

07

Исследование критической температуры T_c гомофазных сверхпроводников $(\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y)$ ($n = 3, 4, 5$) и вольт-амперных характеристик сэндвич-пар полупроводник InP—сверхпроводник Bi/Pb (2223, 2234, 2245)

© Д.Д. Гуламова,¹ А.В. Каримов,¹ Д.Г. Чигвинадзе,² С.М. Ашимов,² О.В. Маградзе,² С.Х. Бобокулов,¹ Ж.Ш. Турдиев,¹ Х.Н. Бахронов¹

¹ Институт материаловедения, научно-производственное объединение „Физика–Солнце“ АН Узбекистана, 100084 Ташкент, Узбекистан

² Институт физики им. Э. Андроникашвили, 0177 Тбилиси, Грузия

e-mail: gulamova@uzsci.net, chigvinadze@yahoo.com

(Поступило в Редакцию 28 марта 2017 г. В окончательной редакции 4 октября 2018 г.)

Исследованы электрофизические свойства сэндвич-пар „полупроводник–сверхпроводник“ (InP–Bi/Pb 2223, 2234, 2245), в которых использованы гомофазные сверхпроводники на основе висмутовых купратов с высокими воспроизводимыми критическими температурами сверхпроводящего перехода $T_c = 107–180$ К. Показано преимущество расплавной гелиотехнологии получения сверхпроводящих материалов. Исследованы микроструктура и фазовый состав сильно анизотропных сверхпроводников номиналов $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n = 3, 4, 5$). Представлена методика экспериментального определения критических температур сверхпроводящего перехода T_c в однофазных и гомофазных ВТСП-образцах. Изучены вольт-амперные характеристики пар InP–Bi/Pb. Определена связь между электросопротивлением сэндвич-пар и критической температурой T_c сверхпроводника.

DOI: 10.21883/JTF.2019.04.47317.2269

Введение

Интерес к исследованию систем типа полупроводник–сверхпроводник (ПП–ВТСП) обусловлен перспективой создания новых материалов для электроники. Сэндвич-пара ПП–ВТСП на основе сверхпроводников с высокими воспроизводимыми критическими температурами перехода в сверхпроводящее состояние может представлять интерес, как перспективный материал для практического применения в широком температурном диапазоне и, возможно, в преобразователях солнечной энергии. Одной из проблем создания высокоэффективных пар (ПП–ВТСП) является использование в них сверхпроводника с высокой критической температурой T_c . Известно о достижении критических температур T_c выше 200 К, однако полученные фазы неустойчивы и соответственно возникает проблема воспроизводимости и долговременной устойчивости характеристик сверхпроводящих фаз.

Как известно, возможность получения сверхпроводника с воспроизводимыми высокими критическими значениями температуры T_c и плотности тока J_c в значительной мере определяется методом синтеза. Наиболее часто для синтеза оксидных сверхпроводников используется метод твердофазных реакций [1,2]. К недостаткам этого метода относятся многоступенчатый процесс синтеза, гранулярная структура, трудности создания текстуры целевых ВТСП-материалов. Преимущества расплавных технологий заключаются в полноте реакций

между исходными компонентами, возможности создания высокой текстуры, „замораживания“ стеклообразного состояния, лучшей технологичности. Разработанная в последние годы Solar Fast Alloys Quenching-T (SFAQ-T) технология [3,4] позволила получать на основе стеклокристаллических и рентгеноаморфных прекурсоров устойчивые к распаду текстурированные сверхпроводники системы $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n = 2–5$) с критической температурой перехода $T_c \geq 181$ К [5]. Такая ВТСП-керамика номиналов $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n = 3–5$) с $T_c = 107–181$ К была использована в сэндвич-парах.

Методы синтеза и исследования

В сэндвич-парах (ПП–ВТСП) в качестве сверхпроводника использовали ВТСП-керамику с $T_c = 107–181$ К номиналов $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n = 3, 4, 5$), которую готовили по керамической технологии из (SFAQ-T) прекурсоров, синтезированных под воздействием концентрированного солнечного излучения. Пары полупроводник–сверхпроводник получали напылением пленок InP толщиной 2–4 μm на керамические сверхпроводники Bi/Pb (2223), (2234) и (2245). На тыльной и фронтальной поверхностях пары формировали контакты из серебра. В итоге получены структуры Ag-InP(Si)-ВТСП-Ag. Микроструктуру и фазовый состав прекурсоров и сверхпроводящей керамики исследовали

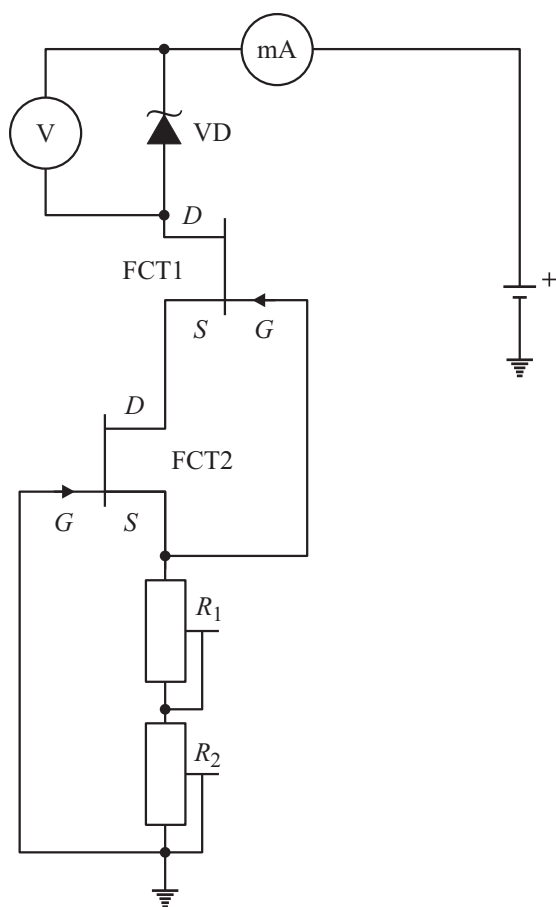


Рис. 1. Схема регулировки тока и измерения ВАХ-образца. FCT1 — кремниевый полевой транзистор; FCT2 — арсенид-галлиевый полевой транзистор; $R_1 = 20 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$; V — вольтметр ВК7-21А; mA — амперметр ВК7-21А; VD — испытуемый диод.

на микроскопе АСМ-550 АGILENT и рентгеновском дифрактометре Дрон УМ-1.

Критическую температуру перехода в сверхпроводящее состояние T_c определяли на автоматизированной многопрофильной установке [6] с чувствительностью на уровне СКВИД-магнитометра [7] по температурным зависимостям в интервале 77–300 К частоты колебаний $\omega = 2\pi/t$ (t — период) сверхпроводника в постоянном внешнем магнитном поле H .

Измерение токовых характеристик структур полупроводник–сверхпроводник проводили с помощью электронной схемы, включающей генератор тока с прецизионным регулированием при помощи переменных потенциометров R_1 и R_2 . Электронная схема регулировки тока и измерения вольт-амперной характеристики (ВАХ) приведена на рис. 1. Схема состоит из двух полевых транзисторов с последовательно соединенными каналами, которые позволяют управляемо изменять ток, протекающий по каналам и соответственно через последовательно соединенный образец, обозначенный в виде диода. Отличие устройства по сравнению с известными

аналогами состоит в том, что оно позволяет задавать прецизионно-регулируемый ток с малым шагом, т.е. получать более десяти точек на один порядок тока и следить за динамикой ВАХ. Для измерения сопротивления смешанных структур типа полупроводник InP-сверхпроводник $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n = 3, 4, 5$) на обе поверхности пары наносили контактные площадки из серебра. Для съема протекающего тока изготавливали два медных диска, форма которых повторяла форму серебряных контактов, с двумя выводами из каждого диска; к двум выводам (первым), верхнему и нижнему, подключали милливольтметр, а к другим выводам (вторым), верхнему и нижнему, подключали микроамперметр и схему соответственно. Таким образом, были получены данные по напряжению для заданных токов и на их основе определена зависимость тока от сопротивления у сэндвич-структуры [8].

Экспериментальные результаты

Исследованию ВАХ предшествовало изучение фазового состава (рис. 2) и T_c сверхпроводников, оказывающих основное влияние на свойства сэндвич-пар.

В прекурсорах, использованных для получения ВТСП-керамики, установлены кристаллические наноразмерные включения 15–18 nm, которые являлись зародышами-центрами образования кристаллов ВТСП-фаз (рис. 2, а). Характерная пластинчатая микроструктура на сколах керамических сверхпроводников $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n = 3-5$), использованных в сэндвич-парах, представлена на рис. 2, б, с. Толщина одной многослойной пластины составляла 40–65 nm, толщина блоков — 70–142 nm.

Особенностью образцов из SFAQ-T-прекурсоров было образование в них фаз-гомологов, что проявлялось на дифрактограммах сериями рефлексов на 2θ , соответствующих сверхпроводящим фазам [9–12]. Уменьшение количества рефлексов с повышением температуры и длительности отжига определяло процесс гомогенизации, что проявлялось в уменьшении количества рефлексов и также подтверждало наличие фаз-гомологов. Исходя из строения прекурсоров, показывающего различные кристаллические зародыши, очевидно, что различные зародыши являлись основой, на которой при последующей термообработке образовывались фазы-гомологи, отличающиеся между собой параметрами элементарной ячейки. Различие в параметрах элементарной ячейки фаз-гомологов составляло: $\Delta c = 0.0820 \text{ nm}$; $\Delta a = 0.0020 \text{ nm}$; $\Delta b = 0.0022 \text{ nm}$. Наибольшее различие соответствовало параметру „с“ у номинала Bi/Pb 2245, что коррелирует с увеличением числа слоев в его кристаллической решетке по сравнению с номиналами Bi/Pb 2223 и 2234.

Анизотропия по оси „с“ у образцов из (SFAQ-T) прекурсоров: Bi/Pb (2223) $c/a = 7.4079$, $c/b = 6.2807$; Bi/Pb (2234) $c/a = 11.1899$; $c/b = 11.2625$ больше

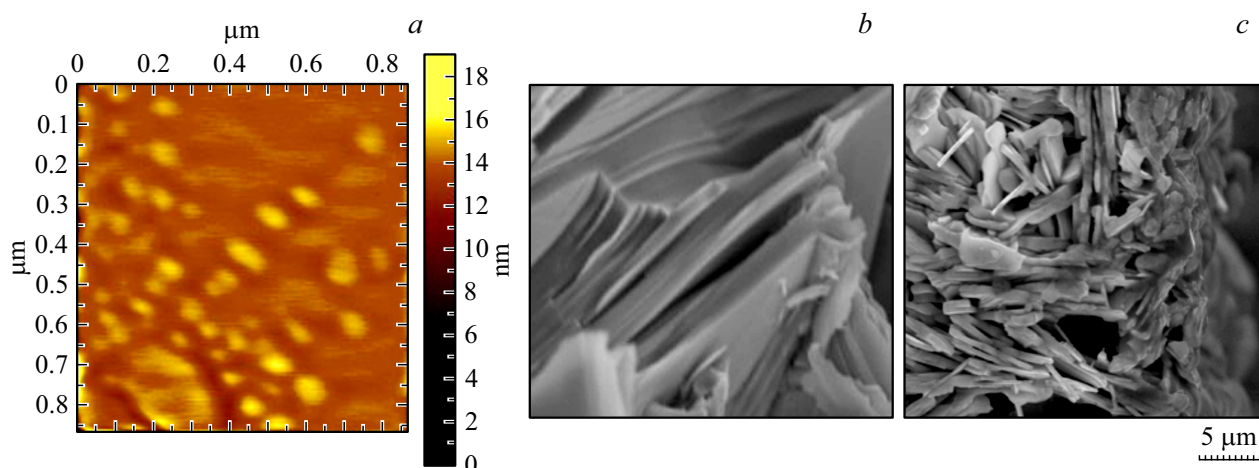


Рис. 2. Микроструктура прекурсора (*a, b*) и ВТСП-керамики (*c*) номинального состава $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n = 5$).

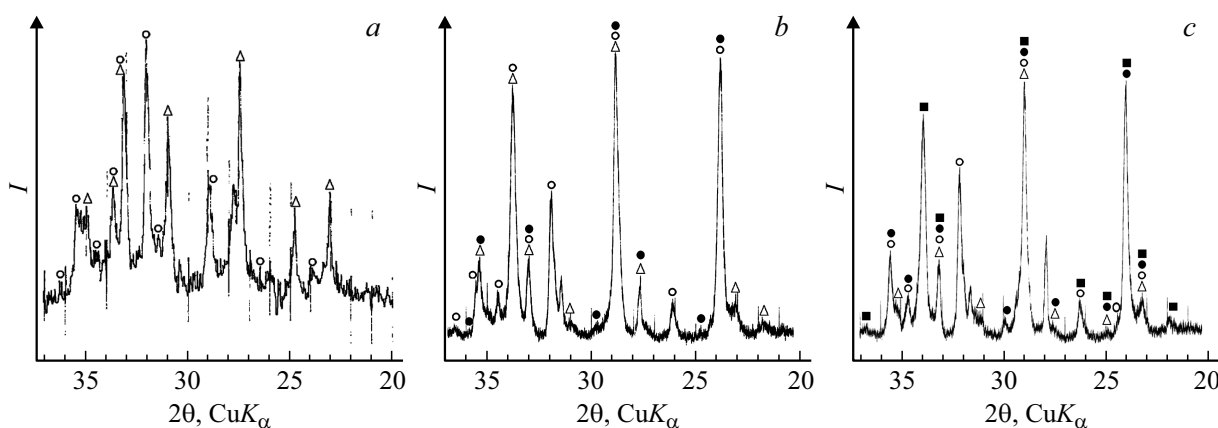


Рис. 3. Дифрактограммы сверхпроводящих образцов номинальных составов $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$: *a* — ($n = 3$); *b* — ($n = 4$); *c* — ($n = 5$), полученных из SFAQ-T прекурсоров и использованных в сэндвич-парах (Δ — 2212, \circ — 2223, \bullet — 2234, \blacksquare — 2245).

по сравнению с синтезированными твердофазным методом: Bi/Pb (2223) $c/a = 7.2652$, $c/b = 7.1389$ [9]; Bi/Pb (2234) $c/a = 9.83$, $c/b = 9.68$ [10] и возрастала с увеличением „ n “ у образца Bi/Pb (2245): $c/a = 12.81$; $c/b = 11.307$ по сравнению с Bi/Pb (2223, 2234). Высокая анизотропия по оси „ c “ у образцов из (SFAQ-T) прекурсоров определялась и по значительной интенсивности рефлексов $[00L]$ (рис. 3).

Температуру сверхпроводящего перехода T_c гомофазных висмутовых купратов определяли в интервале (77–300 К) по температурным зависимостям частоты колебаний $\omega = 2\pi/t$ (где t — период) сверхпроводника в постоянном внешнем магнитном поле H . Эксперимент включал резкое охлаждение образца FC (field-cool) до $T = 77$ К в поле H и последующие измерения по мере медленного отогрева в течение 6–8 h до комнатных температур при постоянном H . Одновременно исследовались и диссипативные процессы, характерные для сверхпроводящего или структурного перехода, который может сопровождаться реориентацией магнитных диполей даже в нормальном состоянии образца.

Метод торсионных колебаний был использован впервые для исследования энергетических потерь (диссипации) в смешанном состоянии жестких сверхпроводников в работах [13,14] и для определения критических параметров, таких, как T_c или первое критическое поле H_{c1} [15–18].

Как показано в работе [19], для сверхпроводников в смешанном состоянии взаимодействие между запинингованными и не запинингованными (свободными) вихрями играет важную роль в динамических колебательных процессах, влияя как на частоту ω , так и на диссипацию δ -энергии колебаний.

Определение температуры фазового перехода T_c проводилось не только по измерениям частоты $\omega = 2\pi/t$ колеблющегося в постоянном магнитном поле H сверхпроводника, но и по характеру зависимости диссипационного процесса. Эти две характеристики — $t(T)$ и $\delta(T)$, дополняя друг друга, дают информацию о наличии или же отсутствии магнитных вихревых нитей Абрикосова [20] в исследуемом образце.

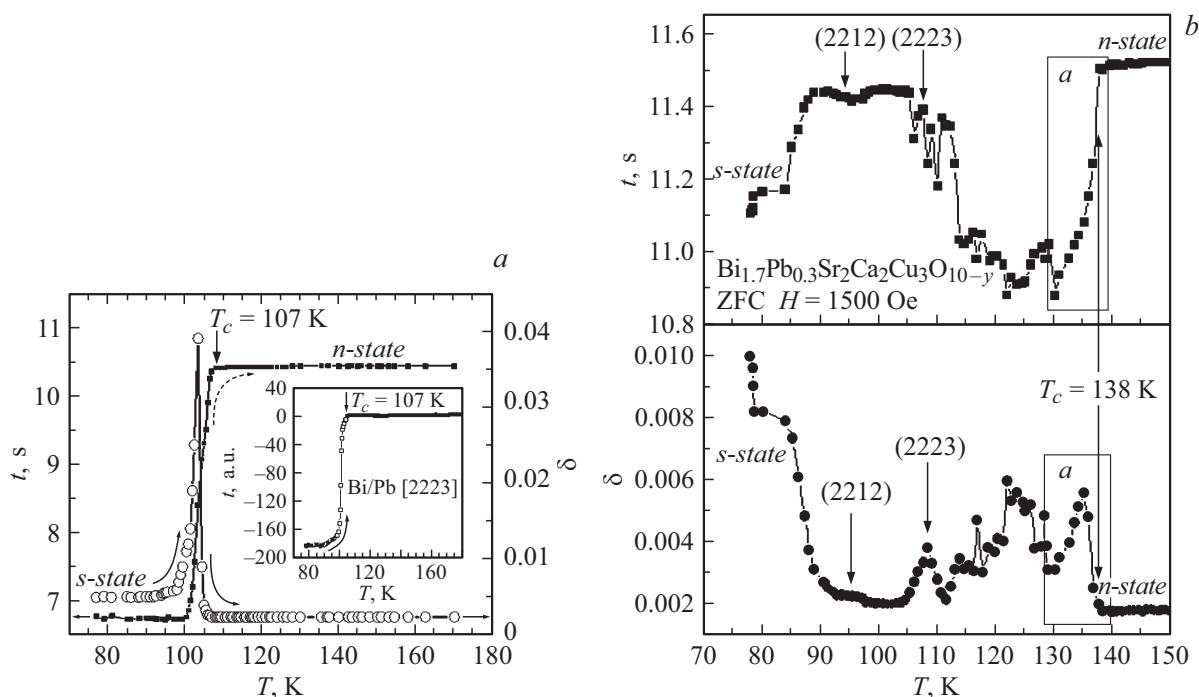


Рис. 4. Температурные зависимости логарифмического декремента затухания δ и периода колебаний t однофазного образца Bi/Pb (2223), синтезированного методом твердофазных реакций (a). Измерения образца Bi/Pb (2223), полученного из SFAQ-T прекурсоров после резкого охлаждения до $T = 77$ K (FC) в магнитном поле $H = 25$ мТ (b).

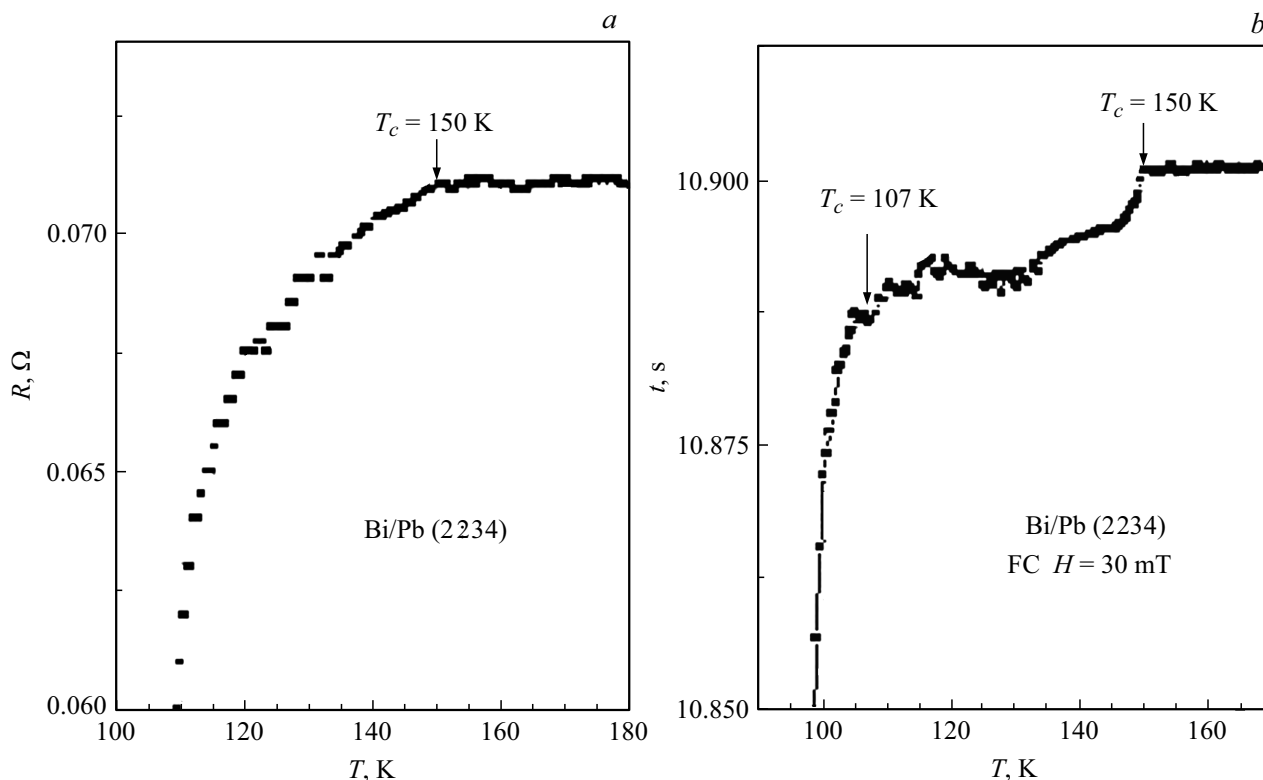


Рис. 5. Температурные зависимости: a — электросопротивления R ; b — периода колебаний t образца состава Bi/Pb (2234) с $T_c = 150$ K, полученного из SFAQ-T прекурсоров [3].

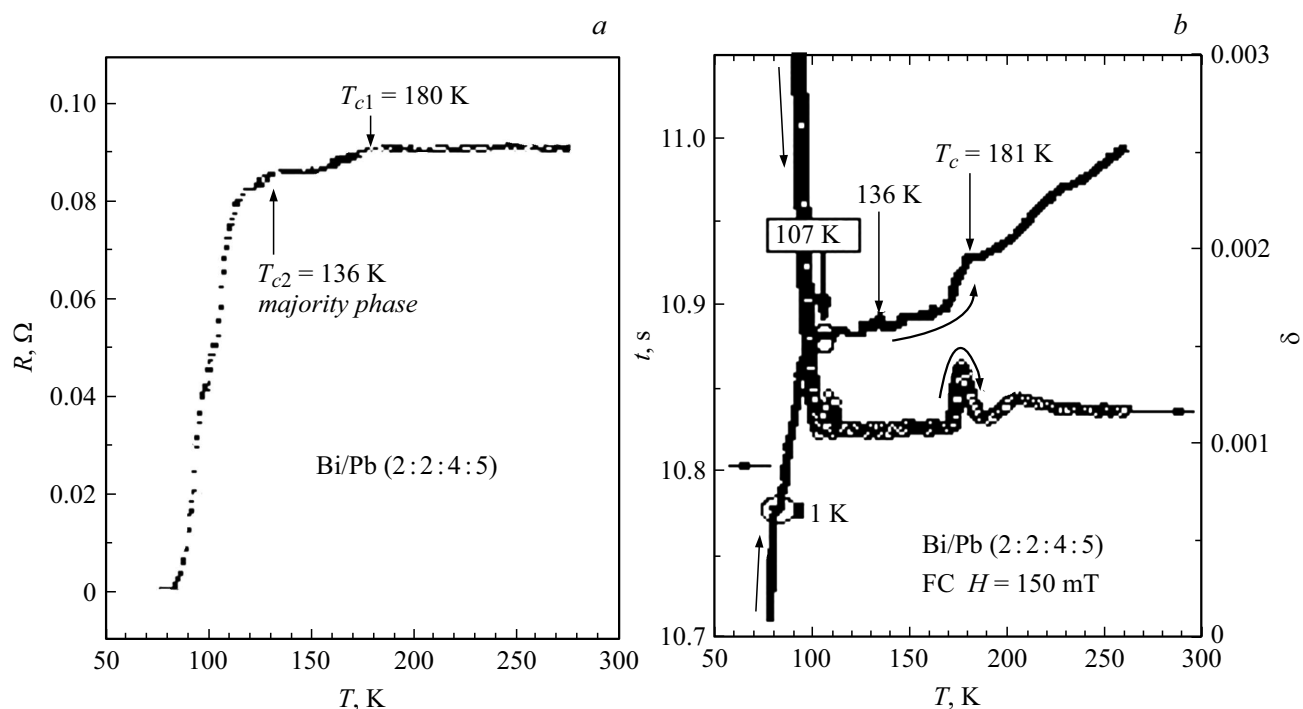


Рис. 6. Температурные зависимости: *a* — электросопротивления R ; *b* — периода колебаний t и логарифмического декремента затухания образца Bi/Pb (2245), полученного из SFAQ-T прекурсоров [5].

Если нет магнитных моментов в образце, то диссипация и частота колебаний не зависят от внешнего магнитного поля. Например, колеблющийся в магнитных полях $H < H_{c1}$ сверхпроводящий образец, или когда внутренние моменты равны нулю или дезориентированы и не фиксированы. Наличие запиннигованных магнитных диполей даже при комнатных температурах (*n*-state) создаст ненулевой магнитный момент M в образце. Взаимодействие между M и H создает момент $\tau = M \times H \sin \alpha$, где α — угол между M и H . Этот дополнительный момент τ воздействует как на неподвижную, так и на осциллирующую систему, делая диссипацию и частоту колебаний зависящими от внешнего магнитного поля, тем более, при наличии магнитных вихревых нитей в смешанном состоянии ($H > H_{c1}$) отдельных областей исследуемого ВТСП.

Как правило, исследуемые образцы одновременно тестировались измерениями как электросопротивления (четырёхконтактным методом), так и магнитной восприимчивости.

Известно, что сила пиннинга существенно зависит и от температуры. Так, например, она стремится к нулю по мере приближения к T_c . При этом растет концентрация свободных вихрей и резко уменьшается значение ω , т. е. растет период колебаний t . В этой связи уместно привести результат на практически однофазном образце Bi/Pb (2223) с $T_c = 107$ К, синтезированном стандартным методом твердофазных реакций (рис. 4).

Видно, что в процессе роста температуры при приближении к T_c на зависимости $\delta(T)$ проявляется резкий

максимум затухания. Последний связан с уменьшением силы пиннинга и постепенным срывом вихрей Абрикосова с пиннинг-центров и их вязким движением в матрице образца при колебаниях. Этот процесс при приближении (по температуре) к T_c сменяется процессом „плавления“ [21,22] в ВТСП вихревой решетки Абрикосова и постепенным исчезновением вихревой структуры, которая была „заморожена“ в процессе FC (field cool), что приводит к резкому увеличению значения t и к такому же резкому уменьшению затухания $\delta(T)$ в непосредственной близости к $T \sim T_c$. Надо отметить, что измерение магнитной восприимчивости в большинстве случаев по характеру кривых совпадает с зависимостью $t(T)$, что показано на вставке рис. 4, *a* ($T_c = 107$ К).

Что касается гомофазного образца Bi/Pb (2223), полученного из SFAQ-T-прекурсоров (рис. 4, *b*), то область сверхпроводящего перехода при $T_c = 138$ К взята в рамки (*a*), и это позволяет сравнить зависимости для образцов, полученных разными методами.

Результаты измерения критической температуры сверхпроводящего перехода T_c для образцов Bi/Pb (2234) с $T_c = 150$ К приведены на рис. 5, а для образца Bi/Pb (2245) с $T_c = 180$ К соответственно на рис. 6. Графики показаны в виде фрагментов кривых по результатам измерения температурных зависимостей периода колебаний и электросопротивления. Все измерения проводились по мере увеличения температуры от $T = 77$ К.

ВАХ сэндвич-пар ВТСП–InP, приведенные на рис. 7, свидетельствуют о зависимости электросопротивления от T_c сверхпроводника.

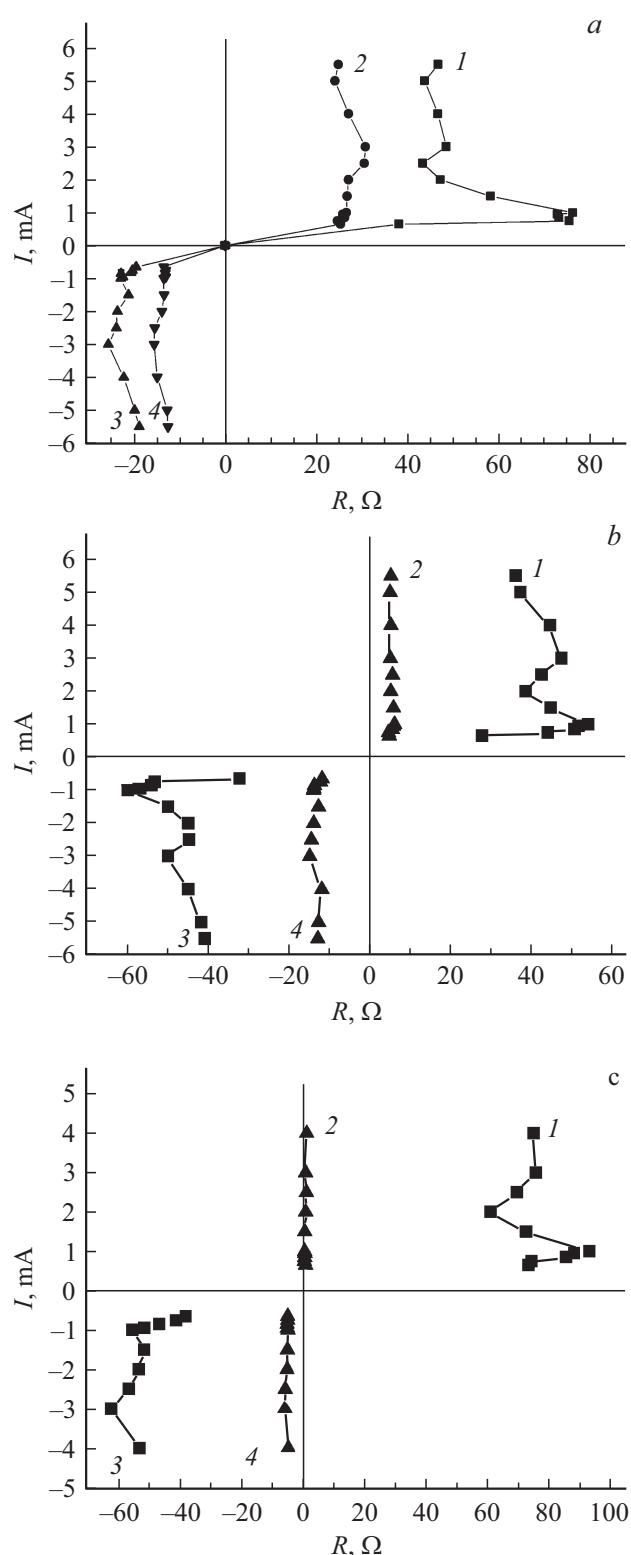


Рис. 7. Зависимости ВАХ сэндвич-пар (InP — Vi/Pb 2223, 2234, 2245) от номинального состава и T_c сверхпроводника: *a* — (Bi/Pb 2223, $T_c = 107\text{--}110\text{ K}$); *b* — (Bi/Pb 2234, $T_c = 150\text{ K}$); *c* — (Bi/Pb 2245, $T_c = 181\text{ K}$): *I* — прямая зависимость сопротивления от тока при $T = 24^\circ\text{C}$; *2* — прямая зависимость в жидком азоте, *3* — обратная зависимость при $T = 24^\circ\text{C}$, *4* — обратная зависимость в жидком азоте.

Минимальное сопротивление пары с ВТСП Vi/Pb (2223) в жидком азоте составляло $\sim 30\ \Omega/\text{cm}^2$. В сэндвич-паре на основе ВТСП-керамики Vi/Pb (2234), содержащей ВТСП-фазы с $T_c = 107\text{--}150\text{ K}$, сопротивление пары в жидком азоте снижалось до $0.7\text{--}0.8\ \Omega/\text{cm}^2$ и приближалось к нулю у пары с ВТСП номинала Vi/Pb (2245), содержащего фазу с более высокой критической температурой перехода в сверхпроводящее состояние $T_c = 181\text{ K}$ (рис. 7).

Заключение

В результате исследования ВАХ сэндвич-пар составов $\text{InP-Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n = 3\text{--}5$), установлена прямая зависимость падения омического сопротивления от критической температуры сверхпроводящего перехода от критической температуры сверхпроводящего перехода в жидком азоте. В исследованных парах полупроводник—сверхпроводник на границе раздела создается гетеропереход, где высота и ширина потенциальной ямы зависят от параметров сверхпроводника. Чем ниже его удельное электросопротивление, тем уже потенциальная яма и выше подвижность электронов и концентрация носителей. В результате создаются условия для туннелирования носителей через полупроводник, который охватывается носителями, вводимыми электрическим полем, создаваемым за счет гетероперехода. Результат свидетельствует об определяющем влиянии сверхпроводника на свойства пар в целом.

Использованные в парах сверхпроводники получены из (SFAQ-T) стеклокристаллических прекурсоров, строение и фазовый состав которых определяют свойства целевых керамических сверхпроводников. Как известно, у сверхпроводящей керамики предъявляются строгие требования к границе между кристаллитами, которые затруднительно выполнить при использовании для синтеза наиболее распространенного метода твердофазных реакций [1,2]. Расплавные методы, устраняя гранулярную структуру, позволяют добиться лучших результатов за счет направленной кристаллизации и устранения несверхпроводящих фаз, формирования когерентных межзеренных границ, повышенной плотности и др. Использованный (SFAQ-T) метод обеспечивал стабильность и высокие T_c целевой ВТСП-керамики за счет создания плотной слоистой когерентной структуры, представленной фазами—гомологами, у которых разница в параметрах элементарной ячейки по осям составляла: $\Delta c = 0.082\text{ nm}$; $\Delta a = 0.002\text{ nm}$; $\Delta b = 0.0022\text{ nm}$. Толщина блоков, состоящих из расположенных параллельно друг другу слоев фаз—гомологов, составляла в среднем $90\text{--}148\text{ nm}$. Такое строение целевой ВТСП-керамики получалось в результате образования кристаллов ВТСП-фаз на нанозародышах, замороженных при резкой закалке расплава, который находился в резко градиентных условиях, создаваемых воздействием лучистого потока высокой плотности с одной стороны и водоохла-

ждаемой подложкой — с противоположной стороны. Указанные условия определяли образование в расплаве кластеров—зародышей переменного состава, которые, в свою очередь, являлись основой фаз—гомологов. При кристаллизации наиболее термодинамически выгодным было сочленение кристаллитов плоскостями-аналогами, в результате чего образовывалась плотная слоистая структура с когерентными границами. В таких ВТСП, как было установлено в [23], при формировании кристаллической решетки происходило периодическое разупорядочение решетки с образованием дефектов, которые представляли собой центры пиннинга, что в свою очередь способствовало повышению T_c . Такая структура ВТСП фаз обеспечивала повышенные воспроизводимые значения T_c . Твердофазным и расплавленными методами [1,2,24] подобная слоистая наноразмерная структура из фаз—гомологов у купратов не получены, что является одной из причин, не позволившей получить Bi/Pb-фазы с T_c более 140 К.

Проведенные исследования показали возможность развития технологий синтеза ВТСП с использованием энергии Солнца и применение их в качестве носителей заряда в композитных структурах в паре с сегнето-, пьезо- и полупроводниками.

Работа выполнена при финансировании проекта АН РУз (№ Ф2-ФА-0-49021Ф2-ФА-Ф088).

Список литературы

- [1] Третьяков Ю.Д., Казин П.Е. // Неорганические материалы. 1993. Т. 29. № 12. С. 1571–1581.
- [2] Yoshihiro Abe // Nagoya, Institute of Technology. Japan. 1997. P. 312.
- [3] Chigvinadze J., Acrivos J., Gulamova D., Ashimov S., Machaidze T., Magradze O., Donadze G., Dvali G., Uskenbaev D. // The International Scientific Conference Dedicated to the 90th Anniversary of Georgian Technical University, Basic Paradigms in Science and Technology Development for the 21st Century, Tbilisi, Georgia. 2012. September 19–20. P. 70–79.
- [4] Chigvinadze J.G., Gulamova D.D., Ashimov S.M., Machaidze T.V., Maghradze O.V., Donadze G.J., Uskenbaev D.E. // International Conference Material Science Days, Tbilisi, Georgia, 8-10 July, 2009. It is publ. in Georgian Internat. Journal of Science and Technology. NY. 2009. Chap. 2. P. 9–15.
- [5] Chigvinadze J., Acrivos J., Ashimov S.M., Gulamova D.D., Donadze G.J. // arXiv.org>cond-mat>arXiv: 1710.10430
- [6] Ashimov S.M., Chigvinadze Dzh.G. // Instrum. Experim. Techniq. 2002. Vol. 45. N 3. P. 431–435.
- [7] Chigvinadze J., Buntar V., Ashimov S., Machaidze T., Donadze G. // Nanochemistry and Nanotechnologies. Proc. of Papers of the First International Conference. Tbilisi, Georgia. March 23–24. 2010. P. 238–244.
- [8] Каримов А.В., Едгорова Д.М., Абдулхаев О.А., Якубов Э.Н., Юлдашев Ш.Ш., Тураев А.А. // Физическая инженерия поверхности. 2012. Т. 10. № 4. С. 308–313.
- [9] Yahya A.K., Koh A.K., Abd-Shukor R. // Phys. Lett. A. 1999. Vol. 259. P. 295–301.
- [10] Shi N.-C., Ma F., Wang Z.-S., Rong X.-F., Du T.-S., Zhou J. Primary Reference: Chin.Sci.Bull. 1990. Vol. 35. P. 573.
- [11] Sequeira A., Rajagopal H., Sastry P.V.P.S.S., Yakhmi J.V., Iyer R.M. PHYCE 6. 1991. Vol. 173. P. 267.
- [12] Tarascon J.M. et al. // Phys. Rev. B. 37. 1988. P. 9382.
- [13] Chigvinadze J.G. // JETP. 1972. Vol. 63. P. 2144.
- [14] Chigvinadze J.G. // JETP. 1973. Vol. 65. P. 1923.
- [15] Ashimov S.M., Tsakadze J.S., Nedzelyak N.L. Abstracts of Papers, 21 Vsesoyuznoe Soveshanie po Fizike Nizkikh Temperature (21st All-Union Meet. On Low Temperature Physics), Kharkov: FTINT AN Ukr. SSR. 1980. Vol. 1. P. 309.
- [16] Duran C., Esquinazi P., Luzuriada J., Brandt E.H. // Phys. Lett. A. 1987. № 9. Vol. 123. P. 485.
- [17] Karasik V.R., Chigvinadze J.G. // Abstracts of Papers, 25 Vsesoyuznoe Soveshanie po fizike nizkikh temperature (25th All-Union Meet. On Low Temperature Physics), Leningrad: IYaF. 1988. Vol. 1. P. 229.
- [18] Ashimov S.M. // Abstracts of Papers, 18 Vsesoyuznoe Soveshanie po fizike magnitnykh Yavlenii (18th All-Union Meet. In Physics of Magnetic Phenomena), Kalinin: State Univ., 1988. N 1. P. 57.
- [19] Galaiko V.P. // JETP Lett. 1973. Vol. 17. P. 73.
- [20] Abrikosov A.A. // J. Phys. Chem. Solids. 1957. Vol. 2. N 3. P. 199–208.
- [21] Gammel P.L., Schneemeyer L.F., Waszczak J.V., Bishop D.J. // Phys. Rev. Lett. 1988. Vol. 61. P. 1666.
- [22] Farrell D.E., Rice J.P., Ginsberg D.M. // Phys. Rev. Lett. 1991. Vol. 67. N 9. P. 1165.
- [23] Tayson K., Kmiec J., Acrivos J.V., Gulamova D.D., Chigvinadze J.G. // National ACS Meeting San Diego CA, March 2012. San Jose State University.
- [24] Петрашко В.В., Новьш Б.В., Прыткова Н.А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2000. Т. 26. Вып. 8. С. 88–94.