело к результату, аналогичному полученному в работе [4]. Таким образом, в результате экспериментальных и теоретических исследований к концу 70-х годов стало очевидно, что

точечные контакты являются полновесным инструментом физических исследований, а за методом закрепился термин МКС.

Стало также понятно, что не только процессы рассеяния электронов на фононах, но и взаимодействие электронов с другими квазичастицами или другие механизмы релаксации энергизованных электронов могут изучаться с помощью МКС. Так началось исследование электрон-магнонного взаимодействия [8], эффекта Кондо [9,10], двухуровневых систем [11], эффектов электрического кристаллического поля [12], спиновых флуктуаций [13] и др.

В процессе поиска эффектов электрон-магнонного взаимодействия в простых ферромагнитных металлах была обнаружена гигантская нелинейность ВАХ при энергиях, значительно превышающих фононные [14,15], что в результате привело к разработке теории теплового режима в контактах [15], когда неупругая длина свободного пробега электронов становится меньше размера контакта и джоулев нагрев вызывает увеличение температуры контакта пропорционально приложенному напряжению.

Была развита высокочастотная микроконтактная спектроскопия [16,17] для исследования кинетики релаксации квазичастичных возбуждений в твердых телах: неравновесных фононов, двухуровневых систем, уровней внутрикристаллического поля и др.

Следует отметить, что параллельно с использованием точечных контактов для целей МКС с начала 80-х годов точечные контакты начали применяться для исследования энергетической щели в сверхпроводящих материалах, используя так называемую спектроскопию андреевского отражения [18]. Хотя физические процессы, лежащие в основе МКС и спектроскопии андреевского отражения, разные, но между ними есть взаимосвязь, основанная как на общей методологии создания точечных контактов, так и на взаимодополняемости спектроскопических данных [19].

В результате развития нанofизических исследований в конце прошлого столетия исследователи, использующие МКС, стали применять свои наработки и в этой области, поскольку микроконтакты сами по себе являются нанообъектами. В частности, в микроконтактах возможно достижение громадной плотности тока порядка 10^{10} А/см² и выше. Соответственно, используя ферромагнитные материалы, можно реализовать высокие плотности спин-поляризованного тока, что важно при проведении, например, спин-вентильных исследований в области спинтроники [20,21]. Наработки в области МКС стали ценными и при рассмотрении квантовых эффектов в проводимости одноатомных контактов и нанопроволочек [22]. Необходимо отметить также и перспективные результаты, полученные в области применения металлических контактов для сенсорики [23].

Подводя итог, можно сказать, что за прошедшие 40 лет в области МКС достигнут большой прогресс, опубликовано около полутысячи научных работ, ряд обзоров и книг [24–30]. МКС стала не только новым востребованным методом физических исследований элементарных возбуждений в твердых телах, но и нашла свое место в ряду применений в области нанofизики.

Опубликованные в настоящем выпуске журнала статьи основаны на докладах, представленных на Международном семинаре по проблемам МКС, который состоялся на родине метода МКС в Физико-техническом институте низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины в сентябре 2014 г. Публикации в значительной мере отражают современные тенденции и направления в методе МКС. Это касается спин-зависящих явлений в проводимости точечных контактов, исследований нетрадиционных механизмов электронного спаривания в композитных соединениях, процессов электронного транспорта на границе нормальный металл–сверхпроводник, ряда нанofизических исследований и др. Все это указывает на дальнейшее плодотворное развитие метода МКС, его актуальность и широкое применение во многих областях твердотельных физических исследований.

1. I.K. Yanson, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **66**, 1035 (1974) [*Sov. Phys. JETP* **39**, 506 (1974)].
2. A.G.M. Jansen, F.M. Mueller, and P. Wyder, *Phys. Rev. B* **16**, 1325 (1977).
3. I.K. Yanson and A.G. Batrak, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **76**, 325 (1979) [*Sov. Phys. JETP* **49**, 166 (1979)].
4. I.O. Kulik, A.N. Omelyanchouk, and R.I. Shekhter, *Fiz. Nizk. Temp.* **3**, 1543 (1977) [*Sov. J. Low Temp. Phys.* **3**, 840 (1977)].
5. I.O. Kulik and I.K. Yanson, *Fiz. Nizk. Temp.* **4**, 1267 (1978) [*Sov. J. Low Temp. Phys.* **4**, 596 (1978)].
6. A.A. Lysykh, I.K. Yanson, O.I. Shklyarevskii, and Yu.G. Naidyuk, *Solid State Commun.* **35**, 987 (1980).
7. A.P. van Gelder, *Solid State Commun.* **25**, 1097 (1978).
8. A.I. Akimenko and I.K. Yanson, *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **31**, 209 (1980) [*JETP Lett.* **31**, 191 (1980)].
9. A.G.M. Jansen, A.P. van Gelder, P. Wyder, and S. Strässler, *J. Phys. F* **11**, L15 (1981).
10. Yu.G. Naidyuk, O.I. Shklyarevskii, and I.K. Yanson, *Fiz. Nizk. Temp.* **8**, 725 (1982) [*Sov. J. Low Temp. Phys.* **8**, 362 (1982)].
11. A.I. Akimenko, N.M. Ponomarenko, I.K. Yanson, S. Janoš, and M. Reiffers, *Sov. Phys. Solid State* **26**, 1374 (1984).
12. K.S. Ralls and R.A. Buhrman, *Phys. Rev. Lett.* **60**, 2434 (1988).
13. Yu.G. Naidyuk, M. Reiffers, A.G.M. Jansen, P. Wyder, I.K. Yanson, D. Gignoux, and D. Schmitt, *Int. J. Mod. Phys. B*, **7**, 222 (1992).
14. B.I. Verkin, I.K. Yanson, I.O. Kulik, O.I. Shklyarevskii, A.A. Lysykh, and Yu.G. Naidyuk, *Solid State Commun.* **30**, 215 (1979).

15. B.I. Verkin, I.K. Yanson, I.O. Kulik, O.I. Shklyarevski, A.A. Lysykh, and Yu.G. Naidyuk, *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Fiz.* **44**, 1330 (1980).
16. R.W. van der Heijden, H.M. Swartjes, and P. Wyder, *Phys. Rev. B* **30**, 3513 (1984).
17. I.K. Yanson, O.P. Balkashin, Yu.A. Pilipenko, *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **41**, 304 (1985) [*JETP Lett.* **41**, 373 (1985)].
18. G.E. Blonder, M. Tinkham, and T.M. Klapwijk, *Phys. Rev. B* **25**, 4515 (1982).
19. Yu.G. Naidyuk and K. Gloos, *Solid State Commun.* **184**, 29 (2014).
20. I.K. Yanson, Yu.G. Naidyuk, D.L. Bashlakov, V.V. Fisun, O.P. Balkashin, V. Korenivski, A. Konovalenko, and R.I. Shekhter, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 186602 (2005).
21. I.K. Yanson, Yu.G. Naidyuk, V.V. Fisun, A. Konovalenko, O.P. Balkashin, L.Y. Triputen, and V. Korenivski, *Nano Lett.* **7**, 927 (2007).
22. Nicolas Agrait, Alfredo Levy Yeyati, and Jan M. van Ruitenbeek, *Phys. Rep.* **377**, 81 (2003).
23. G.V. Kamarchuk, O.P. Pospelov, A.V. Yeremenko, E. Faulques, and I.K. Yanson, *Europhys. Lett.* **76**, 575 (2006).
24. A.G.M. Jansen, A.P. van Gelder, and P. Wyder, *J. Phys. C* **13**, 6073 (1980).
25. I.K. Yanson, *Fiz. Nizk. Temp.* **9**, 676 (1983) [*Sov. J. Low Temp. Phys.* **9**, 343 (1983)].
26. I.K. Yanson and O.I. Shklyarevskii, *Fiz. Nizk. Temp.* **12**, 899 (1986) [*Sov. J. Low Temp. Phys.* **12**, 509 (1986)].
27. A. Duif, A.G.M. Jansen, and P. Wyder, *J. Phys.: Condens. Matter* **1**, 3157 (1989).
28. Yu.G. Naidyuk and I.K. Yanson, *J. Phys.: Condens. Matter* **10**, 8905 (1998).
29. A.V. Khotkevich and I.K. Yanson, *Atlas of Point-Contact Spectra of Electron-Phonon Interaction in Metals*, Kluwer Academic Publishers, Boston (1995).
30. Yu.G. Naidyuk and I.K. Yanson, *Point-Contact Spectroscopy, Springer Series in Solid-State Sciences*, Springer Science+Business Media, Inc (2005), Vol. 145.

Ю.Г. Найдюк