

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Определение состава и механических деформаций в $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ - гетероструктурах из данных спектроскопии комбинационного рассеяния света: уточнение параметров модели / В.А. Володин [и др.] // ФТП.– 2006. – Т. 40, № 11.– С. 1349–1355.
2. Расчет спектров комбинационного рассеяния света сплава $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ /А.В.Васин [и др.] // Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского – 2011. –№5(1). – С.62–68.
3. Strain-relaxed SiGe/Si heteroepitaxial structures of low threading-dislocation density / P.I.Gaiduk [et al.] // Thin Solid Films. – 2000. – V. 40, № 367. – P. 120–125.

ОЦЕНКА НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ ОДНОРОДНОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ КИЛОВОЛЬТНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ЗОНДОМ

М. А. Степович¹, А. Н. Амрастанов¹, Е. В. Серегина²

¹) *Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, ул. Степана Разина, 26, 248023 Калуга, Россия, e-mail: m.stepovich@rambler.ru; an_amr@mail.ru*

²) *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет), Калужский филиал, ул. Баженова, 2, 248000 Калуга, Россия, e-mail: evfs@yandex.ru*

Методами математического моделирования рассмотрена задача распределения тепла в металлических материалах, облучённых остро сфокусированными электронными пучками киловольтных энергий (от 10 по 30 кэВ) при отсутствии теплообмена мишени с внешней средой. Модель построена на решении многомерного стационарного уравнения теплопроводности с использованием функции Грина. В качестве функции источника использована модель, применимая для широкого класса твердых тел и диапазона энергий первичных электронов, основанная на раздельном описании вкладов в рассеиваемую в мишени энергию поглощенных и обратно рассеянных электронов. Использование особенностей такого подхода объяснена немонотонная зависимость температуры наибольшего нагрева мишени от энергии первичных электронов. Полученные результаты могут быть использованы при моделировании нагрева металлических элементов материалов и структур микро- и нанoeлектроники.

Ключевые слова: электронно-зондовый наноанализ, металлические мишени, тепловое воздействие, уравнение теплопроводности, функция Грина.

ESTIMATION OF HEATING OF SURFACE OF HOMOGENEOUS METAL TARGETS BY KILOVOLT ELECTRON BEAM

М. А. Stepovich¹, А. N. Amrastanov¹, Е. V. Seregina²

¹) *Tsiolkovsky Kaluga State University, Stepan Razin Street 26, 248023 Kaluga, Russia*

²) *Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Kaluga Branch, Bazhenov Street 2, 248000 Kaluga, Russia*

Corresponding author: M. A. Stepovich (m.stepovich@rambler.ru)

The problem of heat distribution in metallic materials irradiated with sharply focused electron beams of kilovolt energies (from 10 to 30 keV) in the absence of heat exchange between the target and the external medium was considered by mathematical modeling methods. The model is based on solving a multidimensional stationary heat equation using the Green function. The source function is a model applicable to a wide class of solids and a range of primary electron energies, based on a separate description of the contributions to the energy of the absorbed and backscattered electrons scattered in the target. Using the features of this approach, the nonmonotonic dependence of the temperature of the maximum heating of the target on the energy of the primary electrons is explained. The results obtained can be used in modeling the heating of metallic elements of materials and structures of micro- and nanoelectronics.

Key words: electron-probe nanoanalysis; metal targets; thermal action; heat equation; Green's function.

ВВЕДЕНИЕ

При облучении образца сфокусированным электронным пучком в месте его падения на мишень выделяется значительная энергия, что может привести к повышению локальной температуры [1–4] и, как следствие, возможной необходимости учёта этого явления при проведении количественных исследований. Экспериментальное определение температуры нагрева сильно осложнено малым размером области генерации тепла, вследствие чего получаемые результаты имеют невысокую точность и могут рассматриваться как качественные. Поэтому особую ценность на практике приобретают расчётные оценки величины нагрева электронным зондом, основанные на решении уравнения теплопроводности [1, 2, 5], однако при решении этого уравнения часто используют существенные упрощения, что может привести к значительному разбросу результатов.

Ранее [1, 2, 5] методами математического моделирования нами проведены расчёты нагрева полупроводниковых мишеней под электронным зондом. В данной работе объектами исследований являются металлы; моделирование проведено для энергий электронного зонда от 10 кэВ по 30 кэВ. При этом, как и ранее, в качестве функции генерации источника тепла используется модель, основанная на возможности раздельного количественного описания вклада энергии поглощённых в мишени и обратно рассеянных электронов [6, 7]. Эта модель может быть успешно использована для проведения количественных расчетов для широкого класса материалов (практически от Al по Pt) в широком диапазоне энергий первичных электронов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотренная математическая модель нагрева поверхности металла предназначена для расчёта распределения тепла в условиях, близких к вакууму, при любых энергиях электронного пучка и различных значениях коэффициента теплопроводности металлической мишени. Как и ранее, температурное поле описывалось следующим трехмерным стационарным уравнением:

$$\left(\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial z^2} \right) = - \frac{P(x, y, z)}{k}.$$

Здесь $\Delta T(x, y, z) = T(x, y, z) - T_0$ – искомый нагрев мишени при воздействии электронного зонда, T – температура образца в точке (x, y, z) после установления стационарного режима под воздействием электронного пучка, T_0 – температура образца до воздействия электронного пучка, k – коэффициент теплопроводности, а $P(x, y, z)$ – функция, описывающая потери энергии электронами зонда в мишени [8, 9]. $\Delta T(x, y, z)$ должна удовлетворять следующим граничным условиям: $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \Delta T = 0$, $\lim_{y \rightarrow \pm\infty} \Delta T = 0$, $\lim_{z \rightarrow +\infty} \Delta T = 0$. В условиях, близких к вакууму, теплообменом с внешней средой можно пренебречь, поэтому можно задать следующее граничное условие: $\partial \Delta T(z=0)/\partial z = 0$. Как и ранее, уравнение теплопереноса решено с использованием функции Грина.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчётов повышения локальной температуры металлических мишеней для энергии электронов 10, 20, 30 кэВ при токе зонда 10^{-7} А и $y = 0$ представлены на рисунках. При этом оси x и y находятся на плоской поверхности мишени (при $z = 0$), ось z направлена вглубь мишени.

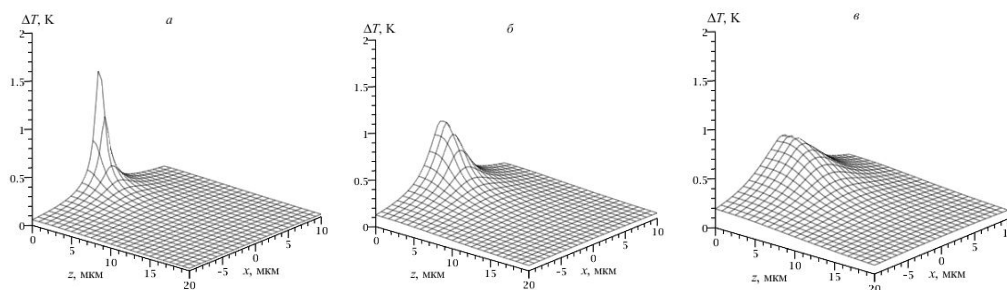


Рисунок 1. – Рассчитанное распределение температуры $\Delta T(x, y = 0, z)$ в Al мишени. Энергия электронов пучка 10 (а), 20 (б) и 30 (в) кэВ, ток зонда 10^{-7} А

Использование модели потерь энергии электронами в конденсированном веществе, основанной на возможности раздельного количественного описания вклада энергии поглощённых в мишени и обратно рассеянных электронов, даёт немонотонную зависимость температуры наибольшего нагрева мишени от энергии первичных электронов, что было установлено нами для полупроводниковых мишеней ранее [5].

Отметим, что значение тока, используемое при расчётах значений $\Delta T(x, y = 0, z)$, больше, чем используемые в растровой электронной микроскопии при диагностике материалов и структур микроэлектроники и в этом смысле представленные на рис. 1– рис. 3 результаты можно рассматривать как оценочные. В то же время подобные значения тока и энергий электронов используются в ряде электроннозондовых технологий, например, при катодолюминесцентных исследованиях материалов и структур оптоэлектроники. Как и для полупроводниковых мишеней, для лёгких металлических мишеней (например, для алюминиевой мишени – рис. 1) рассчитанные

значения температуры по сравнению с мишенями со средними порядковыми номерами (например, для медной мишени – рис. 2) оказались немного ниже – примерно на пару градусов, а для тяжёлых мишеней (например, для золотой мишени) – примерно в два раза выше.

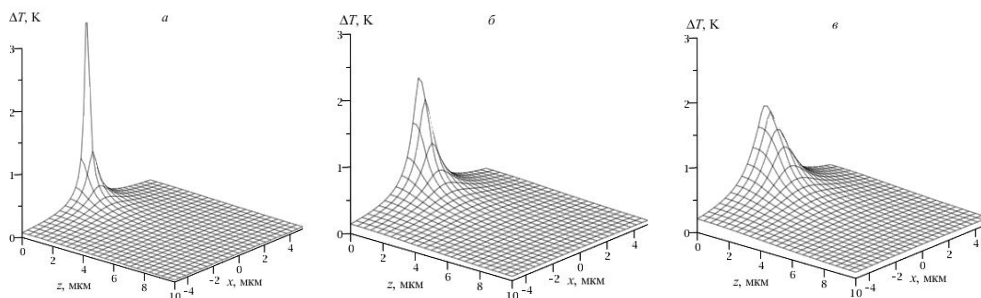


Рисунок 2. – Рассчитанное распределение температуры в Си мишени. Энергия электронов пучка 10 (а), 20 (б) и 30 (в) кэВ, ток зонда 10^{-7} А

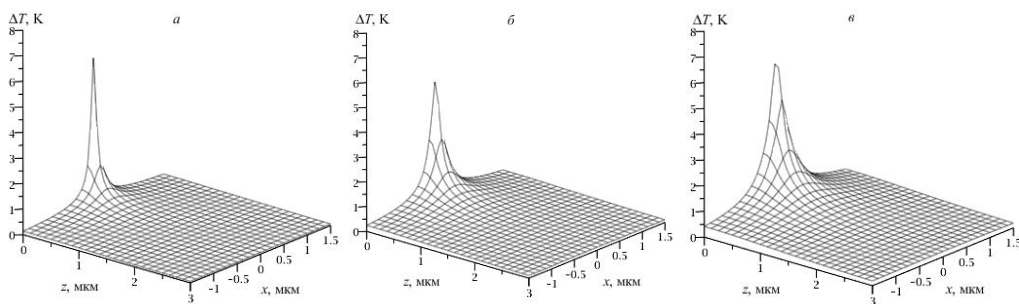


Рисунок 2. – Рассчитанное распределение температуры в Си мишени. Энергия электронов пучка 10 (а), 20 (б) и 30 (в) кэВ, ток зонда 10^{-7} А

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методами математического моделирования проведена оценка влияния электронного зонда на распределение температуры в объёме металлических мишеней при использовании энергий электронов в диапазоне 10...30 кэВ. Получено, что для лёгких металлических мишеней рассчитанные значения температуры по сравнению с мишенями со средними порядковыми номерами немного ниже – примерно на пару градусов, а для тяжёлых мишеней – примерно в два раза выше.

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований и правительства Калужской области (проект № 18-41-400001).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Об одной возможности математического моделирования теплового воздействия остро сфокусированного электронного пучка на однородный полупроводник / А.Н. Амрастанов [и др.] // Известия РАН. Серия физическая. – 2016. – Т. 80, № 10. – С. 1448–1452.
2. On Possibility of Mathematically Modeling the Thermal Effect of a Finely Focused Electron Beam on a Homogeneous Semiconductor / A.N. Amrastanov [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2016. – V. 80, issue 10. – P. 1290–1294.
3. Тепловое воздействие электронного зонда при рентгеноспектральном нанонализе / А.Н. Амрастанов [и др.] // Измерительная техника. – 2017. – № 6. – С. 13–15.
4. Thermal Action of an Electronic Probe with X-ray Spectral Nanoanalysis / A.N. Amrastanov [et al.] // Measurement Techniques. – 2017. – V. 60, issue 6. – P. 534–537.
5. On one peculiarity of the model describing the interaction of the electron beam with the semiconductor surface / M.A. Stepovich [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 955. – P. 012040 (6 pp.).
6. Михеев, Н.Н. Количественный анализ материалов полупроводниковой оптоэлектроники методами растровой электронной микроскопии / Н.Н. Михеев, В.И. Петров, М.А. Степович // Известия Академии наук СССР. Серия физическая. – 1991. – Т. 55, № 8. – С. 1474–1482.
7. Mikheev, N.N. Quantitative Analysis of Semiconductor Optoelectronic Materials by Raster Electron Microscopy / N.N. Mikheev, V.I. Petrov, M.A. Stepovich // Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Physical Series. – 1991. – V. 55, no. 8. – P. 1–9.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ НАНОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК НА СТЕКЛЕ ПО ДАННЫМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

И. И. Ташлыкова-Бушкевич¹, Е. С. Мойсейчик²,
Р. Д. Лобач¹, Д. В. Суходольский¹

¹⁾ *Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, 220013 Минск, Беларусь, e-mail: iya.itb@bsuir.by,*

²⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь*

В данной работе рассмотрены вопросы, касающиеся анализа поверхностного нанорельефа, а также взаимосвязь параметров шероховатости тонких металлических пленок с их физико-химическими свойствами. Показано, как компьютерная обработка полученных с помощью атомно-силовой микроскопии изображений поверхности тонких пленок молибдена на стекле позволяет получить количественную информацию о поперечных и продольных характеристиках шероховатости поверхности, а также распределении высот и впадин нанорельефа в зависимости от условий формирования покрытий. Предложено использование нового исследовательского гибридного параметра k , который количественно характеризует форму неровностей профиля. Установленная зависимость равновесного краевого угла смачивания пленок водой от k демонстрирует, что смачиваемость системы Мо/подложка определяется особенностями нанорельефа поверхности.

Ключевые слова: ионно-ассистированное осаждение; сканирующая зондовая микроскопия; смачиваемость; молибден.