

Возбуждение колебаний магнитной индукции в пластине Nb–Ti в результате термомагнитной лавины потока

В. В. Чабаненко

*Физико-технический институт им. А. А. Галкина НАН Украины
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина
E-mail: chaban@host.dipt.donetsk.ua*

В. Ф. Русаков

*Донецкий национальный университет МОН Украины
ул. Университетская, 24, г. Донецк, 83055, Украина*

В. А. Ямпольский

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
ул. Акад. Проскуры, 12, г. Харьков, 61085, Украина*

Г. Шимчак, С. Пехота, С. Васильев, А. Набялек

Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, al. Lotnikow 32/46, 02-668 Warsaw, Poland

Статья поступила в редакцию 8 февраля 2002 г.

Обнаружены слабозатухающие колебания магнитной индукции жесткого сверхпроводника частотой $\sim 10^3$ Гц. Возбуждение колебаний в смешанном состоянии пластины Nb–Ti является результатом гигантских лавин магнитного потока, возникающих при развитии термомагнитной неустойчивости. Время существования осцилляционных явлений в десятки раз превышает длительность лавины. Эти колебания содержат информацию о вихревой материи сверхпроводника.

Виявлено слабозагасаючі коливання магнітної індукції жорсткого надпровідника частотою $\sim 10^3$ Гц. Збудження коливань у мішаному стані пластини Nb–Ti є результатом гігантських лавин магнітного потоку, що виникають при розвитку термомагнітної нестійкості. Час існування осциляційних явищ в десятки разів перевищує тривалість лавини. Ці коливання містять інформацію про вихрову матерію надпровідника.

PACS: 74.60.Ge

Введение

Известно достаточно много работ (например, [1–3]), посвященных исследованию отклика жесткого сверхпроводника второго рода в метастабильном смешанном состоянии на сильное внешнее магнитное возмущение. Три типа поведения критического состояния монокристаллов ВТСП наблюдаются [1] при увеличении скорости изменения внешнего магнитного поля в диапазоне

0–42 Тл/с: стабильный режим вхождения потока при малых и предельно больших скоростях и вхождение потока в виде гигантских скачков вследствие термомагнитной неустойчивости при промежуточных скоростях. Стабильный режим при очень высоких скоростях изменения внешнего поля возникает из-за подавления неустойчивости критического состояния. Использование более высоких скоростей $\sim 10^4$ Тл/с позволило наблюдать [3] наведенные несрелаксированные экраны

рующие токи в ВТСП материалах, на порядок превышающие типичные значения критических токов в обычных условиях малых скоростей изменения поля.

Наши предшествующие исследования явления терромагнитной неустойчивости [6], а также изучение структуры гигантских скачков потока с помощью датчика Холла [7] в Nb–Ti и Nb сверхпроводниках позволило наблюдать целый ряд любопытных явлений. Так, всплеск магнитной индукции $B_{\text{surf}}(t)$ на поверхности сверхпроводника, возникающий в результате гигантской лавины ($\sim 10^{10}$ квантов потока), имеет максимальное значение, превышающее величину внешнего магнитного поля. То есть вблизи поверхности сверхпроводника в результате лавины потока резко возрастает плотность магнитной индукции (происходит сжатие). После сжатия потока следуют *сильно затухающие во времени осцилляции магнитной индукции*. В дополнение к этому во временном интервале, предшествующем лавине, магнитный поток неожиданно движется в противоположном лавине направлении, как при вхождении потока (режим экранирования), так и при его выходе (режим захвата потока). Здесь величина обратных (для направления основного движения потока) пиков индукции достигает 16% от полного значения скачка потока. Энергетически это уже значительная величина, которая позволяет говорить о некотором динамическом потенциальном барьере, *препятствующем изменению потока*. На сегодняшний день не существуют теоретические модели, однозначно объясняющие новые динамические свойства вихревого состояния сверхпроводника.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию с помощью индукционных измерений динамических свойств вихревой материи в низкотемпературных сверхпроводниках с сильным пиннингом магнитного потока в экстремальных условиях. Такие условия реализуются при срыве вихревой материи с центров пиннинга и последующего ее гигантского ускорения (500 км/с^2) в результате развития терромагнитной неустойчивости [4,5]. Под действием силы Лоренца магнитный поток за доли секунды приобретает скорость в несколько десятков метров в секунду. Цель данной работы состоит в экспериментальном исследовании структуры скачка потока в сверхпроводящей пластине. *Основной результат исследований состоит в регистрации слабозатухающих осцилляционных явлений частотой $\sim 10^3 \text{ Гц}$ в магнитной индукции сверхпроводника. Осцилляционный процесс наблюдается*

в течение порядка 0,1 с после завершения лавины. Эти колебательные процессы содержат информацию о вихревом состоянии сверхпроводника, возникшем после релаксации неоднородного смешанного состояния.

Наблюдение *слабозатухающих* колебаний достаточно высокой частотой в сильно диссипативной среде, которой является вихревая материя сверхпроводника в смешанном состоянии, оказывается довольно неожиданным результатом. Низкочастотные ($\sim 1 \text{ Гц}$) колебательные процессы, предшествующие лавине магнитного потока в различных физических величинах сверхпроводника, хорошо известны (см., например, [8–10]). Они связаны с неустойчивостью неоднородного критического состояния в момент, предшествующий магнитной лавине. Медленные флуктуации границы нормальных и сверхпроводящих областей в результате термального импульса наблюдались в высокотемпературных сверхпроводниках [11]. Такие флуктуации приводили к колебаниям (частотой $\sim 0,05 \text{ Гц}$) измеряемых напряжений в исследованиях на постоянном и переменном токах.

Методика эксперимента

Динамику магнитного потока внутри сверхпроводника (Nb–Ti, 50 ат.%, $T_c = 9 \text{ К}$), находящегося в жидком гелии при $T = 2 \text{ К}$, изучали с помощью катушки индуктивности, которую наматывали непосредственно на сверхпроводящую пластину $6 \times 15 \times 15 \text{ мм}$ (см. вставку на рис. 1,а). Катушка состояла из нескольких десятков витков. Она регистрировала напряжение, пропорциональное скорости изменения магнитного потока $d\Phi/dt$. Это напряжение подавалось прямо на самописец быстроизменяющихся процессов с памятью (transient recorder, model TCC-1000, Riken Denshi Co., LTD). В памяти самописца структура каждого скачка напряжения на катушке была представлена 1020 экспериментальными точками, координаты которых затем вводились в компьютер. Петли намагниченности $\mathbf{M}(H)$ ($\mathbf{M} = \mu_0 \mathbf{H} - \mathbf{B}_{\text{surf}}$, где \mathbf{H} — внешнее магнитное поле, μ_0 — магнитная проницаемость вакуума) регистрировались с помощью датчиков Холла, один из которых измерял поверхностную индукцию B_{surf} , а другой — внешнее магнитное поле H .

Результаты эксперимента

Исследование сигналов, записанных с измерительной катушки и дающих интегральную характеристику процессов по всему сечению сверх-

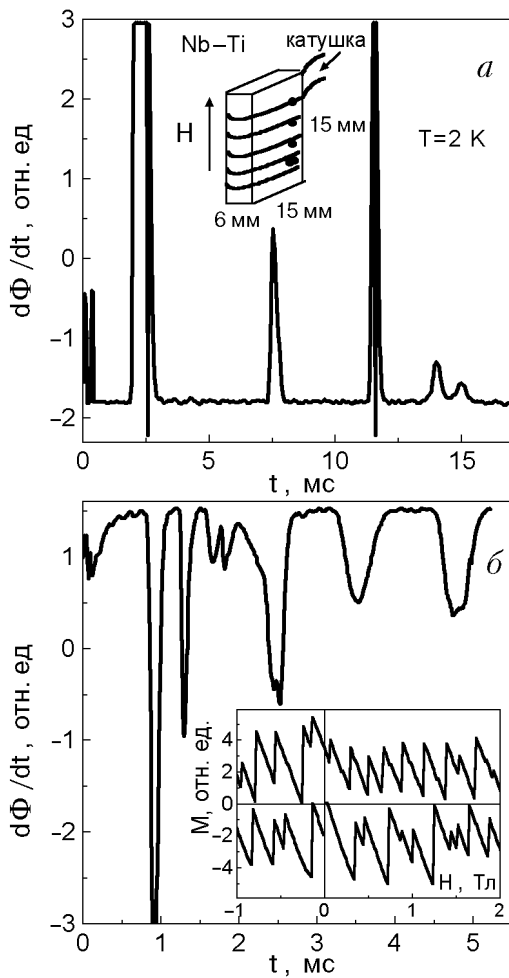


Рис. 1. Напряжение на измерительной катушке во время развития терромагнитной неустойчивости: *а* — пример дискретных лавин в режиме захвата потока (на вставке показана геометрия эксперимента); *б* — пример практически непрерывного каскада лавин в режиме экранирования магнитного потока (вставка демонстрирует скачки потока в намагниченности $M(H)$).

проводящего сердечника, показало, что во время развития терромагнитной неустойчивости магнитный поток входит в образец довольно сложным случайным образом. На рис. 1 показаны примеры таких сигналов. Видно, что поток может входить в виде как дискретных лавин, так и почти непрерывного каскада скачков (рис. 1,б). Оба типа картинок наблюдаются как при входе потока, так и при его выходе. На рисунке представлены случайно выбранные примеры обоих типов изменения потока. Реже наблюдаются двойные лавины (рис. 2,а,б), а также одиночные (рис. 2,в и 3).

Как свидетельствуют результаты, представленные на рис. 1–3, лавины заканчиваются осцилляционным процессом. Этот колебательный процесс содержит некоторую суперпозицию колебаний с разными частотами. Оценка основной частоты ко-

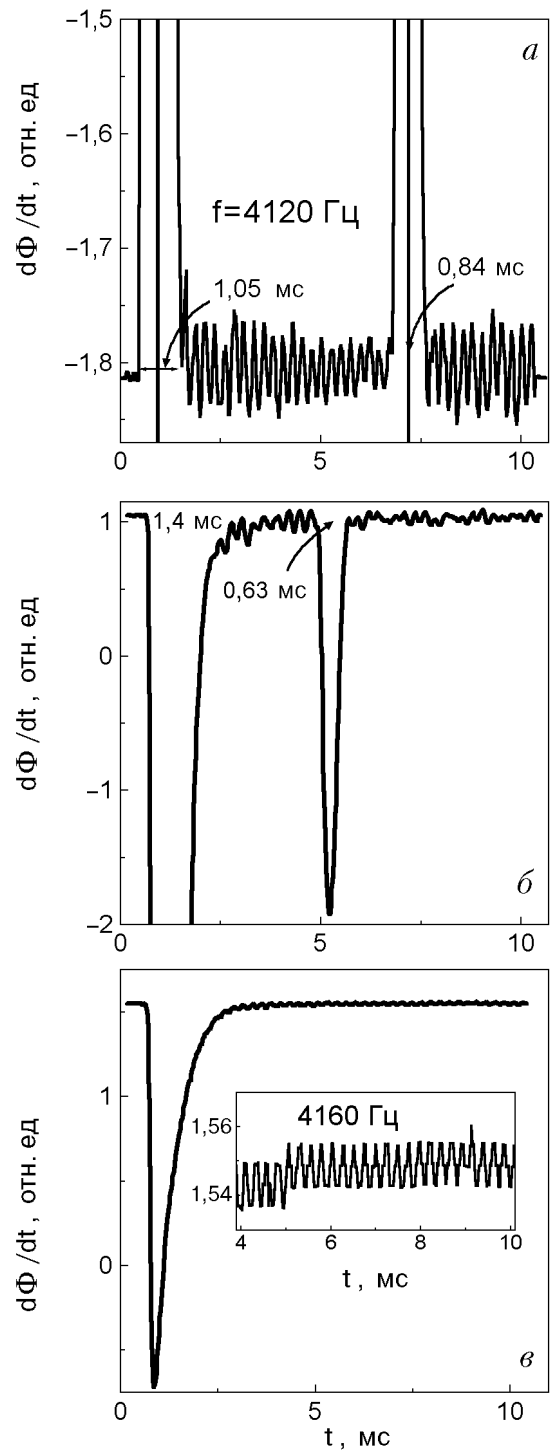


Рис. 2. Осцилляционные явления при $T = 2$ К в индукции сверхпроводника (пластина Nb–Ti): при выходе (режим захвата потока) двух последовательных лавин потока (*а*); двухступенчатая (*б*) и одноступенчатая (*в*) лавины при входе потока (режим экранирования потока).

лебаний, приведенных на рис. 3,б как частного от деления количества происшедших колебаний на их суммарную длительность, дает значение $\approx 4,2$ кГц. Проведенный анализ частотного спектра колебаний дает основную частоту 3,71 кГц,

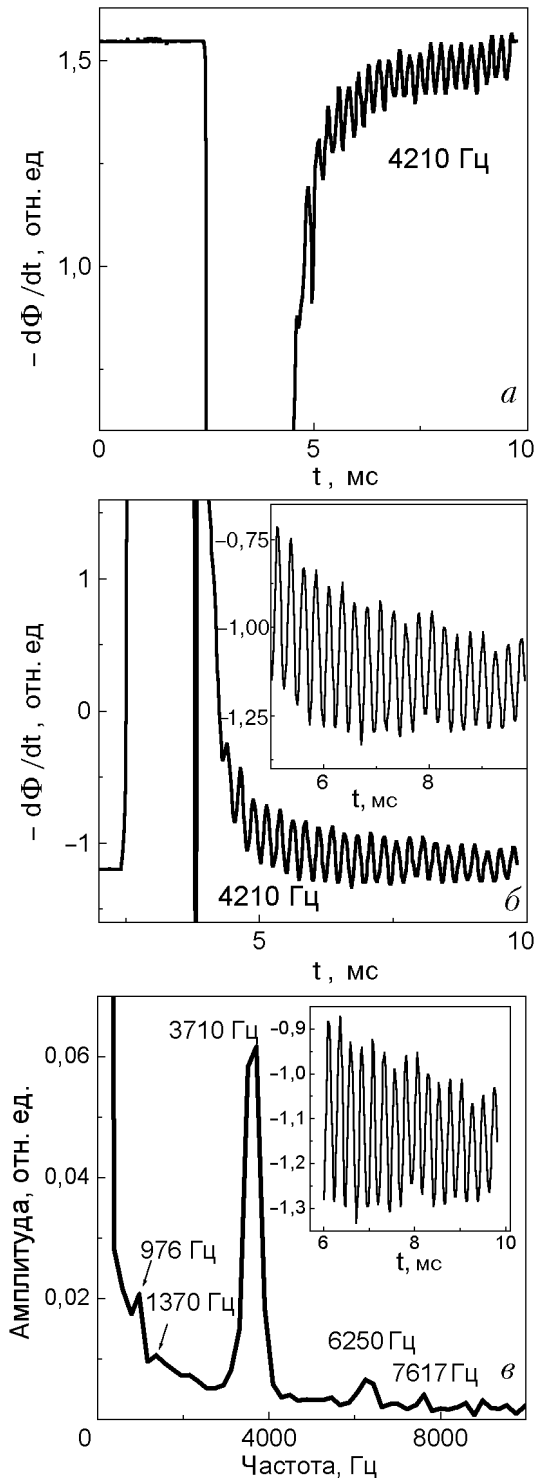


Рис. 3. Детальная картина осцилляций в пластине Nb-Ti при температуре 2 К: а — в режиме экранирования и б — в режиме захвата потока; в — спектр наблюдаемых колебаний, построенный с использованием преобразования Фурье.

близкую к оценочной. Кроме основной частоты в спектре, показанном на рис. 3,в, присутствуют колебания с меньшими амплитудами со следующими частотами: 976, 1370, 6250 и 7617 Гц.

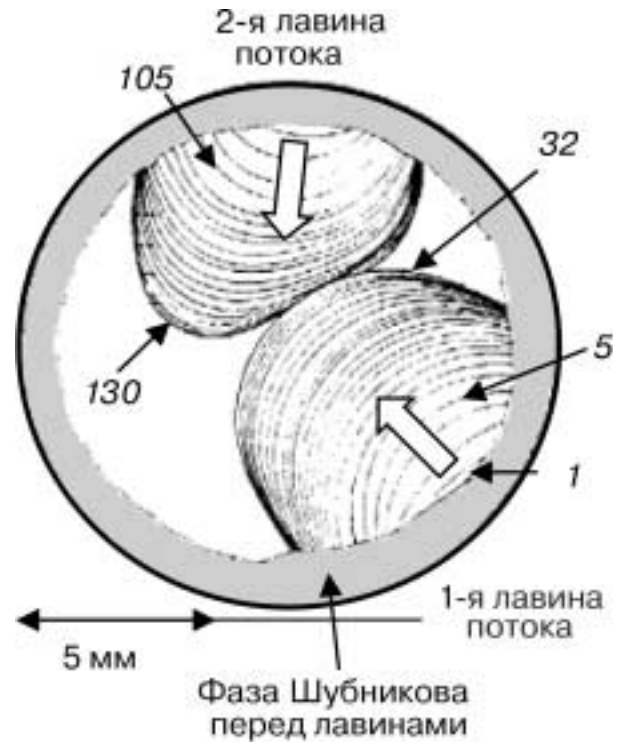


Рис. 4. Визуализация двух последовательных скачков потока в ниобиевом диске (из работы [12]).

Наблюдаемые колебания индукции связаны, по-видимому, с волнами плотности в вихревой материи, возникающими в той области сверхпроводника, куда в результате лавины вошел магнитный поток. В остальной части образца поток запиннингован. На рис. 4, взятом из работы [12], показан результат магнитооптической визуализации (с использованием скоростной кинокамеры) проникновения магнитного потока в ниобиевый диск при последовательном прохождении двух лавин. Эта диаграмма демонстрирует последовательные положения движущегося фронта потока. Временной промежуток между последовательными кадрами равен 103 мкс. Цифры у фронтов потока определяют номера кадров пленки. Рисунок 4 отражает важный факт: магнитный поток второй лавины, возникшей у противоположного конца диска через 7 мс после первой, при достижении через 10 мс границы фронта первой лавины обтекает уже застывший (запиннингованный) ее профиль. Это говорит о том, что врывающийся в образец магнитный поток обладает свойствами «расплавленной» материи. Это позволяет высказать предположение, что регистрируемые колебания индукции связаны с волнами плотности вихревой материи, возникающими в «лужицах» врывающегося потока. Наблюдаемый нами коле-

батальный процесс определяется свойствами расплавленной вихревой материи, среди которых важнейшими, по-видимому, являются ее масса и вязкость.

Заклучение

В настоящей работе экспериментально обнаружены осцилляционные явления в магнитной индукции жесткого сверхпроводника в смешанном состоянии, возникающие после лавинообразного вхождения магнитного потока, спровоцированного термомагнитной неустойчивостью. Дальнейшие экспериментальные исследования этих эффектов и построение теоретической модели обнаруженных колебаний позволят определить важнейшие параметры вихревой материи.

1. A. Gerber, J. N. Li, Z. Tarnawski, J. J. M. Franse, and A. A. Menovsky, *Phys. Rev.* **B47**, 6047 (1993).
2. V. Meerovich, M. Sinder, V. Sokolovsky, S. Goren, G. Jung, G. E. Shter, and G. S. Grader, *Supercond. Sci. Technol.* **9**, 1042 (1996).
3. K. Rosseel, J. Vanacken, L. Trappeniers, H. H. Wen, W. Boon, F. Herlach, V. V. Moshchalkov, and Y. Bruynseraede, *Physica* **C337**, 265 (2000).
4. S. L. Wipf, *Phys. Rev.* **161**, 404 (1967).
5. R. G. Mints and A. L. Rakhmanov, *Rev. Mod. Phys.* **53**, 551 (1981).
6. V. V. Chabanenko, A. I. D'yachenko, M. V. Zalutskii, V. F. Rusakov, H. Szymczak, S. Piechota, and A. Nabialek, *J. Appl. Phys.* **88**, 5875 (2000).
7. V. V. Chabanenko, V. Rusakov, V. Yampol'skii, S. Piechota, A. Nabialek, S. Vasiliev, and H. Szymczak, *Cond-mat/0106379* 19 Jun. 2001.
8. N. H. Zebouni, A. Venkataram, G. N. Rao, C. G. Grenier, and J. M. Reynolds, *Phys. Rev. Lett.* **13**, 606 (1964).
9. R. G. Mints, *Phys. Rev.* **B53**, 12311 (1996).
10. L. Legrand, I. Rosenman, R. G. Mints, G. Gollin, and E. Janod, *Europhys. Lett.* **34**, 287 (1996).
11. I. Kirschner, R. Laiho, A. C. Bodi, and E. Lahderanta, *Physica* **C290**, 206 (1997).
12. B. B. Goodman and M. Wertheimer, *Phys. Lett.* **18**, 236 (1965).

Excitation of magnetic flux oscillations in Nb–Ti plates as a result of the thermomagnetic flux avalanche

V. V. Chabanenko, V. F. Rusakov,
V. A. Yampol'skii, H. Szymczak, S. Piechota,
S. Vasiliev, and A. Nabialek

Low-damping $\sim 10^3$ Hz oscillations of a magnetic flux in hard superconductors are observed. The excitation of these oscillations in a Nb–Ti plate in the mixed state is a result of the giant avalanches of magnetic flux occurring due to the development of thermomagnetic instability. The lifetime of the oscillation phenomena is tens times greater than that of the avalanche. Such oscillations contain information about vortex matter of a superconductor.