

ОСОБЕННОСТИ РЕЛАКСАЦИИ НАМАГНИЧЕННОСТИ НА НАЧАЛЬНОМ ВРЕМЕННОМ ИНТЕРВАЛЕ И ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА КРИП ПОТОКА В МОНОКРИСТАЛЛАХ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$

В.В.Мошалаков, А.А.Жуков,

В.Д.Кузнецов¹⁾, В.В.Метлушко¹⁾, Л.И.Леонюк

Обнаружена релаксация намагниченности монокристаллов $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$ на начальном временном интервале, предположительно обусловленная вязким течением абрикосовских вихрей при токах больше критических. Эта релаксация сменяется на логарифмическую при переходе к термоактивированному крипу потока. Впервые детально исследована полевая зависимость скорости логарифмической релаксации при различных температурах.

Одной их особенностей поведения высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в магнитном поле в сверхпроводящем состоянии ($T < T_c$) является наличие логарифмической релаксации намагниченности¹⁻⁴, связанной с термически активированным крипом потока. В исследованиях этого явления логарифмический закон наблюдался, начиная с некоторого конечного времени t_0 ($t_0 \sim 200$ с) после ввода магнитного поля. Что же касается начального временного участка $t < t_0$ здесь динамика поведения вихревой структуры пока не изучалась. В связи с этим целью настоящей работы являлось исследование особенностей процессов релаксации намагниченности в монокристаллах $\text{Bi}_2(\text{Sr}, \text{Ca})_3\text{Cu}_2\text{O}_x$, которая при неизменной конфигурации образца пропорциональна его магнитному моменту P_m , при $t < t_0$. Одновременно решалась задача определения влияния магнитного поля на скорость релаксации $P_m(t)$ для времен $t > t_0$ при различных ориентациях магнитного поля. Данные по влиянию температуры на скорость релаксации $dP_m(t)/d(\ln t)$ можно найти в ряде работ¹⁻⁴. Вместе с тем полевые зависимости $dP_m(t, B)/d(\ln t) = f(B)$ детально не исследовались.

Измерения магнитного момента производились в интервале полей $B = 0 - 300$ мТл в режиме ZFC на СКВИД-магнитометре⁵ с чувствительностью $\sim 10^{-10}$ А/м². Установка позволяет работать в температурном интервале 1.8 - 300 К.

Характерная полная релаксационная кривая $P_m(t)$ приведена на рис. 1. Можно выделить два, существенно различающихся, участка на зависимости $P_m(t)$: первый ($t < t_0$) - с быстрой релаксацией $P_m(t)$, второй ($t > t_0$) - с медленной логарифмической. Обнаружено, что при $t < t_0$ изменение $P_m(t)$ близко к экспоненциальному закону (см. верхнюю вставку на рис.1), причем в пределе $t \rightarrow 0$ магнитный момент определяется лишь внешним магнитным полем из условия полного диамагнитного экранирования с учетом формы образца. Для $t > t_0$, наблюдается логарифмическая релаксация момента $P_m(t)$, проиллюстрированная прямыми линиями на нижней вставке на рис. 1 ($\ln(t, \text{мин}) > 2$). Обнаруженная нелогарифмическая релаксация $P_m(t)$ на начальном временном интервале может быть связана, по нашему мнению, с вязким течением абрикосовских вихрей при токах j больших критического j_c . Ситуация с $J > J_c$ может возникнуть при достаточно высоких температурах T и полях B . Это предположение подтверждается нашими измерениями $P_m(t)$ при меньших T и B (рис. 2), когда временные зависимости $P_m(t)$ выходят на логарифмический закон уже при существенно меньших временах (см. рис. 2, кривые 1, 2).

Полевые зависимости логарифмической релаксации момента при фиксированной температуре T_0 показаны на рис. 2. Так же, как и температурные зависимости скорости $R(T) = dP_m(B_0, T)/d(\ln t)$ ¹⁻⁴, полевые зависимости $R(B) = dP_m(B, T_0)/d(\ln t)$ имеют резкий

¹⁾ Московский физико-технологический институт им. Д.И.Менделеева.

максимум, который смещается в область меньших полей при повышении T_0 . Немонотонная зависимость $R(T, B)$ появляется вследствие перемножения монотонно растущей (kT) и монотонно падающей ($j_c(T, B)$) функций, определяющих температурные и полевые зависимости скорости релаксации ⁴

$$R = (aJ_c / 3)(kT/U_0),$$

где J_c – плотность критического тока, U_0 – средняя энергия активации вихрей. Наличие резкого максимума у зависимостей $R(B, T)$ можно объяснить возникновением топологического перехода в распределении экранирующих токов, а вследствие этого в распределении абрикосовских вихрей. Точка перехода, соответствующая проникновению экранирующих токов до центра образца, для квадратной пластинки может быть рассчитана из соотношения ⁴

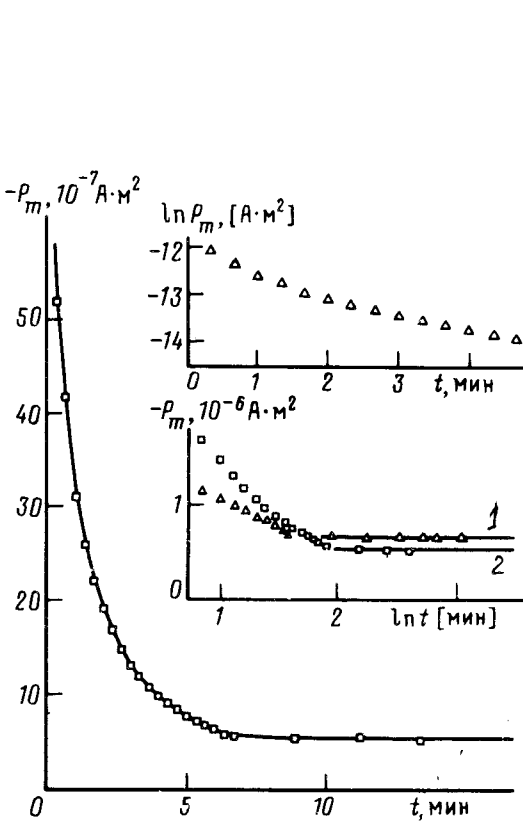


Рис. 1

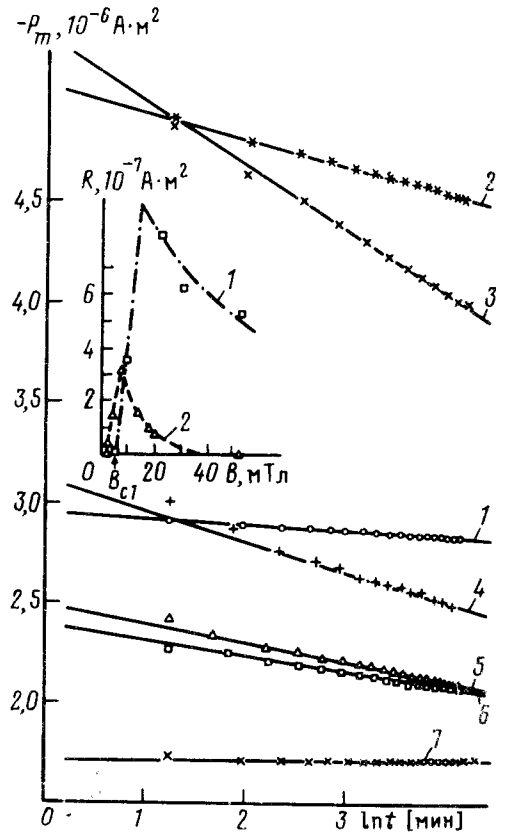


Рис. 2

Рис. 1. Зависимости магнитного момента монокристалла $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$ от времени, ZFC, $T = 77 \pm 0,1\text{ К}$, $B = 8,92$ мТл, $\mathbf{B} \parallel \mathbf{c}$. На вставке 1: временная зависимость логарифма магнитного момента монокристалла $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$, $T = 77$ К, $\mathbf{B} \parallel \mathbf{c}$, $B = 8,92$ мТл. На вставке 2: зависимости магнитного момента монокристалла $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$ от логарифма времени, $T = 77$ К, $\mathbf{B} \parallel \mathbf{c}$: 1 – $B = 4,23$ мТл; 2 – $B = 8,92$ мТл

Рис. 2. Зависимости магнитного момента монокристалла $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$ от логарифма времени (время в мин.), $\mathbf{B} \parallel \mathbf{c}$, $T = 50$ К; кривая 1 – $B = 2,45$ мТл; 2 – $B = 4,51$ мТл; 3 – $B = 7,83$ мТл; 4 – $B = 13,84$ мТл; 5 – $B = 18,28$ мТл; 6 – $B = 20,22$ мТл; 7 – $B = 52$ мТл. На вставке: зависимости скорости релаксации R монокристалла $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$ от магнитного поля B , $\mathbf{B} \parallel \mathbf{c}$: кривая 1 – $T = 30$ К; 2 – $T = 50$ К

$$B_a - B_{c1} = \frac{6\sqrt{2}\mu_0 M_t}{\pi L^3} \ln(2L/D),$$

где B_a и B_{c1} — соответственно, приложенное и первое критическое поле, M_t — магнитный момент в точке перехода, L — поперечный размер, а D — толщина пластинки; поле направлено перпендикулярно плоскости пластинки. Используя кривые намагничивания при соответствующих температурах можно получить для точек перехода значения $B_a = 16$ мТл и $B_a = 6$ мТл при $T = 30$ К и $T = 50$ К, соответственно. Эти значения, как видно из рис. 2, хорошо согласуются с положением максимумов у зависимостей $R(B, T_0)$. Экстраполяция $R(B, T_0)$ к значению $R = 0$ дает первое критическое поле B_{c1} (без учета размагничивания) ²: $B_{c1}(T_0 = 30 \text{ К}) = 5,5$ мТл, $B_{c1}(50 \text{ К}) = 1,5$ мТл. Эти величины хорошо согласуются со значениями B_{c1} , найденными по началу отклонения $P_m(B, T_0)$ от линейного хода.

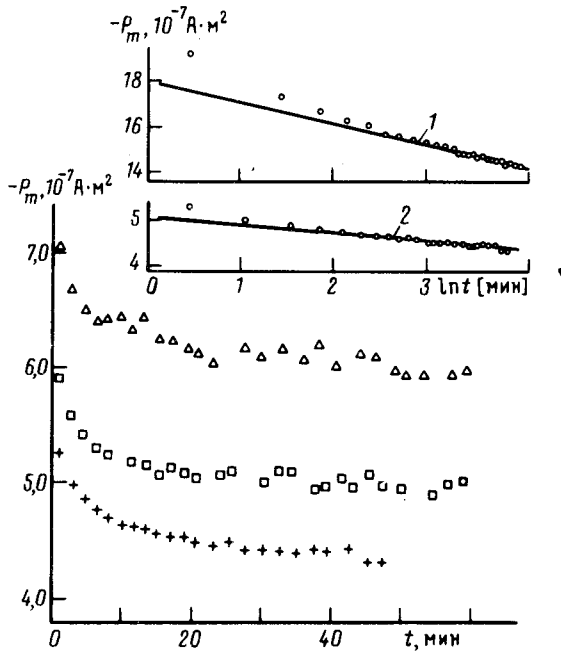


Рис. 3. Временные зависимости магнитного момента монокристалла $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$, $\mathbf{B} \perp \mathbf{c}$, $T = 50$ К: \square — $B = 4,63$ мТл; Δ — $B = 10,72$ мТл; $+$ — $B = 52$ мТл. На вставке: зависимости момента монокристалла $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$ от $\ln t$, $\mathbf{B} \perp \mathbf{c}$, $B = 52$ мТл: кривая 1 — $T = 30$ К; 2 — $T = 50$ К

Насколько нам известно, в литературе по ВТСП пока нет данных по релаксации $P_m(t)$ в монокристаллах $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$ для ориентации $\mathbf{B} \perp \mathbf{c}$. Поэтому мы специально исследовали зависимости $P_m(t)$ и для $\mathbf{B} \perp \mathbf{c}$ (рис. 3). Поскольку в этой ориентации первое критическое поле аномально мало даже при $T = 4,2$ К, то наблюдаются значительные флуктуации в регулярном распределении абрикосовских вихрей. Только при достаточно больших полях $B \gtrsim 52$ мТл зависимости $P_m(t)$ становятся более гладкими (см. рис. 3) и при $t > t_0$ и для $\mathbf{B} \perp \mathbf{c}$ также появляется логарифмическая релаксация.

Таким образом в настоящей работе, во-первых, впервые изучен характер релаксации $P_m(t)$ на начальном временном участке, где обнаружена быстрая релаксация, близкая к экспоненциальной. Для сверхпроводящего кольца "чистая" экспоненциальная зависимость $P_m(t)$ получается в приближении вязкого течения вихрей:

$$L \frac{dJ}{dt} = -R_{\text{fl}}(J - J_c)$$

где L — индуктивность кольца, R_{fl} — сопротивление обусловленное вязким течением вихрей.

Во-вторых, обнаружен резкий максимум на полевой зависимости скорости релаксации $R(B, T_0)$, то есть поле B влияет на $R(B, T_0)$ подобно тому, как температура на $R(B_0, T)$ ^{3, 4}.

В-третьих, для ориентации $\mathbf{B} \perp \mathbf{c}$ также установлен выход при $t > t_0$ на логарифмическую релаксацию $P_m(t)$, если измерения проводить в достаточно сильных магнитных полях.

Литература

1. *Yeshunrun Y., Malosemoff A.P.* Phys. Rev. Lett., 1987, **60**, 2202.
2. *Yeshunrun Y., Malosemoff A.P. et al.* Cryogenics, 1989, **29**, 258.
3. *Гуннуус А.А., Мощалков В.В. и др.* Письма в ЖЭТФ, 1989, **49**, 392.
4. *Moshchalkov V.V. et al.* Subm. to Physica C.
5. *Кузнецов В.Д.* ПТЭ, 1985, **4**, 196–201.

Московский государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
13 июня 1989 г.