

УДК 535.231.62

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕОХЛАЖДАЕМЫХ РУТЕНИЕВЫХ МИКРО- И НАНОБОЛОМЕТРОВ

А. С. Ильин, И. А. Кон, А. С. Соболев, А. Г. Коваленко

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, 125009, г. Москва, ул. Моховая, д.11, корп. 7

Статья поступила в редакцию 30 ноября 2019 г.

**Аннотация.** Представлены микро- и наномостики из рутения для неохлаждаемых болометров терагерцового диапазона, работающих при комнатной температуре. Образцы мостиков имеют толщину 20 нм и планарные размеры  $2 \times 1$  мкм, и  $2 \times 0,1$  мкм, и были изготовлены с помощью электронно-лучевой литографии на подложках из оксидированного монокристаллического кремния. Были измерены зависимость сопротивления от температуры и ВАХ. На основе полученных характеристик были вычислены температурный коэффициент сопротивления тонкопленочных образцов, дифференциальное сопротивление образцов, а также электрическая вольт-ваттная чувствительность  $S_v$ . Последняя составила  $S_v = 87$  В/Вт для мостиков шириной 1 мкм и  $S_v \approx 500$  В/Вт для ширины 0,1 мкм. Полученная чувствительность превышает известную из литературы для болометров из ниобия, что, по нашему мнению, указывает на перспективность использования рутения в качестве поглотителя для болометров терагерцового диапазона, работающих без охлаждения.

**Ключевые слова:** рутений, неохлаждаемый болометр, электронная литография, тонкие пленки, комнатная температура, вольт-ваттная чувствительность, температурный коэффициент сопротивления.

**Abstract.** Ruthenium micro- and nano-bridges for uncooled terahertz bolometers operating at room temperature are presented. The bridge samples have a thickness of 20 nm and planar dimensions of  $2 \times 1$   $\mu\text{m}$ , and  $2 \times 0.1$   $\mu\text{m}$ , and were fabricated using electron beam lithography on oxidized single-crystal silicon substrates. The temperature dependence of the resistance and the I–V characteristics were measured.

Based on the obtained characteristics, the temperature coefficient of resistance for thin-film samples, the differential resistance of the samples, and the electric voltage responsivity  $S_v$  were calculated. The latter was  $S_v = 87$  V/W for the bridges  $1 \mu\text{m}$  wide and  $S_v \approx 500$  V/W for the  $0.1 \mu\text{m}$  wide. The obtained responsivity exceeds that of niobium bolometers known from the literature, which, in our opinion, indicates the prospects of using ruthenium as an absorber for terahertz bolometers operating without cooling.

**Key words:** ruthenium, uncooled bolometer, electron-beam lithography, EBL, thin films, room temperature, voltage responsivity, temperature coefficient of resistance

## Введение

Непрерывно растет круг задач, в которых востребованы амплитудные детекторы терагерцового диапазона. Наряду с радиоастрономией, где допускается использование криогенных технологий, терагерцовые и субмиллиметровые детекторы находят массовое применение в средствах медицинской диагностики [1], контроля качества [2] и в системах безопасности [3]. В связи с этим растет актуальность разработки новых приемных устройств, обладающих достаточной чувствительностью при комнатной температуре. В настоящее время наиболее известны некоторые виды неохлаждаемых терагерцовых детекторов, таких как диоды Шоттки, НЕМТ-транзисторы, болометры и пироэлектрики [4-6]. Наилучшей вольт-ваттной чувствительностью ( $S_v$ ), более  $10^3$  В/Вт, обладают диоды Шоттки; у болометров она на порядок хуже.

В работе Лууканена и др. [7] описаны болометры на основе тонких пленок ниобия, обладающие  $S_v = 85$  В/Вт. В данной работе в качестве чувствительного элемента, поглотителя, используется подвешенный мостик, инкапсулированный в оксид кремния. При толщине пленки ниобия  $35$  нм размеры изготовленного из нее мостика составляют  $10 \times 1$  мкм. Также ниобиевый болометр рассматривался в работе Уварова и др. [8], где полученная вольт-ваттная чувствительность составила  $S_v = 29$  В/Вт, при размерах

поглотителя  $1 \times 2 \times 0,02$  мкм, и был измерен температурный коэффициент сопротивления (ТКС) тонкопленочного образца  $\alpha = 1,4 \times 10^{-3}$  1/К.

Рутений является перспективным материалом для использования в качестве болометрического поглотителя, температура его окисления составляет около 800 °С, против немногим более 200 °С у ниобия. Имея близкие с ниобием значения ТКС [9], рутениевые болометры должны обладать большей чувствительностью  $S_v$  за счет более высокой рабочей температуры. При этом, электрофизические свойства тонкопленочных элементов из ниобия сильно подвержены влиянию технологического процесса формирования мостика [8], в то время как свойства рутениевых микро- и наноструктур им не подвержены [10]. В настоящей работе мы исследуем ТКС тонкопленочного рутения и электрическую вольт-ваттную чувствительность рутениевых наномостиков и оцениваем их перспективность для применений в качестве неохлаждаемых болометров.

## 1. Конструкция и технология изготовления образцов болометра

Образцы для измерений представляли собой полоски из рутения толщиной 20 нм и геометрическими размерами  $2 \times 1$  мкм в одной серии и  $2 \times 0,1$  мкм во второй серии. Вторым слоем формировались подводящие линии и контактные площадки из палладия толщиной 200 нм. Перед осаждением обоих металлов предварительно напылялся тонкий, 2-3 нм, адгезионный слой титана. Для исследования ТКС был изготовлен образец тонкой пленки рутения. Структуры для измерений расположены на подложке из монокристаллического кремния с термически оксидированной поверхностью, с толщиной оксида около 300 нм. На рис. 1 приведено РЭМ-изображение одного из образцов, а также, в верхнем правом углу, его центральной части, где видно рутениевый мостик и подводящие линии из палладия.

Формирование образцов производилось с помощью аддитивной технологии с использованием электронно-лучевой литографии с масками из ПММА для слоя из рутения и двуслойными масками из П(ММА-ММА)/ПММА для слоя из палладия. Осаждение материалов производилось с помощью

магнетронного распыления с предварительной активацией поверхности в ВЧ-разряде. Рутений осаждался при давлении аргона  $5 \times 10^{-3}$  мбар, расстоянии мишень-подложка 60 мм и мощности 200 Вт. Палладий осаждался при давлении аргона  $5 \times 10^{-3}$  мбар, расстоянии мишень-подложка 80 мм и мощности 50 Вт. Остаточное давление в камере перед напылением составляло, в обоих случаях,  $10^{-7}$  мбар.

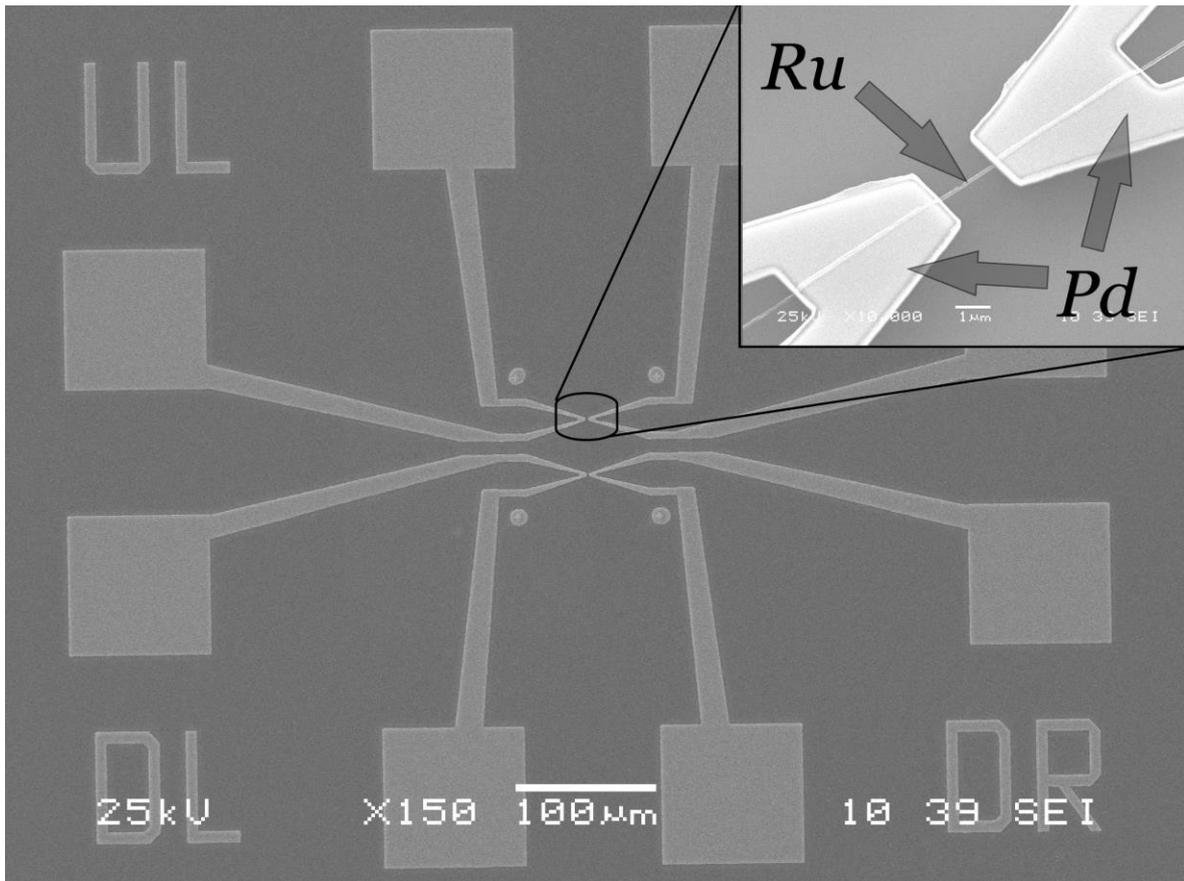


Рис. 1. РЭМ-изображение образца и его центральной части с рутениевым мостиком.

Осаждение материалов осуществлялось в высоковакуумной установке магнетронного распыления VAAT LS 730S. Формирование масок для литографии производилось на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6460 с литографическим расширением NANOMAKER с функцией коррекции эффекта близости. Толщины напыляемых пленок контролировались с помощью профилометра KLA-TENCOR ALPHA-STEP IQ.

## 2. Измерения характеристик болометра

С изготовленными образцами были проведены измерения зависимости сопротивления от температуры и вольт-амперной характеристики.

Измерения зависимости сопротивления от температуры осуществлялись на нагревательной плитке с использованием термопары. На основе полученной зависимости были вычислены значения ТКС в каждой точке.

На рис. 2 изображены полученные зависимости сопротивления и ТКС от температуры, а также полученные в работе Егера и Розенбома [9] аналогичные зависимости для массивного образца рутения.

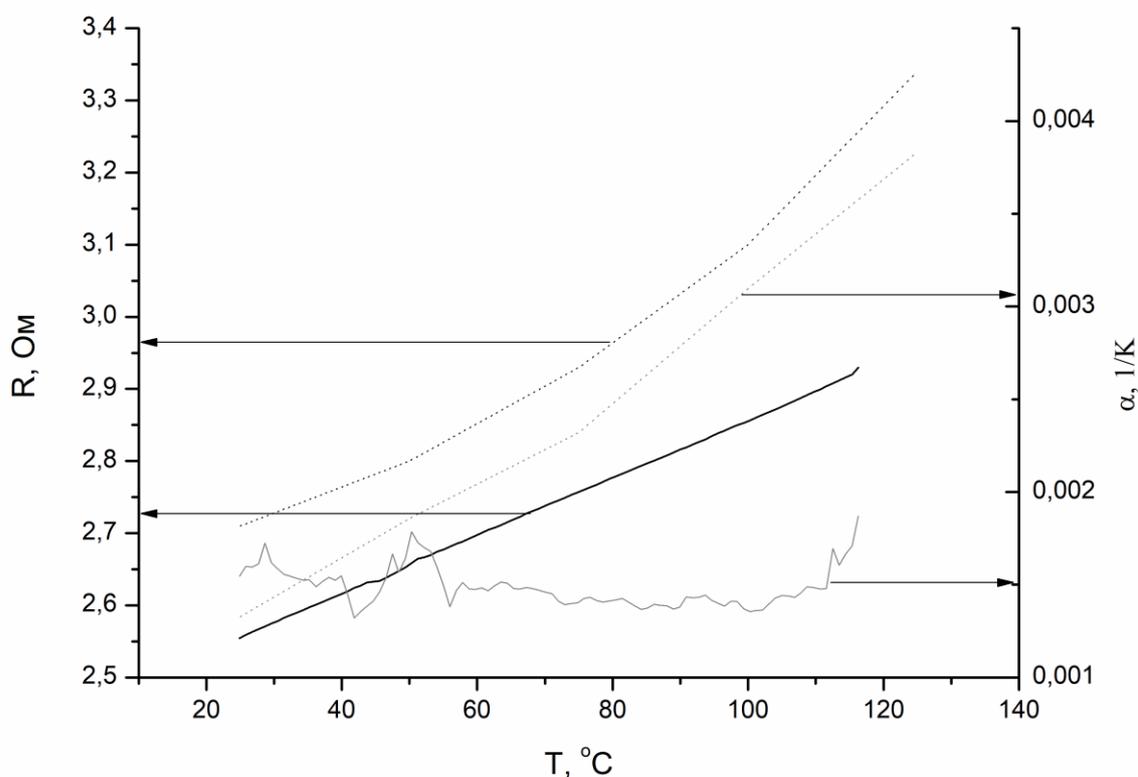


Рис. 2. Зависимости  $R(T)$  и  $\alpha(T)$  для полученных образцов (сплошные линии) и массивного образца из работы [9] (пунктирные линии).

Перед измерениями  $R(T)$  были измерены ВАХ изготовленных образцов. Такой порядок измерений позволяет исключить влияние отжига на свойства рутениевых мостиков. Измерения ВАХ производились с помощью калибратора-мультиметра Keithley 2450 по четырехточечной схеме, в режиме

заданного тока. На рис. 3 приведены вольт-амперные характеристики для образцов с ширинами 1 мкм и 0,1 мкм.

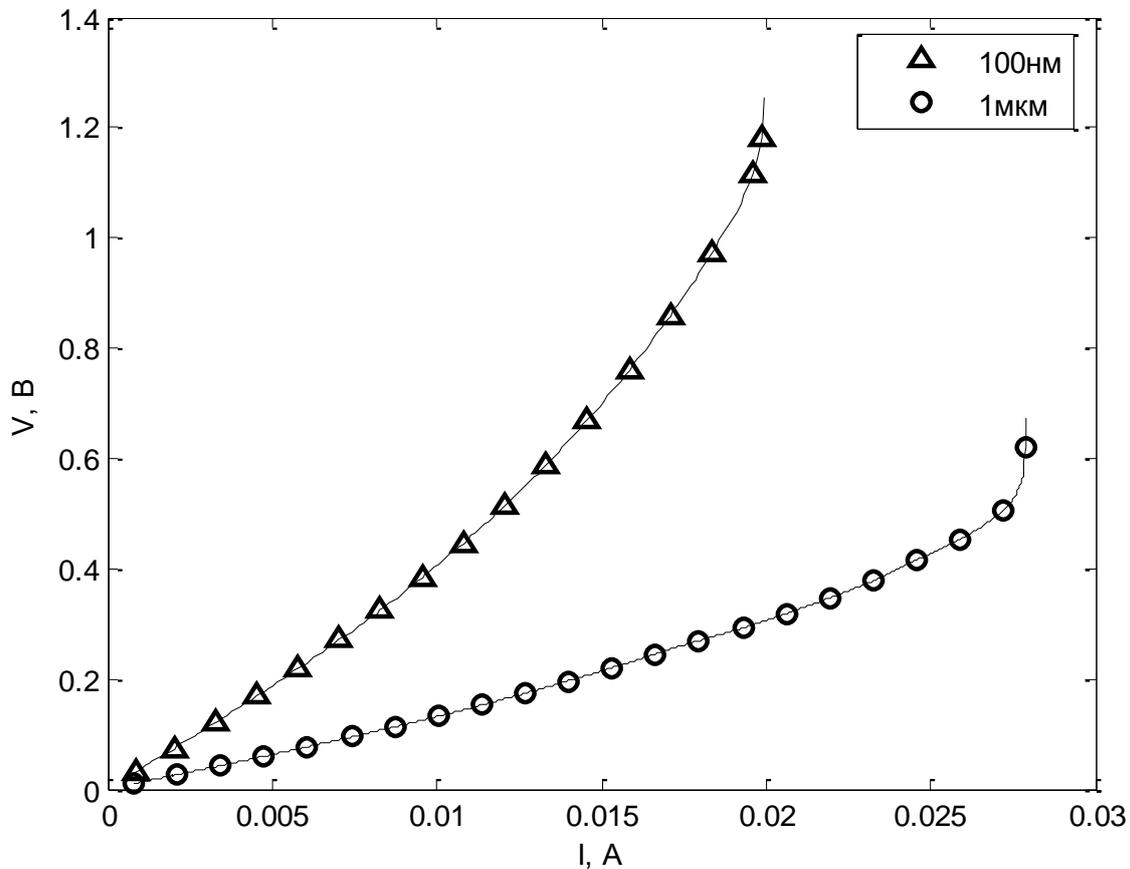


Рис. 3. ВАХ полученных образцов; значения тока для образца  $w = 100$  нм умножены на 10.

На основе полученных характеристик были вычислены значения дифференциального сопротивления  $R_d$  образцов в каждой точке, после чего, по известной формуле для вольт-ваттной чувствительности  $S_v = (R_d - R)/2IR$  [11], были вычислены значения чувствительности для изготовленных рутениевых мостиков. Полученные кривые зависимости  $R_d$  и  $S_v$  от тока смещения  $I$  приведены на рис. 4.

Из полученных графиков видно, что оптимальным для образцов с шириной мостика 1 мкм является выбор рабочей точки при токе смещения 27 мА, а для образцов с шириной мостика 0,1 мкм – 1,9 мА. При этом, значения  $S_v$  составляют 87 В/Вт и около 500 В/Вт соответственно.

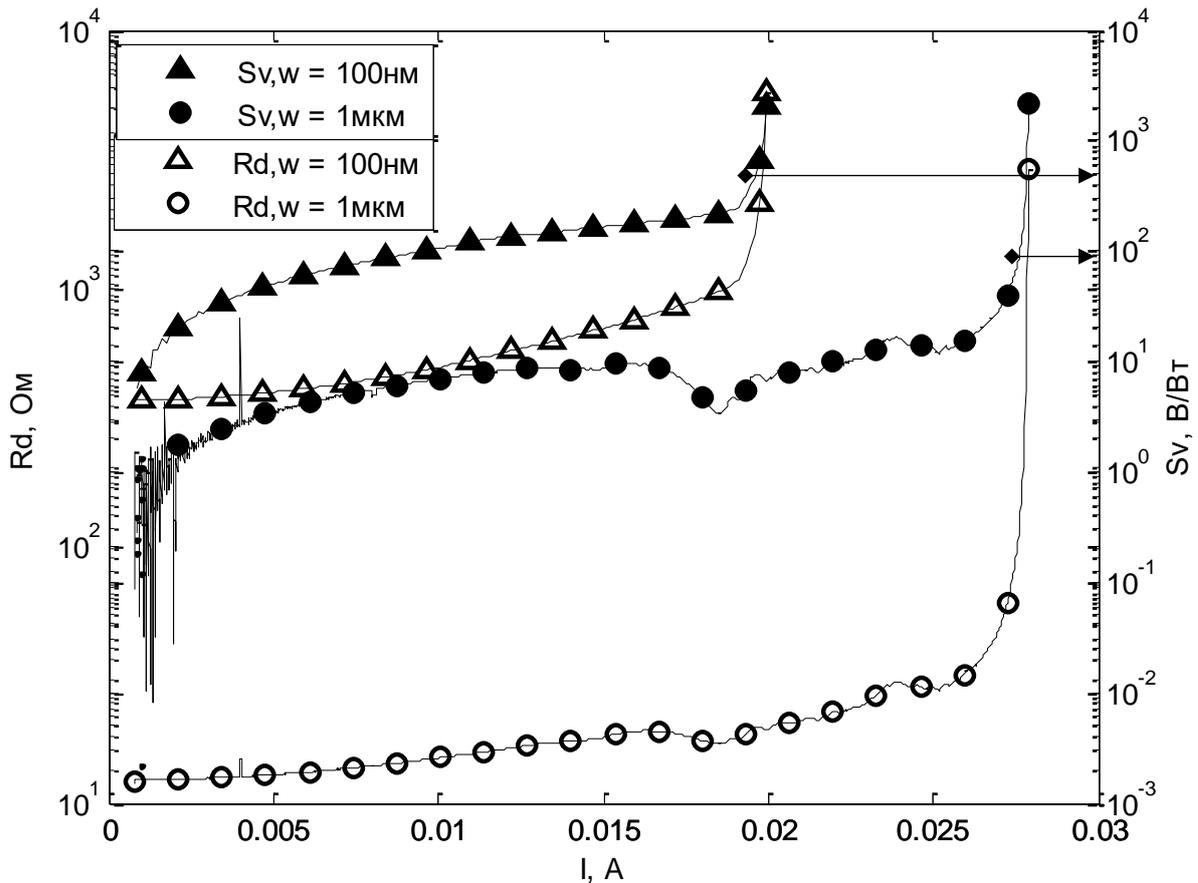


Рис. 4. Зависимости дифференциального сопротивления  $R_d$  и вольт-ваттной чувствительности  $S_v$  от тока смещения  $I$ ; значения тока для образца  $w = 100 \text{ nm}$  умножены на 10.

### Заключение

В данной работе были изготовлены, с помощью электронно-лучевой литографии, образцы рутениевых наномостиков толщиной 20 нм и планарными размерами  $2 \times 1 \mu\text{m}$  и  $2 \times 0,1 \mu\text{m}$ , а также образец тонкой пленки рутения. Были измерены зависимость сопротивления от температуры и ВАХ. На основе измеренных характеристик были вычислены значения электрической вольт-ваттной чувствительности  $S_v$ , составившие  $S_v = 87 \text{ V/W}$  для мостиков шириной 1 мкм и  $S_v \approx 500 \text{ V/W}$  для ширины 0,1 мкм. Показанная чувствительность существенно выше известной из литературы, что, по нашему мнению, говорит о перспективности использования рутения в качестве поглотителя для болометров терагерцового диапазона, работающих без охлаждения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-07-00881.

### Литература

1. Wallace V.P., Fitzgerald A.J., Pickwell-MacPherson E. Understanding terahertz data for medical applications. *37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Wollongong, NSW, 2012. P.1-2. DOI: [10.1109/IRMMW-THz.2012.6380434](https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2012.6380434)
2. Ren A.F., Zahid A., Fan D., Yang X.D., ImranM.A., Alomainy A., Abbasi Q.H. State-of-the-Art in Terahertz Sensing for Food and Water Security – a Comprehensive Review. *Trends in Food Science & Technology*. 2019. Vol. 85. P. 241-251. DOI: [10.1016/j.tifs.2019.01.019](https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.01.019)
3. Kemp M.C. Detecting hidden objects: Security imaging using millimetre-waves and terahertz. *2007 IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance*, London, 2007, P. 7-9. DOI: [10.1109/AVSS.2007.4425277](https://doi.org/10.1109/AVSS.2007.4425277)
4. Rogalski A., Sizov F. Terahertz detectors and focal plane arrays. *Opto-Electronics Review*. 2011. Vol.19. No.3. DOI: [10.2478/s11772-011-0033-3](https://doi.org/10.2478/s11772-011-0033-3)
5. Sizo, F.F. THz radiation detectors: State-of-the art. *Semiconductor Science and Technology*. 2018. Vol.33. 123001. DOI:[10.1088/1361-6641/aae473](https://doi.org/10.1088/1361-6641/aae473)
6. Muravev V.M., Kukushkin I.V. Plasmonic detector/spectrometer of subterahertz radiation based on two-dimensional electron system with embedded defect. *Applied Physics Letters*. 2012. Vol.100. No.8.art. no. 082102. DOI: [10.1063/1.3688049](https://doi.org/10.1063/1.3688049)
7. Miller A.J., Luukanen A., Grossman E.N. Micromachined antenna-coupled uncooled microbolometers for terahertz imaging arrays. *Proc. SPIE 5411, Terahertz for Military and Security Applications II*, 8 September 2004. DOI: [10.1117/12.543236](https://doi.org/10.1117/12.543236)
8. Уваров А.В., Кузьмин А.А., Шитов С.В., Коваленко А.Г. Электрические измерения тонкопленочных ниобиевых микроструктур для неохлаждаемых

болометров миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн, *Журнал радиоэлектроники*. 2011. №3. URL <http://jre.cplire.ru/jre/mar11/3/text.pdf>

9. Jaeger F.M., Rosenbohm E. The Temperature-Coefficient of the Electrical Resistance of Ruthenium and its Thermo-electrical Behaviour with respect to Platinum, *Proc. Ned. Akad. v. Wetensch.*, Amsterdam. 1941. Vol. 44. P.144-152

10. Ilin A.S, Cohn I.A., Vystavkin A.N., Kovalenko A.G. Thin film ruthenium microstructures for transition edge sensors. *Proc. SPIE 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016, 102240S*. 30 December 2016. DOI <https://doi.org/10.1117/12.2266275>

11. R. Clark Jones. The General Theory of Bolometer Performance. *Journal of the Optical Society of America*. 1953. Vol.3. No.1. DOI: [10.1364/JOSA.43.000001](https://doi.org/10.1364/JOSA.43.000001)

**Для цитирования:**

Ильин А.С., Кон И.А., Соболев А.С., Коваленко А.Г. Электрофизические свойства неохлаждаемых рутениевых микро- и наноболометров. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2019. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec19/10/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.12.10