



УДК 538.945

Статья

Исследование релаксации магнитного потока в микронном ВТСП с собственным и искусственным пиннингом

А. Н. Максимова*, А. Н. Мороз, В. А. Кашурников

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409 Москва, Россия

* e-mail: anmaksimova@mephi.ru

Методом Монте-Карло выполнено исследование процессов релаксации захваченного магнитного потока в сверхпроводящем мостике микронной ширины. Расчеты выполнены для типичных параметров высокотемпературного сверхпроводника $YB_2Cu_3O_{7-x}$. Исследованы случаи наличия только собственного пиннинга и искусственного в виде субмикронных отверстий — антиточек. Показано, что присутствие отверстий уменьшает захваченный магнитный поток. Показано также, что зависимость захваченного потока от времени для микронного мостика не согласуется с моделью коллективного крипа, скорость релаксации растет с температурой.

Ключевые слова: ВТСП; пиннинг; магнитная релаксация; антиточки

DOI: 10.62539/2949-5644-2024-0-1-22-28

1. Введение

В последнее время в литературе встречается большое количество различных работ, в которых исследуется возможность применения микромостиков или нанопроволок из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в качестве элементов сверхвысокочувствительных датчиков (в частности, способных регистрировать единичные фотоны), элементов токоограничителей и магнетометров [1, 2]. Уже при достаточно небольших размерах сверхпроводника (порядка 10–20 нм) в него могут проникать вихри Абрикосова [3], и их динамика будет первоопределяющей в формировании таких важных характеристик сверхпроводника, как критический ток и захват магнитного потока. При этом существенный вклад в процессы проникновения вихрей в сверхпроводник и релаксации из него вносят дефекты материала (центры пиннинга).

Одним из применений ВТСП является создание квазипостоянных магнитов с захваченным потоком. В этой связи важной задачей является исследование величины и стабильности захваченного в образце магнитного потока. В работах [4, 5] экспериментально исследовались величина и профиль захваченного потока в ВТСП-пене. В наших работах [6, 7] исследование релаксации захваченного магнитного потока образца с отверстиями выполнено численно, при этом размер образца составлял несколько микрометров.

Экспериментальные исследования могут в ряде случаев представлять трудности, связанные, например, с длительным временем, необходимым для выращивания образцов. Численное моделирование лишено подобных недостатков. Моделирование методом молекулярной динамики для вихревой решетки в мезоскопическом сверхпроводнике выполнялось и ранее, например, в работах [8, 9]. Было исследовано влияние намагничивающего поля на температуру плавления вихревой решетки, показано, что температура плавления является осциллирующей функцией магнитного поля. Однако в данных работах вычисления были сделаны для фиксированного количества вихрей. В отличие от молекулярной динамики, метод Монте-Карло позволяет ввести рождение и уничтожение вихрей и, таким образом, корректно воспроизвести процессы перемагничивания и релаксации в вихревой системе. Целью настоящей работы является получение релаксационных кривых микронного ВТСП-мостика,

содержащего разные типы пиннинга, и исследование влияния температуры на скорость магнитной релаксации.

2. Расчетная модель

Расчеты выполнены методом Монте-Карло (МК) в рамках двумерной модели слоистого ВТСП [10]. В этой модели вихревую линию можно представить как стопку взаимодействующих слоев вихрей (панкейков). Энергию такой системы с хорошей точностью можно представить как сумму собственных энергий панкейка (первое слагаемое), энергий парного взаимодействия панкейков внутри одного слоя (второе слагаемое), их взаимодействия с центрами пиннинга и с мейсснеровским и транспортным токами (третье и четвертое слагаемые) и энергии межплоскостного взаимодействия вихрей (последнее слагаемое):

$$G = \sum_z \left(N_z \varepsilon + \sum_{i < j} U_{\Delta y / \Delta x \text{ in-plane}}(r_{ij}) + \sum_{i,j} U_p(r_{ij}) + \sum_{i,j} U_{\text{bdr}}(r_{ij}^{\text{img}}) + \sum_i U_{\text{inter-plane}}(r_i^{z,z+1}) \right) \quad (1)$$

Слоистая структура ВТСП и вихревая решетка в ней схематически показаны на рис. 1. Двумерная модель позволяет нам пренебречь межплоскостным взаимодействием и считать отклик одного слоя средним откликом всего образца. В рамках нашего подхода можно исследовать процессы в вихревой системе на уровне отдельных вихрей, проанализировать возможные вихревые конфигурации и их влияние на экспериментально измеримые характеристики образца.

Магнитное поле в нашем расчете направлено перпендикулярно сверхпроводящим слоям (параллельно оси анизотропии), транспортный ток в настоящей работе отсутствовал. Вдоль направления входа вихрей в образец (ось x) мостик имеет ширину 6 мкм. Моделирование релаксации осуществляется следующим образом. К исходно ненамагниченному образцу прикладывается намагничивающее поле H_m , система доводится до термодинамически равновесной конфигурации. Затем в течение 10^4 шагов МК намагничивающее поле доводится до 0 и далее наблюдается релаксация захваченного потока. Согласно нашим предыдущим работам, можно ввести временной эквивалент шага МК, равный примерно 10^{-8} с [11, 12]. В соответствии с этой оценкой, весь процесс релаксации в мостике наблюдался в течение порядка 1 с. Подробнее с моделью расчетов можно ознакомиться в работах [11, 12].

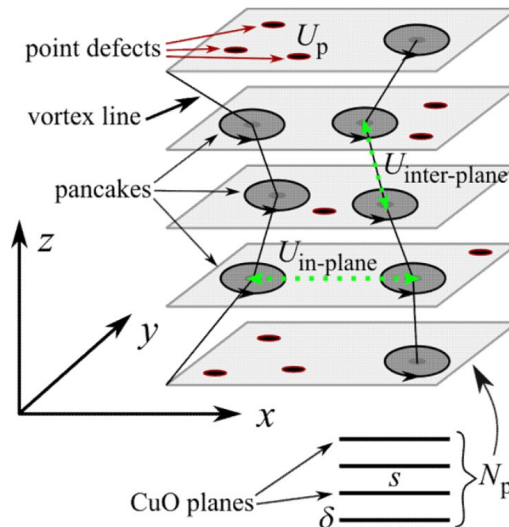


Рис. 1. Геометрия расчетной модели слоистого высокотемпературного сверхпроводника. N_p обозначает количество сверхпроводящих слоев, s — расстояние между ними, δ — толщину слоя.

Центры пиннинга вводились в расчет в виде потенциальной ямы следующего вида, описывающей точечный дефект:

$$U_p(r_{ij}) = -\alpha \frac{1}{1+r_{ij}/\xi} \exp\left(-\frac{r_{ij}}{2\xi}\right), \quad (2)$$

где α — параметр, характеризующий глубину потенциальной ямы, r_{ij} — расстояние между вихрем i и дефектом j , ξ — длина когерентности сверхпроводника, характеризующая ширину потенциальной ямы. Обычно $\alpha \sim 0.01-0.10$ эВ. В нашей модели для параметра α выбрано логнормальное распределение вида (3), и влияние ширины σ этого распределения на релаксацию магнитного потока было также исследовано. Субмикронное отверстие вводится в образец также в виде потенциальной ямы, и его эффективная глубина подбирается так, чтобы величина захваченного в отверстии магнитного поля приблизительно совпадала с внешним полем. В образце с отверстиями присутствовало всего $N_h = 5$ подобных дефектов радиусом 700 нм, равномерно распределенных по ВТСП.

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

3. Результаты

Расчеты выполнены для типичных параметров сверхпроводника $YB_2Cu_3O_{7-x}$ с критической температурой $T_c = 92$ К, глубиной проникновения магнитного поля $\lambda = 120$ нм и $\xi = 2.2$ нм. На рис. 2 показаны сравнения зависимостей магнитного поля в образце от времени (в шагах МК) при различных температурах для образцов с 5 отверстиями и образцов только с собственным пиннингом (обозначенные как $N_h = 0$). Намагничивающее поле равно 0.3 Тл. На рисунке справа показаны те же зависимости в двойном логарифмическом масштабе. В двойном логарифмическом масштабе зависимости прямолинейны на временах много больше времени отключения поля, что соответствует модели коллективного крипа потока [11].

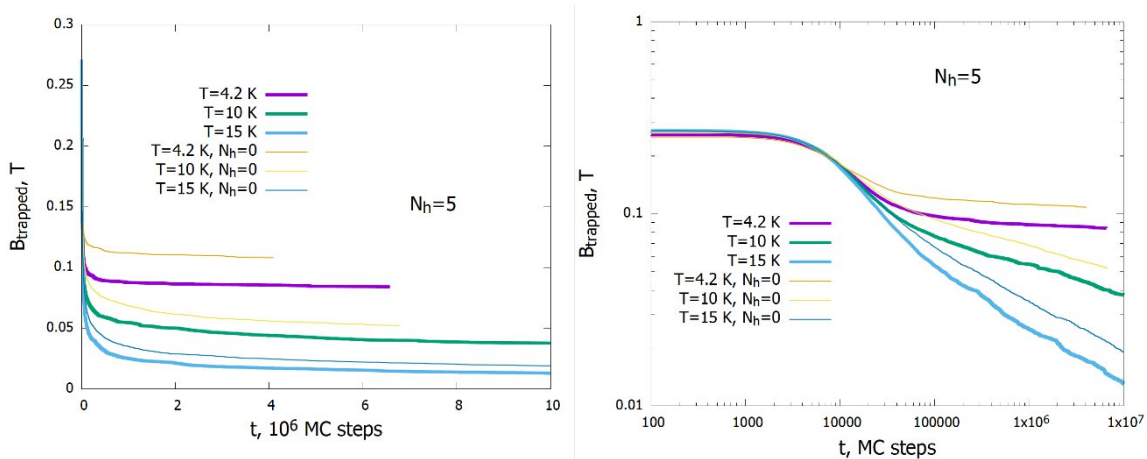


Рис. 2. Релаксация магнитного потока в образце с отверстиями ($N_h = 5$) и без отверстий ($N_h = 0$) при разных температурах T .

Будем далее рассматривать только образец с собственными дефектами. На рис. 3 показаны зависимости магнитного потока от времени для $H_m = 0.3$ Тл при различных температурах. Видно, что при $T > 30$ К зависимость отклоняется от прямолинейной, наблюдаются ступеньки на графиках. При этом скорость релаксации, определяемая как $d(\ln(M))/d(\ln(t))$, растет со временем. Заметим, однако, что модель коллективного крипа справедлива для малых приращений захваченного потока, в то время как в наших расчетах приращение этой величины порядка ее самой. Ступеньки, как показывает расчет, связаны с выходом из мостика отдельных вихрей.

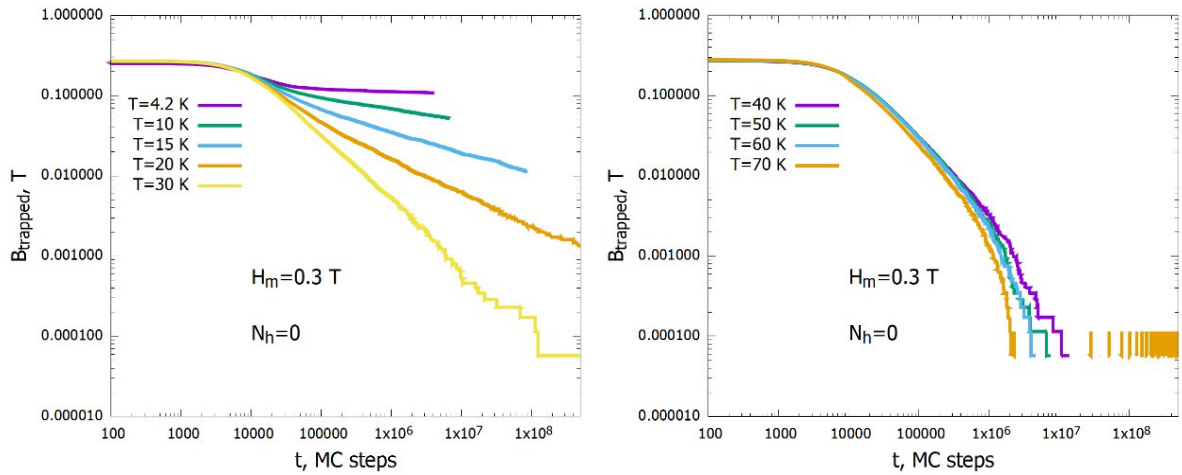


Рис. 3. Релаксация магнитного потока в образце без отверстий при разных температурах.

Исследуем далее влияние величины намагничивающего поля H_m и ширины логнормального распределения дефектов по глубине σ (рис. 4). Здесь зависимости магнитного потока нормированы на исходное значение. Из рисунка видно, что величина H_m слабо влияет на скорость релаксации, но уменьшение σ приводит к росту скорости релаксации и уменьшению захваченного потока. При наименьшем σ графики имеют наиболее выраженные ступеньки.

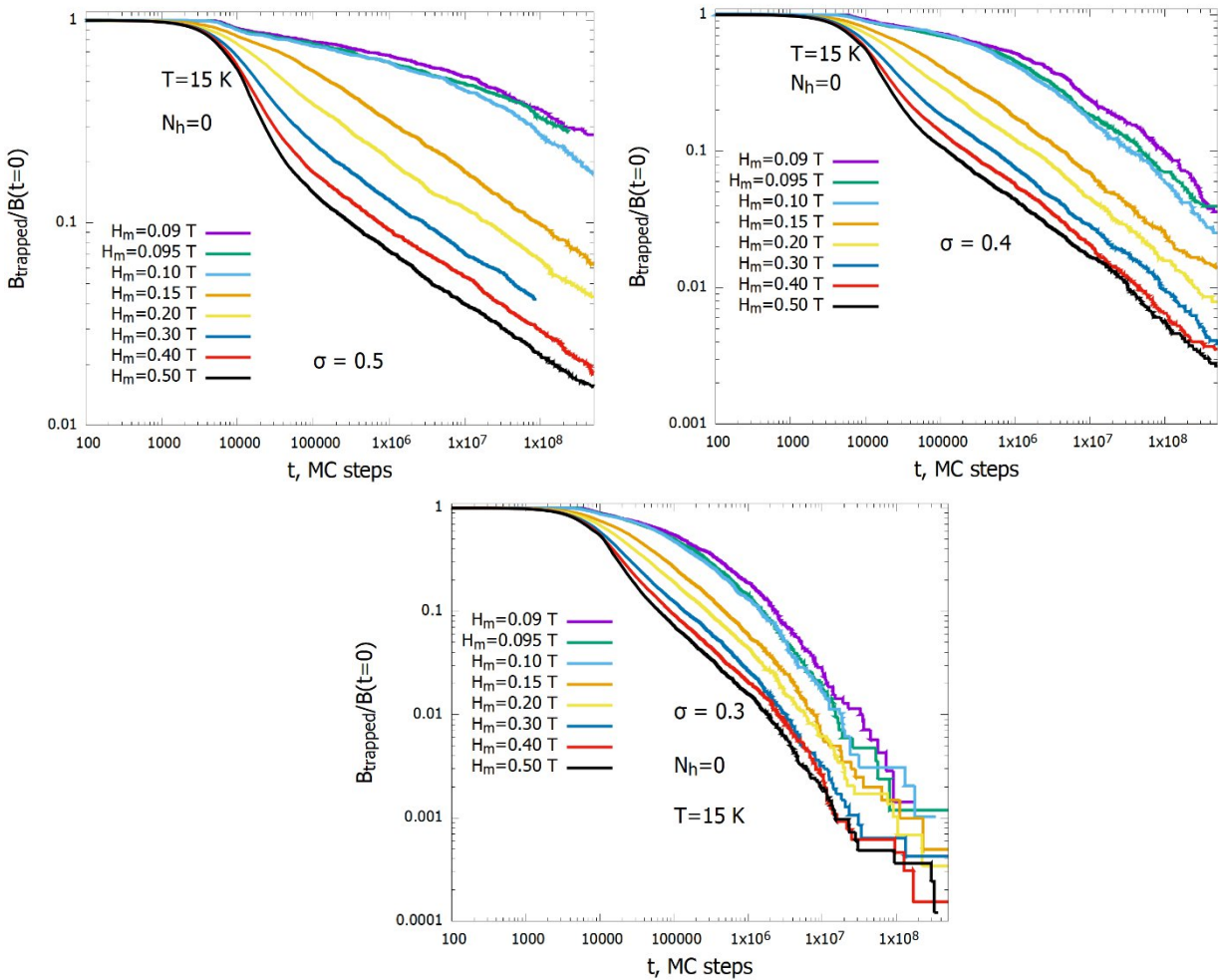


Рис. 4. Релаксация магнитного потока в образцах без отверстий с разными параметрами распределения глубины собственных дефектов после намагничивания полями разных амплитуд H_m .

Из графиков, представленных на рис. 2 и 3, может быть определена температурная зависимость скорости релаксации (рис. 5). Видно, что скорость релаксации растет при $T < 30$ К с дальнейшим выходом на насыщение.

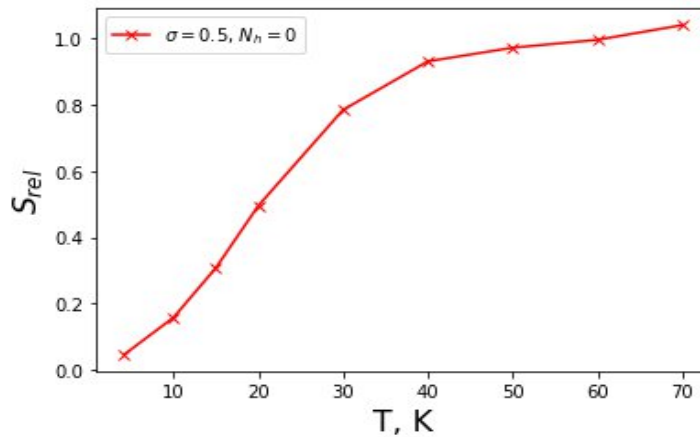


Рис. 5. Зависимость скорости релаксации от температуры в образце без отверстий.

4. Обсуждение

Результаты, полученные нами, качественно соответствуют существующим экспериментальным данным. Следует отметить, что эксперименты проводятся в основном для макроскопических образцов, в то время как наше моделирование ограничено размером в несколько мкм и несколькими тысячами вихрей в образце. В эксперименте, как правило, наблюдается линейный в логарифмическом масштабе спад намагниченности со временем, и в нашем расчете такое поведение наблюдается при температурах до 30 К. Микронный размер образца позволяет наблюдать особенности, обусловленные отдельными вихрями, такие как ступеньки на зависимости магнитного потока от времени, которые также наблюдаются экспериментально, например, при релаксации магнитного потока после импульсного намагничивания сверхпроводника. В то же время в нашей модели размер образца более чем на порядок превышает характерный размер вихря, что позволяет рассматривать вихревую решетку как ансамбль взаимодействующих частиц с дальнедействующим потенциалом. Для субмикронного мостика такой подход невозможен и требуется решать уравнения Гинзбурга-Ландау. Исследования субмикронных мостиков также широко представлены в литературе [14, 15]. Результаты наших расчетов могут быть использованы при планировании экспериментов, подборе оптимальных режимов пиннинга. Следует учитывать, что наша оценка временного эквивалента шага Монте-Карло составляет 10^{-8} - 10^{-9} с [11, 12]. Данная оценка получена нормированием рассчитанных нами вольт-амперных характеристик на эксперимент. С учетом масштабирования наши результаты могут быть экстраполированы на макро-скопические образцы.

5. Выводы

Численно методом Монте-Карло исследованы процессы релаксации в вихревой системе в микронном сверхпроводящем мостике. Исследовано влияние искусственных центров пиннинга — субмикронных отверстий — на релаксацию магнитного потока, также исследованы случаи различного распределения собственных центров пиннинга по глубине их потенциальных ям. Показано, что чем уже логнормальное распределение (при фиксированной глубине, соответствующей максимуму), тем быстрее происходит релаксация и тем менее эффективно происходит захват магнитного потока сверхпроводником. Субмикронные отверстия незначительно уменьшают захваченный поток. Показано, что для микронного мостика существуют расхождения с моделью коллективного крипа потока: наблюдается рост скорости релаксации со временем при высоких температурах и ступеньки на зависимости

захваченного потока от времени, соответствующие выходу отдельных вихрей. Результаты могут быть использованы при проектировании сверхпроводящих мостиков, подборе оптимальных режимов пиннинга для повышения магнитных характеристик.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект государственного задания № FSWU-2023-0031).

Литература

- [1] E. Tralbaldo et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **32**, 073001 (2019). DOI: 10.1088/1361-6668/ab1814
- [2] R.F. Voss, R.B. Laibowitz, A.N. Broers, *Appl. Phys. Lett.*, **37**, 656-658 (1980). DOI: 10.1063/1.92026
- [3] G. Papari, et al., *Physica C*, **506**, 188-194 (2014). DOI: 10.1016/j.physc.2014.06.017
- [4] M.R. Koblishka et al., *Materials*, **12**, 853 (2019). DOI: 10.3390/ma12060853
- [5] M.R. Koblishka et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **33**, 044008 (2020). DOI: 10.1088/1361-6668/ab72c3
- [6] Maksimova, et al., *J Supercond. Nov. Magn.*, **1-8** (2022). DOI: 10.1007/s10948-021-06067-7
- [7] D. M. Gokhfeld, et al., *Phys. C: Supercon. Appl.*, **600** (2022), 1354106. DOI: 10.1016/j.physc.2022.1354106
- [8] M. Kato, H. Kitago H., *J Phys.: Conf. Ser.*, **871**, 012028 (2017). DOI: 10.1088/1742-6596/871/1/012028
- [9] T. Kusafuka, M. Kato, O. Sato, *J Phys.: Conf. Ser.*, **1293**, 012021 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1293/1/012021
- [10] W.E. Lawrence, S. Doniach S. *Proceedings of LT 12, Kyoto* (1971).
- [11] A.N. Moroz, et al., *J Phys.: Cond. Mat.*, **33**, 145902 (2021). DOI: 10.1088/1361-648X/abdce7
- [12] A.N. Moroz, et al., *J Phys.: Cond. Mat.* **33**, 355901 (2021). DOI: 10.1088/1361-648X/ac0be9
- [13] Y. Yeshurun, A.P. Malozemoff, A. Shaulov, *Rev. Mod. Phys.*, **68**, 911 (1996). DOI: 10.1103/RevModPhys.68.911
- [14] J. Puig, *Phys. C: Supercon. Appl.*, 590, 1353948 (2021). DOI: 10.1016/j.physc.2021.1353948
- [15] Abou El Hassan, et al., *In E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, **229**, 01014 (2021). DOI: 10.1051/e3sconf/202122901014

Study of magnetic flux relaxation in a micron-sized HTS with intrinsic and artificial pinning

A. N. Maksimova*, **A. N. Moroz**, **V. A. Kashurnikov**

National research nuclear university МЕРФИ, 115409 Moscow, Russia

* e-mail: anmaksimova@mephi.ru

The Monte Carlo method was used to study the relaxation processes of the trapped magnetic flux in a micron-wide superconducting bridge. Calculations are performed for typical parameters of the high-temperature superconductor $YB_2Cu_3O_{7-x}$. The cases of the presence of only its own pinning and artificial in the form of submicron antidot holes have been investigated. It is shown that the presence of holes reduces the trapped magnetic flux. It is also shown that the dependence of the trapped flow on time for a micron bridge does not agree with the collective creep model, and the relaxation rate increases with temperature.

Keywords: HTS, pinning, magnetic relaxation, antidots



Максимова Анастасия Николаевна — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры Общей физики. Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия.

Dr. Anastasia N. Maximova - Associate Professor, Department of General Physics, National research nuclear university «МЕРФИ», Moscow, Russia



Мороз Анна Николаевна — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры Физики твердого тела и наносистем. Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия.

Dr. Anna N. Moroz - Associate Professor, Department of Solid-State Physics and Nanosystems, National research nuclear university «МЕРФИ», Moscow, Russia



Кашурников Владимир Анатольевич — доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры Физики твердого тела и наносистем. Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия.

Prof. Dr. – Vladimir A. Kashurnikov - Department of Solid-State Physics and Nanosystems, National research nuclear university «МЕРФИ», Moscow, Russia