

И.В. МАРТИРОСЯН, Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, Д.А. АБИН, С.В. ПОКРОВСКИЙ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЦЕНТРОВ ПИННИНГА В ВТСП ЛЕНТАХ ДЛЯ ОБМОТОК СПИН ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования теплового отклика слоистой структуры композитной ВТСП ленты на основе соединения $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, подверженной облучению ионами ксенона $^{132}Xe^{27+}$. В рамках континуального подхода исследована динамика изменения температуры в области ионного трека, рассчитаны зависимости среднего диаметра радиационного дефекта в отдельных слоях ВТСП ленты от плотности энергии линейного источника.

I.V. MARTIROSIAN, D.A. ALEXANDROV, D.A. ABIN, S.V. POKROVSKII

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

MODELING OF THE PROCESSES OF PINNING CENTER FORMATION IN HTSC COMPOSITES UNDER HEAVY ION IRRADIATION

This work presents numerical simulations of the thermal response of a multilayer composite high-temperature superconducting tape based on $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, subjected to irradiation with $^{132}Xe^{27+}$ ions. Within a continuum modeling framework, the temporal evolution of the temperature field in the vicinity of the ion track is analyzed, and the dependence of the average diameter of radiation-induced defects in individual layers of the superconducting tape on the energy density of the linear heat source is evaluated.

В высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) системах, включая сверхпроводящие индуктивные накопители энергии (СПИН), перспективным направлением является применение ВТСП лент с искусственно сформированными центрами пиннинга, обеспечивающими повышение критической плотности тока и устойчивости к внешним магнитным полям [1]. Одним из эффективных способов создания таких центров пиннинга является облучение тяжёлыми ионами, приводящее к формированию протяжённых дефектов в сверхпроводящем слое. Известно, что максимальная эффективность центров пиннинга достигается в случае, когда характерный размер дефекта сравним с длиной когерентности сверхпроводника, что определяет необходимость контролируемого формирования наноразмерных повреждений. В связи с этим в настоящей работе рассматривается численное моделирование формирования дефектов в слоистой архитектуре ВТСП ленты на основе соединений $REBa_2Cu_3O_{7-x}$ (REBCO, где RE-редкоземельный элемент) при ионном облучении, направленное на получение наноразмерных дефектов с заданными геометрическими и энергетическими характеристиками.

Для исследования радиационно-индуцированных дефектов применяется широкий круг вычислительных подходов, включая молекулярную динамику, стохастические методы переноса частиц и континуальные модели энерговыделения. Последние, как правило, рассматривают однородные среды и игнорируют как слоистость, так и анизотропию теплофизических свойств, характерные для ВТСП композитов.

В данной работе предлагается альтернативный континуальный подход к описанию радиационных повреждений в композитных ВТСП лентах, основанный на численном решении системы уравнений в рамках метода конечных элементов. Энерговыделение, связанное с пролётом иона, моделируется в виде распределённого по длине линейного теплового источника, параметры которого определяются энергией частицы и временем её взаимодействия с отдельными слоями многослойной структуры. В модель включено уравнение теплопроводности в сочетании с фазово-полевым описанием перехода между твёрдым и расплавленным состояниями, что позволяет воспроизводить последовательность процессов локального плавления материала и его последующего сверхбыстрого затвердевания. Такой формализм даёт возможность напрямую оценивать геометрию радиационно-индуцированного дефекта в многослойной ВТСП ленте и устанавливать количественное соответствие между параметрами источника тепла в континуальной постановке и энергией налетающего иона.

На основе разработанной модели проанализирована временная эволюция температурного поля вблизи ионного трека при различных уровнях удельного энерговыделения и исследованы условия формирования остаточного дефекта. Показано, что контраст теплофизических свойств отдельных слоёв приводит к локальным изменениям радиуса трека вблизи межслоевых границ, тогда как уменьшение энерговыделения иона по мере его пробега вглубь материала вызывает постепенное сужение дефекта внутри каждого слоя. Расчётные оценки характерных размеров повреждённой области в сверхпроводящем слое YBCO, лежащие в диапазоне порядка 1–7 нм, находятся в согласии с экспериментальными данными, полученными для треков, сформированных тяжёлыми ионами сравнимых энергий.

Работа выполнена в рамках государственного задания (проект FSWU-2025-0008) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

Список литературы

1. X. Li, M. M. Ainslie, D. Song, Superconductor Science and Technology, vol. 38, no. 3, p. 033001, 2025/02/17 2025.