

05.5;15

Экспериментальный метод контроля перегрева сверхпроводящих пленок под действием импульсного тока

© М.А. Васютин, Н.Д. Кузьмичев, Д.А. Шилкин

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск, Россия
E-mail: vasyutinm@mail.ru

Поступило в Редакцию 5 января 2022 г.

В окончательной редакции 24 мая 2022 г.

Принято к публикации 6 июня 2022 г.

С помощью временных разверток тока через образец сверхпроводящей пленки исследовано влияние скорости токовой развертки на процесс распространения тепла от токовых контактов. В качестве образцов использовались пленки NbN, находящиеся ниже и выше температуры перехода в сверхпроводящее состояние. Предложен метод определения критического нагрева ключевых зон образца. Оценены скорости распространения резистивного фронта и нормального домена в сверхпроводнике при различных температурах.

Ключевые слова: пленки нитрида ниобия, временная развертка тока, резистивный фронт, нормальный домен.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.14.52868.19131

При исследовании токонесящих свойств сверхпроводников одной из наиболее важных задач является обеспечение отсутствия перегрева образцов. Анализ вольт-амперных характеристик, измеренных обычным четырехконтактным методом, часто не может дать четкого разделения вкладов тепловых и нетепловых механизмов в резистивное состояние сверхпроводника. Поэтому для определения перегреваемых участков мы предлагаем использовать временные развертки напряжения на потенциальных контактах к образцу и на эталонном сопротивлении, последовательно соединенном с ним (токовая развертка). При этом разность потенциалов на эталонном сопротивлении будет обеспечивать контроль тока в цепи, форма временной развертки которого и будет являться основным инструментом анализа изменения сопротивления образца. Дело в том, что сопротивление образца может увеличиваться и в то время, когда напряжение на потенциальных контактах будет оставаться нулевым. Это связано с неизбежным нагревом области токовых контактов. Такой критический нагрев будет хорошо виден на токовой развертке, так как увеличение сопротивления всей цепи приведет к отклонению развертки от линейной зависимости (ослаблению роста). В этом случае при обеспечении допустимого уменьшения роста тока (за счет увеличения скорости развертки тока, снижения температуры, увеличения теплоотвода) можно гарантировать отсутствие перегрева в области потенциальных контактов (в нулевом магнитном поле).

При наложении магнитного поля анализ разверток усложняется, но и в этом случае можно выделять вклад теплового нагрева, анализируя характер увеличения сопротивления образца до наступления резистивного состояния. Это связано с двумя характерными особенностями: 1) увеличение сопротивления образца, вызванное распространением резистивной области; 2) уменьшение

сопротивления течения потока из-за уменьшения сверхпроводящей области образца и одновременное увеличение сопротивления течения потока из-за увеличения силы тока через образец. Увеличится или уменьшится вклад в сопротивление от второго механизма, зависит от температуры, магнитного поля, характера дефектов, на которых пиннингуются вихри. Это может быть оценено экспериментально.

Проверка описанного выше метода была проведена на пленках нитрида ниобия (NbN). Пленки NbN имеют высокое удельное сопротивление нормального состояния и применяются сейчас во многих прикладных и фундаментальных исследованиях. На основе ультратонких пленок и нитей NbN изготавливаются логические устройства [1], болометры [2], резонаторы [3], приемные элементы терагерцевого излучения [4], стандарты напряжения [5] и другие устройства, которые часто используются в измерительной технике. Широкие и относительно толстые (единицы микрометров) пленки нитрида ниобия применяются в накопителях энергии [6].

В наших экспериментах исследовались пленки NbN, полученные с помощью реактивного катодного распыления ниобиевой мишени в тлеющем разряде в атмосфере азота и аргона на подложках из плавленого кварца [7,8]. Для пленок толщиной 400–600 nm температура перехода в сверхпроводящее состояние $T_c = 16.2–16.5$ K и ширина перехода $\Delta T_c \approx 0.1$ K. Образцы пленок имели длину $l = 9$ mm и ширину $b = 5$ mm. Для изучения электрических характеристик применялся четырехконтактный метод с контактами из бериллиевой бронзы, обеспечивающей дополнительный теплоотвод от образцов [9]. Для формирования одиночного импульса и регистрации откликов с потенциальных контактов и последовательно включенного эталонного сопротивления ($R = 1 \Omega$) использовались генератор АСК-4106 и

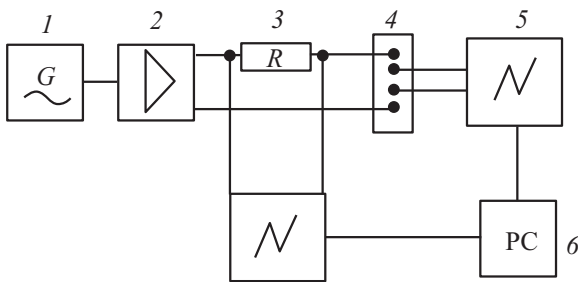


Рис. 1. Электрическая схема эксперимента. 1 — генератор АСК-4106, 2 — усилитель, 3 — эталонное сопротивление ($R = 1 \Omega$), 4 — образец NbN, 5 — осциллограф АСК-3107, 6 — персональный компьютер.

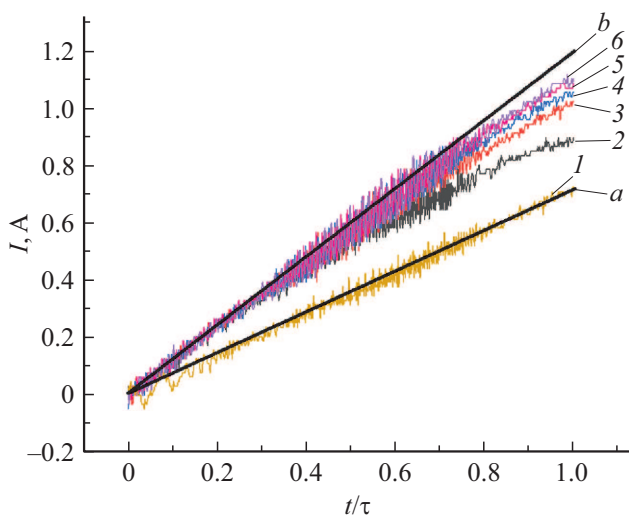


Рис. 2. Зависимость тока через пленку NbN ($T_c = 16.3 \text{ K}$) от времени развертки τ в отсутствие внешнего магнитного поля. 1 — выше T_c ($T = 17 \text{ K}$), $\tau_1 = 0.25 \text{ ms}$, 2 — $\tau_2 = 1 \text{ ms}$, 3 — $\tau_3 = 0.25 \text{ ms}$, 4 — $\tau_4 = 0.1 \text{ ms}$, 5 — $\tau_5 = 0.05 \text{ ms}$, 6 — $\tau_6 = 0.025 \text{ ms}$. Зависимости 2–6 получены при температуре пленки $T = 13.5 \text{ K}$. Линия *a* — прямая, аппроксимирующая экспериментальную зависимость I . Линия *b* — зависимость, которая должна наблюдаться при полном отсутствии нагрева образца, находящегося в сверхпроводящем состоянии.

осциллограф АСК-3107 с частотными полосами пропускания не ниже 100 MHz (рис. 1). Подробнее техника измерений и параметры пленок описаны в работе [10]. Представленные экспериментальные данные получены на образце толщиной 400 nm с $T_c = 16.3 \text{ K}$.

Эксперименты проводились в отсутствие внешнего магнитного поля (напряженность поля $H = 0$) при таких температурах, когда токи, переводящие образец в резистивное состояние, были намного меньше тока распаривания.

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости тока в цепи, состоящей из последовательно включенных пленки NbN и эталонного сопротивления, от времени его нарастания (времени импульса/развертки τ) $I(t)$ при температуре пленки $T = 13.5 \text{ K}$ ($H = 0$). Ток

измерялся по напряжению на эталонном сопротивлении. До величины тока $I = 0.4\text{--}0.5 \text{ A}$ (соответствующая плотность тока $j = (1.3\text{--}2.5) \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$) зависимости $I(t)$ совпадают в пределах ошибок измерений, т.е. до этих значений нагревом образца можно пренебречь. При дальнейшем увеличении тока заметно значительное расхождение зависимостей $I(t)$, оценить которое можно по значениям токов в конце импульса $I_{\max}(t)$.

Минимальные значения в конце импульса $I_{\max N}$ имеет ток при переходе всего образца в нормальное состояние при $T = 17 \text{ K}$, когда сопротивление цепи становится максимальным (зависимость I). Зависимость I не меняет своего вида при разных временах развертки. При этом $I_{\max N} = 0.7 \text{ A}$, а зависимость I линейна (аппроксимация *a*), что свидетельствует, в частности, и о том, что влиянием изменения сопротивления подводящих проводов при пропускании тока можно пренебречь. Максимально возможное значение $I_{\max S}$ можно определить путем экстраполяции линейной зависимости, общей для всех $I(t)$, до точки окончания времени импульса (идеальная линия *b*, которая должна наблюдаться при полном отсутствии нагрева образца, т.е. когда весь образец будет находиться в сверхпроводящем состоянии). В этом случае $I_{\max S} = 1.2 \text{ A}$.

Таким образом, реальные значения I_{\max} находятся в пределах от 0.7 до 1.2 A, и чем меньше время импульса, тем выше I_{\max} . Поскольку обеспечение полного отсутствия нагрева образца при контактных измерениях практически невозможно при таких сильных токах, важно оценить верхний предел времени импульса, при котором резистивный фронт распространяется до потенциальных контактов, т.е. момент, когда области образца от токовых контактов до потенциальных уже перешли в резистивное и нормальное состояния из-за нагрева, а область между потенциальными контактами еще сверхпроводящая.

Для такой оценки необходимо определить значение I_{\max} , при котором сопротивление образца R_s будет составлять 8/9 от его сопротивления в нормальном состоянии ($R_m \approx 12 \Omega$, считаем образец однородным, расстояние между соседними контактами одинаковым, а область между внутренними краями потенциальных контактов равной 1/9 длины образца). Тогда, используя значения $I_{\max N}$, $I_{\max S}$ и предполагая линейную зависимость $R_s(I_{\max})$ в области от $I_{\max N}$ до $I_{\max S}$, можно получить для нашего случая $I_{\max 8/9} \approx 0.77 \text{ A}$ ($j \sim 3.5 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$). Это значение тока соответствует времени развертки $\tau \approx 1.6 \text{ ms}$. При $\tau < 1.6 \text{ ms}$ тепловая волна не успевает дойти до потенциальных контактов, и влияние перегрева на вид вольт-амперных характеристик исключается.

На рис. 3 приведены временные развертки напряжения на потенциальных контактах образца для различных температур при времени развертки $\tau = 0.25 \text{ ms}$. Видно, что при уменьшении температуры от $T = 17.0 \text{ K}$ (зависимость *b*) до $T = 15.0 \text{ K}$ (зависимость *1*) возрастает время начала перегрева области между потенциальными контактами. При этом при $T = 15.2 \text{ K}$ (зависимость 2)

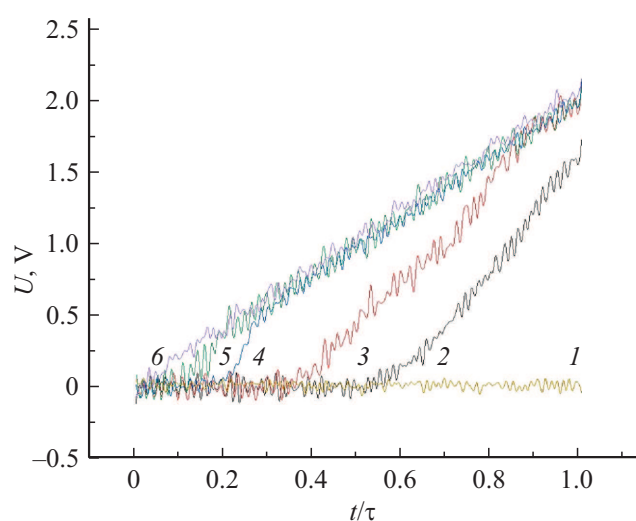


Рис. 3. Зависимость напряжения на потенциальных контактах образца ($T_c = 16.3$ К) от времени для различных температур при времени развертки $\tau = 0.25$ ms. T , К: 1 — 15.0, 2 — 15.2, 3 — 15.5, 4 — 15.9, 5 — 16.0, 6 — 17.0.

нагрев этой области не приводит к полному ее переходу в нормальное состояние, некоторая часть остается в резистивном состоянии. При $T = 15.0$ К вся область остается в сверхпроводящем состоянии.

Зная расстояние между соседними токовым и потенциальным контактами (3–4 mm) и время развертки (0.25 ms), можно оценить скорость распространения резистивного фронта v в образце при различных температурах по началу роста напряжения. При $T = 15.2$ К (зависимость 2) $v = 20$ –27 m/s; при $T = 15.5$ К (зависимость 3) — $v = 30$ –40 m/s; при $T = 15.9$ К (зависимость 4) — $v = 60$ –80 m/s; при $T = 16.0$ К (зависимость 5) — $v = 120$ –160 m/s. При $T = 15.9$ К (зависимость 4) можно оценить скорость движения фронта нормального домена [11] по времени выхода сигнала на линейный участок (весь образец переходит в нормальное состояние): $v = 4.5$ mm/0.08 ms = 56.25 m/s.

Таким образом, в работе показано, что, используя временные развертки тока и напряжения при контактном исследовании сверхпроводников, можно установить критерий перегрева образцов в зависимости от температуры и скорости нарастания тока. Данные временной развертки тока при определенной температуре проясняют картину движения резистивного фронта и определяют время импульса, меньше которого перегрев области между потенциальными контактами можно исключить.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Б.А. Гурович, К.Е. Приходько, Л.В. Кутузов, Б.В. Гончаров, Д.А. Комаров, Е.М. Малиева, ФТТ, **63** (9), 1241 (2021). DOI: 10.21883/FTT.2021.09.51245.36H [B.A. Gurovich, K.E. Prikhodko, L.V. Kutuzov, B.V. Goncharov, D.A. Komarov, E.M. Malieva, Phys. Solid State, **63**, 1369 (2021). DOI: 10.1134/S1063783421090109].
- [2] Y. Ren, D. Zhang, K. Zhou, W. Miao, W. Zhang, S. Shi, V. Seleznev, I. Pentin, Y. Vakhtomin, K. Smirnov, AIP Adv., **9** (7), 075307 (2019). DOI: 10.1063/1.5090132
- [3] F.W. Carter, T. Khaire, C. Chang, V. Novosad, Appl. Phys. Lett., **115** (9), 092602 (2019). DOI: 10.1063/1.5115276
- [4] А.М. Чекушкин, Л.В. Филиппенко, А.А. Ломов, D. Liu, S.-C. Shi, В.П. Кошелец, ЖТФ, **91** (10), 1577 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.10.51373.135-21
- [5] S. Solve, R. Chayramy, M. Maruyama, C. Urano, N.-H. Kaneko, A. Rüfenacht, Metrologia, **55** (2), 302 (2018). DOI: 10.1088/1681-7575/aaac44
- [6] Y. Suzuki, N. Iguchi, K. Adachi, A. Ichiki, T. Hioki, C.-W. Hsu, R. Sato, S. Kumagai, M. Sasaki, J.-H. Noh, Y. Sakurahara, K. Okabe, O. Takai, H. Honma, H. Watanabe, H. Sakoda, H. Sasagawa, H. Doy, S. Zhou, H. Hori, S. Nishikawa, T. Nozaki, N. Sugimoto, T. Motohiro, J. Phys.: Conf. Ser., **897**, 012019 (2017). DOI: 10.1088/1742-6596/897/1/012019
- [7] Н.Д. Кузьмичев, Г.П. Мотулевич, ЖЭТФ, **84** (6), 2316 (1983). http://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_057_06_1351.pdf [N.D. Kuz'michev, G.P. Motulevich, Sov. Phys. JETP, **57**, 1351 (1983). <http://jetp.ras.ru/cgi-bin/r/index/e/57/6/p1351?a=list>].
- [8] Д.Р. Джурев, Г.П. Мотулевич, ФТТ, **27** (9), 2640 (1985).
- [9] М.А. Васютин, Н.Д. Кузьмичев, Д.А. Шилкин, ЖТФ, **91** (3), 538 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.03.50534.183-20 [M.A. Vasyutin, N.D. Kuz'michev, D.A. Shilkin, Tech. Phys., **66** (3), 524 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221030233].
- [10] М.А. Васютин, Н.Д. Кузьмичев, Д.А. Шилкин, ФММ, **121** (10), 1045 (2020). DOI: 10.31857/S0015323020090090 [M.A. Vasyutin, N.D. Kuz'michev, D.A. Shilkin, Phys. Metals Metallogr., **121** (10), 955 (2020). DOI: 10.1134/S0031918X20090094].
- [11] А.И. Безуглый, ФНТ, **26** (8), 755 (2000). [A.I. Bezuglyĭ, Low Temp. Phys., **26** (8), 553 (2000). DOI: 10.1063/1.1289123].