

УДК 538.915

*А. М. Чекушкин^{1,2}, М. А. Тарасов¹, Р. А. Юсупов^{1,2}, В. С. Эдельман³,
А. А. Гунбина⁴*

¹Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН

²Московский физико-технический институт (государственный университет)

³Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН

⁴Институт прикладной физики РАН

Влияние ловушек из нормального металла, андреевского отражения и эффекта близости на охлаждение сверхпроводника в СИНИС-структурах

Экспериментально исследованы болометры структуры сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник (СИНИС). Подводящие электроды из нормального металла к такой структуре должны выполнять функции ловушек горячих квазичастиц, т.е. теплоотвода. Обнаружено, что теплоотводы из палладия в непосредственной близости со сверхпроводником уменьшают эффективный объем сверхпроводящего алюминия и приводят к его перегреву. Исследована аналогичная серия образцов с подводящими электродами из золота. В этом случае при контакте сверхпроводящего алюминия с золотом на границе образуется барьер, который препятствует подавлению энергетической щели сверхпроводника, однако такая ловушка не улучшает теплоотвод. Поскольку исследованные ловушки из нормального металла не обеспечивают достаточного охлаждения, была сделана оценка перегрева в зависимости от объема сверхпроводника. По нашим оценкам в образце с объемом сверхпроводящего алюминия 14 мкм³ перегрев практически отсутствует по сравнению с образцом с объемом сверхпроводника 0.2 мкм³ с перегревом до 480 мК от фоновой температуры 280 мК. Показано, что для улучшения охлаждения сверхпроводника наиболее эффективным методом является увеличение объема сверхпроводящего алюминия, что способствует разбавлению горячих квазичастиц и уменьшению перегрева.

Ключевые слова: ловушка из нормального металла, андреевское отражение, эффект близости, СИН-переход, болометры.

*A. M. Chekushkin^{1,2}, M. A. Tarasov¹, R. A. Yusupov^{1,2}, V. S. Edelman³,
A. A. Gunbina⁴*

¹V.Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS

²Moscow Institute of Physics and Technology (State University)

³P.Kapitza Institute for Physical Problems RAS

⁴Institute of Applied Physics RAS

Influence of normal metal traps, Andreev reflection and proximity effect on superconductor cooling in SINIS-structures

Bolometers of superconductor–insulator–normal metal–insulator–superconductor (SINIS) structure are fabricated and investigated. Wiring normal metal electrodes to such structure should function as normal metal traps, i.e. heat sink. It is observed that the palladium heat sink placed close to a superconductor reduces the effective volume of superconducting aluminum and leads to its overheating. Similar samples with golden electrodes are fabricated for comparison. In this case, a specific barrier is formed on

the Al-Au interface. This barrier prevents the suppression of an energy gap, but does not improve heat removal. The investigated normal metal traps do not provide enough cooling and thus studies of the overheating dependence on the superconductor volume are performed. In samples with Al volume of $0.2 \mu\text{m}^3$, we estimate overheating up to 480 mK, whereas the phonon temperature is 280 mK compared to no visible overheating for $14 \mu\text{m}^3$ Al volume. According to these results the effective method of cooling the superconductor electrode is to increase the volume which leads to dilution of hot quasiparticles and reducing the overheating.

Key words: normal metal trap, Andreev reflection, proximity effect, SIN-junction, bolometers.

1. Введение

Одной из актуальных задач в настоящее время является охлаждение сверхпроводника в таких структурах, как СИНИС-болометры (сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник), электронные охладители и криогенные термометры. Перегрев сверхпроводника сопровождается ухудшением предельных характеристик таких структур: понижением сверхпроводящей щели, обратным туннелированием горячих квазичастиц в нормальный электрод и повышением электронной температуры абсорбера. В случае ограниченной площади сверхпроводящих электродов применяют т.н. сверхпроводящие ловушки и стоки (trap and drain), представляющие собой пленки нормального металла, расположенные сверху и снизу от сверхпроводника и отделенные от него некоторым потенциальным барьером. Существует мнение, что ловушку из нормального металла можно наносить непосредственно на сверхпроводящий электрод, но в этом случае возникают сразу две проблемы: подавление сверхпроводимости обратным эффектом близости и андреевское отражение от границы раздела сверхпроводник–нормальный металл (СН). Была изготовлена серия образцов СИНИС-болометров и проведены измерения энергетической щели СИН-переходов в зависимости от размеров сверхпроводника, наличия непосредственного контакта с нормальным металлом и расстояния от этой границы до туннельного перехода.

2. Конфигурация исследуемой структуры

Схематичное изображение и фотографии СИНИС-болометра, исследуемого в данной работе, представлены на рис. 1.

Изготовление тестовых структур проходит за два технологических цикла: а) контактные площадки и электроды из нормального металла (трехслойка Ti/Au/Pd), б) изготовление непосредственно самого болометра. В качестве поглотителя (абсорбера) используется нормальный металл, в данном случае алюминий, с подавлением сверхпроводящих свойств благодаря подслою железа; далее, путем напуска кислорода в камеру, осуществляется окисление алюминия для получения слоя изолятора. Применяя технику теневого напыления (напыление под углами $\pm 45^\circ$) получаем сверхпроводящие электроды из алюминия. Контакты сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник образуют два туннельных СИН-перехода. Напыление болометров происходит без разрыва вакуума. В исследуемых структурах были различные объем сверхпроводника (S), расстояние от СИН-перехода до нормального металла (на рис. 1б обозначено – l) и состав электродов из нормального металла (N). Результаты измерений будут представлены в разделе 4. Изготавливаемые структуры были расположены на одном образце для того, чтобы исключить возможные колебания параметров от технологического цикла.

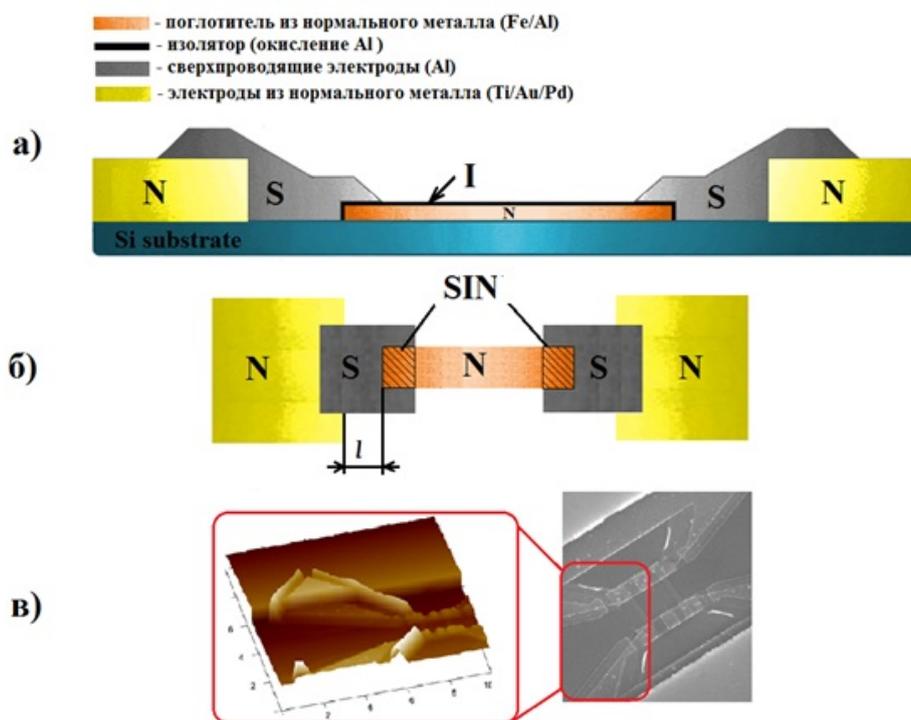


Рис. 1. СИНИС-болومتر: а) схематичное изображение вид сбоку, б) схематичное изображение вид сверху, в) фотография в AFM и SEM

3. Теоретическое обоснование

Температурная зависимость вольт-ваттного отклика пропорциональна $1/T^4$, и при повышении электронной температуры с 280 мК до 500 мК получаем снижение отклика на порядок. Перегрев сверхпроводника в первом приближении происходит за счет мощности постоянного смещения на структуре:

$$P = I \cdot V + P_{cool}, \quad (1)$$

где I , V ток и напряжение смещения, P_{cool} мощность электронного охлаждения. В результате получаем мощность порядка пиковатта на микронный переход при смещении в районе энергетической щели. Если принять, что тепло рассеивается за счет электрон-фононного взаимодействия: $P = \Sigma \nu (T^5 - T_0^5)$, то получим для сверхпроводника объемом $\nu = 2 \cdot 10^{-19} \text{ м}^3$ вклад джоулевого разогрева в электронную температуру $T = (P/\Sigma \nu)^{0.2} = 0.48 \text{ К}$, а для сверхпроводника объемом $\nu = 2 \cdot 10^{-17} \text{ м}^3$ всего 0.19 К. Если фононная температура $T_0 = 0.28 \text{ К}$, то в первом случае получим 0.49 К, а во втором – 0.287 К, т.е. практически без перегрева. Значение постоянной $\Sigma = 2 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^3\text{К}^5$ взяты из [1], где у авторов отношение площади сверхпроводника к площади туннельного перехода 300, тогда как в первом случае мы взяли 3. Поскольку длина свободного пробега и длина когерентности в алюминии достаточно большая, то в большом сверхпроводнике происходит разбавление концентрации горячих квазичастиц с последующим электрон-фононным взаимодействием и уходом фононов в подложку или в близлежащие теплопроводящие нормальные соединительные проводники.

Улучшение охлаждения в [2, 3] подводящих электродов вблизи СИН переходов объясняется специфическим свойством интерфейса Au–Al, который представляет собой интерметаллический компаунд, т.е. может быть описан как туннельный барьер с относительно высокой прозрачностью. Детальное исследование оптимальной прозрачности границы алюминия и нормальной ловушки было проведено в [4–6], где было обнаружено,

что доза окисления обчного туннельного барьера: давление $p = 1.3$ мбар, время окисления $t = 300$ с, тогда как для туннельного барьера СИН-переходов ловушек доза составляет $p = 0.18$ мбар, $t = 1$ с, т.е. отличается на три порядка. По нашему мнению, Al–Au интерфейс представляет собой сравнимый барьер.

Для уточнения этой идеи был изготовлен контрольный образец, в котором стандартная разводка TiAuPd с верхним слоем из палладия была заменена на пленку TiAu, так что верхний слой золота формировал контакт с алюминием (экспериментальные результаты будут представлены в разделе 4 на рис. 5). Помимо подавления энергетической щели и андреевского отражения, еще одним недостатком резистивной разводки типа TiAuPd является низкая теплопроводность таких пленок, в отличие от чистого золота, что дополнительно ухудшает теплоотвод от сверхпроводника и ухудшает параметры устройств.

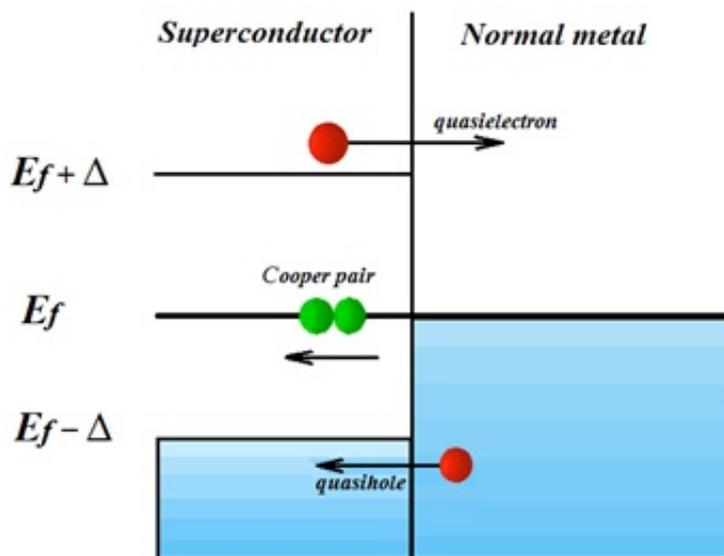


Рис. 2. Энергетическая диаграмма, иллюстрирующая, как горячий квазиэлектрон (красный) с энергией выше щели пересекает SN-границу и сопровождается обратным движением куперовской пары (два зеленых кружочка) и горячей квазидырки (красная) из N электрода. Таким образом, обеспечивается сохранение заряда и энергии

При изготовлении СИНИС-структур обычно в качестве материала разводки и соединительных проводников используют трехслойную комбинацию пленок TiAuPd с верхним слоем палладия. В этом случае палладий находится в непосредственном контакте с алюминием, что приводит к подавлению сверхпроводимости в алюминии и формированию андреевского контакта на границе нормальной и сверхпроводящей частей алюминиевой пленки. Если же раздвинуть на 2–3 мкм положение края туннельного перехода и положение ловушки, то подавление сверхпроводимости в туннельном переходе практически исчезает, а величина двойной энергетической щели возрастает. Теплоотвод от сверхпроводника с использованием нормальной ловушки с непосредственным контактом оказывается менее эффективным, чем в случае СИН-перехода с высокой прозрачностью. Это утверждение можно проиллюстрировать на энергетической диаграмме (рис. 2). Аналогично N-S теплопроводности, в случае S-N границы транспорт горячих квазиэлектронов из S в N сопровождается перемещением в противоположном направлении куперовской пары и квазидырки. В этом случае выполняется сохранение и энергии, и заряда. Процесс можно описать уравнением [2] для теплового потока из S в N:

$$P(T) = \frac{f_0}{2} \cdot S \cdot \left(\frac{2p_0}{h} \right)^2 \frac{k^2}{h} T \sqrt{\pi T \Delta} \exp\left(-\frac{\Delta}{kT}\right) = w_0 S T \sqrt{T \Delta} \exp\left(\frac{\Delta}{kT}\right), \quad (2)$$

где p_0 – импульс Ферми, f_0 – постоянная порядка единицы, S – площадь перехода. Для разности температур δT – результирующий тепловой поток для низких температур

$$Q = A \sqrt{\frac{\Delta^3}{T}} \exp\left(-\frac{\Delta}{kT}\right) \cdot \delta T. \quad (3)$$

Перепад температур δT , определяемый этим уравнением, возникает на каждой границе между сверхпроводником и нормальным металлом. Согласно этому уравнению дополнительное тепловое сопротивление возрастает на 5 порядков при охлаждении до $T_0 = 0.1T_c$.

4. Эксперимент и результаты измерений

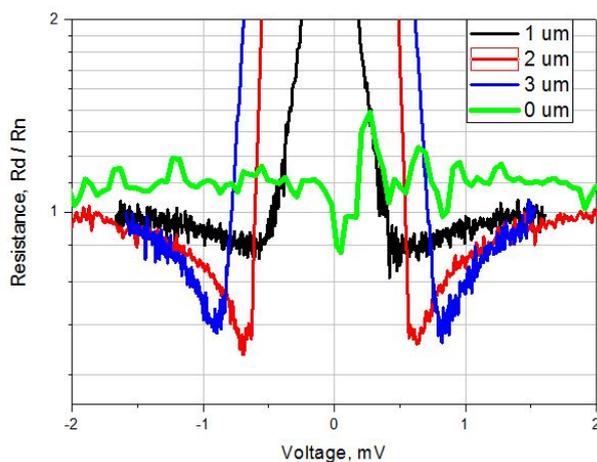


Рис. 3. Дифференциальное сопротивление четырех последовательно соединенных СИН-переходов для образцов с ловушкой из нормального металла на расстоянии 1, 2 и 3 мкм от сверхпроводящего электрода и с непосредственным контактом

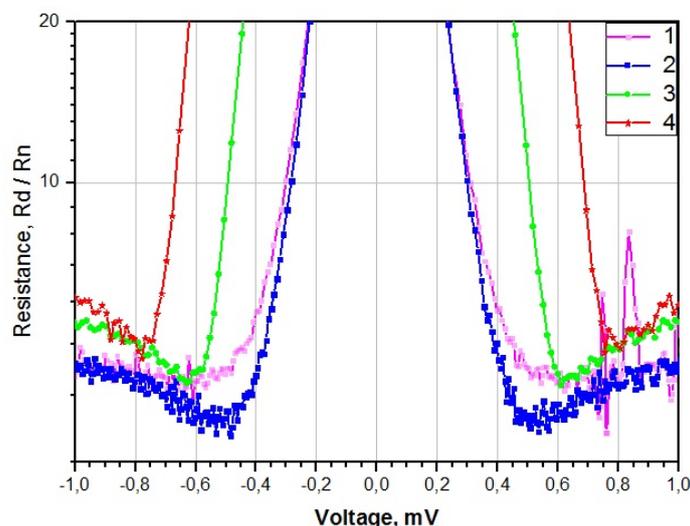


Рис. 4. Зависимости дифференциального сопротивления от напряжения смещения для четырех модельных образцов

Эксперименты проводились на постоянном токе без источников излучения. Образец помещался в закрытый держатель, представляющий собой медное основание, и прижимался стеклотекстолитовой частью с погопинами. Держатель с образцом крепится к холодной плите криостата и подключается к разъему внутри криостата. Измерения проводились при температуре 280 мК – снимали ВАХ и строили дифференциальное сопротивление. Первый эксперимент проводили с образцом, на котором были изготовлены

болометры с различным расстоянием между СИН-переходом и нормальным металлом. Полученные экспериментальные данные приведены на рис. 3. Величина энергетической щели в пересчете на один СИН-переход составляет 0.1 мВ, 0.155 мВ, 0.2 мВ для образцов с ловушкой из нормального металла (обозначены 1–3 на графике). Также была сделана серия образцов, когда ловушка из нормального металла имеет непосредственный контакт со сверхпроводником (при изготовлении таких образцов нормальный металл (палладий) напылялся поверх алюминиевых электродов под углами $\pm 45^\circ$). Из экспериментальных данных на рис. 3 можно сделать вывод, что ловушка из нормального металла с непосредственным контактом со сверхпроводником не способствует охлаждению сверхпроводящего электрода, но при этом может заметно подавить щель сверхпроводника как за счет обратного эффекта близости, так и за счет джоулева разогрева малого объема сверхпроводника. Помимо этого, участок с подавленной щелью существенно уменьшает площадь сверхпроводящего электрода. Для последующего эксперимента были изготовлены и измерены образцы с различным объемом сверхпроводящего алюминия и различным расстоянием между СИН-переходом и ловушкой из нормального металла. Дифференциальные сопротивления этих образцов приведены на рис. 4, нумерация на графике следующая:

- 1 – сверхпроводящие электроды лежат на трехслойке Ti/Au/Pd, расстояние до нормальной ловушки 2 мкм;
- 2 – конфигурация аналогична первой, но сверхпроводящие электроды лежат на тонком слое из Ti/Pd. В первом и во втором случаях отношение площади сверхпроводящего алюминия к площади СИН-перехода (S_{Al}/S_{SIN}) составляет всего 3;
- 3 – в структуре была значительно увеличена площадь сверхпроводящего алюминия, сверхпроводящий электрод лежит на двухслойке Ti/Pd, но расстояние от СИН-перехода до нормального металла такое же, как и в предыдущих двух случаях;
- 4 – в этом случае имеем большую площадь сверхпроводящего алюминия ($S_{Al}/S_{SIN} = 200$), расстояние от СИН-перехода до нормального металла – 5 мкм.

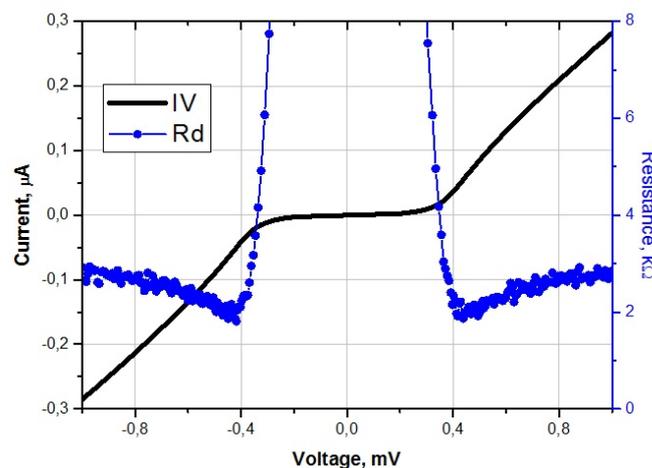


Рис. 5. ВАХ и дифференциальное сопротивление для СИНИС-болометра с контактом алюминий–золото между тепловым стоком и сверхпроводящим электродом

Худший результат (2) с энергетической щелью $V_{\Delta} = 127$ мкВ получен для нормальной ловушки вблизи туннельного перехода, а лучший результат (4) – $V_{\Delta} = 200$ мкВ для структуры с большой площадью сверхпроводника, без нормальной ловушки в непосредственной близости от СИН-перехода.

Лучший результат получается при отсутствии ловушки из нормального металла в непосредственной близости и при наличии большого объема алюминия. Для этой

наиболее удачной конфигурации была изготовлена партия образцов, но стандартная трехслойка для подводящих проводов из Ti/Au/Pd была заменена на пленку Ti/Au. Из полученных экспериментальных данных, представленных на рис. 5, можно сделать вывод, что непосредственный контакт с золотом не ухудшил величину энергетической щели и качество перехода, т.е. интерфейс алюминий–золото можно использовать в качестве барьера для ловушки из нормального металла.

5. Заключение

Были изготовлены и измерены три серии образцов для исследования влияния ловушек из нормального металла в СИНИС-болометрах. По полученным данным можно сделать вывод, что ловушка из нормального металла не улучшает охлаждение СИНИС-структуры, но может негативно влиять на основные характеристики структур. Экспериментально было показано, что непосредственная близость такой ловушки подавляет сверхпроводящую щель. Увеличение площади сверхпроводящего алюминия способствует разбавлению горячих квазичастиц в нем, а следовательно, обеспечивает лучшее охлаждение структуры. Было показано, что в случае контакта сверхпроводящего алюминия с золотом не деградируют свойства сверхпроводника.

Литература

1. *O'Neil G.C., Lowell P.J., Underwood J.M., Ullom J.N.* Measurement and modeling of a large-area normal-metal/insulator/superconductor refrigerator with improved cooling // *Phys. Rev. B.* 2012. V. 85. P. 134504. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.85.134504>.
2. *Tarasov M., Kuzmin L., Fominsky M., Agulo I., Kalabukhov A.* Electron cooling in a normal-metal hot-electron bolometer // *JETP Letters.* 2003. V. 78. N 11. P. 714. PACS numbers: 07.57.Kp; 74.50.+r
3. *Kuzmin L., Agulo I., Fominsky M., Savin A., Tarasov M.* Optimization of electron cooling by SIN tunnel junctions // *Supercond. Sci. Technol.* 2004. S400-S405. DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/17/5/062>
4. *Pekola J., Anghel D., Suppala T.* Trapping of quasiparticles of a nonequilibrium superconductor // *Appl. Phys. Lett.* 2000. V. 76. N 19. P. 2782. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.126474>
5. *Nguyen H., Pascal L., Peng Z. [et al.].* Sub-50-mK Electronic Cooling with Large-Area Superconducting Tunnel Junctions // *Rev. Phys. Appl.* 2014. V. 2. P. 054001. DOI: [10.1103/PhysRevApplied.2.054001](https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.2.054001)
6. *Nguyen H., Aref T., Kauppila V. [et al.].* Trapping hot quasi-particles in a high-power superconducting electronic cooler // *New Journal of Physics.* 2013. V. 15. P. 085013. DOI: [10.1088/1367-2630/15/8/085013](https://doi.org/10.1088/1367-2630/15/8/085013)
7. *Андреев А.Ф.* Теплопроводность промежуточного состояния сверхпроводников. *ЖЭТФ.* 1964. Т. 46. С. 1823.
8. *Tarasov M., Edelman V., Mahashabde S., Kuzmin L.* Optical Response of Superconductor–Insulator–Normal Metal–Insulator–Superconductor Tunnel Structures // *JETP.* 2014. V. 119. N 1. P. 107. DOI: [10.1134/S106377611406020X](https://doi.org/10.1134/S106377611406020X)

References

1. *O'Neil G.C., Lowell P.J., Underwood J.M., Ullom J.N.* Measurement and modeling of a large-area normal-metal/insulator/superconductor

- refrigerator with improved cooling. *Phys. Rev. B*. 2012. V. 85. P. 134504. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.85.134504>.
2. *Tarasov M., Kuzmin L., Fominsky M., Agulo I., Kalabukhov A.* Electron cooling in a normal-metal hot-electron bolometer. *JETP Letters*. 2003. V. 78. N 11. P. 714. PACS numbers: 07.57.Kp; 74.50.+r
 3. *Kuzmin L., Agulo I., Fominsky M., Savin A., Tarasov M.* Optimization of electron cooling by SIN tunnel junctions. *Supercond. Sci. Technol.* 2004. S400-S405. DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/17/5/062>
 4. *Pekola J., Anghel D., Suppala T.* Trapping of quasiparticles of a nonequilibrium superconductor. *Appl. Phys. Lett.* 2000. V. 76. N 19. P. 2782. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.126474>
 5. *Nguyen H., Pascal L., Peng Z. [et al.]*. Sub-50-mK Electronic Cooling with Large-Area Superconducting Tunnel Junctions. *Rev. Phys. Appl.* 2014. V. 2. P. 054001. DOI: [10.1103/PhysRevApplied.2.054001](https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.2.054001)
 6. *Nguyen H., Aref T., Kauppila V. [et al.]*. Trapping hot quasi-particles in a high-power superconducting electronic cooler. *New Journal of Physics*. 2013. V. 15. P. 085013. DOI: [10.1088/1367-2630/15/8/085013](https://doi.org/10.1088/1367-2630/15/8/085013)
 7. *Andreev A.* The Thermal Conductivity of the Intermediate State in Superconductors. *JETP*. 1964. V. 46. P. 1823.
 8. *Tarasov M., Edelman V., Mahashabde S., Kuzmin L.* Optical Response of Superconductor–Insulator–Normal Metal–Insulator–Superconductor Tunnel Structures. *JETP*. 2014. V. 119. N 1. P. 107. DOI: [10.1134/S106377611406020X](https://doi.org/10.1134/S106377611406020X)

Поступила в редакцию 19.03.2018