

---

---

# ФИЗИКА

---

---

УДК 536.2.02

## РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В НАНОСТРУКТУРАХ ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

<sup>1</sup>Кармоков А.М., <sup>2</sup>Козырев Е.Н., <sup>1</sup>Молоканов О.А., <sup>1</sup>Кармокова Р.Ю.\*

<sup>1</sup>Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

<sup>2</sup>Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)

\*karrit@mail.ru

*Предложена модель тепловых процессов, протекающих в пористом анодном оксиде алюминия с регулярной структурой. Получены зависимости распределения температурного поля в параллельном и перпендикулярном направлениях относительно канала пористого анодного оксида алюминия. Получено распределение температуры вдоль тонкого стержня оксида алюминия с максимумом посередине, для случая, когда концы стержня имеют одинаковую температуру, а также построена зависимость изменения температуры в перпендикулярном направлении по толщине стенки канала. Проведен расчет зависимости мощности теплового потока от толщины резистивного слоя в поверхностном слое канала пористой структуры.*

**Ключевые слова:** пористый оксид алюминия, температурное поле, тепловой поток, резистивный слой, закон Фурье.

## CALCULATION OF THERMAL PROCESSES OCCURRING IN NANOSTRUCTURES OF POROUS ANODIC ALUMINUM OXIDE

<sup>1</sup>Karmokov A.M., <sup>2</sup>Kozyrev Ye.N., <sup>1</sup>Molokanov O.A., <sup>1</sup>Karmokova R.Yu.

<sup>1</sup>Kabardino-Balkarian State University

<sup>2</sup>North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)

*A model of thermal processes occurring in porous anodic aluminum oxide with a regular structure is proposed. The dependences of the distribution of the temperature field in parallel and perpendicular directions relative to the channel of porous anodic aluminum oxide were obtained. The resulting temperature distribution along the thin oxide of the rod assumes a maximum in the middle, for cases where the ends of the rod have the same temperature, and the temperature change in the base direction along the thickness of the channel wall is also plotted. The dependence of the heat flow power on the thickness of the resistive layer in the surface layer of the channel of the porous structure was calculated.*

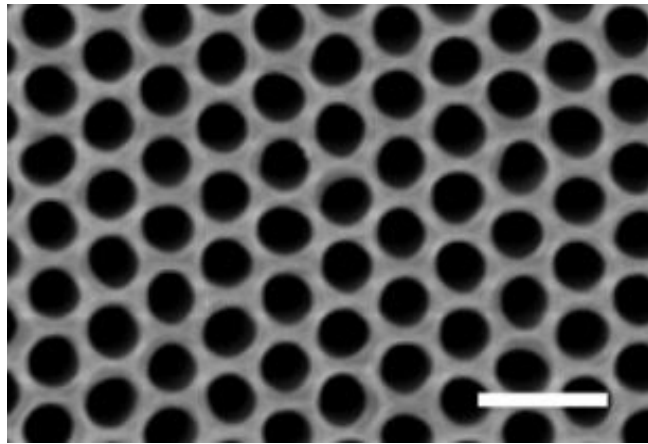
**Keywords:** porous aluminum oxide, temperature field, heat flow, resistive layer, Fourier's law.

## Введение

Теплофизические характеристики материалов являются важными критериями работоспособности и качества изделий, функциональные свойства которых используются в электронной технике. Например, стабильность и длительность работы микропористых структур с наполнителями зависят от термической стабильности используемого материала в процессе эксплуатации приборов назначения [1–3]. В ряде случаев функциональные материалы могут иметь пористые структуры, что может внести существенный вклад в качество и работоспособность изделий, в частности, микропористых структур с наполнителями. В работе [4] предлагается применение пористого анодного оксида алюминия для создания МКП нового поколения. Синтез оксида алюминия с регулярной пористой структурой отработан достаточно хорошо и в настоящее время можно сформировать сотовые структуры с толщиной 40–150 мкм и диаметрами каналов 0.2–8 мкм.

В работе [5] исследована термическая стабильность мембран анодного оксида алюминия и определено влияние отжига при высоких температурах на морфологию поверхности и ее структуру. Также определены коэффициенты теплового расширения, значения теплоемкости и теплопроводности.

На *рис. 1* представлен фрагмент поверхности анодного оксида алюминия из работы [6]. Как видно из рисунка, каналы имеют практически совершенную гексагонально расположенную структуру, что важно для применения их в микроканальных пористых структурах.



*Рис. 1.* Морфология фрагмента поверхности анодного оксида алюминия из работы [6].  
Размерный отрезок – 200 нм

Тепловые потоки в подобных изделиях могут возникать как внутри канала в процессе воздействия ускоренных заряженных частиц, так и извне в результате воздействия внешних тепловых полей при эксплуатации изделий. Например, в процессе эксплуатации микроканальных структур в ряде случаев между металлизированными торцами пластины вдоль канала создается постоянное электрическое поле, которое влияет на температурное поле матрицы внутри полости канала. Кроме того, соударение ускоренных этим полем заряженных частиц с поверхностью канала в процессе умножения, тоже может внести изменение теплового поля внутри канала. Из этих двух составляющих наиболее существенный вклад в тепловой баланс пористой структуры вносит внешнее электрическое поле [7]. Поэтому рассмотрение изменения температурного профиля внутри канала, возникающего при растекании выделяющегося тепла к торцам, и перегрев торцов структуры относительно окружающей среды является важной задачей.

В настоящей работе предложена математическая модель тепловых процессов, протекающих в матрице наноструктур пористого алюминия, с учетом теплового рассеяния, и рассчитаны тепловые потоки, протекающие во внутренних стенках параллельно направлению канала и в межканальной области пористой структуры, т. е. в перпендикулярном к каналам направлении (*рис. 2*).

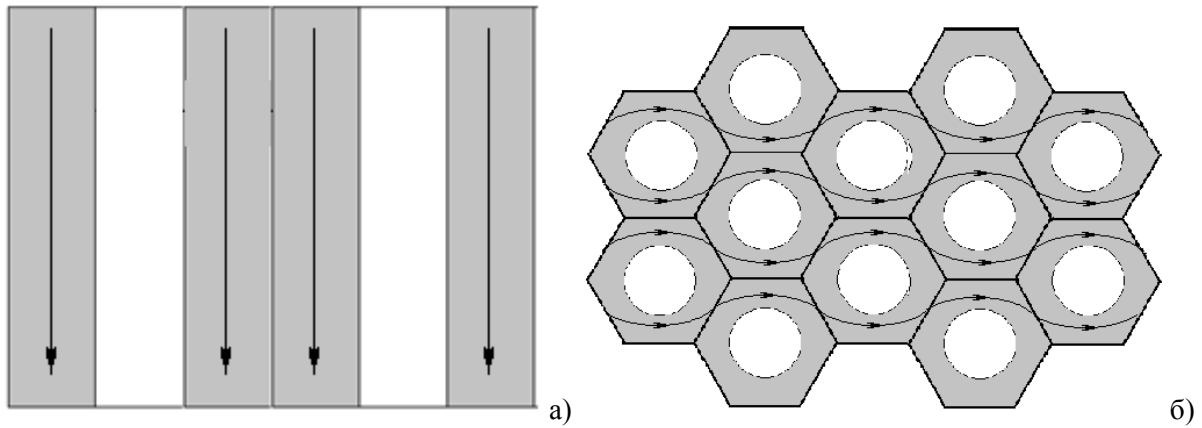


Рис. 2. Схема структуры пористого анодного оксида алюминия:  
а – тепловой поток вдоль каналов; б – тепловой поток перпендикулярно каналам

Принимая во внимание гексагональное расположение сквозных каналов в пористой структуре можно отметить, что пористость  $p$  и коэффициент прозрачности  $k$  структуры совпадают. Их можно определить как отношение площади круга, занимаемой одним каналом к площади шестигранника, приходящейся на один канал. Тогда пористость структуры, которая совпадает с коэффициентом прозрачности определяется соотношением

$$p = k = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2, \quad (1)$$

$$r_2 = r_1 + d,$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – радиусы внутренней и внешней стенок канала, соответственно, а  $d$  – половина расстояния между каналами.

На рис. 3 показана зависимость пористости структуры от диаметра каналов  $r_1$  и величины  $d$ .

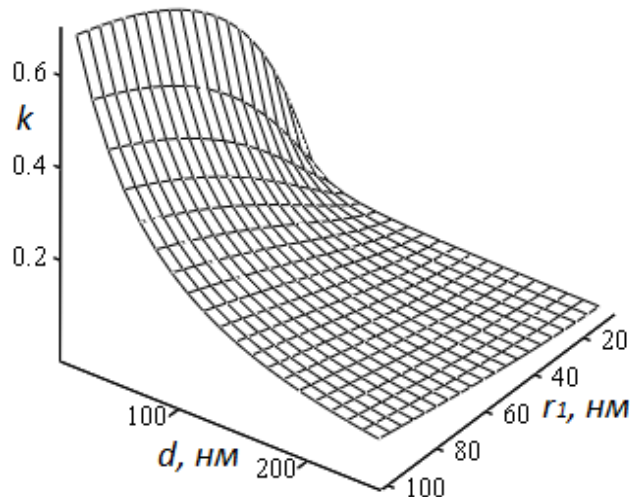
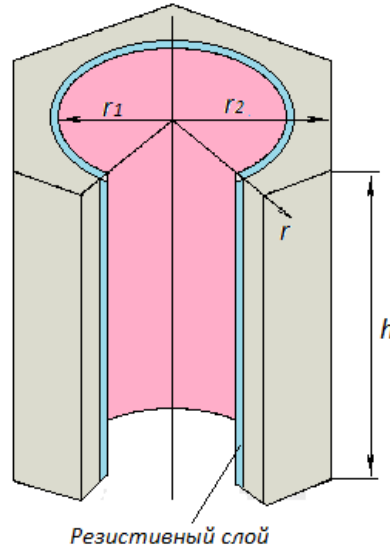


Рис. 3. Зависимость коэффициента прозрачности ( $k$ ) наноразмерных каналных структур анодного оксида алюминия от внутреннего радиуса канала ( $r_1$ ) и значения половины расстояния между каналами ( $d$ )

### Исследование тепловых процессов в цилиндрических структурах

При использовании микро- и наноканальных структур обычно между торцами создается разность потенциалов высокого напряжения. Это продольное поле создает ускорение и лавинное умножение заряженных частиц, например электронов внутри канала за счет больших значений (более единицы) коэффициента вторичной электронной эмиссии при столкновениях частиц со стенками каналов. Для обеспечения этих процессов на внутренней поверхности канала создаются резистивный слой для формирования заданного распределения напряженности поля и для подвода тока к точкам вторичной эмиссии, а

также эмиссионный слой для обеспечения вторичной электронной эмиссии с коэффициентом более единицы. В результате прохождения электрического тока вдоль канала по указанным слоям выделяется резистивное тепло, и поверхность разогревается как по длине, так и толщине стенки канала, т. е. создается градиент температуры. На *рис. 4* представлен фрагмент единичного канала с внутренним и внешним радиусами  $r_1$  и  $r_2$ , соответственно, и длиной  $h$ .

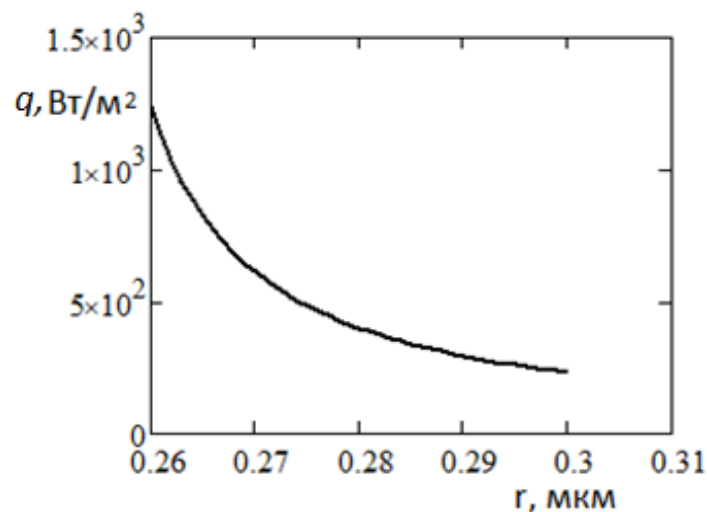


*Рис. 4.* Схема полого шестигранника для расчета температурного профиля в стенке канальной структуры

В расчетах принята номинальная потребляемая мощность равной 2–10 мВт [7, 8]. С учетом этого построено распределение температуры вдоль канала из анодного оксида алюминия для пористой структуры диаметром 18 мм. Для канала с диаметром 500 нм, длиной  $h = 100$  мкм и коэффициентом прозрачности 0.7 на изделие приходится  $5.08 \times 10^8$  каналов. Таким образом, с учетом этих параметров, потребляемая одним каналом номинальная мощность будет составлять  $(0.98-1.97) \times 10^{-11}$  Вт, а удельная мощность, потребляемая резистивным слоем будет равна

$$q(r) = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\pi(r^2 - r_1^2)}, \quad (2)$$

где  $r_1$  и  $r$  – радиус канала и толщина резистивного слоя, соответственно. На *рис. 5* показана зависимость потока мощности от толщины резистивного слоя при радиусе канала  $r_1 = 0.25$  мкм.



*Рис. 5.* Зависимость потока тепловой мощности от толщины резистивного слоя при радиусе канала 0.25 мкм

Из рис. 5 видно, что с увеличением толщины проводящего слоя  $\Delta r = r - r_1$  уменьшается поток мощности, что определяет величину изменения температуры на поверхности канала.

Для определения температурного поля вдоль канала выделим однородный стержень длиной  $h \gg r_1$ . Если взять площадку  $dS$  и рассчитать изменение количества тепла  $dQ$ , проходящее через нее по нормали за время  $dt$ , согласно закону Фурье имеем [9]

$$dQ = -\lambda \frac{dT}{dn} dS dt, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности среды. В стационарных условиях при расчетах удобнее использовать плотность теплового потока, определяемую уравнением

$$q = \lambda \text{grad} T. \quad (4)$$

Решение этого уравнения для изменения температуры вдоль длинного тонкого стержня имеет вид

$$\Delta T \left( \frac{x}{h}, r \right) = \frac{q(r) h^2}{2\lambda} \left[ \frac{1}{4} - \left( \frac{x}{h} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

Для пористого анодного оксида алюминия  $\lambda = 1.63$  Вт/(м К) [5].

Используя приведенные выше номинальные данные, рассчитано изменение температуры по длине канала и от толщины резистивного слоя в оксиде алюминия для одного канала (рис. 6). Расчеты проводились для стержня длиной  $h \gg r_1$  при радиусе канала  $r_1 = 0.25$  мкм и  $h = 100$  мкм.

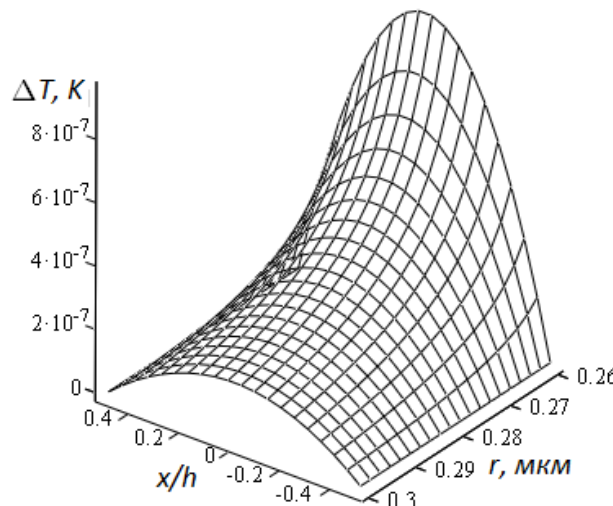


Рис. 6. Распределение температуры по длине канала в зависимости от толщины резистивного слоя и отношения  $x/h$  для канала радиуса 0.25 мкм

Таким образом, видно, что в пористой мембране температура в средней части канала может повышаться в несколько раз в зависимости от подаваемой мощности.

### Расчет распределение температуры по толщине стенки цилиндра

Значительный разогрев поверхностного слоя канала будет способствовать образованию теплового потока в направлении вдоль канала и по толщине стенки канала. В стационарных условиях тепловой поток  $q$  через цилиндрическую поверхность радиуса  $r$  и длиной  $h$  согласно закону Фурье можно записать в виде

$$Q = qS = -\lambda \frac{dT}{dr} 2\pi r h. \quad (6)$$

Отсюда

$$dT = -\frac{Q}{2\pi h\lambda} \frac{dr}{r}. \quad (7)$$

Интегрируя последнее соотношение, и решая с учетом граничных условий  $r = r_1, T = T_1$  и  $r = r_2, T = T_2$ , получаем уравнение, описывающее распределение температуры по толщине стенки цилиндра в виде

$$T = T_1 - \frac{dQ}{2\pi h\lambda} \ln \frac{r}{r_1}. \quad (8)$$

Предположим, что в результате пропускания электрического тока вдоль канала поверхность канала разогревается от 300 до 310 К. При этом выделяемая мощность рассеивается через стенку, и наблюдается градиент температуры по толщине стенки. На рис. 7 показаны результаты расчета распределения температуры по толщине стенке цилиндра, полученные при значениях мощности теплового потока 1.5 мВт, 5 мВт, 10 мВт. Расчеты проводились для капилляра с толщиной стенки 75 нм и внутренним радиусом канала 250 нм, что соответствует коэффициенту прозрачности пористой структуры  $k = 0.7$ .

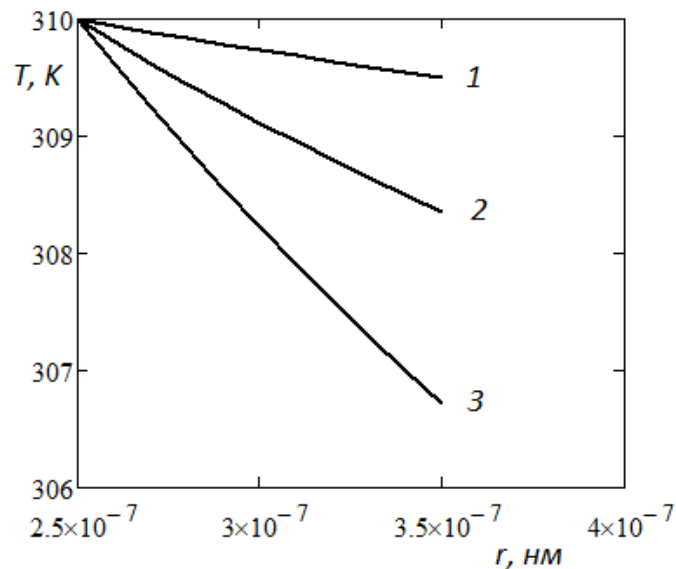


Рис. 7. Распределение температуры в стенке канала с внутренним радиусом цилиндра 250 нм и толщине 150 нм при различных мощностях теплового потока: 1 – 1.5 мВт, 2 – 5 мВт, 3 – 10 мВт

### Выводы

По предложенной модели построено распределение температурного поля в параллельном и перпендикулярном направлениях относительно канала в структуре пористого анодного оксида алюминия. Получено распределение температуры вдоль тонкого стержня оксида алюминия с максимумом посередине для случая, когда концы стержня имеют одинаковую температуру, а также построена зависимость изменения температуры в перпендикулярном направлении по толщине стенки канала. Получена зависимость мощности теплового потока от толщины резистивного слоя в поверхностном слое канала анодного оксида алюминия.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 23–13–20012).

### Библиография

1. Шомахов З.В., Кармоков А.М., Молоканов О.А., Люев В.К., Кармоков М.М., Молоканова О.О. Диффузия в стекле С78-5 под действием электрического тока при высоких температурах // Известия вузов. Физика. 2019. Т. 62, № 5. С. 64–68.

2. Кармоков А.М., Молоканов О.А., Молоканова О.О., Шомахов З.В. Стабилизация электрических свойств стекол вакуумной электроники // Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82, № 7. С. 942–944.
3. Шомахов З.В., Молоканов О.А., Кармоков А.М. Электрофизические свойства стекол С87-2, С78-4, С78-5 // Физика и химия стекла. 2018. Т. 44, № 3. С. 286–289.
4. Сокол В.А., Яковцева В.А., Шиманович Д.Л. Особенности применения пористых оксидов алюминия // Доклады БГУИР. 2012. № 2. С. 21-27.
5. Росляков И.В., Напольский К.С., Евдокимов П.В., Напольский Ф.С., Дунаев А.В., Елисеев А.А., Лукашин А.В., Третьяков Ю.Д. Термические свойства мембран анодного оксида алюминия // Наносистемы: Физика, химия, математика. 2013. Т. 4, № 1. С. 120–129.
6. Han H., Park S.J., Jang J.S., Ryu H., Kim K.J., Baik S., Lee W. In situ determination of the pore opening point during wet-chemical etching of the barrier layer of porous anodic aluminum oxide: nonuniform impurity distribution in anodic oxide // ACS Applied Materials & Interfaces. 2013. V. 5. N 8. P. 3441–3448.
7. Аксенов В.А. Электронно-оптический преобразователь. Патент РФ № 2331948 от 09.01.2007.
8. Белл Р.Л. Эмиттеры с отрицательным электронным родством. М.: Энергия, 1978. 190 с.
9. Мазо А.Б. Основы теории и методы расчета теплопередачи: учебное пособие. Казань: изд-во Казан. ун-та, 2013. 144 с.