

УДК 519.633.6 536.21 538.945

Анализ распределения тепла в пленке нитрида ниобия на основе трехмерной модели при импульсном воздействии электрического тока.

Данилова Е.В., Кузьмичев Н.Д., Васютин М.А.

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет

Аннотация: В работе рассматривается процесс распространения тепла в пленке NbN при прохождении через нее импульса тока на основе неоднородного трехмерного уравнения теплопроводности. Построена 3D модель системы «контакты-пленка-подложка-окружение». Оценен максимальный нагрев пленки. Показано, что материал контактов (бериллиевая бронза) обеспечивает эффективный теплоотвод от сверхпроводящей пленки, находящейся в резистивном состоянии, при протекании через нее тока большой плотности.

Ключевые слова: распределение тепла, неоднородное уравнение теплопроводности, 3D модель, краевая задача, контакты-пленка-подложка-окружение, пленка NbN .

1. Введение

Сверхпроводящие пленки нитрида ниобия (NbN) имеют температуру перехода в сверхпроводящее состояние (T_c) равную 12-17 К и являются одними из наиболее перспективных и исследуемых материалов. За счет простоты изготовления, механической прочности и радиационной устойчивости, пленки NbN активно используются в прикладных целях и фундаментальной науке. Математическое моделирование процесса теплопереноса в системе «контакты-пленка-подложка-окружение» позволяет определить максимальный нагрев пленки при заданной скважности импульса электрического тока амплитудой близкой к критической плотности тока сверхпроводящего состояния NbN . В работе представлены расчеты 3D модели в ПО Comsol Multiphysics на основе трехмерного неоднородного уравнения теплопроводности с учетом расположения теплоотводящих контактов на поверхности пленки NbN , а также длительности и амплитуды импульса тока.

2. Постановка задачи

Рассмотрим систему «контакты-пленка-подложка-термостат» на примере пленки нитрида ниобия, напыленной на кварцевую (SiO_2) подложку (рис. 1).

Образец пленки NbN имеет размеры 9 мм×5 мм×400 нм. Толщина кварцевой подложки равна 1 мм. Прижимные контакты из бериллиевой бронзы имеют ширину 1 мм, толщину 0.13 мм, длину 5 мм и плотно прижаты к пленке. Они имеют высокую теплопроводность при низких температурах. Теплообмен пленки в области контакта происходит по закону Ньютона. Область контакта пленки с кварцевой подложкой остается постоянной поддерживаемой в эксперименте и равной температуре медной подложки (термостат). Для анализа системы использовалось неоднородное

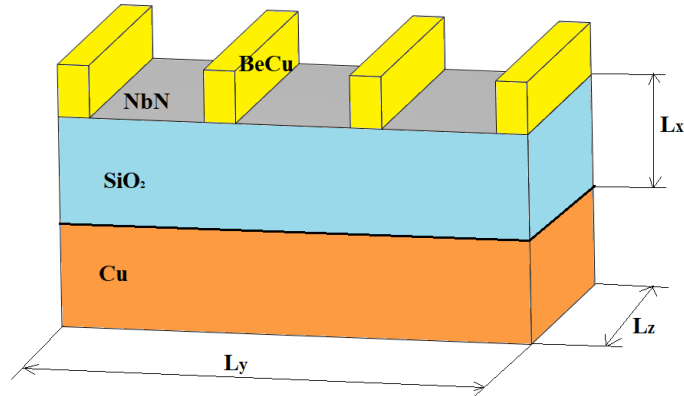


Рис. 1. Модель системы «контакты-пленка-подложка».

трехмерное уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a^2 \Delta T = Q, \quad (1)$$

где T – температура пленки, t – время, x, y, z – координаты системы (рис. 1), $a^2 = \frac{\lambda}{\rho C}$ – коэффициент температуропроводности, C – теплоемкость пленки, ρ – ее плотность, λ – ее коэффициент теплопроводности. Тепловыделение Q вычисляется в соответствии с формулой

$$Q(x, y, z, t) = \frac{P(x, y, z, t)}{c_{NbN} \cdot \rho_{NbN}},$$

$P(x, y, z, t)$ – объёмная плотность мощности источника тепла (плёнки), $c_{NbN} = 17$ Дж/(кг·К) – удельная теплоёмкость плёнки при $T = 14$ К, $\rho_{NbN} = 8400$ кг/м³ – плотность плёнки [3]. В нашем случае сила тока линейно возрастает за время t_0 от 0 до I_{max} . Величина $P(x, y, z, t)$, определяемая законом Джоуля-Ленца:

$$P(x, y, z, t) \equiv P(t) = \begin{cases} \rho \cdot j_0^2 \cdot t^2, & x \leq d, t \leq t_0; \\ 0, & x > d, t > t_0, \end{cases}$$

где $\rho \approx 440 \mu\omega \cdot cm$ – удельное сопротивление плёнки в нормальном состоянии, $j_0 = \frac{I_{max}}{d\omega t_0}$, $t_0 = 0.25$ мс, $I_{max} = 1.12$ А. Данные параметры взяты из условий реального эксперимента по исследованию вольт-амперных характеристик пленок нитрида ниобия, находящихся в резистивном состоянии 1-4, например, выше T_c . Начальное условие определяет начальную температуру системы «контакты-пленка-подложка-окружение» и в нашем случае мы задали равным: $T(x, y, z, 0) = T_0 = 14$ К. Граничное условие при $x = 0$ определялось с учетом закона Ньютона для теплообмена между пленкой и контактами (третья краевая задача):

$$\frac{dT}{dx}(0, y, z, t) = H(y)[T(0, y, z, t) - T_0]$$

В межконтактной области $H = 0$, в области контакта $H = H_0 = 50$ мм⁻¹ [4]. Граничное условие при $x = L_x$ имеет вид: $T(L_x, y, z, t) = T_0 = 14$ К (первая краевая

задача), L_x – толщина подложки вместе с пленкой. Боковые поверхности пленки находятся при $T = 14$ К.

3. Методы и результаты решения

Для решения поставленной задачи использовалось ПО Comsol Multiphysics. Первым шагом делаем построение модели с помощью блока Geometry (Геометрия). При построении следует учитывать, что толщина пленки достаточно мала, а количество элементов расчетной сетке в ней должна быть большое. С учетом этого фактора необходимо связывать все элементы геометрии узлом Form Assembly и выключить Create imprints. Вторым шагом приступаем к заданию материалов. Электросопротивление пленки NbN слабо зависит от температуры и поэтому в расчетах эту зависимость можно не учитывать. Далее выставляем начальные условия. Для моделирования джоулева нагрева следует использовать связку процедур Electric currents с Heat transfer in solids через интерфейс Electromagnetic heating. Помимо стандартных интерфейсов Current Conservation, Electric Insulation, Initial Values и Continuity добавляем интерфейс Terminal и задаем в него эффективное значение тока в импульсе, отметим области, которые должны быть источником тока – крайние контакты. Переходя к интерфейсу Heat transfer in solids, добавляем Temperature и задаем значение температуры, указывая все охлаждаемые поверхности. Один из самых сложных моментов расчета и построения является задание расчетной сетки. Самым оптимальным вариантом является построение квадратной сетки на поверхности пленки. Необходимо протянуть ее по всей длине до изоляции через Swept, отметить через Distribution количество слоев в доменах. Сетку на лапках можно оставить призматической. Заключительный этап – настройка решателя. В Comsol есть особенные встроенные решатели для таких задач: Frequency-Stationary и Frequency-Transient. Их особенность заключается в том, что потери электрической энергии система считает в частотном режиме, т. е. среднюю за период, а тепловой расчет проводит либо в стационарном, либо во временном диапазоне. Такой решатель допустимо использовать в том случае, если нам надо узнать распределение температуры в момент, сильно больший по сравнению с периодом импульса. Это позволяет получить достаточно хорошее решение за короткое время. Если использовать просто временной диапазон для таких задач, она резко станет гораздо сложнее. В настройках Frequency-Stationary выставляем частоту колебаний. Выполнив все необходимые настройки получаем 3D модель распределения тепла в исследуемой системе (рис. 2-3).

4. Выводы

Как видно из результатов (рис. 2-3) максимальная температура нагрева составляет 14.76 К, и достигается в точке между 2 и 3 контактами. Данная работа подтверждает, что контакты из бериллиевой бронзы являются достаточным теплоотводом. Нагреванием самих контактов можно пренебречь так как масса и теплопроводность контактов много больше, чем пленки. Исследуемая модель показывает, что токи высокой плотности ($10^4 - 10^5$ А/см²) незначительного (~ 0.8 К) нагревают исследуемые образцы пленок, находящихся в резистивном состоянии благодаря контактам из выбранного материала.

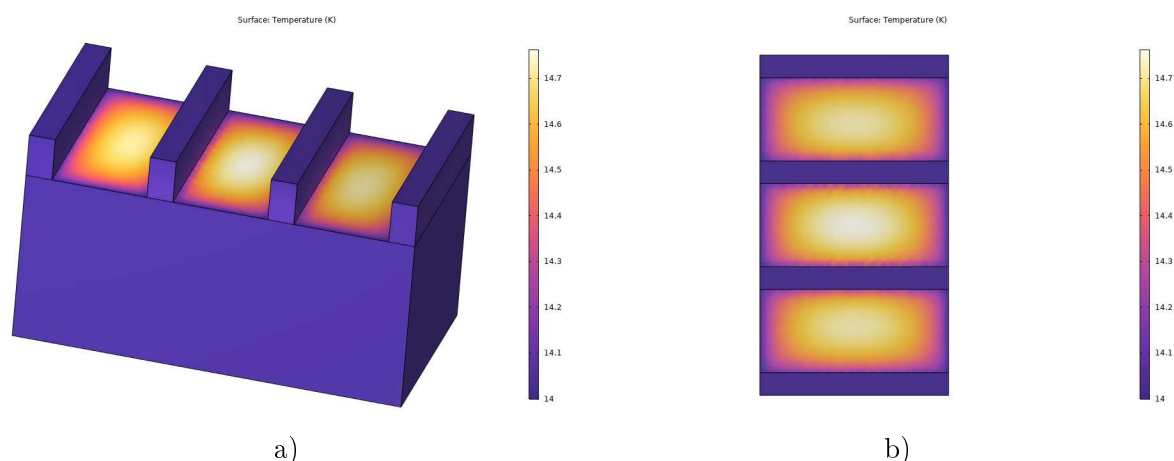


Рис. 2. Распределение тепла в пленке NbN после подачи импульса тока при $t = t_0 = 0.25$ мс:
а) общий вид, б) вид сверху.

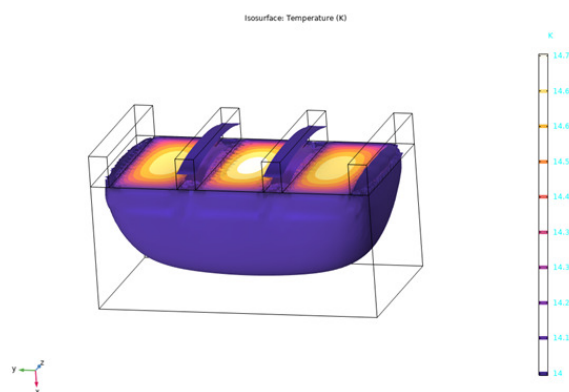


Рис. 3. Изоповерхность температуры исследуемой модели.

Литература

1. Кузьмичев Н.Д., Васютин М.А., Данилова Е.В., Лапшина Е.А. Математическое моделирование переноса тепла в системе плёнка-подложка-термостат при нагреве электропроводящей плёнки импульсным током высокой плотности // Журнал Средневолжского математического общества. 2021. Т.23. №1. С. 82–90.
2. Васютин М.А., Данилова Е.В., Кузьмичев Н.Д. Оценка максимального нагрева пленки NbN токовым импульсом при низких температурах на основе уравнения теплопроводности // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т.29. №3. С. 473–480.
3. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
4. Васютин М.А., Кузьмичев Н.Д., Шилкин Д.А. Моделирование процесса теплоотдачи сверхпроводящих пленок в резистивном состоянии // Журн. техн. физики. 2021. Т.91, Вып. 3. С. 538–541.

MSC 35K200

Analysis of heat distribution in a niobium nitride membrane based on a three-dimensional model under pulsed electric current.

E.V. Danilova, N.D. Kuzmichev, M.A. Vasyutin
National Research Mordovian State University

Abstract: The paper considers the process of heat propagation in an NbN membrane when a current pulse passes through it based on an inhomogeneous three-dimensional thermal conductivity equation. A 3D model of the "contacts–membrane–substrate–environment" system is constructed. The maximum heating of the membrane is estimated. It is shown that the contact material (beryllium bronze BeCu) provides an effective heat sink from a superconducting membrane in a resistive state when a high-density current flows through it.

Keywords: heat transfer, inhomogeneous heat equation, boundary value problem, beryllium bronze, NbN membrane.

References

1. Kuzmichev N.D., Vasyutin M.A., Danilova E.V., Lapshina E.A. Mathematical modeling of heat transfer in a film–substrate–thermostat system when an electrically conductive film is heated by a high-density pulsed current // Journal of the Middle Volga Mathematical Society. 2021. Vol.23. No.1. P. 82-90.
2. Vasyutin M.A., Danilova E.V., Kuzmichev N.D. Estimation of the maximum heating of the NbN film by a current pulse at low temperatures based on the thermal conductivity equation // Thermophysics and aeromechanics. 2022. Vol.29. No.3. P. 473–480.
3. Tables of physical quantities. Guide / Edited by I.K. Kikoin. M.: Atomizdat, 1976. 1008 p.
4. Vasyutin M.A., Kuzmichev N.D., Shilkin D.A. Modeling of the heat transfer process of superconducting films in a resistive state // Journal of Technology. physics. 2021. Vol.91. Issue 3. P. 538-541.