

# Физические принципы функционирования калориметрического сенсора мощности СВЧ-излучения на основе анодных тонкопленочных систем

И. А. Машукевич, Б. А. Мякиш, А. О. Крукович, С. М. Завадский, А. Н. Плиговка

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 220013*

*Минск, Беларусь*

*E-mail: iliamashook@gmail.com*

**Введение.** Измерение мощности СВЧ-излучения в трубчатых волноводных трактах является сложной и актуальной задачей современного приборостроения. Сенсоры мощности СВЧ-излучения страдают от ряда недостатков, таких как низкая чувствительность, медленное время отклика, плохое согласование импеданса и частотно-зависимая калибровка [1]. Перечисленные недостатки могут быть устранены дорогими решениями, но они экономически не выгодны и требуют сложных технологий. Компромиссным решением данной проблематики может быть применение анодных тонкопленочных систем, в которых ультратонкая пленка поглощает до 50% СВЧ-излучения. Терморезистивные элементы и микронагреватели формируются из анодных нанопроводов на основе двухслойной системы Al/Nb [2].

В данной работе будут рассмотрены физические принципы функционирования калориметрического сенсора мощности СВЧ-излучения на основе тонких пленок алюминия, ниобия и их анодных оксидов.

**1 Физические принципы.** Поглотитель представляет собой кремниевую пластину с тонкой металлической пленкой никеля (поверхностное сопротивление  $\sim 100 \text{ Ом} \cdot \square^{-1}$ ). С обратной стороны пластины напылена двухслойная система Al/Nb, которая после анодирования, реанодирования и химического травления формирует массив оксидных ниобиевых полупроводниковых нанопроводов [2]. Они выполняют роль нагревателя для нивелирования температуры окружающей среды и терморезисторов для измерения температуры нагрева поглотителя. В основе работы описанной конструкции лежат следующие физические принципы.

*1.1 Поглощение СВЧ-излучения.* Поле проникает через структуру при падении электромагнитной волны на тонкую проводящую пленку толщиной  $d$ , значительно меньшей глубины скин-слоя:

$$\delta = \frac{2}{\omega \mu \sigma}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – электропроводность элемента;  $\omega$  – циклическая частота падающего излучения;  $\mu$  – диэлектрическая проницаемость пленки. Взаимодействие описывается через поверхностный импеданс:

$$Z_s = R_s + jX_s, \quad (2)$$

где  $R_s$  – поверхностное сопротивление;  $X_s$  – поверхностное реактивное сопротивление. Для металлической пленки поверхностное сопротивление составляет:

$$R_s = \frac{1}{\sigma d}. \quad (3)$$

Мощность поглощенного излучения определяется через коэффициенты отражения  $R$  и прохождения  $T$  так как в формуле [3]:

$$A = 1 - R - T. \quad (4)$$

Условие максимального поглощения достигается при согласовании импедансов:  $R_s = Z_0$ , где  $Z_0 \approx 377 \text{ Ом} \cdot \text{м}^{-1}$  – волновое сопротивление свободного пространства. При этом объемная плотность джоулевых потерь, приводящая к нагреву, описывается законом:

$$q_v = \frac{1}{2} \sigma |E|^2, \quad (5)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля. Интегральная поглощенная мощность на единицу площади описывается формулой:

$$P_{abs} = \frac{1}{2} R_s |J_s|^2, \quad (6)$$

где  $J_s$  – поверхностная плотность тока.

Поглощенная СВЧ-энергия диссипирует в тепло, причем в силу малости толщины пленки ( $d \ll$  характерного теплового масштаба) температурное поле по толщине считается однородным. Уравнение теплового баланса для элемента поверхности имеет вид [4]:

$$\rho c_p d \frac{\partial T}{\partial t} = P_{abs}(t) - T - T_0 R_{th} \rho c_p p, \quad (7)$$

где  $\rho$ ,  $c_p$  – плотность и удельная теплоемкость материала пленки,  $T_0$  – температура окружающей среды,  $R_{th}$  – термическое сопротивление подложки и окружающей среды. В стационарном режиме непрерывного облучения устанавливается перегрев:

$$\Delta T = P_{abs} \cdot R_{th}. \quad (8)$$

При импульсном воздействии с длительностью импульса  $t_p$ , малой по сравнению с постоянной времени отвода тепла  $\tau_{th}$ , процесс носит адиабатический характер, и максимальное повышение температуры оценивается как:

$$\Delta T_{max} = P_{abs} \cdot t_p \rho c_p p d, \quad (9)$$

что критически важно для оценки термомеханической стойкости тонкопленочных структур.

*1.2 Передача тепла от поглотителя до терморезисторов.* В калориметрическом СВЧ-сенсоре на кремниевой пластине тепло от тонкопленочного поглотителя передается к терморезисторам преимущественно за счет латеральной теплопроводности через кремниевую подложку. Высокая теплопроводность монокристаллического кремния  $\kappa_{Si} \approx 130 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$  формирует основное термическое сопротивление в области между источниками тепла и датчиками. Физическая модель такой передачи описывается стационарным уравнением теплопроводности для полубесконечной пластины:

$$\nabla^2 T = - \frac{P_{abs}}{\kappa_{Si}}, \quad (10)$$

где перегрев в месте расположения терморезистора на расстоянии  $r$  от поглотителя аппроксимируется функцией Грина при точечном источнике:

$$\Delta T = \frac{P_{abs}}{2\pi\kappa_{Si}r^2}, \quad (11)$$

либо уточняется через эквивалентное термическое сопротивление растекания:

$$R_{th} = \frac{1}{\kappa_{Si}A}F, \quad (12)$$

для источника конечных размеров  $A$  [4, 5].

*1.3 Измерение температуры поглотителя.* Терморезистивное измерение температуры нанопроводами анодного оксида ниобия основано на линейной зависимости электрического сопротивления наноструктуры от температуры, что описывается классической моделью термистора:

$$R(T) = R_0[1 + \alpha(T - T_0)], \quad (13)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления (ТКС),  $T_0$  – начальное значение температуры,  $R_0$  – значение сопротивления при начальное температуре,  $T$  – заданная температура [6].

*1.4 Джоулев нагрев.* Нагрев калориметрического сенсора нанопроводами анодного оксида ниобия используется для активной термостабилизации и нивелирования температуры окружающей среды путем пропускания через массив нанопроводов электрического тока, что приводит к выделению тепла согласно закону Джоуля–Ленца:

$$P_{Joule} = I^2R(T), \quad (14)$$

где  $I$  – ток смещения,  $R(T)$  – сопротивление нанопровода, зависящее от температуры [7].

**Заключение.** Функционирование калориметрического СВЧ-сенсора на основе анодных тонкопленочных систем заключается в последовательной реализации четырех физических принципов:

- 1) Поглощение СВЧ-излучения, где достигается преобразование электромагнитной энергии в тепловую за счет джоулевых потерь.
- 2) Передача тепла к терморезисторам через латеральную теплопроводность кремниевой подложки, что определяет ТКС и временные характеристики сенсора.
- 3) Терморезистивное измерение температуры нанопроводами анодного оксида ниобия, благодаря высокому ТКС.
- 4) Реализация активной термостабилизации джоулевым нагревом нанопроводов, компенсирующая дрейфы окружающей среды.

Совокупность этих принципов обеспечивает высокую чувствительность, стабильность и точность калориметрического сенсора при измерениях мощности СВЧ-излучения в различных условиях эксплуатации.

### Литература.

1. 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.
2. Pligovka, A. Anodic Niobia Column-like 3-D Nanostructures for Semiconductor Devices / A. Pligovka, A. Lazavenka, G. Gorokh // IEEE Transactions on Nanotechnology. – 2019. – Vol. 18 (125). – P. 790–797.
3. Microwave absorption on a thin film / H. Bosman, Y. Y. Lau, R. M. Gilgenbach / Appl Phys Lett. – 2003. – Vol. 82, № 9. – P. 1353–1355.
4. Heat Transfer Evaluation of the Nasal Thermistor Technique / K. Storck, M. Karlsson, P. Ask. [et al.] // IEEE Transactions on biomedical engineering. – 1996. – Vol. 43, № 12. – P. 1187–1191.
5. Хвесьюк, В. И. Теплопроводность наноструктур / В. И. Хвесьюк, А. С. Скрыбин //

Теплофизика высоких температур. – 2016. – Т. 55, № 3. – С. 447–471.

6. Feteira, A. Negative Temperature Coefficient Resistance (NTCR) Ceramic Thermistors: An Industrial Perspective / Antonio Feteira // J. Am. Ceram. Soc. – 2009. – Vol. 92 (5). – P. 967–983.
7. Joule heating in nanowires / H. Fangohr, D. S. Chernyshenko, M. Franchin [et al.] // Phys. Rev. B. – 2011. – Vol. 84. – P. 054437.