

Магнито-оптические исследования прыжков магнитного потока в MgB_2 пленках

А.В. Бобыль^{1,2}, Ю.М. Гальперин^{1,2}, Т.Х. Йохансен², Д.В. Шанцев^{1,2},

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН РАН, 194021 С-Петербург, Россия

²Физический факультет Университета Осло, 0316 Осло, Норвегия

Впервые были получены магнито-оптические изображения прыжков магнитного потока СП пленок. Исследовались MgB_2 пленки в перпендикулярном магнитном поле. При медленном росте поля ($\sim 10 \mu T/s$) и $T < 10$ К наблюдались прыжки потока в виде овалов размером 10-20 μm , случайно расположенные вдоль фронта проникающего в пленку потока. Общее количество вихрей в одном прыжке варьируется от 20 до 10000. Одновременно наблюдаются огромные лавины потока в виде «деревьев» (дендритного типа) с размерами порядка размера исследуемых образцов ($\sim cm$) и количеством вихрей от 10^6 и до 108. Дендриты могут запускаться также импульсами транспортного тока и подавляются при контакте сверхпроводящей пленки с металлической фольгой. Предполагается, что оба типа прыжков возникают в результате термомагнитной неустойчивости. Они могут инициироваться флуктуациями электрического поля или температуры, возникающими при релаксации упругих напряжений, что особенно характерно для напряженных пленок. Для возникновения дендритной неустойчивости принципиально важно наличие большого электрического поля, при котором диффузия магнитного потока происходит быстрее, чем диффузия тепла.

Использование пленок MgB_2 в прикладных задачах затруднено в связи с наличием неустойчивости проникновения магнитного потока дендритного типа. Магнито-оптические исследования выявили, что при температурах ниже пороговых ($T_h \approx 10$ К) и при магнитных полях, превышающих $H_h = 2-10$ мТ, поток проникает в MgB_2 пленки преимущественно лавинообразным путем, с формированием огромных дендритов (\sim размера образца). Это отличает их от плавного и ровного движения фронта в других СП-ках 2-го рода с сильным пиннингом, где могут наблюдаться только малые прыжки потока ($< N_{max} \approx 100$ вихрей). В данной работе было обнаружено, что проникновение магнитного потока в пленках MgB_2 при полях $< H_h$ также происходит за счет сравнительно небольших (относительно дендрита) лавин. При этом величина $N_{max} \approx 10000$, что на два порядка превышает аналогичную величину для большинства других СП-ков. [1,2]

Распределение магнитного потока пленок MgB_2 , нанесенных на подложки Al_2O_3 импульсным лазерным напылением, исследовалось магнито-оптическим (МО) методом, основанным на эффекте Фарадея [3]. Пленки охлаждались в нулевом внешнем магнитном поле и помещались в перпендику-

лярное медленно растущее магнитное поле (1-20 $\mu T/сек$).

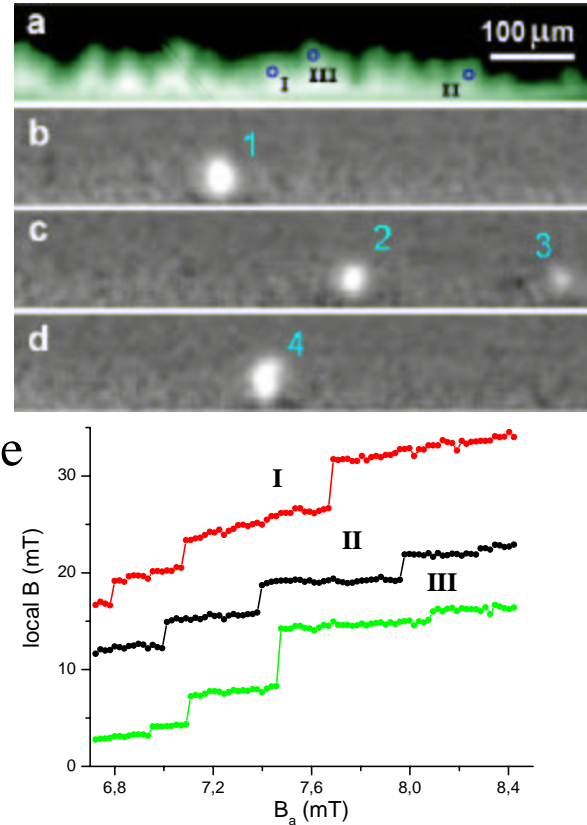


Рис.1. (а): Магнито-оптическое изображение плотности потока $B(r)$ вблизи края MgB_2 пленки во внешнем поле $B_a=7.1$ мТ. (b)-(d): изменения $B(r)$ по мере увеличения B_a на 0.01 мТ, полученные вычитанием ближайших МО изображений. Белые области соответствуют прыжкам потока. Количество вихрей определяется интегрированием $B(r)$ по площади и равняется 1900, 1200, 300 и 2100 Φ_0 для прыжков 1-4, соответственно. (е): зависимость локального потока от B_a для трех областей размером $10 \times 10 \mu m^2$, отмеченных кружками на МО изображении (а); ступеньки на $B(B_a)$ соответствуют отдельным прыжкам.

На Рис.1(а) видно, что фронт магнитного потока (светлая область) является неоднородным. Визуально в микроскопе вблизи фронта наблюдается появление большого количества малых и быстрых прыжков (< 0.1 с). Для количественного описания статистики прыжков были зарегистрированы 2200 изображений с интервалом 0.01 мТ. Появление прыжков анализировалось на изображениях, полу-

чаемых вычитанием двух ближайших. На Рис.1(b) показано разностное изображение, полученное путем вычитания изображений при $B(\mathbf{r}, 7.11 \text{ mT})$ и $B(\mathbf{r}, 7.10 \text{ mT})$. Серый фон соответствует отсутствию изменений, а овальное пятно – появлению микролавины вихрей. На следующих изображениях Рис.1(c,d) видны прыжки в других местах фронта потока. На Рис.1(e) показана зависимость локальной плотности потока от внешнего поля. Видно, что накопление вихрей в пленке происходит в основном за счет прыжков. Неоднократные повторения этих экспериментов показали, что хотя зависимость суммарного количества проникших вихрей от внешнего поля и воспроизводится, но момент появления конкретного прыжка или дендрита непредсказуем.

Минимальный прыжок размером 20 вихрей зарегистрирован при 3.3 мТ. (см. Рис.2).

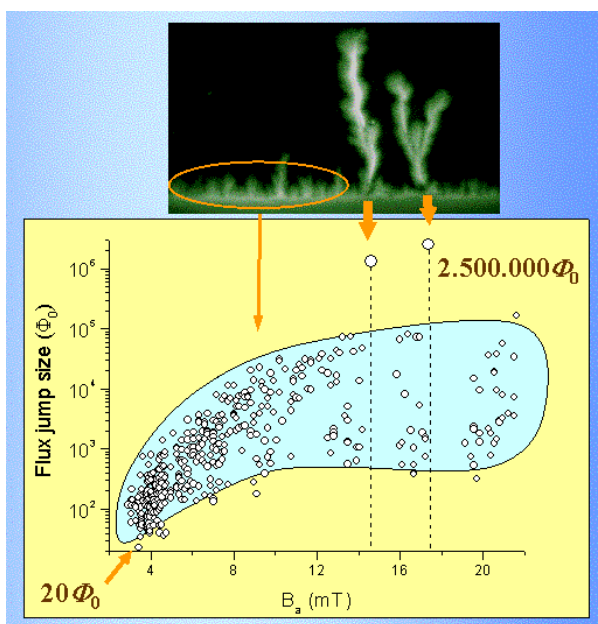


Рис.1. Распределение размера лавин (прыжков) в зависимости от внешнего магнитного поля B_a . При больших полях размеры прыжков постепенно увеличивается в среднем до 10000 вихрей. При 15 мТ появляется первый дендрит размером более миллиона вихрей. В верхней части показано МО изображение края образца в поле 22 мТ.

Заметим, что в области больших полей $B_a > 14$ мТ малые прыжки продолжают появляться одновременно с большими дендритами. Однако сразу после появления дендрита имеется некая «мертвая» область, где малые прыжки отсутствуют (справа от вертикальной пунктирной линии на Рис.2).

Два типа различных по размеру лавин (прыжков) ранее наблюдались в Nb пленках [4]. Был сделан вывод, что они имеют различную физический природу. В наших исследованиях оба типа лавин

исчезают выше некоторой пороговой температуры 10 К. Это предполагает, что оба типа лавин имеют единую термо-магнитную природу – исчезают при высоких Т за счет роста удельной теплоемкости. Существование двух типов лавин может быть связано с сильным размагничивающим фактором тонких пленок. Когда прыжок превышает некий критический размер, линии огибающего тока вокруг области прыжка увеличивают локальное поле и таким образом ускоряют развитие прыжка. В этом случае величина последнего ограничивается только размерами исследуемого образца. Другая возможная причина – стабилизирующая роль теплопроводности, которая наиболее эффективно подавляет только малые прыжки. Аналогичный стабилизирующий эффект возникает также из-за быстрого роста теплоемкости с ростом температуры в момент прыжка. Наконец, сравнение статистики прыжков для пленок с разным количеством краевых дефектов показывает, что неоднородности СП-ка также оказывают большое влияние на функцию их распределения по величине.

Другой принципиальный вопрос, какие факторы определяет ширину дендрита? Был проведен линейный анализ термо-магнитной неустойчивости, основанный на уравнениях Максвелла и нелинейности ВАХ СП-ка. Оказалось, что чем меньше ширина дендрит, тем меньше перераспределение тока и тем быстрее возникает неустойчивость. Однако узкие дендриты подавляются диффузией тепла. Условие равенства выделяемой энергии за счет джоулевого нагрева, jE , и скорости ее термической диффузии, $\kappa \nabla^2 T$, где κ - коэффициент теплопроводности, приводит к появлению критерию оптимальной ширины дендрита, порядка $\sqrt{\kappa(\partial J_c / \partial T)^{-1} / E}$ [5].

Таким образом, проникновение магнитного потока в пленки MgB_2 ниже 10 К происходит путем быстрых лавин (прыжков) различных пространственных масштабов – от μm до sm . Термическая природа лавин означает, что плотность критического тока определяется здесь величинами таких термических параметров, как удельная теплоемкость, а не величиной силы пиннинга.

- [1] M. Baziljevich, A.V. Bobyl, D.V. Shantsev, T.H. Johansen and S.I. Lee. *Physica C* **369**, 93-96 (2002).
- [2] A.V. Bobyl, D.V. Shantsev, T.H. Johansen, W.N. Kang, H.J. Kim, E.M. Choi, S.I. Lee. *Appl. Phys. Lett.* **80**, 4588-4590 (2002).
- [3] A.V. Bobyl, T.H. Johansen, D.V. Shantsev. *Magneto-optical imaging*. NATO conference. Kluwer, 205 (2004).
- [4] E.R. Nowak, O.W. Taylor, Li Liu, H.M. Jaeger, T.I. Selinder, *Phys.Rev. B* **55**, 11702(1997).
- [5] A.L. Rakhmanov, D.V. Shantsev, Y.M. Galperin, T.H. Johansen, cond-mat/0405446.