

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 538.945

ГЕНЕРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СХЕМЕ CORBINO ДЛЯ ВТСП

© 2025 г. А. А. Михайлов^а, *, А. Н. Максимова^а, А. Н. Мороз^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, 115409 Россия

*E-mail: maa061@campus.mephi.ru

Поступила в редакцию 13.05.2024 г.

После доработки 14.05.2024 г.

Принята к публикации 28.07.2024 г.

Методом Монте-Карло рассчитаны вольтамперные характеристики сверхпроводящего диска в рамках двумерной модели слоистого ВТСП при подаче тока по схеме Corbino при постоянном внешнем магнитном поле в 1000 Э. Получена напряженность на нескольких соосных кольцах образца и выведен критический ток для трех диаметров, температур и плотностей дефектов. Исследовано влияние концентрации точечных дефектов и температуры на скорость движения вихрей Абрикосова.

Ключевые слова: метод Монте Карло, схема Corbino, ВТСП

DOI: 10.56304/S2079562924060216

Схема Corbino — модель электронной системы, состоящая из металлического, полупроводникового или сверхпроводящего диска с отверстием в центре и с контактами, один из которых расположен на внутренней стенке отверстия, другой — на периферии диска. Схема Corbino была разработана в начале 20 века и используется для изучения тока и проводимости в различных материалах. Она позволяет исследовать зависимость электрических свойств материала от величины магнитного поля и температуры. Схема Corbino является важным инструментом в физике твердого тела и имеет широкий спектр применения в научных и инженерных исследованиях.

За время ее существования схема применялась для различных исследований, таких как: процессы теплопереноса [1, 2], вязкость материала [3], магнито-упорядоченные системы [4], вихревая структура сверхпроводников [5–7].

Обсуждаемая геометрия рассматривается в качестве перспективных энергозависимых ячеек хранения информации и применения в квантовых вычислительных системах [7].

Основная особенность подключения Corbino — создание радиального градиента плотности электрического тока, уменьшающегося к краю образца. Так становится возможным исследовать отклик материала на целый диапазон токов и проводить исследования взаимодействий слоев, образующихся внутри диска.

Комбинирование радиально расходящегося тока и перпендикулярно направленного сверхпроводящей плоскости магнитного поля приводит к возникновению силы Лоренца, ориентированной

нормально к обоим воздействиям, что приводит к движению как заряженных частиц, так и вихрей Абрикосова в высокотемпературных сверхпроводниках.

Движение под действием поля и тока может быть заменено на пару магнитного поля и градиента температур [1, 2], что применяется для создания квантовых термоэлектрических охладителей

Согласно результатам [5], при небольших токах решетка движется как единое целое — жесткая вихревая структура. При превышении порогового значения, начинается плавление в центра структуры к краю, что согласуется с повышением плотности и, как следствие, действующей со стороны тока силы. Это приводит к независимому движению соседних оболочек.

В работе [6] описан переход к плавлению вихревой решетки при превышении определенного значения тока для разных концентрических слоев. Выявлена аномальная зависимость движения оболочек от их радиуса — плавление начинается с внешней стороны, где напряжение сдвига минимально, а также, крайние слои движутся с большей угловой скоростью по сравнению с соседними внутренними при наличии отклонений от решетки центральных оболочек, что объясняется взаимодействиями вихрь — оболочка — сила Лоренца.

Применение ВТСП в квантовой вычислительной технике ограничивалось сложностями контроля позиции и количества вихрей в ячейке. Это удалось решить авторам [7]. С помощью величины прикладываемого магнитного поля к Джозефсоновским переходам получилось реализовать чтение и запись текущих состояний системы. Такое откры-

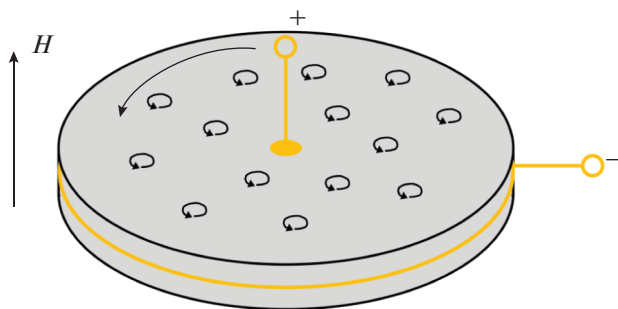


Рис. 1. Геометрия модели.

тие прокладывает дорогу к квантовым вычислениям на основе ВТСП, как заявляют сами авторы.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Расчеты выполнены в рамках двумерной модели слоистого ВТСП методом Монте Карло [8]. Полная энергия системы вихрей может быть представлена в виде

$$G = N\varepsilon + \sum_{ij} U_{\text{int}}(r_{ij}) + \sum_i U_{\text{broad}}(r_i) + \sum_{id} U_{\text{def}}(r_{id}) + \sum_i U_{\text{cur}}(r_i) + \sum_i U_{\text{field}}(r_i),$$

$\varepsilon = \delta\Phi_0^2/(4\pi\lambda)^2 (\ln[\lambda(T)/\xi(T)] + 0.52)$ — собственная энергия слоевого вихря (панкейка) где δ — толщина сверхпроводящего слоя; второй член описывает попарное взаимодействие вихрей; третий — взаимодействие вихрей с границей диска; четвертый — взаимодействие вихрей с сеткой дефектов; последние слагаемые отвечают за взаимодействие с протекающим транспортным током и магнитным полем. $\Phi_0 = \pi\hbar c/e$ — квант магнитного потока, r_{ij} — расстояние между вихрями i и j в плоскости ВТСП-слоя, r_{id} — расстояние между вихрем и дефектом. Подробнее описание взаимодействий, входящих в модель, см. [9, 10].

Моделируется один слой слоистого объемного сверхпроводника $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{7+\delta}$, находящийся в перпендикулярном магнитном поле. Плотность тока задается в центральном цилиндре диаметром 10 длин когерентности ξ . Второй токовый контакт располагается вдоль внешней границы. Сила Лоренца направлена против часовой стрелки.

Взаимодействие вихря с границей описывается как притяжение вихря к его зеркальному отражению — “антивихрю”. Оно выбрано в виде:

$$U_{\text{broad}} = \frac{\Phi_0^2}{8\pi^2\lambda^2} \delta \sum_{i=1}^N K_0\left(\frac{r_i}{\lambda}\right),$$

где r_i — расстояние до отражения, получаемого по теореме обратных радиусов — расстояние отраже-

ния от центра диска, умноженное на радиус вихря равно квадрату радиуса образца, K_0 — модифицированная функция Бесселя второго рода (Макдональда).

Энергия взаимодействия вихря с дефектом имеет вид:

$$U_{\text{def}} = -\alpha \frac{\Phi_0^2}{8\pi^2\lambda^2} \delta \frac{1}{r_{id}/\xi + 1} \exp\left(-\frac{r_{id}}{2\xi}\right).$$

Взаимодействие с полем задается формулой:

$$U_{\text{field}} = H \frac{\Phi h}{4\pi} I_0(r_i/\lambda) / I_0(d/\lambda),$$

I_0 — модифицированная функция Бесселя первого рода (Инфельда)

Здесь α — так называемая эффективная глубина ямы дефекта. В нашей работе α выбирается таким образом, чтобы коэффициент перед безразмерным множителем был порядка характерных энергий панкейка. Глубина имеет Гауссово распределение в диапазоне $\alpha = 0.01$ – 0.06 эВ. Такие энергии ограничивают пиннинг одним вихрем на дефект.

Температурные зависимости характерных длин сверхпроводника, в соответствии с моделью слоистого ВТСП [9, 10], выбраны в виде:

$$\lambda(T) = \frac{\lambda(0)}{\sqrt{1 - (T/T_c)^{3.3}}}, \quad \xi(T) = \frac{\xi(0)}{\sqrt{1 - (T/T_c)^{3.3}}},$$

$\lambda(0)$, $\xi(0)$ — глубина проникновения и длина когерентности при $T = 0$.

Температура считалась постоянной на протяжении каждого отдельного расчета.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Перейдем к обсуждению результатов, полученных в виде графиков зависимости напряженности в микровольтах на см от тока в микроамперах. На рис. 2 приведены характерные вольт-амперные характеристики для диска с диаметром 3.5 мкм при температуре 25 К без дефектов в линейном и двойном логарифмическом масштабе. Линии со-

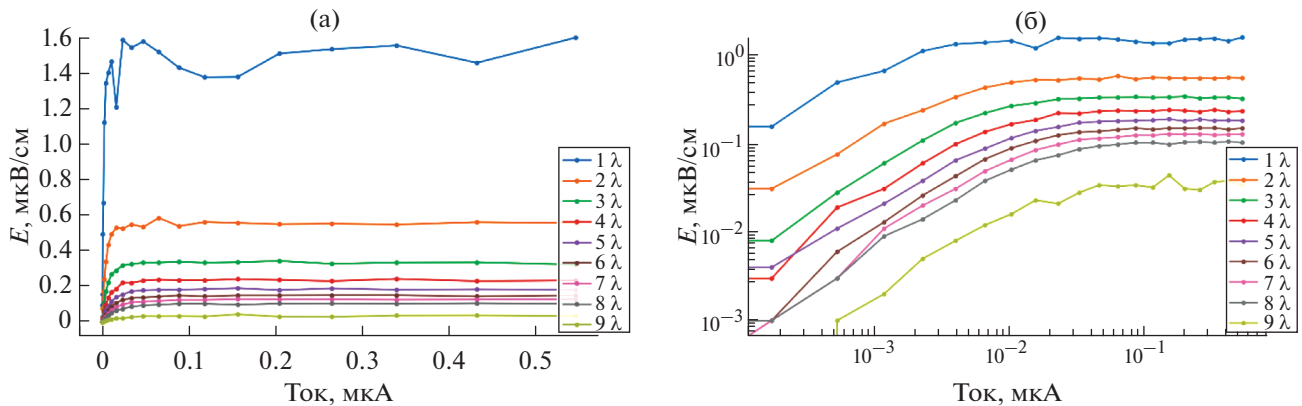


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики для диска с диаметром $D = 3.5$ мкм, $T = 25$ К, $\rho_d = 0$ см $^{-2}$ (без дефектов) в линейном (а) и двойном логарифмическом (б) масштабах.

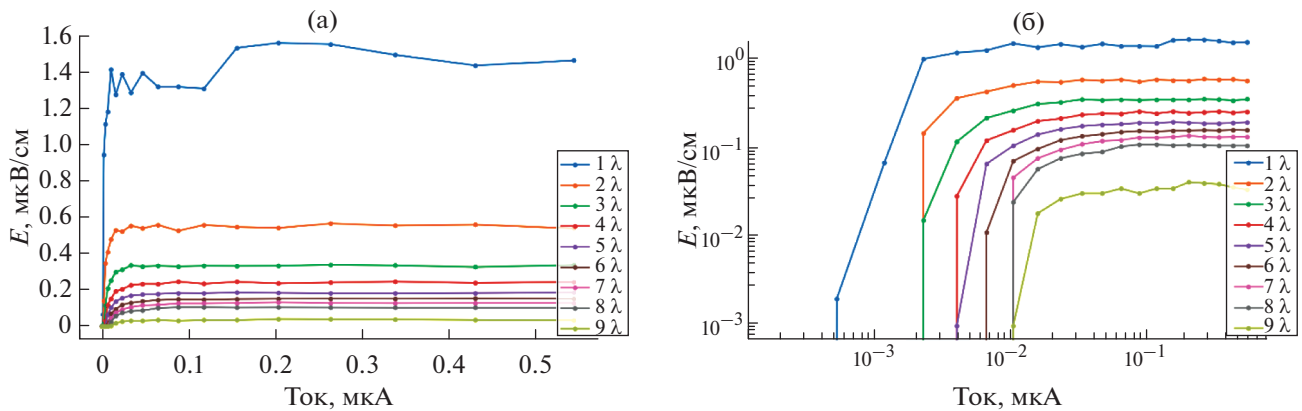


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики для диска с диаметром $D = 3.5$ мкм, $T = 25$ К, $\rho_d = 10^{11}$ см $^{-2}$ (сильно дефектные образцы) в линейном (а) и двойном логарифмическом (б) масштабах.

ответствуют усредненному значению напряженности, вырабатываемой вихрем в одном из концентрических колец толщиной λ .

Виден закономерный результат: повышение плотности тока к центру приводит к росту генерируемого напряжения. Причем данный рост носит степенной характер, являющийся нормой для сверхпроводников. Наблюдаемое при больших токах насыщение связано с ограничением модели на максимальное перемещение вихря за один шаг Монте Карло. При сравнении их с сильно дефектными образцами (рис. 3), предсказуемо можно заметить позднее появление напряжения, что свидетельствует о ненулевом критическом токе. Причем выход на постоянное значение происходит при тех же токах, что и на чистом образце. Можем говорить о свободном движении магнитного потока вопреки присутствию центров пиннинга.

Лучше всего упомянутая разница заметна на прямом сопоставлении — рис. 4. При всех рассмотренных температурах повышение плотности

дефектов сопровождается аналогичным изменением тока регистрации напряжения. Температурные эффекты сглаживают эту зависимость так, что уже при 40 К различия, вносимые числом дефектов, незначительны.

Анализируя аналогичные графики изменения за счет температуры (рис. 5), ожидали повышения тока активации движения вихрей с понижением температуры, что и увидели на графиках. Большая плотность дефектов повышает различие в результатах. Наблюдаемый при меньшей температуре зубчик показывает резкий срыв большого числа закрепленных Абрикосовских вихрей с дефектов.

Бесспорно важным параметром является размер исследуемого образца. В рамках данной работы были рассмотрены три диаметра: 2.0, 3.5 и 4.5 мкм при температуре 25 К. На рис. 6 приведены напряжения внутреннего кольца при различных плотностях дефектов. В чистых образцах скорость движения магнитного потока не имеет отличий. При добавлении центров пиннинга картина не из-

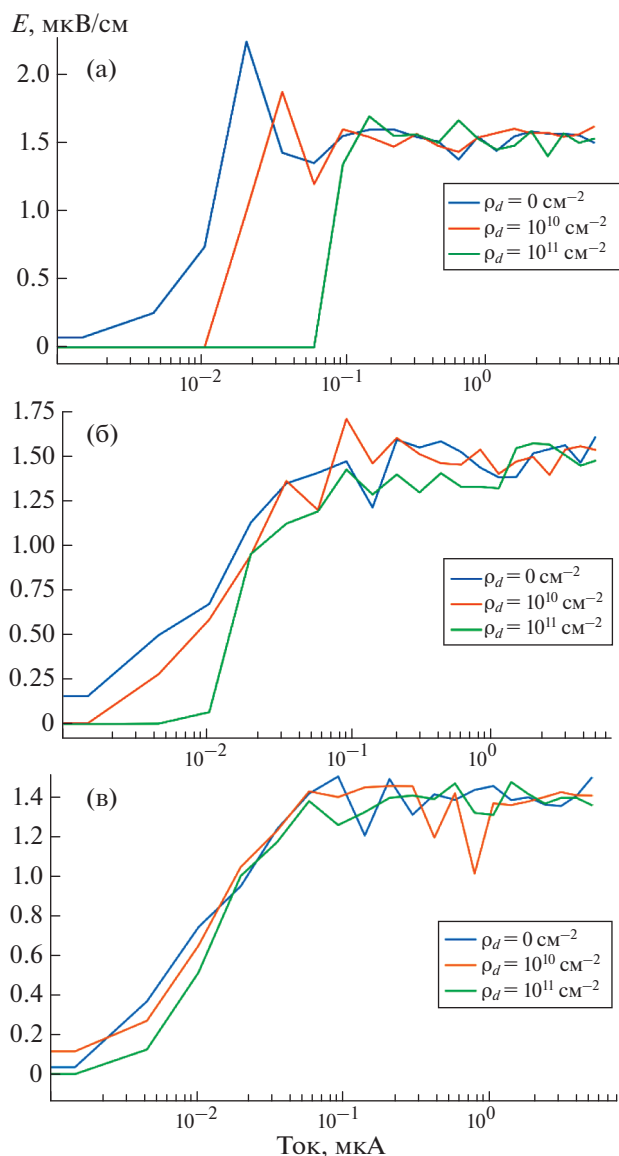


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики для внутреннего кольца при различных плотностях дефектов, $D = 3.5$ мкм: (а) $T = 10$ К, (б) $T = 25$ К, (в) $T = 40$ К.

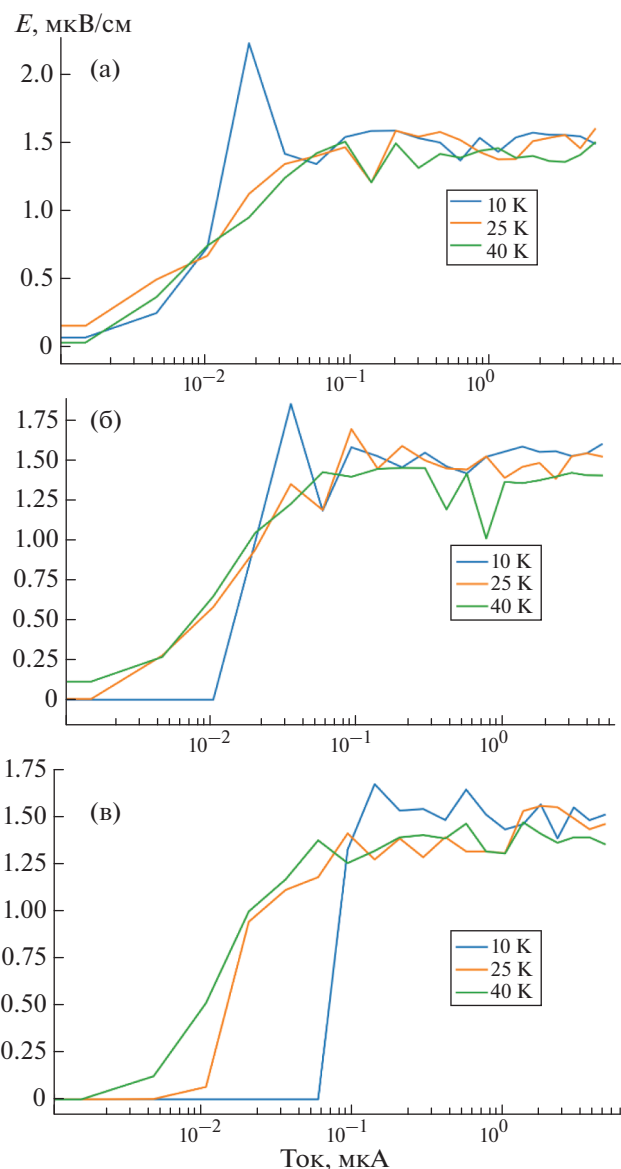


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики для внутреннего кольца при различных температурах, $D = 3.5$ мкм: (а) $\rho_d = 0$ см⁻², (б) $\rho_d = 10^{10}$ см⁻², (в) $\rho_d = 10^{11}$ см⁻².

меняется: в первом кольце толщиной λ движение вихрей совпадает, что свидетельствует об отсутствии влияния границы на внутренние слои.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом Монте-Карло были исследованы вольтамперные характеристики высокотемпературного сверхпроводника в схеме Corbino. Получены данные при трех температурах, диаметрах и плотностях дефектов, глубина которых имеет гауссово распределение.

Повышение числа дефектов приводит к появлению ненулевого критического тока, при кото-

ром отсутствует генерируемое напряжение — среднее перемещение вихрей равно нулю. Также повышает скорость возрастания напряжения при превышении этого значения. Максимальное значение напряжения не зависит от частоты материала, что свидетельствует о свободном движении вихрей Абрикосова.

Повышение температуры образца уменьшает влияние центров пиннинга.

Граница не оказывает влияния на внутренние слои при размере не меньше двух микрометров в диаметре.

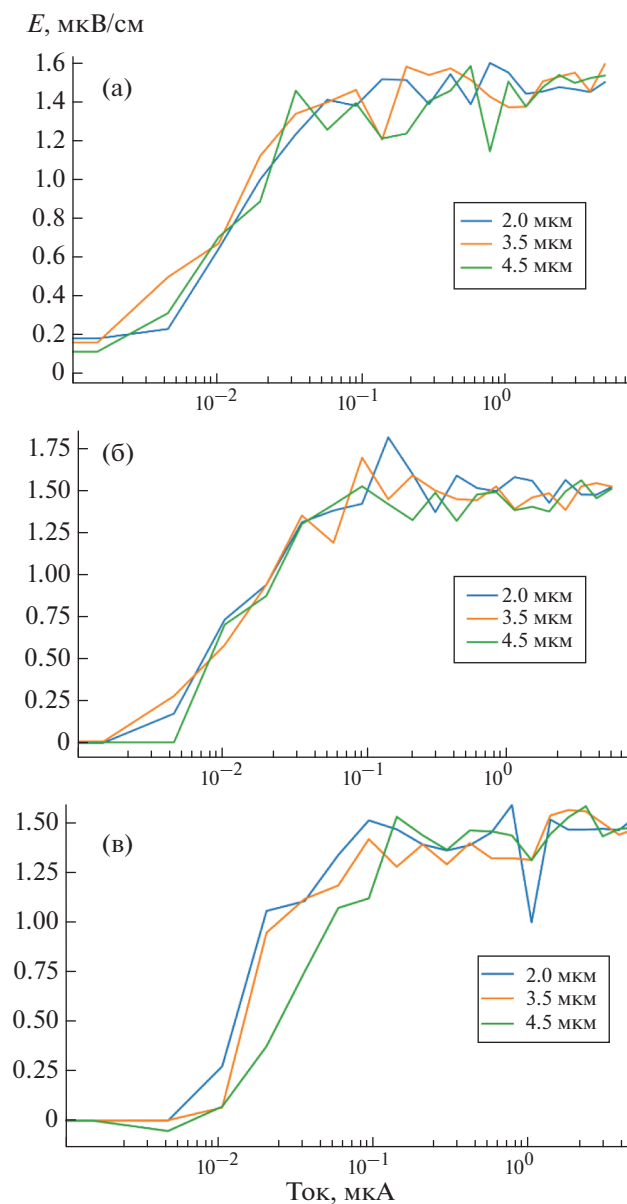


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики внутреннего кольца при различных диаметрах, $T = 25$ К: (а) $D = 2.0$ мкм, (б) $D = 3.5$ мкм, (в) $D = 4.5$ мкм.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке программы НИЯУ МИФИ “Приоритет 2030”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Zou Z. *et al.* // Phys. Rev. E. 2024. V. 109. P. L062104.
2. Mateos J.H. *et al.* // Phys. Rev. B. 2021. V. 103 (12). P. 125404.
3. Gall V., Narozhny B.N., Gornyi I.V. // Phys. Rev. B. 2023. V. 107 (23). P. 235401.
4. Галаучук В.И., Лукашевич М.Г. // Журн. Белорусс. гос. ун-та.: физ. Т. 2. С. 46–53.
5. Misko V.R., Peeters F.M. // Phys. Rev. B. 2006. V. 74 (17). P. 174507.
6. Lin N.S., Misko V.R., Peeters F.M. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102 (19). P. 197003.
7. Okugawa T. *et al.* // Phys. Rev. B. 2022. V. 106 (2). P. 024501.
8. Lawrence W.E., Doniach S. // Proc. LT 12. Kyoto, Japan. 1970.
9. Rudnev I.A., Odintsov D.S., Kashurnikov V.A. // Phys. Lett. A. 2008. V. 372 (21). P. 3934–3936.
10. Kashurnikov V.A., Maksimova A.N., Rudnev I.A. // Phys. Solid State. 2014. V. 56 (5). P. 894–911.

Voltage Generation in the Corbino Scheme for a High-Temperature Superconductor

A. A. Mikhailov^{1, *}, A. N. Maksimova¹, and A. N. Moroz¹

¹ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: maa061@campus.mephi.ru

Received May 13, 2024; revised May 14, 2024; accepted July 28, 2024

Abstract—The current–voltage characteristics of a superconducting disk with the current supply in the Corbino scheme at an external static magnetic field of 1000 Oe have been calculated within the two-dimensional model of a layered high-temperature superconductor. The field strength on several coaxial rings of the sample has been obtained and the critical current for three diameters, temperatures, and densities of defects have been evaluated. The effect of the concentration of point defects and the temperature on the velocity of Abrikosov vortices has been studied.

Keywords: Monte Carlo method, Corbino scheme, high-temperature superconductor