

PACS numbers: 74.25.N-, 74.25.Sv, 74.25.Wx, 74.72.-h, 74.78.-w

## Статические и динамические вольт-амперные характеристики тонких сверхпроводящих плёнок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

А. А. Каленюк, А. И. Ребиков, С. С. Черенко\*

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,  
бульв. Акад. Вернадского, 36,  
03680, ГСП, Киев-142, Украина  
\*Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,  
ул. Владимирская, 64/13,  
01601 Киев, Украина*

В работе рассматривается экспериментальная методика получения статических (прямых) и динамических (дифференциальных) вольт-амперных характеристик (ВАХ) тонких (200 нм) сверхпроводящих плёнок  $\text{YBCO}$ . Прямые и дифференциальные ВАХ снимаются в один проход (при одном сканировании по току), что позволяет в дальнейшем сравнивать эти характеристики без учёта изменения внешних факторов в процессе измерений. Для получения дифференциальных ВАХ использовалось небольшое (по сравнению с постоянной составляющей тока) синусоидальное токовое возбуждение на частотах от 350 Гц до 20 кГц. В результате анализа измеренных ВАХ установлено отсутствие влияния частоты возбуждающего тока на вид дифференциальных ВАХ, выработаны критерии применимости дифференциального метода и проведено сравнение чувствительности получения ВАХ этими двумя методами.

У роботі розглянуто експериментальну методику вимірювання статичних (прямих) і динамічних (диференційних) вольт-амперних характеристик (ВАХ) тонких (200 нм) надпровідних плівок  $\text{YBCO}$ . Прямі та диференційні ВАХ вимірюються в один прохід (при одній розгортці за струмом), що уможливило в подальшому порівнювати ці характеристики без урахування зміни зовнішніх факторів у процесі вимірювання. Для одержання диференційних ВАХ використовувалось невелике (в порівнянні зі значенням постійної складової струму) синусоїдальне струмове збудження на частотах від 350 Гц до 20 кГц. Внаслідок аналізу вимірюваних ВАХ встановлено відсутність впливу частоти збуджувального струму на вигляд диференційних ВАХ, визначено критерії застосовності диференційного методу і виконано порівняння чутливості одержання ВАХ цими двома методами.

An experimental method of obtaining of static (direct) and dynamic (differ-

ential) current–voltage characteristics of YBCO superconductive thin films (200 nm) is presented. Direct and differential  $I$ – $V$  curves are measured in single current sweep that ensures their correct comparison without considering changes in conditions of experiment. In comparison with DC component, low AC current excitement on frequencies between 350 Hz and 20 kHz is used for the measurement of differential  $I$ – $V$  curves. As a result, influence of the frequency of AC component on shape of  $I$ – $V$  curves is not revealed. Criteria of applicability of differential method are worked out, and comparison of sensitivities of both methods is performed.

**Ключевые слова:** вольт-амперная характеристика, дифференциальная ВАХ, сверхпроводящая пленка,  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ -купрат, вихри Абрикосова, пиннинг, термоактивированный крип, критическое состояние, течение магнитного потока.

*(Получено 14 декабря 2012 г.; окончат. вариант — 18 марта 2013 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Использование высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в качестве бездиссипативных токонесущих материалов является весьма перспективным направлением в энергетической отрасли хозяйства. Для этих целей идеально подходят гибкие металлические ленты с пленочным покрытием из ВТСП материала  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO), имеющего температуру перехода в сверхпроводящее состояние выше температуры кипения жидкого азота [1–3].

Плотность критического тока  $j_c$  определяет токонесущие способности этих материалов. Множество работ посвящено проблемам увеличения плотности критического тока путем оптимизации параметров технологии осаждения, допирования различными примесями, бомбардировкой высокоэнергетическими ионами [2–8].

В большинстве работ приводятся измерения  $j_c$  в зависимости от изменения технологических параметров получения пленок или от влияния внешних факторов (температуры, магнитных полей). Значение  $j_c$  определяется в момент возникновения падения напряжения на исследуемом образце, и зависит от чувствительности используемой аппаратуры. С этой позиции, исследование ВАХ пленок несет большую информативность. По виду ВАХ можно судить о процессах, происходящих в пленке в момент протекания сверхтоков, а значит, появляется возможность изучить причины возникновения диссипаций в этих материалах. Имея подобную информацию можно оптимизировать процесс получения пленок.

В радиотехнике давно используют метод получения дифференциальных ВАХ [9]. Используя этот метод совместно с синхронным детектированием, можно добиться лучшей чувствительности по сравнению с прямым измерением падения напряжения на образце  $U(I)$ .

Использование дифференциального метода требует выполнения нескольких условий, одно из которых состоит в том, что скорость протекания исследуемых процессов в образце должна быть намного больше, чем скорость нарастания зондирующего тока (обычно это частоты до 20 кГц). В практических применениях температура токонесущих материалов из ВТСП обычно достаточно высока (порядка азотных температур 78 К). Это приводит к существенной роли тепловых флуктуаций, которые в сверхпроводниках второго рода проявляются в виде крипа магнитного потока — термоактивированных прыжков вихрей Абрикосова между соседними центрами пиннинга. В присутствии транспортного тока под действием силы Лоренца возникает термоактивированный поток вихрей, направленный перпендикулярно току и приводящий к возникновению электрического поля в сверхпроводнике. Критический ток, определяемый из транспортных измерений по критерию порогового электрического поля в сверхпроводнике  $E_c$  (обычно используемый критерий  $E_c = 1$  мкВ/см), при температурах кипения жидкого азота соответствует режиму термоактивированного крипа вихрей [10]. Как известно из экспериментов по изучению скорости релаксации магнитного момента сверхпроводника, термоактивированный крип при азотных температурах в ВТСП материалах (в частности, в YBCO) — достаточно медленный процесс, с характерными временами протекания  $\tau \sim 100$  с [11–13]. Помимо динамических магнитных измерений, детально исследовать процессы крипа (в частности, их влияния на измеряемую величину  $j_c$ ) можно путем измерений ВАХ  $U(I)$  на постоянном токе  $I$  и дифференциального сопротивления сверхпроводника в каждой точке  $U(I)$  на малом переменном токе  $\Delta I$ , модулирующем постоянный транспортный ток ( $\Delta I \ll I$ ). Поэтому главными целями этой работы было получение и сравнение прямых и дифференциальных (измеренных на разных частотах) экспериментальных ВАХ тонких YBCO пленок при температуре 78 К.

## 2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ПРЯМЫХ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ВАХ

Главной задачей работы было получение дифференциальной ВАХ тонких YBCO пленок в виде зависимости дифференциального сопротивления от тока:

$$R_{\text{diff}}(I) = \frac{dU(I)}{dI}. \quad (1)$$

Для получения дифференциального сопротивления в точке  $I_0$  ( $R_{\text{diff}}(I_0)$ ) использовалась синусоидальная модуляция тока амплитудой  $\Delta I \ll I_0$ . Модуляция тока приводила к возникновению на образ-

це падения переменной составляющей напряжения  $\Delta U$ , амплитуда которой, в случае  $\Delta I = \text{const}$ , пропорциональна  $R_{\text{diff}}(I_0)$ . В качестве источника переменного тока использовался генератор напряжения и преобразователь напряжение–ток (рис. 1). Падение напряжения  $\Delta U$  определялось синхронным детектором, который проводил измерения лишь на частоте модулирующего сигнала. Использование синхронного детектирования позволило значительно уменьшить уровень шума в процессе получения дифференциальной ВАХ. Форма сигнала  $\Delta U$  контролировалась осциллографом. Синусоидальная форма напряжения  $\Delta U$  указывала на правильность определения тангенса наклона функции  $U(I)$  в точке  $I_0$ . В случае отклонения формы от синусоидальной уменьшалось значение амплитуды модулирующего тока  $\Delta I$  и проводилось снятие ВАХ заново. На осциллографе также контролировалась амплитуда и форма переменной составляющей тока. В приведенных ниже измерениях динамических ВАХ всегда выполнялось условие  $\Delta I = \text{const} \cong 4 \text{ мА}$ , а форма переменной составляющей тока была строго синусоидальной.

Управление измерениями и считывание результатов осуществлялось с помощью компьютера (ПК) и платы АЦП/ЦАП. Сопряжение между платой и ПК выполнялось специально разработанным программным обеспечением.

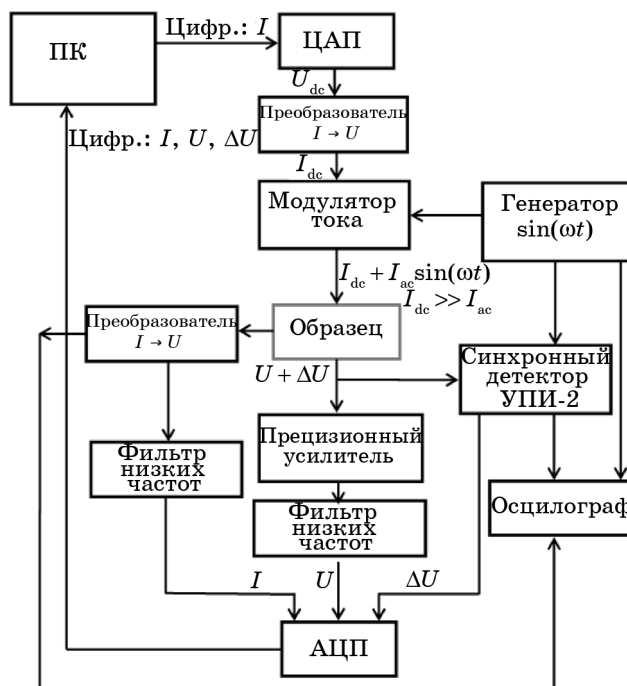


Рис. 1. Блок-схема установки измерения прямых и дифференциальных ВАХ.

Для получения реального значения тока, протекающего по образцу, использовался преобразователь тока в напряжение, фильтр низких частот. Полученное напряжение  $U_I \propto I$  измерялось на модуле АЦП платы ПК. Для получения прямого напряжения  $U(I)$  использовался прецессионный усилитель с максимальным усилением 4200. Для исключения переменной составляющей напряжения сигнал проходил через фильтр низких частот.

Как результат, в реальном времени фиксировались зависимости падения напряжений на образце  $U(I)$  и  $\Delta U(I)$  от протекающего по нему тока  $I$ , то есть измерялась прямая и дифференциальная ВАХ.

Подключение образца осуществлялось четырехзондовым методом [14].

### 3. ОГРАНИЧЕНИЯ МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ВАХ

Для корректного получения дифференциальных ВАХ необходимо выполнить два условия. Первое: минимальная амплитуда  $\Delta I$  (контролируется формой сигнала  $\Delta U$ , как обсуждалось выше). Второе: время установления стационарного состояния исследуемого процесса должно быть намного меньше периода сигнала модулирующего тока  $\tau \ll T\Delta I$ . Остановимся на втором условии подробнее. Используя закон Ома, перепишем выражение (1) в виде:

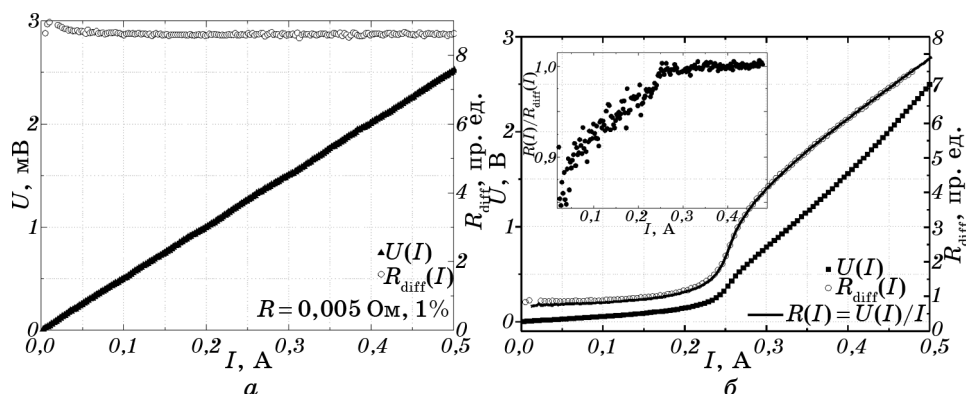
$$R_{\text{diff}}(I) = \frac{dU(I)}{dI} = \frac{d(R(I)I)}{dI} = R(I) + I \frac{dR(I)}{dI}. \quad (2)$$

Если  $\tau \gg T\Delta I$ , то функция  $R(I)$  не успевает изменяться вблизи точки  $I_0$  под действием переменного модулирующего тока. Это приведет к  $dR(I)/dI = 0$ , а значит выражение (2) перепишется в  $R_{\text{diff}}(I) = R(I)$ . Исследуя медленные процессы описанным дифференциальным методом, получим не дифференциальные, а обычные зависимости сопротивления.

Основываясь на приведенных утверждениях, для тестовых исследований были выбраны два образца — резистор номиналом  $R_r = 5$  мОм и криптоновая лампа накала.

Прямая ВАХ резистора — наклонная прямая  $U(I) = R_r I$ . Дифференциальная ВАХ равна константе во всем измеряемом диапазоне (рис. 2, а).

Получение дифференциальных ВАХ криптоновой лампы накала проводилось на частоте 350 Гц. Разогретая нить лампы обладала большой инерционностью и не успевала синхронно прогреваться (изменять сопротивление) под действием переменной составляющей тока. Поэтому ее функция сопротивления задавалась исключительно постоянной составляющей. В результате вместо зависи-

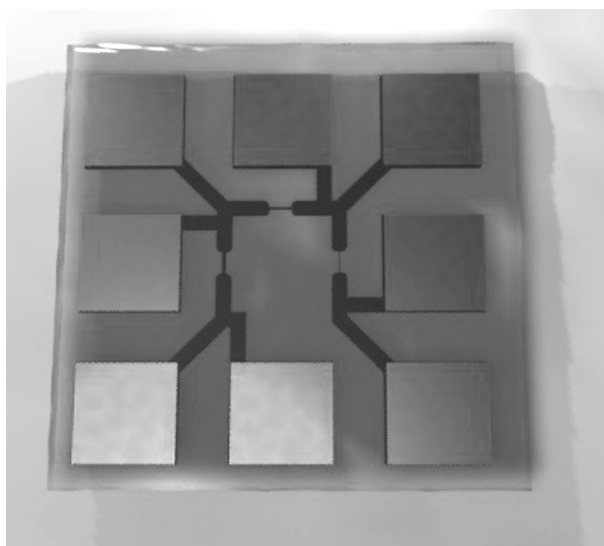


**Рис. 2.** ВАХ резистора и криптоновой лампы накаливания: прямая и дифференциальная ВАХ резистора  $R = 5$  мОм (а); прямая и дифференциальная ВАХ криптоновой лампы накала (2,5 В, 0,5 А), полученная на частоте 350 Гц (б). Сплошная линия — расчетная кривая сопротивления, вычисленная из прямых ВАХ. На вставке зависимость отношения  $R(I)/R_{\text{diff}}(I)$ .

мости  $R_{\text{diff}}(I)$  была получена зависимость  $R(I)$ . Для подтверждения этого был осуществлен расчет функции  $R(I)$  из прямой экспериментальной ВАХ ( $R(I) = U(I)/I$ ). На рис. 2, б продемонстрировано полное совпадение функций  $R_{\text{diff}}(I)$  и  $R(I)$  в области токов  $I > 0,25$  А. Именно в этой области функция сопротивления формируется медленным (по сравнению со скоростью изменения модулирующего тока) процессом нагрева нити накала. В этой области отношение  $R(I)/R_{\text{diff}}(I) = \text{const}$  (вставка на рис. 2, б). Проведенные исследования показывают возможность оценки скорости процессов, путем сравнения прямых и дифференциальных ВАХ. Следует отметить, что условие  $R(I)/R_{\text{diff}}(I) = \text{const}$  является необходимым, но недостаточным для детектирования медленного процесса. С другой стороны, выполнение условия  $R(I)/R_{\text{diff}}(I) \neq \text{const}$  указывает на доминирующий вклад быстрого процесса на формирование ВАХ.

#### 4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ МОСТИКОВ ИЗ ПЛЕНКИ YBCO

В работе были исследованы ВАХ сверхпроводящих мостиков, изготовленных из пленки высокотемпературного сверхпроводника YBCO. Мостики были получены из 190 нм пленки YBCO (лазерное осаждение на подложку из сапфира с 30 нм буферным слоем  $\text{CeO}_2$ ), покрытой после осаждения тонким (50 нм) слоем серебра. Далее, методом стандартной жидкостной фотолитографии, вытравливалась структура (рис. 3) и, затем, химическим способом снималось металлическое покрытие с мостиков. В результате была получена структура с тремя мостиками (длина мостика 0,4 мм, ширины 10,



**Рис. 3.** Топология YBCO мостиков с металлизированными контактными площадками. Длина мостиков 0,4 мм.

25, 55 мкм) и контактными площадками. Для реализации четырёх-зондовой схемы подключения были задействованы по два контакта с каждой стороны измеряемого мостика. Такое расположение позволяло оптимально использовать пленку с размерами 10×10 мм. Ширина областей YBCO, примыкающих к контактными площадкам, значительно превосходит ширину мостика, что позволяет пренебречь потерями в этих областях по сравнению с узким мостиком, критический ток которого значительно ниже широких областей. Поэтому можно считать, что резистивное состояние возникает лишь в мостике.

## 5. ВАХ ТОНКИХ YBCO МОСТИКОВ

Измерение ВАХ мостиков из тонкой YBCO пленки проводилось прямым и дифференциальным методом в одном цикле развертки тока. Скорость развертки тока была 10 мА/мин. Температура поддерживалась на уровне 78 К. В работе приводятся данные для мостика шириной 10 мкм. Мостики с ширинами 25 и 55 мкм оказались менее устойчивыми к протеканию транспортного тока, величина которого была больше критических значений, и вскоре, после нескольких измерений, вышли из строя. При дальнейшем исследовании обнаружен разрыв мостика в виде тонкой ( $\cong 2$  мкм) изломанной линии (рис. 4). Форма линии напоминает границу слабоориентированных доменов YBCO пленки [5], вдоль которой, возможно,

двигались вихри, вызвав локальный перегрев, затем переход в нормальное состояние и, как следствие, испарение пленки с этого участка.

Проведенные исследования не обнаружили зависимости дифференциальной ВАХ от частоты модулирующего тока в диапазоне 0,35–20 кГц (рис. 5, б). Следовательно, значения плотности критического тока, полученные из ВАХ, также не будут зависеть от частоты возбуждающего тока. Следует отметить, что зависимости плотности критического тока от частоты наблюдались в исследованиях YBCO пленок с помощью методики магнитной восприимчивости [15] и трактовались как влияние крипа магнитного потока на формирование динамического отклика пленки. В этом случае реализуется частный случай модели критического состояния, в котором ток индуцируется внешним переменным магнитным полем и его плотность достигает критических значений только на краях пленки. В случае измерения дифференциальных ВАХ, в области возникновения падения напряжения, плотности тока, по-видимому, превышают критические значения во всем объеме пленки, соответственно эффекты перемагничивания краевых областей небольшой переменной составляющей транспортного тока не наблюдаются.

Прямые ВАХ также не зависят от частоты модулирующего тока (рис. 5, а). Отсутствуют эффекты встряски вихрей [16–19]. Плотность критического тока на уровне 1 мкВ оказалась равной  $J_c = 3,8 \cdot 10^6$  А/см<sup>2</sup>.

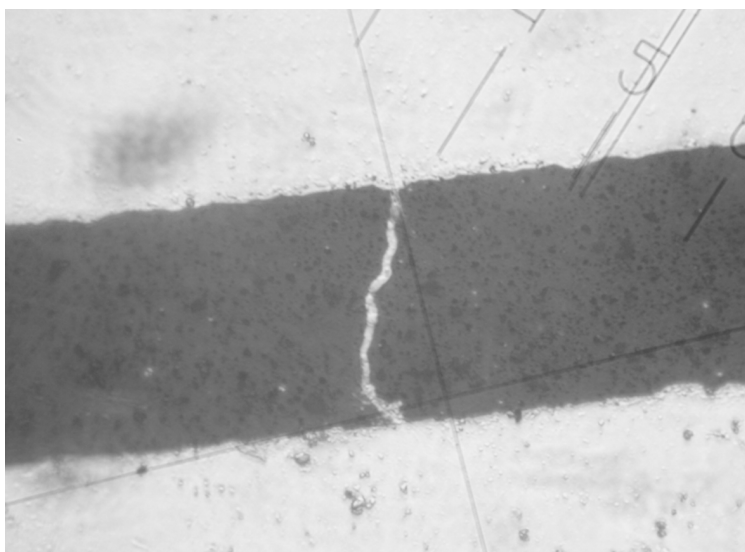
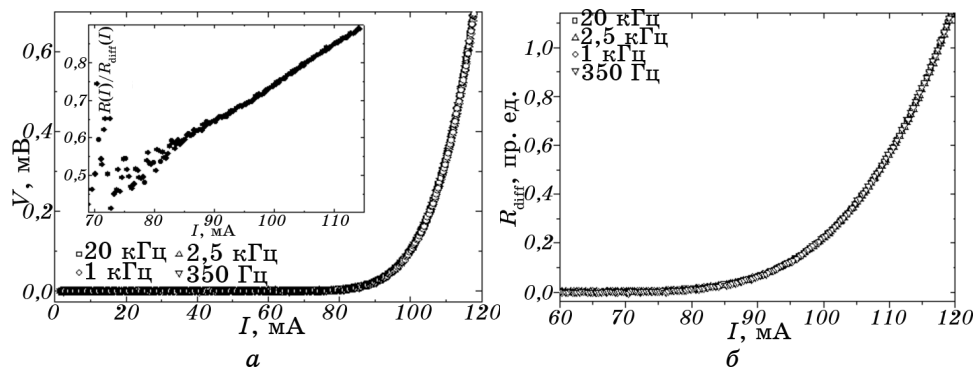


Рис. 4. Тепловое разрушение мостика. Ширина мостика 55 мкм.

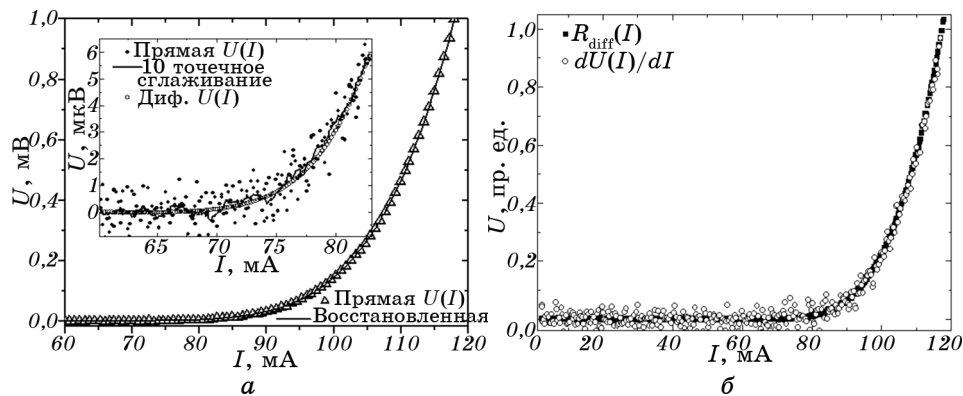




**Рис. 5.** Прямые (а) и дифференциальные (б) ВАХ тонких YBCO мостиков (78 К), полученные для каждой частоты в один проход. На вставке отображена зависимость отношения  $R(I)/R_{\text{diff}}(I)$ .

Зависимость отношения функций  $R(I)$  к  $R_{\text{diff}}(I)$  близка к прямой ( $R(I)/R_{\text{diff}}(I) \neq \text{const}$ ). Из этого можно сделать вывод, что ВАХ пленки формируется быстрым процессом со временем  $\tau < 5 \cdot 10^{-5}$  с, что намного меньше характерного времени крипа магнитного потока  $\tau \sim 100$  с, полученного в экспериментах по исследованию релаксации магнитного потока в YBCO при азотных температурах [11, 12].

На рисунке 6, а проведено восстановление прямой ВАХ путем интегрирования дифференциальной ВАХ. Наблюдается хорошее соответствие двух кривых во всем диапазоне изменений тока. На вставке изображена восстановленная ВАХ, полученная из прецизи-



**Рис. 6.** а — прямая (direct) и восстановленная из дифференциальных измерений (путем интегрирования) вольт-амперные характеристики. На вставке участок прямой и восстановленной прецизионно измеренной дифференциальной ВАХ. Сплошная линия — сглаживание прямой ВАХ по 10 точкам. б — дифференциальная ВАХ и производная прямой характеристики.

онных дифференциальных измерений, выполненных в диапазоне токов 60–82 мА при максимальном усилении синхронного детектора. Проведенная оценка разрешающей способности дифференциальных измерений в этом интервале токов показала точность определения восстановленной прямой ВАХ около 15 нВ и определялась, в основном, амплитудой наведенного через подводящие линии паразитного сигнала, имеющего иную по сравнению с падением напряжения на образце фазу. Соответственно, возникала сложность синхронного детектирования малого падения напряжения на образце.

Зашумленность прямой ВАХ составила  $\pm 1$  мкВ. Проведенное корреляционное сглаживание прямой ВАХ по 10 соседним точкам уменьшило шум до  $\pm 0,2$  мкВ (сплошная линия на вставке рис. 6, а).

На рисунке 6, б представлено обратное сравнение дифференциальной и прямой ВАХ путем взятия производной  $dU(I)/dI$ . Зашумленность производной  $dU(I)/dI$  объясняется большой плотностью экспериментальных точек, приводящей к большому разбросу по  $dU$  по сравнению с  $dI$  при малых падениях напряжения.

## 6. ВЫВОДЫ

В результате проведенной работы, были получены прямая и дифференциальная ВАХ в процессе одного сканирования по току. Такие измерения гарантировали абсолютно одинаковые условия получения этих кривых. Авторам работы неизвестны факты подобного одновременного получения прямых и дифференциальных ВАХ.

Исходя из приведенных оценок, дифференциальный метод обладает большей чувствительностью и, при условии исследований быстрых процессов, позволяет получать ВАХ ниже уровня 1 мкВ. С другой стороны, прямая ВАХ позволяет изучать медленно протекающие процессы (например, крип), которые недоступны при исследовании дифференциального сопротивления. Получение прямой ВАХ не требует дополнительных условий и математических преобразований (интегрирования). Сочетание двух характеристик, полученных при одних и тех же внешних условиях, позволяет объединить достоинства каждой из них в одно целое, например, обнаружить нагрев пленки, не прибегая к импульсным измерениям. В результате проведенных экспериментов на пленках YBCO обнаружено, что ВАХ пленок в стационарном режиме формируется за малые времена  $\tau < 5 \cdot 10^{-5}$  с, что намного меньше характерного времени крипа магнитного потока  $\tau \sim 100$  с, полученного в экспериментах по исследованию релаксации магнитного потока в YBCO при азотных температурах [11, 12]. Этот новый результат представляется весьма интересным для физики смешанного состояния сверхпроводников

и требует дополнительного теоретического анализа.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Эта работа выполнена при поддержке НАН Украины в соответствии с Государственной целевой научно-технической программой «Нанотехнологии и наноматериалы» № 1.1.3.10.

Авторы выражают благодарность А. Л. Касаткину, В. М. Пану, Г. Г. Каминскому и В. Ф. Тарасову за всестороннее обсуждение результатов исследований.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. D. Larbalestier, A. Gurevich, D. M. Feldmann, and A. Polyanskii, *Nature*, **414**: 368 (2001).
2. S. R. Foltyn, L. Civale, J. L. MacManus-Driscoll, Q. X. Jia, B. Maiorov, H. Wang, and M. Maley, *Nature Materials*, **6**: 631 (2007).
3. S. H. Wee, A. Goyal, J. Li, Y. L. Zuev, S. Cook, and L. Heatherly, *Supercond. Sci. Technol.*, **20**: 789 (2007).
4. B. Maiorov, S. A. Baily, H. Zhou, O. Ugurlu, J. A. Kennison, P. C. Dowden, T. G. Holesinger, S. R. Foltyn, and L. Civale, *Nature Materials*, **8**: 398 (2009).
5. В. М. Пан, *ФНТ*, **32**, № 8/9: 1029 (2006).
6. S. I. Kim, F. Kametani, Z. Chen, A. Gurevich, D. C. Larbalestier, T. Haugan, and P. Barnes, *Appl. Phys. Lett.*, **90**: 252502 (2007).
7. C. V. Varanasi, P. N. Barnes, J. Burke, L. Brunke, I. Maartense, T. J. Haugan, E. A. Stinzianni, K. A. Dunn, and P. Haldar, *Supercond. Sci. Technol.*, **19**: 37 (2006).
8. S. R. Foltyn, H. Wang, L. Civale, Q. X. Jia, P. N. Arendt, B. Maiorov, Y. Li, M. P. Maley, and J. L. MacManus-Driscoll, *Appl. Phys. Lett.*, **87**: 162505 (2005).
9. Л. П. Нейман, К. С. Демирчян, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин, *Теоретические основы электротехники* (Санкт-Петербург: ИД «Питер»: 2003).
10. E. H. Brandt, *Physica C*, **195**: 1 (1992).
11. A. Gurevich and H. Kupfer, *Phys. Rev. B*, **48**: 6477 (1993).
12. Y. Yeshurun, A. P. Malozemoff, and A. Shaulov, *Rev. Mod. Phys.*, **68**: 911 (1996).
13. A. Gurevich, *Int. J. Mod. Phys. B*, **9**: 1045 (1995).
14. В. Г. Зарапин, *Электрофизические методы и приборы контроля качества продукции* (Минск: БГТУ: 2006).
15. М. П. Черноморец, Д. Г. Ковальчук, С. М. Рябченко, А. В. Семенов, *ФНТ*, **32**, № 3: 277 (2006).
16. M. G. Aikele, R. P. Huebener, D. Weischer, and C. C. Tsuei, *Physica C*, **290**: 109 (1997).
17. M. P. Risse, M. G. Aikele, S. G. Doettinger, R. P. Huebener, C. C. Tsuei, and M. Naito, *Phys. Rev. B*, **55**: 15191 (1997).
18. G. P. Mikitik and E. H. Brandt, *Phys. Rev. B*, **64**: 092502 (2001).
19. G. P. Mikitik and E. H. Brandt, *Phys. Rev. B*, **69**: 134521 (2004).

