

УДК 621.316.825.4
DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-69-77

КОНСТРУКЦИИ, МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТЕРМОРЕЗИСТИВНЫХ ТРУБЧАТЫХ СВЧ-КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ (КРАТКИЙ ОБЗОР)

**И. А. МАШУКЕВИЧ, С. М. ЗАВАДСКИЙ, С. В. ГРАНЬКО,
Р. Н. ШЕШКО, А. Н. ПЛИГОВКА**

*Учреждение образования «Белорусский государственный
университет информатики и радиоэлектроники»,
г. Минск*

Представлен краткий обзор конструкций, материалов и технологий тонкопленочных терморезистивных трубчатых калориметрических сенсоров, а также разработаны практические рекомендации по оптимизации технических решений для их проектирования и разработки.

Ключевые слова: тонкопленочные сенсоры, калориметр, СВЧ, цилиндрический волновод, терморезистор.

Для цитирования. Конструкции, материалы и технологии тонкопленочных терморезистивных трубчатых СВЧ-калориметрических сенсоров (краткий обзор) / И. А. Машукевич, С. М. Завадский, С. В. Гранько [и др.] // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 4 (103). – С. 69–77. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-69-77

DESIGNS, MATERIALS AND TECHNOLOGIES OF THIN-FILM THERMORESISTIVE TUBULAR MICROWAVE CALORIMETRIC SENSORS (A BRIEF OVERVIEW)

**I. A. MASHUKEVICH, S. M. ZAVADSKI, S. V. GRANKO,
R. N. SHESHKA, A. N. PLIGOVKA**

*Belarusian State University of Informatics
and Radioelectronics, Minsk*

This article presents a brief overview of the designs, materials, and technologies of thin-film thermoresistive tubular calorimetric sensors, along with practical recommendations for optimizing technical solutions for their design and development.

Keywords: thin-film sensors, calorimeter, microwave, cylindrical waveguide, thermoresistor.

For citation. Mashukevich I. A., Zavadski S. M., Granko S. V., Sheshka R. N., Pligovka A. N. Designs, materials and technologies of thin-film thermoresistive tubular microwave calorimetric sensors (a brief overview). Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo, 2025, no. 4 (103), pp. 69–77 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-69-77

Введение

Калориметрические сенсоры мощности микроволнового излучения являются актуальными объектами разработки и широко используются во многих сферах человеческой деятельности, поскольку они играют ключевую роль в прецизионных измерениях мощности микроволнового излучения. Высокая точность и стабильность этих сенсоров делают их востребованными в различных областях науки и техники, включая радиофиизику, телекоммуникации, радиолокацию, медицинскую диагностику [1, 2], метрологию

и контроль параметров высокочастотных излучателей [1–3], а также при анализе физических и химических свойств материала в промышленности, к примеру, для обнаружения фальсификации бензина и масла [1–3], в космических технологиях, например, в различного рода спутниках [2, 4], при исследовании плазмы [5] и др.

Современные тенденции развития сенсорных технологий направлены на повышение чувствительности, миниатюризацию, улучшение тепловых характеристик и снижение энергопотребления современных сенсоров, что делает актуальными исследования новых конструктивных решений и материалов для изготовления сенсоров.

Сравнивая с другими сенсорами мощности микроволнового излучения, калориметрические сенсоры являются наиболее распространенными [6, 7]. Это связано с их высокой стабильностью и точностью измерений на высоких и сверхвысоких частотах [7, 8]. Калориметрические сенсоры разделяются на две большие группы в зависимости от способа измерения выделяемого тепла [7, 9]. К первой группе относятся калориметры с переменной температурой, где мощность определяется по изменению температуры рабочего тела калориметра. Вторая группа – это калориметры с постоянной температурой, где в процессе измерений температура калориметрической системы не изменяется. Калориметры с переменной температурой по конструктивному исполнению разделяют на статические – «сухие» и проточные – «жидкие» калориметры [7, 9, 10]. В статических калориметрах рабочее тело преобразователя, где энергия микроволновых колебаний превращается в тепловую, неподвижно и в процессе измерений микроволновой мощности не изменяет форму и физические свойства. Рабочим телом для статических калориметров может служить вода, твердые объемные поглотители, тонкопленочные поглотители. В проточных «жидких» калориметрах содержится жидкость, играющая роль переносчика тепла от рабочего тела во внешнюю среду. Проточные калориметры имеют много недостатков, которые связаны, в первую очередь, с присутствием в их конструкции жидкости.

Кроме того, следует разделить калориметрические сенсоры по типу микроволнового тракта на коаксиальные, трубчатые и полосковые.

Таким образом, можно отметить, что все калориметрические сенсоры основаны на преобразовании энергии микроволнового излучения в тепловую с последующим измерением количества тепла, выделенного в рабочем теле преобразователя. Сущность метода измерения поэтапно заключается в следующем [7, 9]:

1. С помощью поглотителя принимается входной сигнал. Роль поглотителя, как ранее было упомянуто, могут играть вода (жидкие среды), твердые объемные и тонкопленочные вещества.

2. Тепло преобразуется в измеряемую величину с помощью фиксации изменения температуры термо чувствительного элемента.

3. Измеряется температура и вычисляется мощность. Для данных преобразователей в идеальных случаях свойственно соотношение:

$$P = C_{t^*} \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\theta}{R_{\text{тпл}}},$$

где P – мощность, рассеиваемая в рабочем теле преобразователя; θ – разность температур рабочего тела и окружающей среды; $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ – скорость измерения температуры рабочего тела; $R_{\text{тпл}}$ – тепловое сопротивление между рабочим телом и окружающей средой; C_{t^*} – теплоемкость рабочего тела преобразователя.

4. Выводится результат.

Данный метод имеет ряд преимуществ, таких как легкая калибровка, точность измерения, широкий частотный диапазон. Однако присутствуют и недостатки в виде медленного отклика, наличия габаритной термостабилизационной части для повышения чувствительности и компенсации температуры окружающей среды [7, 8, 11].

Цель настоящей работы – рассмотреть конструктивные и функциональные особенности современных типовых тонкопленочных терморезистивных трубчатых калориметрических сенсоров. Провести анализ их достоинств и недостатков с точки зрения эффективности, экономичности, уровня технической реализации и технологичности, а также выбрать оптимальные технические решения для проектирования и разработки тонкопленочного терморезистивного трубчатого калориметрического сенсора.

Конструктивные и функциональные особенности современных тонкопленочных терморезистивных трубчатых калориметрических сенсоров

В работе [11] представлена конструкция тонкопленочного терморезистивного трубчатого калориметрического сенсора на основе кремниевой подложки, платиновых терморезисторов и тонкой никелевой пленки. Конструкция данного сенсора состоит из алюминиевого корпуса и двух впаянных в него волноводов. Внутри корпуса для термостабилизации размещен теплоизоляционный наполнитель. Волноводы, покрытые золотом внутри, изготовлены из никелевого сплава с низкой теплопроводностью, толщина стенок – 70 мкм, длина волновода – 24 мм. Малая толщина волновода требуется для высокой теплопередачи и низкой теплоемкости. Волновод имеет клиновидную форму, его конец зарезан под углом в 10°. Срез нужен для установки на него нагрузки с терморезистором и нагревателем, а угол выбран таким образом, чтобы увеличивался коэффициент стоячих волн. Нагрузка представляет собой кремниевую пластину толщиной 400 мкм, на поверхность которой нанесена тонкая металлическая пленка никеля, имеющая поверхностное сопротивление $100 \text{ Ом} / \text{квадрат}$. С обратной

стороны кремниевой пластины наклеены с помощью эпоксидного клея платиновые терморезисторы, выполняющие роль нагревателя и сенсора. Закрывается корпус медной крышкой, а выводы сенсора и нагревателя припаяны к контактам печатной платы. Схема установки изображена на рис. 1.

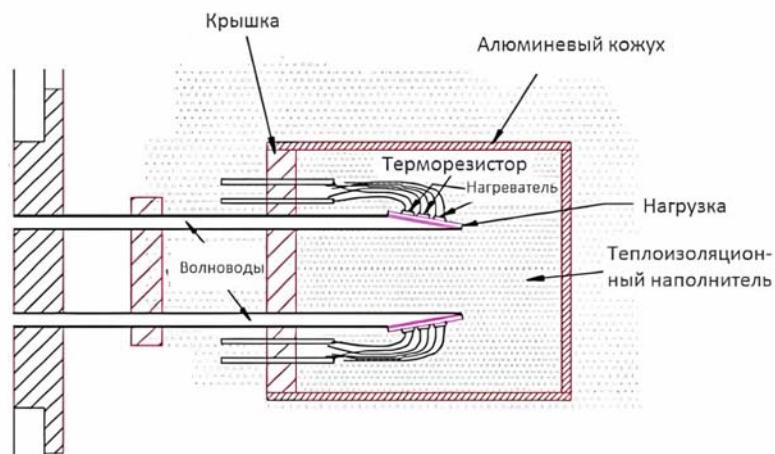


Рис. 1. Схема конструкции сенсора Erickson на основе кремниевой подложки, платиновых терморезисторов и тонкой никелевой пленки [11, 12]

Данная конструкция отличается простотой, высокой чувствительностью и скоростью измерения, широким диапазоном измеряемых частот, предусматривает функции разогрева за счет нагревателя, вследствие чего снижается влияние температуры окружающей среды. В приведенной конструкции имеется улучшенная термостабилизация за счет наличия в сенсоре теплоизоляционного наполнителя. Недостатками показанной конструкции являются высокая стоимость за счет использования платины и золота, большие размеры сенсора, что снижает скорость измерения при малых измеряемых мощностях.

Сенсор в работе [13] представляет собой следующую конструкцию. На кварцевую подложку напыляют тонкую пленку титана. Номинальная толщина пленки составляет 15,5 нм, а ее поверхностное сопротивление равно $\frac{27 \text{ Ом}}{\text{кварт}}$. В рассматриваемой конструкции титановая пленка является термочувствительной и соединена с контактными площадками, покрытыми золотом толщиной 100 нм. Для защиты от воздействий окружающей среды контактные площадки покрывают 50 мкм полииамида. Указанная конструкция представлена на рис. 2.

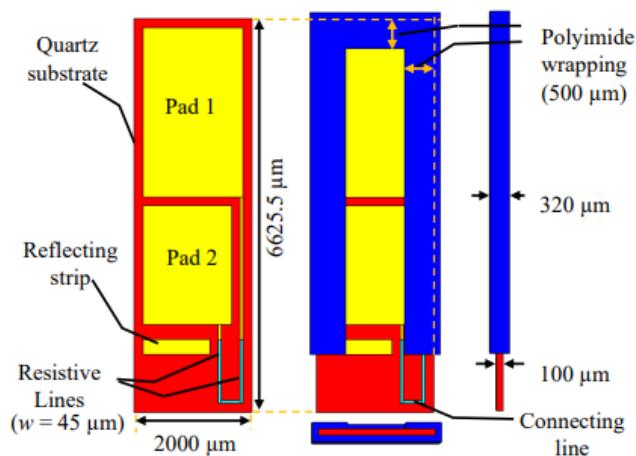


Рис. 2. Схема конструкции сенсора на основе кварцевой подложки и тонкой пленки титана [13]

Данный сенсор имеет более высокую скорость измерения при малых мощностях, меньшие размеры и вес, чем конструкция Erickson [11], отличается простотой, является более экономичным и технологичным. Однако у этого сенсора есть и недостатки: использование пленки титана вместо платинового терморезистора повышает теплопроводность, уменьшает теплоемкость устройства, также снижается точность измерения, отсутствует химически инертный материал на активном слое титана (например, полииамид), из-за чего возникает риск окисления пленки титана под действием влияния окружающей среды, нет функции нагрева для исключения влияния температуры окружающей среды, не имеется решения термостабилизации сенсора.

Известна еще одна конструкция тонкопленочного калориметрического сенсора [14], схема которой дана на рис. 3. В такой конструкции с помощью DC-магнетрона на стеклянную подложку диаметром 100 мм и толщины 400 мкм распыляют алюминий и сплав WTi10%. Алюминиевая пленка была удалена частично, как показано на рис. 3. Далее с помощью барьерного анодирования образован поглотительный слой WTi, имеющий сопротивление $\frac{105 \text{ Ом}}{\text{кварт}}$. На оставшейся половине подложки создавалась столбиковая тонкопленочная структура путем пористого анодирования и реанодирования. После

химической планаризации на поверхности анодного оксида алюминия формировали два прямоугольных никелевых контакта (отмеченная структура выступала в качестве термоочувствительного элемента).

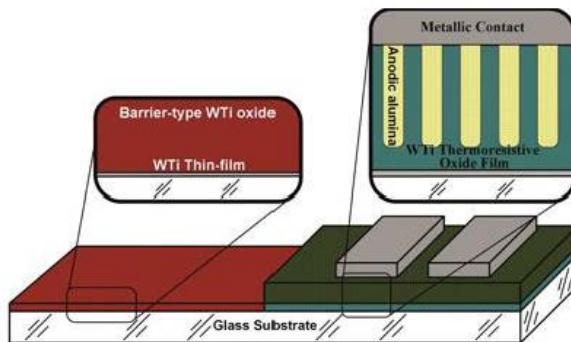


Рис. 3. Схема конструкции сенсора на основе сплава WTi и алюминия [14]

Отмеченная конструкция имеет высокий температурный коэффициент сопротивления, работает в широком диапазоне частот микроволнового излучения, обладает малыми размерами, может быть встроена в современные СВЧ-приборы, так как технологические процессы и материалы для ее изготовления широко используются на отечественных предприятиях микроэлектроники. К недостаткам данной конструкции можно отнести отсутствие термостабилизирующей части для компенсации температуры окружающей среды.

В работе [15] представлена конструкция многослойного тонкопленочного трубочного калориметрического сенсора на кремниевой пластине. Сенсор представляет собой четыре слоя, находящихся на кремниевой пластине толщиной 200 мкм, выполняющей роль поглотителя. Первый и последний слой – это изолирующий слой полиимида толщиной 50 мкм. Кроме того, на поверхности пластины сформирован изоляционный SiO_2 толщиной 1 мкм. Четвертым слоем является тонкая платиновая пленка, которая служит датчиком температуры и имеет форму меандра. Электроды, соединенные с платиновой пленкой, покрыты тонкой пленкой золота толщиной 100 нм и располагаются в четвертом слое вместе с полиимидом, на поверхность которого устанавливается волновод, запиленный под определенным углом. Описанная конструкции приведена на рис. 4.

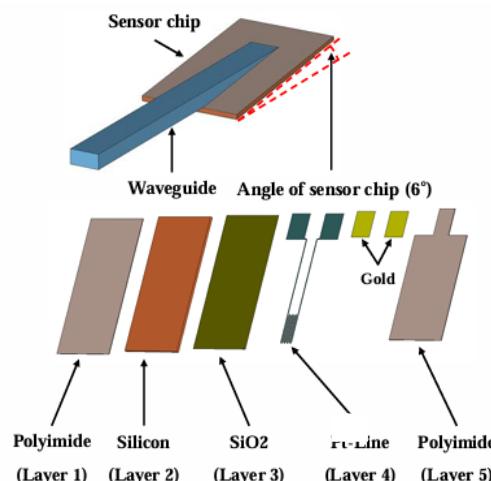


Рис. 4. Конструкция сенсора на основе кремниевого поглотителя и платинового меандра [15]

Несмотря на высокую практичность и хорошую проработку, конструкция имеет ряд значительных недостатков, например, высокие теплопотери из-за отсутствия теплоизоляции, отсутствие нагревателей или иных решений, способных устранить влияние окружающей среды на результат измерения и решить проблему теплового равновесия. Также к ее недостаткам можно отнести высокую стоимость изготовления из-за использования платины в качестве термо чувствительного элемента и золота – как контактного слоя. Кроме того, эта конструкция обладает высоким временем отклика на частотах 110–170 ГГц.

Заключение

В настоящей работе представлен анализ конструктивных и функциональных особенностей четырех наиболее актуальных тонкопленочных трубчатых калориметрических сенсоров микроволнового излучения. Анализ их достоинств и недостатков с точки зрения эффективности, экономичности, уровня технической реализации и технологичности позволил выделить оптимальные технические решения для проектирования и разработки тонкопленочного терморезистивного трубчатого калориметрического сенсора:

1. *Термостабилизация.* Не все представленные конструкции имеют решения в области теплоизоляции и термостабилизации, что делает невозможным применение данных конструкций при нестабильных условиях окружающей среды. Рекомендуется использовать в конструкции нагревательный или термостабилизирующий элемент, а также теплоизоляцию.

2. *Климатическая и коррозионная защита.* В представленных конструкциях в большинстве своем присутствует защитная полиимидная или оксидная пленка. Без данной пленки сенсор подвержен окислению со стороны окружающей среды и имеет сниженный срок эксплуатации, а к тому же требует соблюдения определенных условий эксплуатации. Можно предложить внешние слои сенсора пассивировать защитной пленкой.

3. *Стоимость.* В некоторых сенсорах в качестве термо чувствительного элемента выступают платиновые терморезисторы и золотые контактные слои, что увеличивает затраты на их производство. Рекомендуется разрабатывать сенсор из экономических и технологически доступных материалов, не использовать экзотические, дорогостоящие оборудование и технологические операции.

4. *Габариты.* Можно рекомендовать применение в процессе изготовления микро- и наноструктурирования, чтобы сенсор обладал минимальными размерами и был совместим с большим количеством волноводов, корпусов и конструкций.

В качестве оптимальных технических решений для проектирования и разработки тонкопленочного терморезистивного трубчатого калориметрического сенсора следует использовать полиимид или оксидную пленку как защитный слой, нагреватель и теплоизоляционный наполнитель для термостабилизации, технологичные, экономичные и эффективные материалы для термо чувствительного элемента и поглощающего слоя на основе пористой пленки оксида алюминия с наноструктурированным столбиковым оксидом сплава WTi10% [16] или ниобия [17].

Литература

1. *Microwave Sensors and Their Applications in Permittivity Measurement* / C. Liu, C. Liao, Y. Peng [et al.] // Sensors. – 2024. – Vol. 24, N 23. – P. 7696–7697. – DOI 10.3390/s24237696
2. *A tunable star-shaped highly sensitive microwave sensor for solid and liquid sensing* / M. Z. B. Chowdhury, M. T. Islam, A. Alzamil [et al.] // Alexandria Engineering Journal. – 2024. – Vol. 86. – P. 644–662. – DOI 10.1016/j.aej.2023.12.001

3. Microwave calorimeter for dielectric and thermal analysis of materials / J. R. Sánchez, J. D. Gutiérrez-Cano, P. J. Plaza-González [et al.] // Energy. – 2023. – Vol. 263. – P. 125909. – DOI 10.1016/j.energy.2022.125909
4. COBE differential microwave radiometers – Calibration techniques / C. L. Bennett, G. F. Smoot, M. Janssen [et al.] // The Astrophysical Journal. – 1992. – Vol. 391. – P. 466. – DOI 10.1086/171363
5. Rosario, L. M. Calorimetric Measurements of the Output Power of the 2.48 GHz Commercial Magnetron / L. M. Rosario, R. B. Tumlos, M. D. Leo // Science Diliman. – 2004. – Vol. 16, N 2. – P. 31–35.
6. Microwave Power Measurements: Standards and Transfer Techniques / X. Cui, Y. S. Meng, Y. Shan [et al.] // New Trends and Developments in Metrology. – 2016. – P. 3–20. – DOI 10.5772/60442
7. Белошицкий, А. П. Измерения в оптическом и микроволновом диапазонах длин волн : учеб.-метод. пособие : в 2 ч. / А. П. Белошицкий, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин. – Минск : БГУИР, 2016. – Ч. 1 : Измерения в микроволновом диапазоне. – 88 с.
8. Майгуррова, Н. И. Сравнительный анализ датчиков регистрации физических возмущений окружающей среды / Н. И. Майгуррова, И. Н. Назаренко, Г. Л. Федий // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2017. – № 1. – С. 118–128.
9. Билько, М. И. Измерение мощности на СВЧ / М. И. Билько, А. К. Томашевский, П. П. Шаров. – М. : Совет. радио, 1976. – 168 с.
10. Wideband Overmoded Liquid Calorimeter for High-Power Microwaves: Centimeters to Millimeters / P. V. Vykhodtsev, A. I. Klimov, V. V. Rostov [et al.] // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2020. – Vol. 70. – P. 8001506. – DOI 10.1109/TIM.2020.3034971
11. Erickson, N. A Fast, Very Sensitive Calorimetric Power Meter for Millimeter to Submillimeter Wavelengths / N. Erickson // Thirteenth international Symposium on Space Terahertz Technology, Cambridge, March 26–28 2002. – Cambridge, 2002. – P. 301–307.
12. Плиговка, А. Н. Терморезистивная система СВЧ ваттметра на основе оксидных ниобиевых наностолбиков / А. Н. Плиговка, А. Н. Луферов, Г. Г. Горох // Приборостроение–2016 : материалы 9-й Междунар. конф., Минск, 23–25 нояб. 2016 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2016. – С. 294–295.
13. D-band Thin-Film Resistive Line Bolometer as Transfer Standard / H. Kamble, M. Salek, X. Wang [et al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2023. – Vol. 71, N 11. – P. 4882–4892. – DOI 10.1109/TMTT.2023.3269535
14. Thin Film Microwave Absorber-Column-like Thermistor Couple Fabricated via Anodizing of Al/WTi for Rectangle Waveguide Calorimeter Sensor / A. Hoha, U. Turavets, A. Poznyak, A. Pligovka // IEEE International Conference on Nanotechnology (NANO) : 24th International conference, Gijon, July 8–11 2024 / IEEE Computer Society. – Gijon, 2024. – P. 302–305. – DOI 10.1109/NANO61778.2024.10628810
15. Design, Fabrication, and Characterization of a D-Band Bolometric Power Sensor / M. Salek, M. Celep, T. Weimann [et al.] // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2022. – Vol. 71. – P. 8002509. – DOI 10.1109/TIM.2022.3159009
16. Nanoporous Al₂O₃Assisted Anodizing of WTi Alloy / A. Hoha, U. Turavets, A. Poznyak, A. Pligovka // IEEE International Conference on Nanotechnology (NANO) : 24th International conference, Gijon, July 8–11 2024 / IEEE Computer Society. – Gijon, 2024. – P. 287–291.
17. Pligovka, A. Electro-Physical Properties of Niobia Columnlike Nanostructures via the Anodizing of Al/Nb Layers / A. Pligovka, A. Lazavenka, A. Zakhlebayeva // Proceedings of the IEEE Conference on Nanotechnology, Cork, 23–26 July 2018 / IEEE Computer Society. – USA, 2018. – P. 1–5. – DOI 10.1109/NANO.2018.8626387

References

1. Liu C., Liao C., Peng Y., Zhang W., Wu B., Yang P. Microwave Sensors and Their Applications in Permittivity Measurement. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 23, pp. 7696–7697. <https://doi.org/10.3390/s24237696>
2. Chowdhury M. Z. B., Mohammad T. I., Azlamil A., Soliman M. S., Samsuzzaman M. A tunable star-shaped highly sensitive microwave sensor for solid and liquid sensing. *Alexandria Engineering Journal*, 2024, vol. 86, no. 16, pp. 644–662. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.12.001>
3. Sánchez J. R., Gutierrez J. D., Plaza-Gonzalez P., Penaranda-Foix F. L., Catala-Civera J. M. Microwave calorimeter for dielectric and thermal analysis of materials. *Energy*, 2022, vol. 263, pp. 125909. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125909>
4. Bennett C. L., Smoot G. F., Janssen M., Gulkis S., Kogut A., Hinshaw G., Backus C., Hauser M. G., Mather J. C., Rokke L., Tenorio L., Weiss R., Wilkinson D. T., Wright E. L., de Amici G., Boggess N. W., Cheng E. S., Jackson P. D., Keegstra P., Kelsall T., Kummerer R., Lineweaver C., Moseley S. H., Murdock T. L., Santana J., Shafer R. A., Silverberg R. F. COBE differential microwave radiometers - Calibration techniques. *The Astrophysical Journal*, 1992, vol. 391, pp. 466. <https://doi.org/10.1086/171363>
5. Rosario L. M., Tumlos R. B., Leo M. D. Calorimetric Measurements of the Output Power of the 2.48 GHz Commercial Magnetron. *Science Diliman*, 2004, vol. 16, no. 2, pp. 31–35.
6. Cui X., Meng Y. S., Shan Y., Li Y. Microwave Power Measurements: Standards and Transfer Techniques. *New Trends and Developments in Metrology*, 2016, pp. 3–20. <http://dx.doi.org/10.5772/60442>
7. Beloshitskii A. P., Gusinskii A. V., Kostrikin A. M. *Measurements in the optical and microwave wavelength ranges*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2015, part 1. 88 p. (in Russian).
8. Maigurova N. I., Nazarenko I. N., Fedii G. L. Comparative analysis of sensors for recording physical disturbances in the environment. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika = Aerospace Forces. Theory and Practice*, 2017, no. 1, pp. 118–128 (in Russian).
9. Bil'ko M. I., Tomashevskii A. K., Sharov P. P. *Microwave power measurement*. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1976. 168 p. (in Russian).
10. Vykhotsev P. V., Klimov A. I., Rostov V. V., Tsygankov R. V., Priputnev P. V. Wideband Overmoded Liquid Calorimeter for High-Power Microwaves: Centimeters to Millimeters. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, vol. 70, art. 8001506. <https://doi.org/10.1109/TIM.2020.3034971>
11. Erickson N. A. Fast, Very Sensitive Calorimetric Power Meter for Millimeter to Submillimeter Wavelengths. *Thirteenth international Symposium on Space Terahertz Technology, Cambridge, March 26–28 2002*. Cambridge, 2002, pp. 301–307.
12. Pligovka A. N., Luferov A. N., Gorokh G. G. Thermoresistive microwave power meter system based on niobium oxide nanotubes. *Priborostroenie–2016: materialy 9-i Mezhdunar. konf., Minsk, 23–25 noyabrya 2016 g.* [Instrument Engineering–2016: Proc. of the 9th International Conf., Minsk, November 23–25, 2016]. Minsk, 2016, pp. 294–295 (in Russian).
13. Kamble H., Salek M., Wang X., Celep M., Stokes D., Skinner J., Wang Y. D-band Thin-Film Resistive Line Bolometer as Transfer Standard. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2023, vol. 71, no. 11, pp. 4882–4892. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2023.3269535>
14. Hoha A., Turavets U., Poznyak A., Pligovka A. Thin Film Microwave Absorber-Column-like Thermistor Couple Fabricated via Anodizing of Al/WTi for Rectangle Waveguide Calorimeter Sensor. *IEEE International Conference on Nanotechnology (NANO): 24th International conference, Gijon, July 8–11 2024 g.* Gijon, 2024, pp. 302–305. <https://doi.org/10.1109/NANO61778.2024.10628810>
15. Salek M., Celep M., Weimann T., Stokes D., Shang X., Phung G. N., Kuhlmann K., Skinner J., Wang Y., Design, Fabrication, and Characterization of a D-Band Bolometric Power Sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, vol. 71, art. 8002509. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3159009>

16. Hoha A., Turavets U., Poznyak A., Pligovka A., Nanoporous Al₂O₃ Assisted Anodizing of WTi Alloy. *IEEE International Conference on Nanotechnology (NANO): 24th International conference, Gijon, July 8–11 2024* g. Gijon, 2024, pp. 287–291.
17. Pligovka A., Lazavenka A., Zakhlebayeva A. Electro-Physical Properties of Niobia Columnlike Nanostructures via the Anodizing of Al/Nb Layers. *Proceedings of the IEEE Conference on Nanotechnology, Cork, 23–26 July 2018*. Cork, 2018, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/NANO.2018.8626387>

Поступила 26.06.2025 г.