



УДК 538.945

Краткое сообщение

От импульсных измерений к частотной вольтамперной характеристике сверхпроводников: шаг первый

Е. П. Красноперов*

НИИ «Курчатовский институт», пл. Акдкдемика Курчатова, 1, 123182, Москва, Россия

* e-mail: krasnoperov_ep@nrcki.ru

Поступила в редакцию 22.10.2024, после переработки 05.11.2024, принята к публикации 06.12.2024.

Приводятся результаты измерений в жидком азоте вольт-амперных характеристик (ВАХ) лент высокотемпературных сверхпроводников для переменного тока с периодом $\tau \sim 9$ мсек и снижающейся амплитудой. В случае, когда начальная амплитуда в 4 раза превышает критический ток, уже после первого периода температура превышает критическую, и сверхпроводник переходит в нормальное состояние. Это состояние сохраняется, до тех пор, пока амплитуда тока не снизится до уровня критического тока сверхпроводника. Эксперимент демонстрирует возможность определять условия применения сверхпроводников в цепях переменного тока.

Ключевые слова: высокотемпературный сверхпроводник; переменный ток; вольт- амперная характеристика.

DOI: 10.62539/2949-5644-2024-0-4-43-47

1. Введение

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) сверхпроводника имеет решающее значение при проектировании сверхпроводящих устройств. Определенные на её основе физические параметры материала, как например, ток возникновения неустойчивости [1] позволяет обеспечить стабильную работоспособность сверхпроводящих магнитных систем. Как известно, при измерении ВАХ лент на основе ВТСП второго поколения при вводе либо постоянного (DC), либо переменного (AC) токов существует ряд проблем, которые затрудняют проведение экспериментов. Во-первых, распределение критической плотности тока по их длине ВТСП неоднородно [2-4]. Во-вторых, значение индекса нарастания ВАХ (n -value) относительно низко. Поэтому, если в ВТСП возникает нормальная зона, то скорость ее распространения крайне низка, и составляет порядка 10 см/с [5]. В результате этого происходит локальный перегрев сверхпроводника. Причем предсказать место появления нормальной зоны практически невозможно [6]. Повышение температуры в области возникновения нормальной зоны при токах, близких к критическому I_c , носит необратимый характер. Соответственно, может возникать локальный пережог сверхпроводника, сопровождающийся разрушением образца.

Традиционно ВАХ измеряют, укрепив ленту на плоскую поверхность непроводящего материала. Увеличивая ток, фиксируют появление минимального напряжения на образце. Это значение тока принимается за критическое – I_c при данной температуре. Фактически измерение проводится в изотермических условиях.

Применение импульсного режима ввода тока, позволяет изучать ВАХ при токах, значительно превышающих критические значения [7, 8]. В работах [9, 10] представлены результаты экспериментальных исследований процессов перехода из сверхпроводящего в резистивное состояние при микросекундных токовых импульсах, когда протекающие процессы близки к адиабатическим.

Для практических применений сверхпроводников на переменном токе необходимо знать, как при заданной частоте колебаний амплитуда соотносится с критическим током. В работе [11] показано, что моделирование однократных импульсных измерений ВАХ может быть использовано для прогнозирования частотной вольтамперной характеристики сверхпро-

водника без трудоемких измерений ВАХ на переменном токе. Модель неплохо описывала процесс увеличения тока, но оставался открытым вопрос, какова в реальности (при данных условиях охлаждения) температура после импульса тока.

Целью данной работы было выполнить эксперименты по измерению вольт-амперной характеристики ВТСП ленты в условиях близких к переменному току. Выяснить, какие параметры сверхпроводника возможно измерить, не допуская при этом ухудшения сверхпроводящих свойств образца.

2. Методика измерений

Образцами для исследований служила лента фирмы Super Power, шириной 4 мм и толщиной 0.1 мм. Она имеет подложку из Hastelloy — 50 мкм с буферным слоем, на который нанесен сверхпроводящий слой из YBCO толщиной — 1 мкм. Снаружи имеются стабилизирующие слои серебра толщина — 2 мкм и меди — 25 мкм.

Отрезок ленты 150 мм припаивался к двум свободно висящим медным токоподводам. Продольная ось ленты была горизонтальной, а ее поверхность — параллельна вертикальной плоскости. Конструкция размещалась в емкости с жидким азотом. При такой вертикальной установке ленты в азоте ее обе стороны имеют одинаковые (симметричные) условия охлаждения. Это радикально упрощает расчет теплоотвода по сравнению с горизонтальным расположением ленты на изолированной пластине [11]. Длина припая лент к токоподводам составляла ≈ 15 мм. Потенциальные контакты припаивались к ленте, так что расстояние между контактами ≈ 100 мм.

Неизолированные каналы осциллографа не позволяют одновременно измерять напряжение на последовательно включенных сопротивлениях в токовой цепи (это — эталонное сопротивление $R_n = 0.422$ мОм и лента ВТСП). По этой причине измерения проводились последовательно. Сначала измерялся ток в цепи $\{I(t) = U_r(t)/R_n\}$. Затем, при том же значении зарядного напряжения на конденсаторах, измерялось напряжение $U_s(t)$ на ленте ВТСП. Синхронизация ввода тока осуществлялась сигналом от катушки, вложенной в разрядную индуктивность. Заметим, что сигнал синхронизации после интегрирования и калибровки также может служить измерителем импульсного тока $I(t)$. Исключая время из измерений тока и напряжения на образце, строилась ВАХ – зависимость $U_s(I)$.

Следует указать на индуктивную помеху, которая возникает от магнитного поля, протекающего по ленте тока. Чтобы ее определить, измерялось напряжение на образце при токе ниже критического, когда сигнал от сверхпроводника равен нулю. Поскольку сигнал помехи пропорционален току, то при последующих измерениях при его вычитании из U_s , он брался пропорциональным току.

Импульс тока достигался разрядом предварительно заряженных конденсаторов. Включение разряда осуществлялось тиристором. Параллельно тиристорам включен диод, с обратной полярностью. Такое необычное использование разряда конденсатора обеспечивало протекание затухающего переменного тока с 2–4 колебаниями.

3. Результаты и обсуждение

Во вставке на рис. 1 изображена осциллограмма тока, которая имеет два колебания с периодом $\tau \approx 9$ мсек. На первом полупериоде (1) с амплитудой 270 А наблюдается петля необратимости шириной 25 А, которая вызвана ростом температуры и снижением критического тока. На небольшом интервале от $T = 77$ К до $T_c = 89$ К ($T/T_c = 0.86$) с высокой точностью можно принять, что критический ток линейно падает с температурой, и таким способом определять нагрев сверхпроводника. Для $I_c = 125$ А при $T = 77$ К после первого полупериода температура ленты выросла на 2.4 К. Возможность определять температуру нагрева после импульсов тока, является достоинством метода, поскольку она определяет устойчивую работу сверхпроводника, и служит важным контрольным параметром для модельных расчетов.

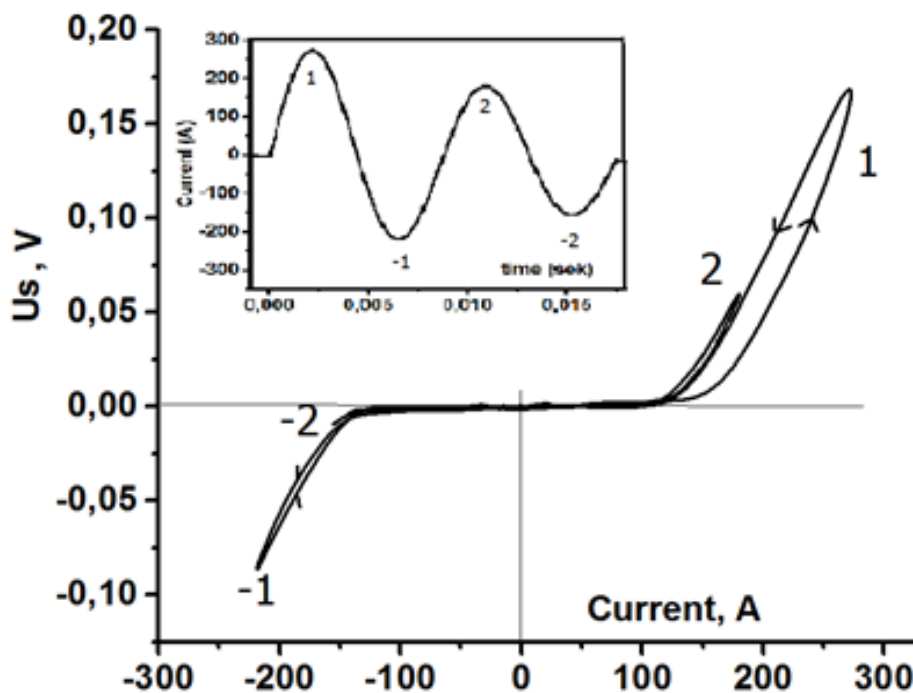


Рис. 1. ВАХ для переменного затухающего тока с максимальной амплитудой ≈ 270 А. Во вставке изображена осциллограмма тока.

Последующие полупериоды тока, с понижающейся амплитудой, имеют узкие петли необратимости, и по окончании первого (-1) полупериода температура и критический ток не меняются. ВАХ становится обратной. Из полученных зависимостей можно сделать вывод, что при работе в жидком азоте для заданного периода 9 мсек ($f \approx 100$ Гц), амплитуда тока может достигать 200 А. Это значительно выше, чем I_c , и жидкий азот может обеспечить устойчивую работу.

На следующем рис. 2 изображена ВАХ с 4-мя периодами колебаний тока и начальной амплитудой 425 А. На первом периоде (1, -1) наблюдаются широкие петли необратимости, резкий рост температуры и падение I_c . Однако, участок характеристики с нулевым сопротивлением ($dU_s/dI \approx 0$) в начале полупериода (-1) говорит о наличии сверхпроводимости. По окончании (-1) из-за роста температуры сверхпроводимость исчезает. Переход в нормальное состояние объясняется, очевидно, малой скоростью отвода тепла по отношению к выделяемой в образце энергии. На начальном участке 2-го периода наблюдается небольшая петля, но это фактически резистивная часть сверхпроводящего перехода, и образец приближается к нормальному состоянию. Тонкая линия на рис. 2 соответствует нормальному сопротивлению $R = 0.00245$ Ом. Это в 5 раз ниже, чем сопротивление ленты при комнатной температуре ($R_{300} = 0.0128$ Ом). В отличие от предыдущего эксперимента (рис. 1), полупериод (-2) с амплитудой тока 200 А создает значительное количество тепла из-за высокого сопротивления образца в нормальном состоянии. Это состояние сохраняется и на третьем периоде (3, -3). Лишь в конце 4-го периода в результате снижения электрической мощности, появляется сверхпроводимость ($dU_s/dI \approx 0$) при токе порядка 20–30 А.

Одной из проблем измерений ВАХ в закритических режимах является возможная деградация сверхпроводящих свойств. В данных экспериментах при многократных циклах охлаждения в жидком азоте, закритические токи до 420 А (рис. 2) пропускались 8 раз, токи до 300 А (рис. 1) более 15 раз. При этом никаких изменений в ВАХ не наблюдалось. Это есть следствие того, что из-за краткости токового воздействия нагрев не был критическим, и как видно из рис. 2 температура оставалась существенно ниже комнатной.

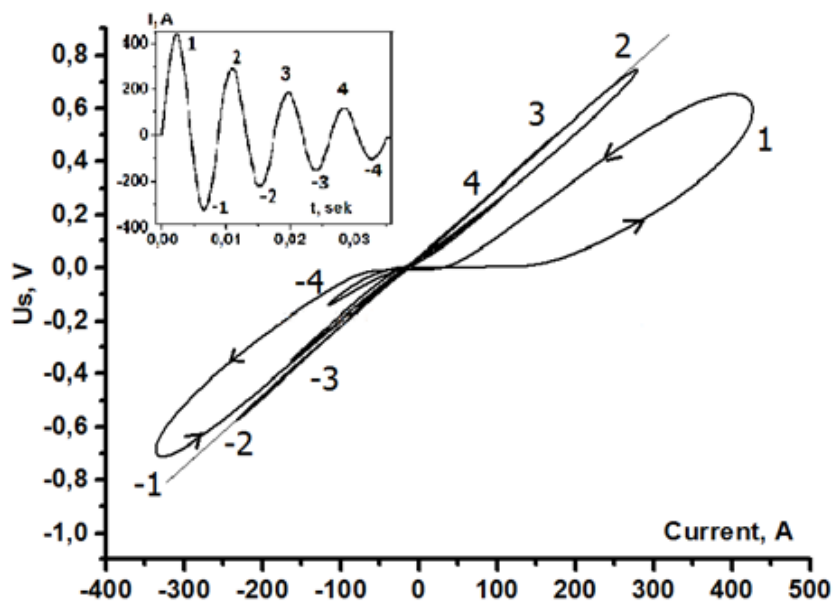


Рис. 2. ВАХ для переменного затухающего тока с максимальной амплитудой 425 А. Во вставке изображена осциллограмма тока. Токая линия соответствует нормальному состоянию образца. Цифрами отмечены максимумы и минимумы (-) соответствующих периодов колебаний.

4. Выводы

Измеряя ВАХ в затухающем переменном токе, с заданной максимальной амплитудой и периодом колебаний, можно определить температуру, и безопасным образом наблюдать, как нагревается образец, и теряется сверхпроводимость. Соответственно, как сверхпроводимость восстанавливается при снижении тока. Тем самым можно задать параметры (амплитуду и частоту) переменного тока, допустимые для работы сверхпроводника в тех или иных условиях охлаждения.

Отметим, что благодаря короткому времени измерений, использованному в работе, вероятность повреждения сверхпроводимости — минимальна.

Благодарности

Автор благодарен Ю. Д. Куроедову за изготовление катушки синхронизации. Работа выполнена в рамках тематического плана НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

- [1] V. R. Romanovskii, Basic Macroscopic Principles of Applied Superconductivity. Boca Raton: CRC Press, 2021. DOI: 10.1201/9781351010160
- [2] V. Selvamanickam, Y. Chen, X. Xiong, Y.Y. Xie, M. Martchevski, A. Rar, Y. Qiao, R. M. Schmidt, A. Knoll, K.P. Lenseth, Ch.S. Weber, IEEE Trans. Appl. Supercond. **19**, 3225 (2009). DOI: 10.1109/TASC.2009.2018792
- [3] V. Selvamanickam, Y. Chen, I. Kesgin, A. Guevara, T. Shi, Y. Yao, Y. Qiao, Y. Zhang, G. Majkic, G. Carota, A. Rar, Y. Xie, J. Dackow, B. Maiorov, L. Civale, V. Braccini, J. Jaroszynski, A. Xu, D. Larbalestier, R. Bhattacharya, IEEE Trans. Appl. Supercond. **21**, 3049 (2011). DOI: 10.1109/TASC.2011.2107310
- [4] M. Paidpilli, Ch. Goel, B. Sarangi, S. Chen, E. Galstyan, J. Jaroszynski, G. Bradford, D. Abraimov, V. Selvamanickam, Superconductivity **9**, 100081 (2024). DOI: 10.1016/j.supcon.2023.100081
- [5] J. Pelegrin, E. Martinez, L.A. Angurel, Y.Y. Xie, V. Selvamanickam, IEEE Trans. Appl. Supercond. **21**, 3049 (2011). DOI: 10.1109/TASC.2010.2084982
- [6] A.M. Archarov, E.S. Dontsova, V.R. Romanovskii et al., Cryogenics and Superconductivity **46**

Society of Japan 837 (2013).

[7] M. Ciszek, S. Trojanowski, Rev. of Sci. Instr. **82**, 114701 (2011). DOI: 10.1063/1.3663071

[8] E. Martínez, L. A. Angurel, J. Pelegrín, Y.Y Xie, V. Selvamanickam, Superconductor Science and Technology **23**, 025011 (2010). DOI: 10.1088/0953-2048/23/2/025011

[9] P. N. Degtyarenko, I. N. Dul'kin, L. M. Fisher, A. V. Kalinov, I. F. Voloshin, V. A. Yampol'skii, Low Temp. Phys. **37**, 101 (2011). DOI: 10.1063/1.3554366

[10] И.В. Анищенко, С.В. Покровский, М.А. Осипов, Д.А. Абин, Д.И. Грицаенко, И.А. Руднев, Письма в ЖТФ **47**, 22 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.19.51508.18828

[11] Е.П. Красноперов, Ю.Д. Куроедов, В.Р. Романовский, ВАHT **1** (2025).

From pulse measurements to the frequency current-voltage characteristic of superconductors: step one

E. P. Krasnoperov*

NRC "Kurchatov Institute", Pl. Akademika Kurchatova, 1, 123182, Moscow, Russia

* e-mail: krasnoperov_ep@nrcki.ru

The results of measurements in liquid nitrogen of volt-ampere characteristics (VAC) of high-temperature superconductor tapes for a decreasing alternating current with a period of $\tau \sim 9$ ms are presented. In the case when the initial amplitude is 4 times greater than the critical current, after the first period the temperature exceeds the critical one, and a normal state occurs. This state is maintained until the current amplitude decreases to the level of the critical current of the superconductor. The experiment demonstrates the possibility of determining the conditions for using superconductors in alternating current circuits.

Keywords: high-temperature superconductor; alternating current; volt-ampere characteristic.



Евгений Павлович Красноперов — начальник лаборатории, д. ф.-м. н, профессор, НИЦ «Курчатовский институт»

Prof., Dr. Evgeny Krasnoperov — Head of Laboratory of Advanced Superconducting and Magnetic Developments at National Research Centre “Kurchatov Institute”