

ОБ ОЦЕНКЕ НЕОБХОДИМОСТИ УЧЁТА РАДИАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЯВЛЕНИЙ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ЭЛЕКТРОННО-ЗОНДОВЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

М.А. Степович¹, Д.В. Туртин², М.Н. Филиппов³, В.В. Калманович¹

¹Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, Калуга, m.stepovich@mail.ru

²Ивановский государственный университет, Иваново, turtin@mail.ru

³Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, mn@filippov.org.ru

Рассмотрен вопрос о нагреве мишени сфокусированным электронным зондом в электронно-зондовом рентгеноспектральном микроанализе. Чаще всего при решении соответствующих задач полагают, что перенос тепла через внешнюю поверхность отсутствует. С другой стороны, поскольку на объектах с низкой теплопроводностью возможен значительный перегрев анализируемого микрообъема, правомерна постановка вопроса об уносе тепла излучением через поверхность. В докладе даны оценки максимально возможного уноса тепла через поверхность (образец рассматривали как абсолютно черное тело, не учитывали конечность температуры стенок камеры прибора). Даже в этом случае из-за малой площади перегрева, значения уносимой излучением энергии существенно меньше величины подводимой зондом энергии. Это позволяет не учитывать унос тепла излучением при моделировании нагрева образца сфокусированным электронным зондом.

При использовании остро сфокусированного электронного зонда для исследований материалов может происходить нагрев мишени, который в ряде случаев необходимо учитывать для получения корректных количественных результатов об объекте исследования, поскольку иногда локальный нагрев может приводить и к необратимому воздействию на материал. Оценка величины нагрева мишени ΔT под электронным зондом может быть проведена методами математического моделирования [1-4]. В качестве примера на рис. 1 и рис. 2 представлены результаты расчётов для Si (лёгкий полупроводник), GaAs (полупроводник со средним атомным номером) и CdTe (тяжёлый полупроводник).

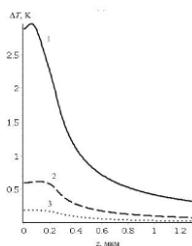


Рис. 1. Распределение температуры в Si по координате z . Расчеты проводились при $x=0$, $y=0$, при энергиях первичных электронов 5 (кривая 1), 10 (2), 15 (3) кэВ, токе зонда 10^{-7} А.

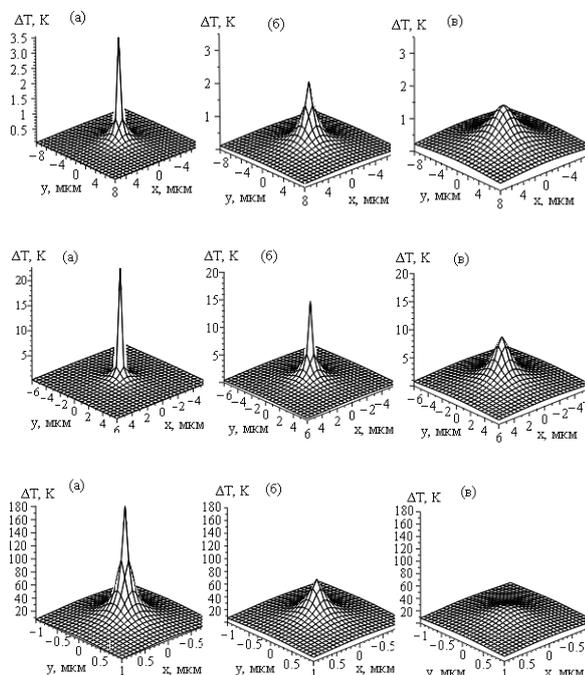


Рис. 2. Распределение температуры в Si (верхний рисунок), GaAs (средний рисунок) и CdTe (нижний рисунок) для энергии электронов зонда $E_0=5$ (а), 10 (б) и 20 (в) кэВ при токе зонда 10^{-7} А.

Однако при расчётах, результаты которых представлены на рисунках, не учтены потери энергии на излучение. В то же время при нагреве образца электронным зондом площадь поверхности, температура которой значимо отличается от исходной, составляет несколько квадратных микрометров, а максимальные значения температуры могут составлять несколько сотен градусов – см. [1-

4] и литературу там же. Рассчитанные для абсолютно черной поверхности зависимости тепловой мощности, уносимой в вакуум излучением через площадки 5×5 мкм, 2×2 мкм и 1×1 мкм от абсолютной температуры этой площадки, приведены на рис. 3. Поскольку образец считался абсолютно черным телом, что соответствует максимальной излучательной способности, реально уносимая излучением энергия может быть в несколько раз меньше. Горизонтальная линия при 0,02 мВт на этом рисунке соответствует мощности, рассеиваемой в образце электронным зондом с энергией 20 кэВ при токе 1 нА. Как видно из представленного рисунка, мощность, уносимая излучением, достигает значения, подводимой зондом, только при температуре около 1900 К и площади нагретого участка 5×5 мкм.

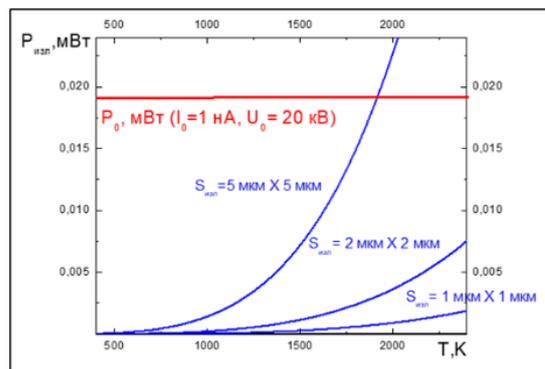


Рис. 3. Рассчитанные зависимости тепловой мощности, уносимой в вакуум излучением через площадки 5×5 мкм и 1×1 мкм от абсолютной температуры T этой площадки.

Такие температуры чаще всего несовместимы с устойчивостью образца. При меньших значениях температуры, обычно наблюдаемых в условиях рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа, охлаждение анализируемого микрообъема за счет излучения с поверхности мишени не является значимым фактором.

1. Амрастанов А.Н., Кузин А.Ю., Митюхляев В.Б., Серегина Е.В., Степович М.А., Тодуа П.А., Филиппов М.Н. Тепловое воздействие электронного зонда при рентгеноспектральном микроанализе // Измерительная техника. – 2017. – № 6. – С. 13-15.

2. Кузин А.Ю., Степович М.А., Митюхляев В.Б., Тодуа П.А., Филиппов М.Н. Тепловые эффекты при низковольтном электронно-зондовом рентгеноспектральном микроанализе с нанометровой локальностью // Измерительная техника. – 2016. – № 10. – С. 27-29.

3. Амрастанов А.Н., Серегина Е.В., Степович М.А., Филиппов М.Н. Оценка нагрева поверхности полупроводниковой мишени низкоэнергетичным электронным зондом // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2018. – № 8. – С. 48-52.

4. Амрастанов А.Н., Серегина Е.В., Степович М.А. Об одной особенности моделирования нагрева полупроводниковой мишени электронным зондом // Известия РАН. Серия физическая. – 2018. – Т. 82, № 9. – С. 1304-1309.