

УДК 538.9

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ШУМЫ В ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОЛОКАХ

Ф.В. ГАСПАРЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

e-mail: fgaspar@ysu.am

(Поступила в редакцию 27 июня 2018 г.)

Изготовлены металлические микроразмерные проволоки из золота, серебра и меди с различными размерами. Исследованы ВАХ, низкочастотные шумы, а также характер и зависимость спектральной плотности шумов от типа и размеров металлов и контактов. Показано, что спектральная плотность низкочастотного шума сильно зависит от размеров образца. Она растет с уменьшением диаметра проволоки и с ростом длины образца. Зависимость спектральной плотности низкочастотного шума показывает, что он имеет контактный характер, а спектральная плотность шума пропорциональна квадрату сопротивления контакта.

### 1. Введение

Металлические микро- и наноразмерные проволоки и ленты, используемые для осуществления гальванической связи между функциональными элементами в микро- и нанoeлектронике, должны обладать как высокой проводимостью, так и не должны влиять на основные электрофизические параметры приборов. Для электронных приборов особое значение имеет отношение сигнал/шум ( $S/N$ ). Тенденция развития современной микро- и нанoeлектроники характеризуется многими ограничениями как на электрофизические и технологические, так и на геометрические параметры и конструкцию приборов. Ограничение на мощность осуществляется уменьшением полезного сигнала – тока. При слабых уровнях сигнала для достижения большого значения отношения сигнал/шум необходимо уменьшить уровень токовых шумов. Известно, что шумы металлических проволок пропорциональны сопротивлению [1–3]. Характеризация шума с  $1/f$ -подобным спектром также называемым избыточным или фликкер-шумом является одной из наиболее важных проблем современной радиофизики. Причина в том, что с одной стороны, характер этих колебаний остается отчасти малоизвестным, хотя возможные механизмы происхождения

обсуждались в научной литературе на протяжении многих десятилетий [1–9]. С другой стороны, этот шум ограничивает чувствительность и влияет на стабильность многих электронных устройств, требования к которым постоянно повышаются. В последнее время резко возрос интерес к  $1/f$ -шуму в тонких металлических пленках и проволоках, что объясняется их широким применением в различных областях физики и техники, особенно в современной микро- и нанoeлектронике, которая предъявляет высокие требования к тонким пленкам и проволокам в производственных коммутационных слоях, резисторах и контактах для интегральных микросхем. Этот вопрос стал весьма важным при продолжающемся уменьшении размеров.

Область применения молекулярных переходов охватывает также молекулярные проволоки. Электрические свойства переходов с одиночными молекулами обычно исследуются посредством регулирования расстояния между двумя металлическими электродами с помощью механически управляемых обрывных переходов (МСВJ) [10–13], сканирующего туннельного микроскопа [14] или атомно-силового микроскопа [15]. Как показано в работе [12], размеры металлических проволочных контактов сильно влияют на вольт–амперные характеристики (ВАХ) молекулярного перехода. Механизм электропроводности в разрывных металлических пленках и проволоках был предметом исследования многих работ [4–7, 16–18], авторы которых столкнулись с проблемой объяснения таких особенностей, как аномально большое удельное сопротивление, отрицательный тепловой коэффициент удельного сопротивления и наличие нового компонента токового шума, отсутствующего в объемных металлических образцах. Только при чрезвычайно высокой плотности тока на очень тонких сплошных металлических пленках обнаружен небольшой токовый шум, имеющий  $1/f$ -спектр [4]. Однако этот шум имеет совершенно иное происхождение, чем тот, который наблюдается в разрывных пленках. Модель механизма проводимости в разрывных металлических пленках, объясняющая происхождение флуктуаций проводимости этих пленок, и экспериментальные результаты, касающиеся шума проводимости прерывистых пленок золота в широком диапазоне температур, представлена в работе [16]. Детальный обзор вопросов, касающихся  $1/f$ -флуктуаций тока в сопротивлениях из конденсированных веществ, особенно металлов, представлен в работе [7].

Недавно нами изучены транспортные свойства голых и функционируемых с органическими молекулами BDT (benzene-1,4-dithiol) золотых наноконструкций с использованием низкочастотной шумовой спектроскопии [18]. Проанализированы зависимости нормализованной спектральной плотности шума  $S_I / I^2$  ( $S_I$  – спектральная плотность шума,  $I$  – ток) для широкого диапа-

зона сопротивлений образцов. Выявлена характерная зависимость  $S_I / I^2$  как функция сопротивления системы. Для трех транспортных режимов (диффузионного, баллистического и туннельного) разработаны модели, описывающие поведение шума как для голых наноразмерных образцов золота, так и функционализованных молекул BDT.

Как известно, для однородных металлов и полупроводников флуктуацию сопротивления можно представить следующим образом [4]:

$$\left\langle \left( \frac{\Delta R}{R} \right)^2 \right\rangle = \left\langle \left( \frac{\Delta G}{G} \right)^2 \right\rangle = \frac{\alpha \Delta f}{Nf} \equiv C \frac{\Delta f}{f}, \quad (1)$$

где  $R$  – сопротивление,  $G$  – проводимость,  $f$  – частота,  $\Delta f$  – полоса частот,  $\alpha = 2 \times 10^{-3}$  – безразмерная постоянная,  $N$  – полное число свободных электронов и  $C \equiv \alpha / N$ .

Хорошо известно, что когда происхождение  $1/f$ -шума в металлических лентах и проволоках связано с объемными эффектами  $C \propto R$  [5], в случае поверхностных эффектов  $C \propto R^2$  [5], в случае же превалирования контактных явлений  $C = R_c^3$  [1, 6], где  $R_c$  – сопротивление контакта.

Настоящая работа посвящена исследованию низкочастотных шумов металлических тонких проволок из золота, серебра и меди с целью выявления влияния типа и размеров (диаметра и длины) проволок, а также влияние контактов на поведение и характер низкочастотных шумов.

## 2. Образцы и методы измерений

Были изготовлены металлические тонкие проволоки из золота, серебра и меди с различными диаметрами и длиной. Исследованы ВАХ и низкочастотные шумы этих проволок.

Установка для измерения шумов приведена на рис.1. Она состоит из источника питания с низким уровнем собственных шумов (источник постоянного напряжения 9 В), который обеспечивает постоянный ток через образец. Образцы с различными длиной (4, 6 и 8 мм) и диаметром (25, 50, 80 и 250 мкм) приклеены к контактной площадке с площадью  $5 \times 5$  мм<sup>2</sup> токопроводящим клеем марки «Контактол». Образцы размещены в изолированном от внешнего электромагнитного влияния пермалловом ящике. Измерительная часть состоит из усилителя (Model-5184 Preamplifier) и работающего с операционной системой Windows 7 спектрального Фурье-анализатора (Handyscope 3, TiePieEngineering). Данные, полученные от спектрального анализатора, передаются в компьютер и обрабатываются при помощи программы LabView. Все измерения проведены при комнатной температуре.

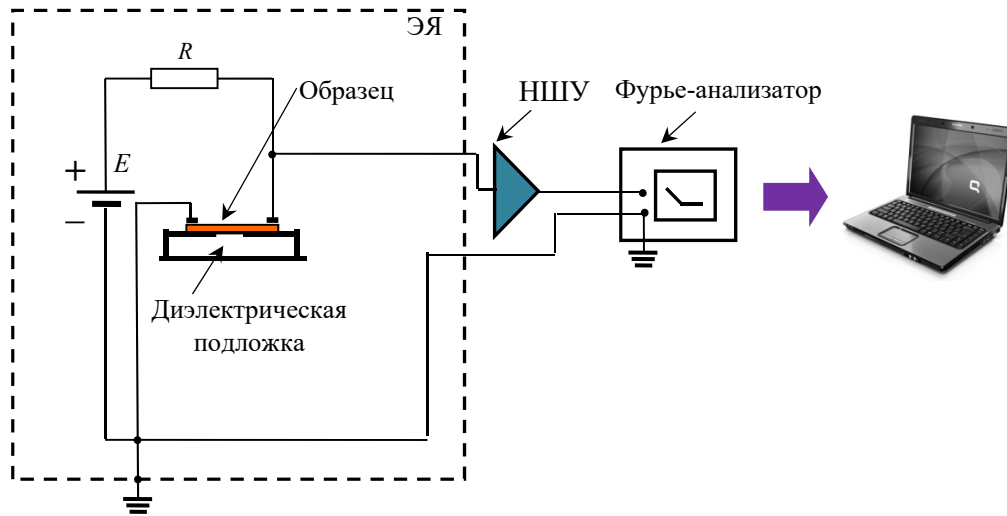


Рис.1. Экспериментальная установка для измерения шума: ЭЯ-экранированный ящик, НШУ – низкошумящий усилитель,  $E$  – источник постоянного тока и  $R$  – нагрузочное сопротивление.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

#### 3.1. Вольтамперные характеристики

Измерения ВАХ проводились подключением к электродам проволоки управляемых источников ЭДС или тока, с помощью измерительных приборов вольтметра и амперметра измеряются напряжения и токи в цепи проволоки при различных значениях ЭДС или тока источников.

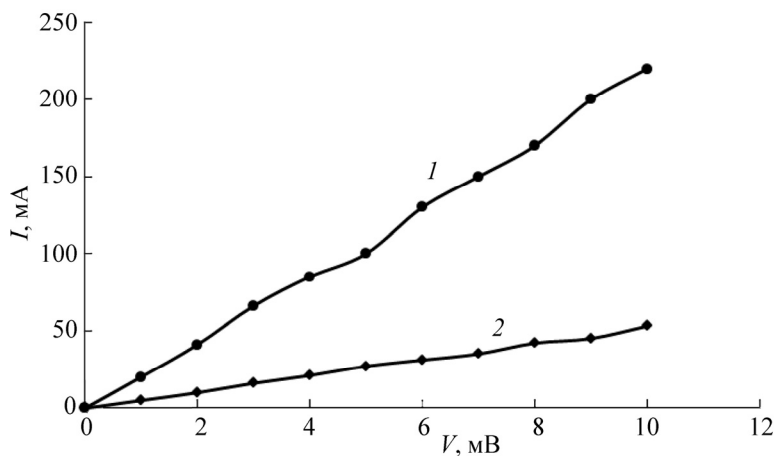


Рис.2. ВАХ проволок из Au длиной 4 мм и диаметрами 50 (1) и 25 (2) мкм.

Типичные ВАХ представлены для проволок из Au на рис.2 и 3 (чистота золота была 99.99). ВАХ описываются законом Ома

$$I = \frac{V}{R} = \frac{VA}{\rho L} = \frac{\pi D^2 V}{4\rho L}, \quad (2)$$

где  $I$  – ток,  $V$  – приложенное напряжение,  $\rho$  – удельное сопротивление,  $L$  – длина,  $D$  – диаметр и  $A$  – площадь поперечного сечения проволоки.

С ростом диаметра и уменьшением длины образцов ток через проволоки растет линейно (рис.2 и 3). ВАХ проволок из Ag и Cu также линейные.

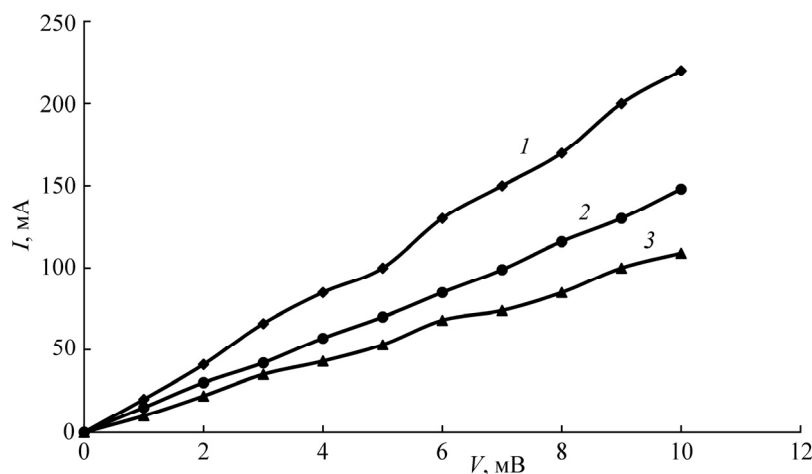


Рис.3. ВАХ проволок из Au диаметром 50 мкм. Длина образцов составляла 4 (1), 6 (2) и 8 мм (3).

### 3.2. Низкочастотные шумы

Проведено измерение низкочастотных шумов металлических проволок в области частот 0.5–500 Гц при комнатной температуре. Результаты представлены для образцов из Au на рис.4 и 5. Шумы состоят как из фликкер, так и теплового и контактного шумов. Для контактного шума наиболее важной переменной является контактное сопротивление  $R_c$ , само по себе зависящее от нескольких факторов. В некоторых случаях контактный шум пропорционален  $R_c$ , а в других случаях он изменяется пропорционально более высокой степени  $R_c$ , т. е.  $R_c^2$  или  $R_c^3$ . Эти зависимости детально исследованы в работах [1–3, 19]. В полученных нами результатах ролью контактного шума нельзя пренебречь, несмотря на то, что в наших измерениях металлические проволоки приклеены к контактным площадкам проводящим клеем. Начиная с частот 100–200 Гц фликкер-шум вместе с контактным шумом экранируется тепловым шумом и уровень шумов выходит на плато.

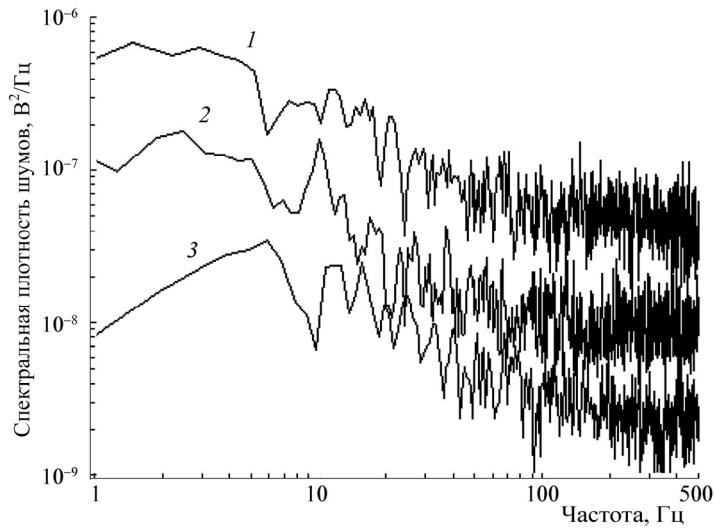


Рис.4. Спектральная плотность шумов проволоки из Au диаметром 50 мкм при токе 75 мА и температуре 300 К. Длина образцов составляла 8 (1), 6 (2) и 4 мм (3).

С ростом длины образцов спектральная плотность шумов растет как для золотых (рис.4), так и для проволок из серебра и меди. Результаты измерений токового шума серебряных тонкопленочных резисторов длиной 7000, 100, 30 и 1 мкм в зависимости от тока и температуры, приведенные в работе [9], также показали, что с ростом длины резисторов от 50 нм до 10 мм нормированная спектральная плотность токовых шумов  $S_I / 2eI$  растет от значения 1/3 до

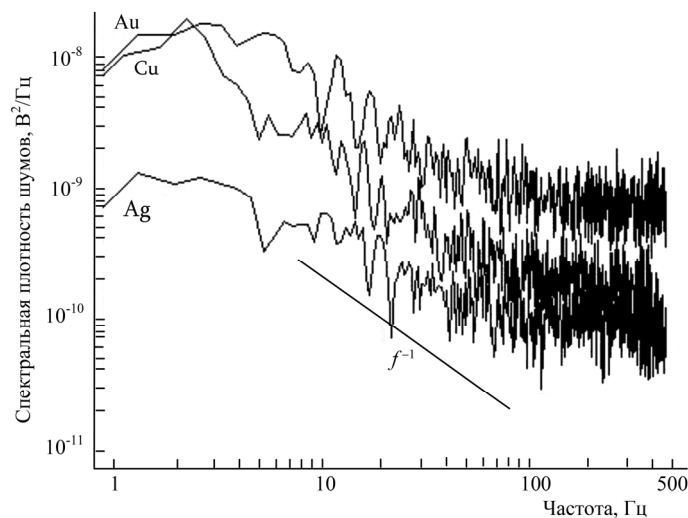


Рис.5. Спектральная плотность шумов проволоки из Ag, Au и Cu диаметром в 50 мкм и длиной 4 мм, измеренная при токе 75 мА и температуре 300 К.

$\sqrt{3}/4$ . Как следует из результатов наших измерений, спектральная плотность шумов проволок из Ag меньше, чем из Cu и Au. Это связано с тем, что при комнатной температуре удельная проводимость Ag больше, чем у Cu и Au [20] ( $\sigma_{\text{Ag}} = 6.2 \times 10^7$ ,  $\sigma_{\text{Cu}} = 5.85 \times 10^7$  и  $\sigma_{\text{Au}} = 4.42 \times 10^7 \text{ } \Omega^{-1}\text{м}^{-1}$ ). Вследствие этого при постоянном токе плотность шумов больше у золотых проволок (рис.5).

На рис.6 представлена зависимость спектральной плотности шумов от диаметра образцов проволоки из Au длиной 4 мм. Рост уровня шумов с уменьшением диаметра проволок был ожидаемым, поскольку  $S_V \propto R^m \propto 1/D^{2m}$ . Такое поведение шумов наблюдалось также в тонких пленках из Au, когда шум растет с уменьшением толщины пленок [5].

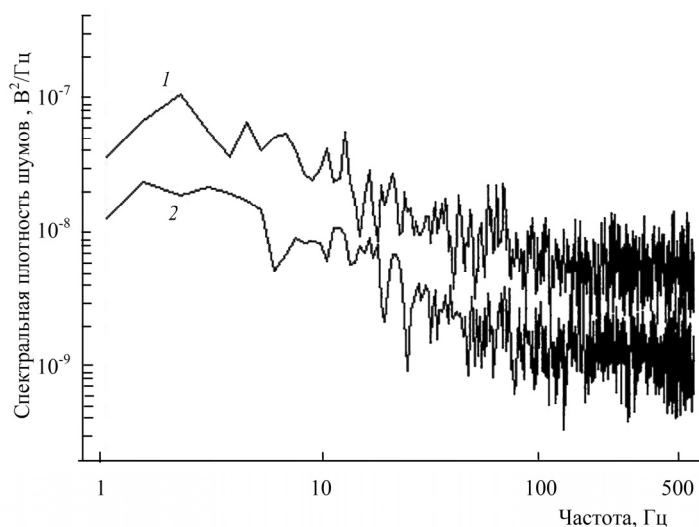


Рис.6. Частотная зависимость спектральной плотности шумов проволок из Au длиной 4 мм при токе 75 мА и температуре 300 К, диаметре образцов. Кривые соответствуют случаям 25 (1) и 50 мкм (2).

На рис.7 представлена зависимость нормированной плотности шумов от сопротивления и длины проволоки из Au диаметром 50 мкм при разных частотах и постоянном токе (75 мА). Кривые построены с использованием данных рис.4. В отличие от результатов работы [9], мы наблюдали более сильную степенную зависимость  $S_V(L)$ , что может быть связано с проявлением зависимости шумов от сопротивления  $S_V \propto R^m \propto L^m$ , где степень  $m$  изменяется от 1 до 3 [1, 5, 6]. Сравнение рис.7 с данными работы [1] (для Au) показывают, что в нашем случае значение степени  $m$  также близко к 3, с ростом частоты значение  $m$  уменьшается и приближается к 2 (ср. кривые для 20 и 500 Гц). Низкие значения  $m$  могут быть обусловлены тем, что в отличие от работе [1], где исследованы металлические контакты, в наших экспериментах контакты были созданы органическим клеем. Можно утверждать, что до частот 100–200 Гц имеем дело

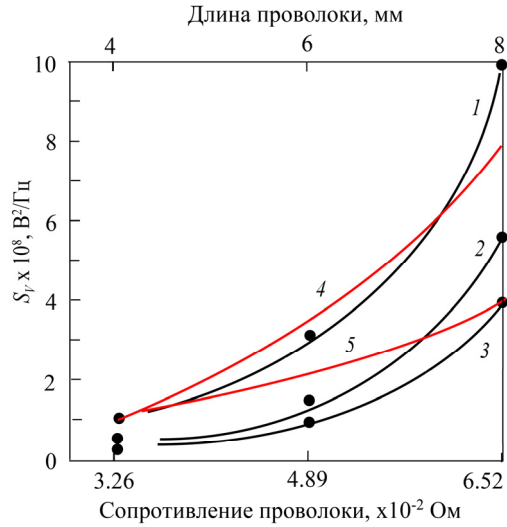


Рис.7. Зависимость нормированной плотности шумов от длины проволоки из Au с диаметром 50 мкм при разных частотах: 20 (1), 100 (2) и 500 Гц (3). Для сравнения приведены также квадратичный (4) и кубический (5) законы.

с шумом, имеющим  $1/f$ -спектр, выше 200 Гц спектры  $1/f$ , тепловых, поверхностных и контактных шумов перекрываются и экранируются тепловым шумом. При таком представлении можно понять расхождение степени  $m$  в зависимости  $S_v \propto R^m \propto L^m$  от единицы, характерное для теплового шума  $S_{v,T} = 4k_B TR \propto R$ . Заметим, что большую роль в формировании шумов в наших образцах играют контакты. Отметим также, что нами использованы проволоки заводского производства и их поверхность дополнительно не обрабатывалась, а качество контактов зависело от добротности используемого контактного клея. Можно считать, что построенные на основе опытных данных кривые удовлетворительно описываются предсказанной в работах [1–3] теорией.

Как видно из рис.4–6 уровень шумов принимает довольно большое значение по сравнению с массивными образцами. Увеличение уровня шумов при уменьшении размеров образцов наблюдалось многократно [20]. Рост шумов можно объяснить следующим образом. Для  $1/f$ -компоненты шума  $S_{v,1/f} \propto N^{-1} \propto (LA)^{-1}$ , так что при уменьшении размеров  $L$  и  $A$  спектральная плотность увеличивается. В каждом проводнике электрического тока, который имеет активное сопротивление, возникает тепловой шум, обусловленный хаотическим движением носителей заряда. Для объяснения высокого уровня теплового шума следует отметить, что спектр теплового шума зависит от размеров проволоки как  $S_{v,T} = 4k_B TR \propto R \propto L / D^2$ , так что, если с уменьшением длины  $S_{v,T}$  уменьшается, то уменьшение  $D$  приводит к более сильному, квадратичному росту уровня теплового шума. Поэтому, если размеры образца уменьшаются во всех направлениях, то спектральная плотность теплового шума  $S_{v,T}$



тоже должна расти. В области частот 10–100 Гц степень частотой зависимости шумов  $\gamma \approx 1$ .

Определим характер измеренного нами шума и выясним его природу. Проведем численные оценки спектральной плотности шумов. Для этого необходимо учитывать, что полное электрическое сопротивление, шум которого измерялся, состоит из сопротивления проволоки  $R$  и сопротивления последовательно соединенных двух контактов  $R_c$ , т. е.  $(R + 2R_c)$ . В этом случае, используя формулу Хуга для низкочастотного шума, можем написать, что

$$S_V = \frac{\alpha V^2}{Nf} = \frac{\alpha R^2 I^2}{nL Af} \left(1 + \frac{2R_c}{R}\right)^2 = \frac{\alpha e \bar{v} \rho^2 LI}{f A^2} \left(1 + \frac{2R_c}{R}\right)^2, \quad (3)$$

где  $\bar{v} = \sqrt{k_B T / m}$  – средняя тепловая скорость электронов в металле. Подставим следующие значения параметров для проволок из Au при комнатной температуре:  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  А.с;  $\bar{v} = 1.17 \times 10^7$  см/с;  $f = 20$  Гц;  $\rho = (\sigma_{Au})^{-1} = 2.26 \times 10^{-6}$  Ом см;  $L = 0.8$  см;  $I = 0.075$  А;  $D = 25 \times 10^{-4}$  см;  $A = \pi D^2 / 4 = 4.9 \times 10^{-6}$  см<sup>2</sup>. Тогда для  $S_V$  получаем:

$$S_V = 2.38 \times 10^{-18} \left(1 + \frac{2R_c}{R}\right)^2 \text{ В}^2/\text{Гц}. \quad (4)$$

Для значений  $S_V \propto (10^{-8} - 10^{-7}) \text{ В}^2/\text{Гц}$ , соответствующих нашим измерениям (см. рис.4–6), необходимо потребовать, чтобы

$$\left(1 + \frac{2R_c}{R}\right)^2 \propto 10^8 - 10^{10}.$$

Это равносильно значению сопротивления контакта

$$R_c \propto R \sqrt{(10^8 - 10^{10})} = 10^4 - 10^5 \text{ Ом}.$$

Наблюдаемые большие уровни измеренного шума могут являться причиной больших значений  $R_c$ , и можно с уверенностью утверждать, что измеренный нами шум, в основном, имеет контактный характер. Как видно из выражения (3)  $S_V \propto R_c^2$ , т. е. если плотность шума представим в виде  $S_V = \alpha V^2 / Nf$ , то зависимость  $S_V(R_c)$  получается более слабой, чем наблюдалось в работах [1, 6]. В наших измерениях наблюдалась именно такая слабая зависимость (см. рис.7). Такое расхождение в зависимости  $S_V(R_c)$  можно объяснить тем, что в работах [1, 6] контакты были металлические, а в нашем случае использован проводящий клей. В то же время в работе [19] отмечается квадратичная зависимость и в металлах. Таким образом, использование органического клея приводит к ослаблению зависимости  $S_V(R_c)$  и как видно из рис.7  $2 < m \leq 3$ .

#### 4. Заключение

Таким образом, измерение низкочастотных шумов металлических микроразмерных проволок с контактами, изготовленными высокопроводящим органическим клеем марки «Контактол» показало, что спектральная плотность низкочастотного шума, в основном, имеет контактный характер, проявляющийся в квадратичной зависимости величины шума от сопротивления контакта. В отличие от случая металлических контактов зависимость  $S_V(R_c)$  ослабляется, а именно:  $S_V \propto R_c^2$ . Плотность шума сильно зависит также от свойств исследуемых металлов – проводимости и геометрических размеров. Уровень шумов увеличивается с ростом длины и уменьшается с ростом диаметра проволоки. Уменьшение длины проволоки способствует облегчению выполнения условия  $S/N > 1$ .

Автор признателен Г. Хондкаряну и А. Аракеляну за помощь в проведении измерений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. F.N. Hooge. *Physica*, **60**, 130 (1972).
2. F.N. Hooge, A.M.H. Hoppenbrouwers. *Phys. Lett.*, **29A**, 642 (1969).
3. A.M.H. Hoppenbrouwers, F.N. Hooge. *Philips Res. Repts.*, **25**, 69 (1970).
4. F.N. Hooge. *Phys. Lett.*, **29A**, 139 (1969).
5. F.N. Hooge, A.M.H. Hoppenbrouwers. *Physica*, **45**, 386 (1969).
6. F.N. Hooge. *Physica*, **83B**, 14 (1976).
7. P. Dutta, P.M. Horn. *Rev. of Modern Phys.*, **53**, 497 (1981).
8. Г.П. Жигальский. *УФН*, **167**, 623 (1997).
9. A.H. Steinbach, J.M. Martinis, M.H. Devoret. *Phys. Rev. Lett.*, **76**, 3806 (1996).
10. Y. Kim, T. Pietsch, A. Erbe, W. Belzig, E. Scheer. *Nano Lett.*, **11**, 3734 (2011).
11. C.A. Martin, D. Ding, H.S. van der Zant, J.M. van Ruitenbeek. *New J. Phys.*, **10**, 065008 (2008).
12. M.L. Perrin, C.J. Verzijl, C.A. Martin, A.J. Shaikh, R. Eelkema, J.H. van Esch, J.M. van Ruitenbeek, J.M. Thijssen, H.S. van der Zant, D. Dulic. *Nat. Nanotechnol.*, **8**, 282 (2013).
13. Ф.В. Гаспарян, *Изв. НАН Армении, Физика*, **52**, 166 (2017).
14. J.C. Cuevas, E. Scheer. *Molecular Electronics. An Introduction to Theory and Experiment*. Singapore World Scientific Publishing, 2010.
15. G. Binnig, C.F. Quate, C. Gerber. *Phys. Rev. Lett.*, **56**, 930 (1986).
16. M. Celasco, A. Masoero, P. Mazzetti, A. Stepanescu. *Phys. Rev.*, **17**, 2553; 2564 (1978).
17. Ю.В. Шарвин. *ЖЭТФ*, **48**, 984 (1965).
18. V. Handziuk, F. Gasparyan, L.K.J. Vandamme, M. Coppola, V. Sydoruk, M. Petrychuk, D. Mayer, S. Vitusevich. *Nanotechnology*, **29**, 388704 (2018).

19. **F.A.L.M. Theunissen.** Appl. Sci. Res., **3**, 201 (1954).
20. **S. Vitusevich, F. Gasparyan.** Low-Frequency Noise Spectroscopy at Nanoscale: Carbon Nanotube Materials and Devices. In: Carbon Nanotubes Applications on Electron Devices. Chapter 11, J.M. Marulanda (Ed.), PH InTech, 2011, pp. 257–296.

## ԲԱՐԱԿ ՄԵՏԱՂԱԿԱՆ ԼԱՐԵՐԻ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԱՂՄՈՒԿՆԵՐԸ

Ֆ.Վ. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ

Պատրաստվել են միկրոչափային մետաղական լարեր ոսկուց, արծաթից և պղնձից: Հետազոտվել են դրանց ՎԱԲ-ը, ցածրհաճախականային աղմուկները, ինչպես նաև աղմուկների սպեկտրալ խտության բնույթն ու կախվածությունը մետաղների տեսակից և չափերից: Ցույց է տրված, որ աղմուկների սպեկտրալ խտությունը աճում է լարի տրամագծի նվազման դեպքում, և աճում է նմուշների երկարության աճից: Ցույց է տրվել, որ աղմուկները հիմականում պայմանավորված են կոնտակտային երևույթներով և քառակուսայինօրենքով են կախված կոնտակտների դիմադրությունից:

## ELECTRICAL NOISE IN THIN METAL WIRES

F.V. GASPARYAN

Metallic micro-sized wires of gold, silver and copper with various sizes were prepared. Their CVC, low-frequency noises, as well as the behavior and dependence of the noise spectral density on the type and sizes of metals and contacts were investigated. It is shown that the spectral density of low-frequency noises strongly depends on the dimensions of the sample. It is also shown that the spectral density of noises increases with a decrease in the diameter of the wire. It has been shown that the noises are mainly conditioned by contact phenomena, and the noise dependence on the resistance of the contacts is quadratic.