

*С. А. Шелудяков, Г. С. Куприянова,  
Я. Ахокас, С. А. Васильев*

**МНОГОЧИПОВЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ТЕРМОМЕТР  
НА ОСНОВЕ  $\text{RuO}_2$  ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ  
В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР 0,02 – 30 К**

*Представлена конструкция полупроводникового термометра сопротивления на основе шестнадцати коммерческих резисторов Vishay RCW575 для применения в температурном диапазоне 0,02 – 30 К. В работе приводится предполагаемый дизайн сенсора, проведены измерения насыщения и термического сопротивления, а также предложено сравнение с одночиповым RCW575 термометром и коммерческим сенсором Lakeshore ROX-102A.*



*A multiple RuO<sub>2</sub>-chip thermometer based on commercial Vishay RCW575 chips for applications in 0,02–30 K range is proposed. Possible design and packaging of the sensor are suggested. Thermometer saturation and thermal resistance of our sensor are measured and compared with a single-chip configuration and commercial Lakeshore ROX-102A thermometer.*

**Ключевые слова:** физика низких температур, термометрия ниже 1К, термометр сопротивления.

**Key words:** Low-temperature physics, thermometry below 1K, resistance thermometry

## Введение

110

Надежная термометрия — одно из обязательных условий организации эксперимента по исследованию явлений в милликельвиновой области температур.

Использование полупроводниковых SMD датчиков наиболее простой и распространенный вторичный метод измерения температуры [1]. Термометр сопротивления имеет малый размер, малую постоянную времени и не требует специального оборудования для проведения измерения. В то же время ряд проблем, связанных с перегревом датчика под воздействием РЧ-наводок, электрического возбуждения измеряющего прибора, земляных петель, теплопритока по проводам, а также граничное термическое сопротивление обычно ограничивают практическое применение резистивных датчиков 50 мК [2].

В настоящее время наибольшее распространение для измерения температуры в субкельвиновом диапазоне получили датчики на основе оксида рутения RuO<sub>2</sub>, применяемые в качестве высокоточных резисторов в электронике [3]. С точки зрения использования в криогенике их основными преимуществами являются хорошая воспроизводимость кривой R(T) для датчиков из одной партии, стабильность при термоциклировании, умеренное магнетосопротивление, малый размер и значительно более низкая цена по сравнению с коммерческими термометрами [4].

Цель данной работы — разработка криогенного термометра, функционирующего в широком интервале температур, обладающего высоким качеством теплового контакта, достаточной устойчивостью ко внешним РЧ-наводкам, а также низкой ценой. Калибровка подобного датчика первичным термометром или вторичным стандартом позволит использовать его взамен коммерческих датчиков температуры.

Несколько подобных термометров будут использованы для термометрии узлов рефрижератора растворения и экспериментальной ячейки в наших последующих экспериментах по исследованию атомов Н в твердой матрице Н<sub>2</sub>.

## 1. Эксперимент

Для решения проблемы возрастающего с понижением температуры термического сопротивления, а также влияния РЧ-наводок, вызывающих насыщение датчика, был разработан 16-чиповый сенсор на основе 1КОм резисторов RCW575 (Dale), купленных большой партией у Vishay inc. Для исследования преимуществ многочипового термометра перед одно-



чиповым были изготовлены два 16-чиповых датчика, S<sub>0</sub> и S<sub>1</sub>. SMD чипы были разделены на четыре порции, соединенные между собой последовательно, причем каждая порция представляет собой четыре чипа, соединенных параллельно. Таким образом, итоговое комнатное сопротивление термометра оставалось равным 1 КОм, что особенно важно при милликельвинных температурах, где сопротивление чипов возрастает до нескольких десятков КОм. Высокое сопротивление увеличивает джонсоновский шум датчика, что требует большего возбуждения для корректности измерения, ведущее, в свою очередь, к преждевременному насыщению термометра. В частности, при 10 мК, чтобы не вызвать перегрев сенсора, мощность возбуждения не должна превышать 1 фВт [5].

Конструкция датчиков S<sub>0</sub> и S<sub>1</sub> приведена на рисунках 1 и 2. Порции чипов были приклеены эпоксидной смолой Stycast 1266 к медному основанию, предварительно покрытому изоляционной полиимидной пленкой (Kapton™). Медное основание имеет внешнюю резьбу для крепления термометра к камере растворения. В целях подавления РЧ-наводок сенсор снабжен двумя LC-фильтрами, а также двумя проходными конденсаторами. Вся система заключена в медную оболочку, выполняющую функцию экрана. Сопротивления датчиков при комнатной температуре составляли 1010 и 1007 Ом соответственно. Разница в сопротивлениях датчиков может быть объяснена некоторым различием в сопротивлении подводящих проводов.

Для оценки эффективности 16-чиповых сенсоров, был также изготовлен одночиповый сенсор S<sub>2</sub>, его конструкция приведена на рисунке 2. RuO<sub>2</sub> чипы был приклеен к медной пластине эпоксидной смолой Stycast 2750FT. Подводящие провода, выполненные из манганина, были предварительно обернуты вокруг пластины для предотвращения теплопритока. Комнатное сопротивление датчика составило 999 Ом. Для сравнения также был использован коммерческий одночиповый SMD сенсор Lakeshore Rox-102A, R<sub>rt</sub>=1037 Ом. Данный термометр также был предварительно подготовлен нами согласно рисунку 1.

В качестве дополнительного инструмента подавления РЧ-наводок была использована вспомогательная система RC-фильтров, помещенных на 0,1 К-пластине рефрижератора растворения (рис. 3). Фильтры были изготовлены на основе керамических SMD компонентов R=50 Ом, C=4,7 нФ, что соответствует частоте среза 4,3 МГц. Измерение было ор-

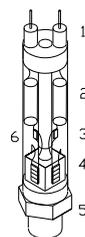


Рис. 1. Конструкция датчика S<sub>0</sub>:  
 1 – проходной конденсатор; 2 – катушки индуктивности; 3 – емкость;  
 4 – порции SMD чипов; 5 – резьба М4;  
 6 – металлический экран

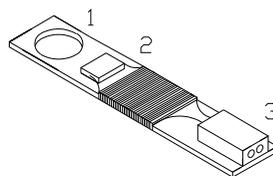


Рис. 2. Конструкция датчика S<sub>1</sub>:  
 1 – отверстие под болтовое соединение М3; 2 – чип;  
 3 – коннектор

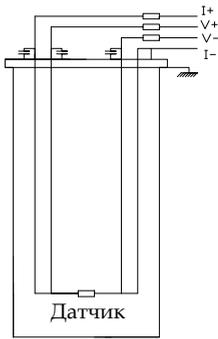


Рис. 3. Схема подключения датчика на уровне 0,1 К-пластины

Измерение сопротивления датчиков было проведено АС-мостом Stanford SIM-921 при частоте возбуждения равной 15 Гц. Для подавления 50 Гц наводок, вызывающих скачки в сопротивлении сенсоров, нами применялся трансформатор для гальванической развязки.

В ходе эксперимента сопротивление датчиков регистрировалось относительно двух вторичных стандартов — кристаллизационного  $^3\text{He}$  (МСТ) и сверхпроводникового SRD-768. При этом показания обоих термометров совпадали в пределах погрешности измерения (не более 3%), что позволило использовать их для анализа поведения и последующей калибровки датчиков сопротивления.

Измерение сопротивления показало расхождения в показаниях датчиков при понижении температуры (рис. 4), что может быть связано с ухудшением теплового контакта и возрастанием влияния РЧ-наводок на производительность датчика.  $S_2$  оставался работоспособным вплоть до 35 мК, но затем вышел на насыщение. 16-чиповый датчик оставался чувствительным к изменению температуры вплоть до 30 мК для  $S_0$  и 20 мК для  $S_1$ , что вызвано различием их подключения на уровне 0,1 К пластины. Lakeshore Rox-102A оставался работоспособным вплоть до 40 мК, при этом его сопротивление составило порядка 100 КОм.

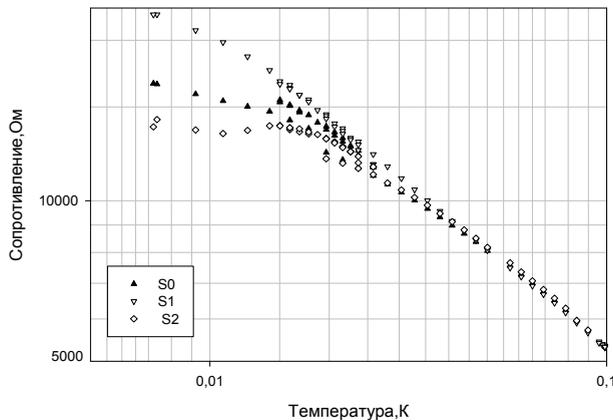


Рис. 4. Поведение датчиков ниже 100 мК



## 2. Анализ измерений

Для оценки качества теплового контакта лучшие из сенсоров разных конфигураций (S<sub>1</sub> и S<sub>2</sub>) возбуждались последовательно напряжением 10, 30, 100, 300 мкВ и 1 мВ.

При этом температура камеры растворения составляла 6,3 мК согласно кристаллизационному термометру <sup>3</sup>He, самая низкая, достигнутая нами в ходе эксперимента. В то же время оба датчика были перегреты (рис. 5).

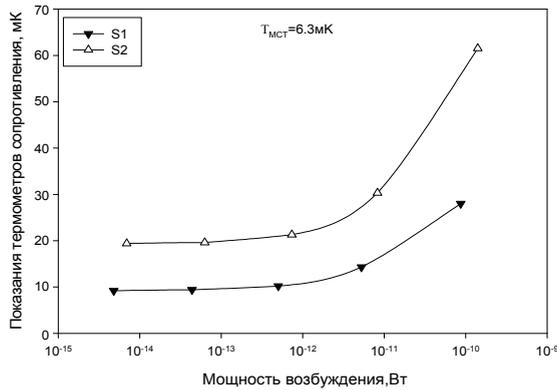


Рис. 5. Перегрев датчиков различным возбуждением

Оценка скачка Капицы  $R_{th}$  для обоих датчиков позволяет получить более детальную информацию. Согласно [6] скачок Капицы на границе металл-металл с учетом температурной зависимости  $R_{th}(T)$  может быть определен как

$$R_{th} = \frac{\delta T^n}{\delta Q},$$

где  $n$  принимает значения от 4 до 6. Отношения наклонов зависимостей дает возможность найти отношение граничных сопротивлений (рис. 6).

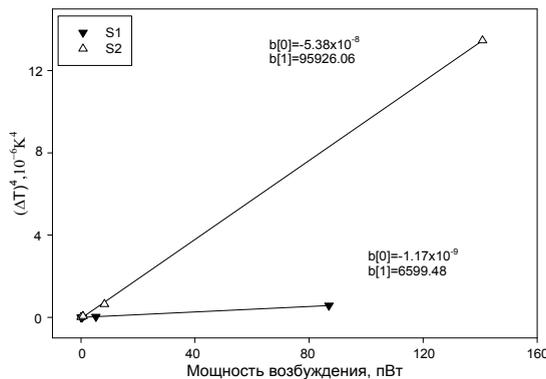


Рис. 6. Термическое сопротивление сенсоров

Отношение наклонов говорит о 15-кратном улучшении термического контакта для сенсора S<sub>1</sub>, из чего можно сделать вывод о том, что



граничное сопротивление пропорционально контактной площади датчика, т.е. тепловой контакт в основном устанавливается через стеклянную оболочку сенсора и эпоксидную смолу, а не через подводящие манганиновые провода.

Для оценки погрешности в показаниях датчика  $S_1$  вследствие перегрева, его экспериментальная кривая  $R(T)$  при  $T > 40$  мК, где его перегрев незначителен, была проэкстраполирована в область более низких температур. На рисунке 7 указана погрешность датчика  $S_1$  вследствие перегрева. Как видно из рисунка, датчик способен функционировать вплоть до температуры 20 мК с погрешностью менее 10 %.

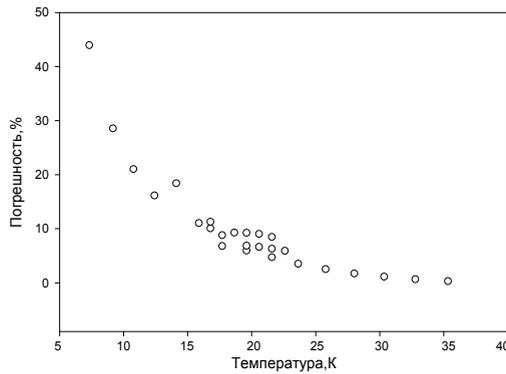


Рис. 7. Погрешность сенсора  $S_1$

Для оценки верхней границы применимости датчика были проанализированы данные калибровок относительно германиевого термометра, а также давления газа  $H_2$ , полученные в предыдущих запусках. Зависимость чувствительности  $(dR/dT)(T)$  приведена на рисунке 8.

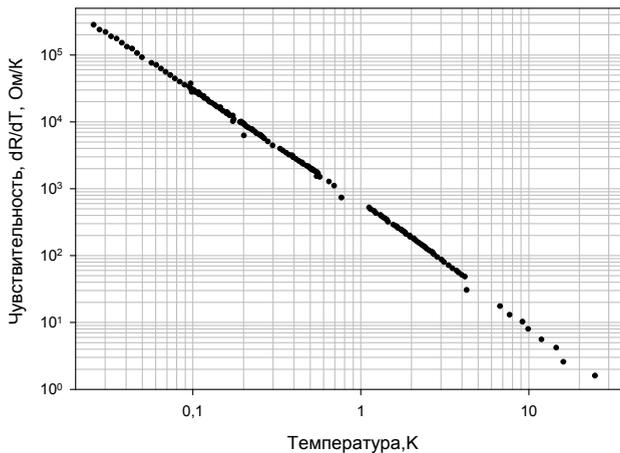


Рис. 8. Чувствительность сенсоров Dale RCW575 (Vishay)

Сенсор сохраняет приемлемую чувствительность вплоть до температур порядка 30 К, что позволяет его использовать как в милликель-



винной области, так и при температурах в несколько десятков К, практически недостижимом для толсто пленочных платиновых термометров. В то же время использование нескольких чипов последовательно позволит пропорционально увеличить чувствительность датчика.

Таким образом, предлагаемая конструкция дает возможность расширить рабочий диапазон термометра вплоть до 20 мК, что примерно соответствует минимальному порогу температур для большинства коммерческих рефрижераторов растворения. Высокая чувствительность датчиков позволяет применять их вплоть до 30 К, где значение  $dR/dT$  составляет несколько Ом/К. Более того, низкая цена компонент, применяемых в термометре, наряду с преимуществами RuO<sub>2</sub> сенсоров (взаимозаменяемость датчиков, низкое магнетосопротивление, устойчивость при термоциклировании), позволит с успехом использовать подобные термометры взамен коммерческих датчиков.

#### Список литературы

1. Yeager C. J., Courts S. S. A Review of Cryogenic Thermometry and Common Temperature Sensors // IEEE sensors journal. 2001. Vol. 1, № 4. P. 352–360.
2. Courts S. S., Krause J. K. A Commercial Ruthenium Oxide Thermometer for Use to 20 Millikelvin, CP985 // Advances in Cryogenic Engineering: Transaction of the Cryogenic Engineering Conference – CEC-2008. 2008. Vol. 53. P. 947–954.
3. Zak D., Dziedzic A., Kolek A. et al. Meas. Sci. Technol. 2006. Vol. 17. P. 22–27.
4. Goodrich R. G., Hall D., Palm E. et al. Magnetoresistance below 1 K and temperature cycling of ruthenium oxide– bismuth ruthenate cryogenic thermometers // Cryogenics. 1998. Vol. 38. P. 221–225.
5. AVS-47 AC-resistance bridge, Instruction manual, 1996.
6. Lounasmaa O. V. Experimental principles and methods below 1K, Academic press. London ; New York, 1974.

#### Об авторах

Сергей Александрович Шелудяков – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

E-mail: seshel@utu.fi

Галина Сергеевна Куприянова – д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

E-mail: galkupr@yandex.ru

Ян Ахокас – исследователь, д-р филос., Университет г. Турку, Финляндия.

E-mail: jmiaho@utu.fi

Сергей Васильев – д-р филос., исследователь, Университет г. Турку, Финляндия.

E-mail: servas@utu.fi

#### Authors

S. A. Sheludyakov – Ph.D. student, I. Kant Baltic Federal University.

E-mail: seshel@utu.fi

G. S. Kupriyanova – professor, I. Kant Baltic Federal University.

E-mail: galkupr@yandex.ru

J. Ahokas – researcher, Ph. D., University of Turku, Finland.

E-mail: jmiaho@utu.fi

S. Vasiliev – senior researcher, Ph.D, University of Turku, Finland.

E-mail: servas@utu.fi