

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ОМИЧЕСКОГО НАГРЕВА КАЛОРИМЕТРИЧЕСКОГО СЕНСОРА МОЩНОСТИ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОПРОВОДОВ ИЗ ОКСИДА НИОБИЯ

*Машукевич И. А., Мякиш Б. А., Крукович А. О.*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Плиговка А. Н. – канд. техн. наук,*

*вед. науч. сотр. НИЛ 4.10 «Нанотехнологии»*

В данной работе представлены результаты численного моделирования в программном комплексе COMSOL Multiphysics 6.4 процессов омического нагрева калориметрического сенсора мощности СВЧ-излучения, выполненного нанопроводами из оксида ниобия. Показана возможность нагрева кристалла сенсора напряжением 12 В. Установлено, что при указанных условиях удается достичь нагрева кристалла на 36 °С, что является достаточным для компенсации температуры окружающей среды.

**Введение.** Анализ современных конструктивных решений тонкопленочных терморезистивных калориметрических сенсоров мощности СВЧ-излучения выявил значительный недостаток существующих конструкций – отсутствие термостабилизации, что приводит к влиянию окружающей среды на результат измерения [1]. Одним из способов устранения этого недостатка является использование омического нагрева [2, 3] кристалла сенсора нанопроводами анодного оксида ниобия. Методика формирования нанопроводов подробно описана в работе [4]. Кратко суть метода заключается в следующем: на поверхность кремниевой пластины методом магнетронного распыления наносится двухслойная система Al/Nb. Затем верхний слой алюминия анодируют в 0,4 М водном растворе щавелевой кислоты в потенциостатическом режиме при напряжении 37 В. После этого подслои ниобия реанодируют в гальваностатическом режиме при плотности тока 300 мкА·см<sup>-2</sup>. Далее методом химического травления вскрывают верхушки нанопроводов и через маску наносят никелевые контактные площадки методом магнетронного напыления.

Данный подход позволяет сформировать массив полупроводниковых нанопроводов оксида ниобия внутри пор анодного оксида алюминия. Преимущество метода заключается в том, что массив нанопроводов оксида ниобия может использоваться не только в качестве нагревателей для компенсации температуры окружающей среды, но и как терморезистивные элементы, способные с высокой точностью определять температуру нагрева поглотителя СВЧ-излучения. Однако, для дальнейшего развития данного решения необходимо определить вольт-амперный режим работы, распределение градиента температуры и напряжения, а также оценить диапазон температур, до которых нанопровода способны нагревать калориметрический сенсор без разрушения.

В данной работе на основе численного моделирования физических процессов методом конечных элементов будут исследованы процессы омического нагрева нанопроводов оксида ниобия, определен градиент температур и электрических потенциалов, а также оценен температурный диапазон нагрева.

**Методика численного моделирования.** В качестве среды для численного моделирования был выбран COMSOL Multiphysics 6.4. Для реализации поставленной цели работы была использована модель джоулевого нагрева со стационарными параметрами моделирования. Мощность, которая выделяется в структуре и вызывает нагрев структуры, в рамках данной модели определяется формулой:

$$P = IU, \quad (1)$$

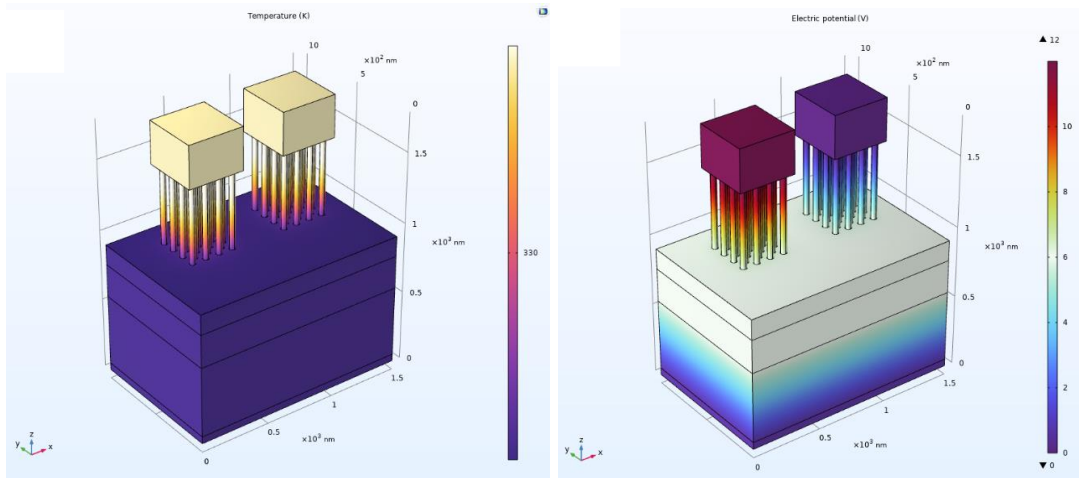
где  $I$  – сила тока, проходящий через элемент структуры,  $U$  – падение напряжения в области данного элемента структуры.

Размер кремниевой подложки был выбран площадью 1,5×1 мкм<sup>2</sup>, а толщина – 500 нм. В качестве поглотителя использовали пленку никеля толщиной 50 нм, расположенную на одной стороне кремниевой подложки. На другой стороне кремниевой подложки располагался слой ниобия толщиной 234 нм, толщина сплошного оксида ниобия – 142 нм, а высота нанопроводов – 551 нм. Диаметр нанопроводов составлял 43 нм. Размер никелевых контактных площадок составлял 0,4×0,4 мкм<sup>2</sup> и толщиной 300 нм. К контактным площадкам прикладывался положительный потенциал, а к подслою ниобия отрицательный, значение напряжения устанавливалось 12 В. Температура окружающей среды задавалась 293,15 К, а коэффициент теплопереноса был установлен 10 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Исходные данные были взяты из работы [4] со следующими допущениями:

- 1) Толщина кремниевой подложки уменьшена до 500 нм.
- 2) Рассматривалась небольшая типовая область структуры, а не вся площадь калориметрического сенсора.

- 3) Контакты были значительно меньше физического прототипа.  
 4) В модели не учитывалось влияние пористого оксида алюминия.

**Результаты и обсуждения.** Результаты моделирования представлены на рисунке 1.



а – градиент температур; б – градиент электрических потенциалов.

Рисунок 1 – Результаты моделирования омического нагрева кристалла калориметрического сенсора нанопроводами оксида ниобия

Результаты вычислительного эксперимента свидетельствуют, что подача напряжения 12 В на калориметрический сенсор с заданными геометрическими параметрами обеспечивает его нагрев с 293,15 К до 329,57 К, при этом величина приращения температуры составляет 36,42 °С. Полученные данные позволяют заключить, что даже относительно низкое напряжение 12 В является достаточным для разогрева кристалла калориметрического сенсора до температурного уровня, превышающего значение, необходимое для компенсации температуры окружающей среды. Следует отметить, что в рамках настоящей работы не учитывались следующие факторы: теплоизолирующие свойства оксида алюминия, влияние толщины кремниевой пластины, а также воздействие значительного количества нанопроводов на температурный режим подложки. Кроме того, геометрические размеры контактных площадок являются недостаточными для практической реализации, и их увеличение потенциально может привести к повышению температуры нагрева при неизменном значении приложенного напряжения. Полученные результаты могут найти применение при проектировании тонкопленочных калориметрических сенсоров в последующих исследованиях и разработках.

**Заключение.** С использованием программного пакета COMSOL Multiphysics 6.4 выполнено численное моделирование процесса омического нагрева в калориметрическом сенсоре мощности СВЧ-излучения. Показано, что при относительно низком приложенном напряжении достигается нагрев кристалла на 36,42 °С. Полученные результаты позволяют утверждать, что омический нагрев нанопроводов, электрически соединённых с исходной структурой, является эффективным механизмом для повышения температуры кристалла калориметрического сенсора.

Вместе с тем следует учитывать, что представленные результаты получены при ряде допущений. При проектировании структур, использующих указанный принцип нагрева, необходимо принимать во внимание следующие параметры: увеличенную толщину основания, геометрические размеры подложки и контактных площадок, а также общее количество нанопроводов, участвующих в процессе нагрева. Указанные факторы способны влиять на распределение электрического потенциала – в частности, приводить к необходимости его повышения на одном из контактов для достижения требуемой температуры.

**Список использованных источников:**

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. 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.
3. 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.
4. 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. – P. 790-797.