



А. А. Баранник, А. И. Губин, А. А. Лавринович, Н. Т. Черпак
Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
 12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
 E-mail: al.a.barannik@gmail.com

МИКРОВОЛНОВАЯ РАДИОФИЗИКА НЕОБЫЧНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Предмет и цель работы. Представлен обзор основных результатов, полученных авторами в процессе микроволновых (МВ) исследований необычных сверхпроводников и разработок МВ-устройств на основе купратных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в течение последних 10–15 лет.

Методы и методология работы. Экспериментальные исследования проводились методами импедансных измерений сверхпроводниковых образцов. С этой целью авторами разработаны две техники измерений в мм-диапазоне волн: на базе квазиоптических сапфировых резонаторов и с использованием особенности отражения p -поляризованной волны от поверхности сверхпроводника при скользких углах падения.

Результаты работы. Исследованы эпитаксиальные пленки купратного сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ и Fe-содержащих сверхпроводников в виде монокристаллов пниктида $Ba(Fe_{0,926}Co_{0,074})_2As_2$ и эпитаксиальных пленок халькогенида $FeSe_xTe_{1-x}$ ($x = 0,5$ и $0,7$). Результаты МВ-отклика электродинамических структур с исследуемыми образцами служили основой для нахождения комплексной проводимости, в том числе флуктуационной. В целом полученные результаты подтверждают сценарий d -волновой симметрии щелевой функции для купратных сверхпроводников и s_{\pm} -волновой симметрии для Fe-сверхпроводников. Однако ряд обнаруженных особенностей и эффектов, а именно необычная частотная зависимость остаточного поверхностного сопротивления в $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ в виде $\omega^{3/2}$, рост квазичастичной проводимости с понижением температуры, начиная с критической, а также лавинообразный переход из сверхпроводящего в сильнодиссипативное состояние в нелинейной копланарной линии передачи, требуют дальнейшего изучения. Разработаны и созданы новые МВ-устройства на основе купратных ВТСП-пленок в мм-диапазоне волн: 1) квазиоптический сапфировый резонатор с радиальной щелью и ВТСП торцевыми стенками для исследования Fe-сверхпроводников в виде малых (1–2 мм в плоскости a – b) образцов; 2) планарный квазиоптический резонатор; 3) полосно-пропускающий фильтр с E -плоскостной вставкой в крестообразном волноводе. Также показана возможность бесконтактного тестирования при комнатной температуре однородности свойств массивных сверхпроводников.

Заключение. Получена температурная зависимость комплексной проводимости сверхпроводников $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, $Ba(Fe_{0,926}Co_{0,074})_2As_2$ и $FeSe_xTe_{1-x}$ ($x = 0,5$ и $0,7$) и связанных с ней физических величин, что позволяет судить о подтверждении соответствующих сценариях волновой симметрии щелевой функции в исследованных сверхпроводниках. Однако ряд обнаруженных особенностей и эффектов требуют дальнейшего изучения. Экспериментально подтверждена ранее высказанная оценка возможности создания пассивных МВ-устройств на основе ВТСП с рабочими частотами вплоть до 40 ГГц. Ил. 21. Табл. 1. Библиогр.: 64 назв.

Ключевые слова: необычные сверхпроводники, микроволновый поверхностный импеданс, комплексная проводимость, квазиоптический сапфировый резонатор, нелинейная копланарная линия передачи, пассивные микроволновые устройства.

Работа представляет собой обзор результатов, полученных авторами в процессе исследований необычных сверхпроводников методами микроволновых (МВ) импедансных измерений и разработок МВ-устройств на основе купратных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в течение последних 10–15 лет. В этот период продолжались интенсивные всесторонние исследования свойств купратных сверхпроводников различными методами с целью выяснения природы необычной сверхпроводимости, которая остается, по-видимому, наиболее серьезной нерешенной проблемой в физике твердо-

го тела [1]. Эта проблема стала еще более интригующей после открытия в указанном периоде времени нового класса необычных сверхпроводников, а именно сверхпроводников типа пниктидов и халькогенидов с ионами железа (Fe-сверхпроводников) [2]. Для физиков открылась возможность изучать природу необычной сверхпроводимости, сравнивая свойства необычной сверхпроводимости в компаундах с ионами железа и без них. Отметим, что этот процесс проходит в условиях, когда наряду с продолжающимся поиском приложений купратных сверхпроводников наметились определенные пер-

спективы для применения и Fe-сверхпроводников, по крайней мере, в сильноточной технике [3].

В данной работе приведены результаты исследований МВ импедансных свойств необычных сверхпроводников и их комплексной проводимости с использованием разработанной авторами измерительной техники, включающей как высокочастотные диэлектрические резонаторы, так и измерительные ячейки с использованием эффекта отражения при скользких углах падения. Дано краткое описание обнаруженных физических особенностей исследованных сверхпроводников в МВ-поле. Приведены также результаты разработок ряда оригинальных МВ-устройств на основе купратных ВТСП.

1. Новая техника измерений МВ поверхностного импеданса и комплексной проводимости. С целью изучения природы необычной сверхпроводимости используется весьма разнообразный арсенал экспериментальных методов исследования и современной измерительной техники. При этом возникает проблема согласованности результатов измерений, полученных различными методами и с помощью различных экспериментальных средств. Поэтому важной является экспериментальная техника, обеспечивающая достаточную надежность исследований.

Измерение поверхностного МВ-импеданса по формуле

$$Z_s = \frac{\sqrt{i\omega\mu_0}}{\sigma} = R_s + iX_s, \quad (1)$$

где Z_s , R_s и X_s – поверхностные импеданс, сопротивление и реактанс; ω – угловая частота; μ_0 – магнитная константа и $\sigma = \sigma_1 - i\sigma_2$ – комплексная проводимость (σ_1 – квазичастичная проводимость, σ_2 – проводимость сверхтекучей компоненты) позволяет получать надежные значения комплексной проводимости σ и, следовательно, изучать свойства электронной системы сверхпроводников.

Указанные исследования проводятся, как правило, при воздействии на сверхпроводник слабых сигналов, когда Z_s можно считать независимым от амплитуды МВ-поля. В общем случае Z_s является функцией поля, что приводит к нелинейности МВ-отклика электродинамических структур, содержащих сверх-

проводники. Эффекты нелинейности Z_s ВТСП активно изучались во многих лабораториях мира, однако общая теория явлений МВ-нелинейности еще не построена. С другой стороны, эффекты нелинейности важны не только для физиков, но и для инженеров, разрабатывающих МВ-устройства с использованием сверхпроводников.

1.1. Квазиоптические диэлектрические резонаторы как сенсоры поверхностного импеданса сверхпроводников. Высокая добротность квазиоптических диэлектрических резонаторов (КДР), достаточно разреженный квазиэквидистантный спектр, приемлемые размеры в мм-диапазоне длин волн [4], наряду с малыми потерями в сверхпроводниках, дают основания для использования КДР в качестве сенсоров поверхностного импеданса сверхпроводников Z_s . Последний содержит информацию о физических свойствах сверхпроводников, что важно для более глубокого понимания природы сверхпроводимости. С другой стороны, Z_s является важной характеристикой при мониторинге качества эпитаксиальных пленок, предназначенных для создания МВ пассивных устройств. Необычные сверхпроводники синтезируются в виде монокристаллов и эпитаксиальных пленок, что предопределяет разделение сенсоров на две соответствующие подгруппы. Эпитаксиальные пленки могут иметь достаточно большие размеры, соизмеримые с размерами КДР, что значительно облегчает использование в качестве сенсоров КДР, изготовленные в виде диска, полусферы или конуса. Монокристаллы имеют небольшие размеры, что требует модификации вышеуказанных форм КДР.

Для проведения высокоточных исследований пленок впервые был использован дисковый резонатор с торцевыми проводящими стенками (рис. 1, а) [5]. При этом требуется наличие двух пленок, что дает возможность получать значение Z_s , усредненное для двух пленок. Для исследования индивидуальных свойств пленок требуется наличие трех пленок и проведение трех измерений. Для исследования свойств отдельной пленки были предложены резонаторы в форме полусферы [6] и усеченного конуса [7], которые имеют только одну проводящую плоскость (рис. 1, б и в). Сравнительный анализ характеристик senso-

ров на базе диска, полусферы и конуса (таблица) показывает, что сенсор на базе диска может быть использован для стандартных физических исследований сверхпроводников во всем температурном интервале, полусфе-

рический КДР целесообразно использовать при низких криогенных температурах, а конусообразные КДР можно использовать для мониторинга свойств пленок при температурах, близких к $T = 77$ К.

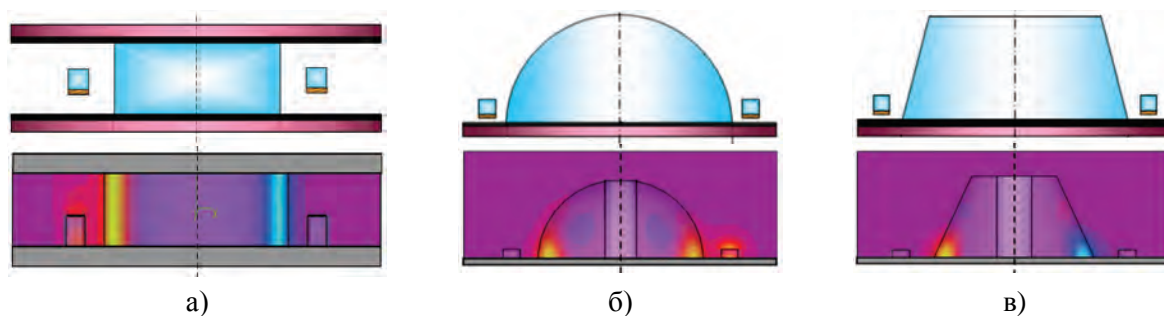


Рис. 1. Дискový (а), полусферический (б) и конусообразный (в) КДР с соответствующими E_z -компонентами электрического МВ-поля

Характеристики сенсоров на базе КДР

Форма КДР	R_s^{\min} , МОм	$\delta R_s / R_s$, %	Добротность			A_s Ом
			300 К	77 К	4,2 К	
Диск	$6,2 \times 10^{-6}$	2,0 (4,2 К)	$4,3 \times 10^4$	$4,6 \times 10^5$	$1,1 \times 10^6$	$2,92 \times 10^{-3}$
Полусфера	$1,7 \times 10^{-5}$	1,8 (4,2 К)	$4,5 \times 10^4$	$5,6 \times 10^5$	$6,4 \times 10^6$	$1,08 \times 10^{-3}$
Конус	$4,8 \times 10^{-5}$	2,5 (77 К)	$4,1 \times 10^4$	$2,1 \times 10^5$	$2,4 \times 10^5$	$2,08 \times 10^{-3}$

Для исследования сверхпроводников может быть использована модификация дискового КДР (рис. 1, а) [8] с радиальной щелью, в которой располагается исследуемый образец. Более детально техника на базе этого резонатора будет рассмотрена в разд. 4.

1.2. *Отражение при скользящих углах падения – путь к исследованию сверхпроводников выше T_c .* В микроволновой физике и технике ВТСП-материалы обычно используются в виде тонких пленок, нанесенных на диэлектрические подложки [9]. Один из методов измерения комплексной проводимости сверхпроводящих тонких пленок в МВ-диапазоне основан на измерении энергии, прошедшей через образец [10]. Такие измерения были проведены ранее для низкотемпературных сверхпроводников. Очевидно, этот подход применим только для очень тонких пленок. Кроме того, свойства ВТСП-пленки могут сильно зависеть от ее толщины, поэтому необходимо иметь возможность измерения ее импедансных МВ-свойств при произвольной толщине пленки. Можно было бы предложить альтернативный подход – измерение

коэффициента отражения. Однако коэффициент отражения даже от нормального металла близок к единице, в результате чего изменение коэффициента отражения при переходе из нормального в сверхпроводящее состояние мало, следовательно, его трудно регистрировать. В инфракрасном диапазоне показано, что чувствительность можно увеличить при использовании p -поляризованной волны, падающей на образец под скользющим углом [11]. Измерения коэффициента отражения указанной волны, падающей под скользющим углом, показывают, что его чувствительность к изменениям проводимости увеличивается. Данный эффект связан с резким уменьшением коэффициента отражения по мере приближения угла падения к углу Брюстера, который для сверхпроводников и металлов близок к 90° . В исследованиях, проводимых в МВ-диапазоне длин волн, применение параллельно поляризованной волны, падающей под скользющим углом, позволяет увеличить чувствительность коэффициента отражения к изменениям в комплексной проводимости образца более

чем на порядок [12]. При падении волны под углом 80° чувствительность коэффициента отражения к изменению проводимости возрастает в 5,6 раза. Падение под таким углом может быть реализовано при помощи волнового уголкового изгиба и наклонной закорачивающей плоскости [13]. Последний вариант выбран как оптимальный для исследований (рис. 2).

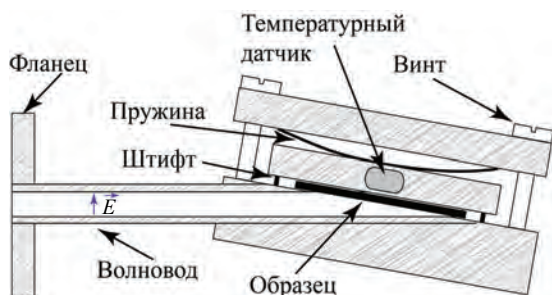


Рис. 2. Волноводная измерительная секция с наклонной закорачивающей плоскостью

С использованием указанного подхода возможно исследование сверхпроводников не только в сверхпроводящем, но и нормальном состоянии. При этом чувствительность коэффициента отражения к изменениям проводимости выше в нормальном состоянии – в отличие от резонаторного метода, который позволяет исследовать более точно образцы в сверхпроводящем состоянии. Указанная особенность позволяет исследовать поведение сверхпроводников при температурах выше критической и такие эффекты, как псевдощелевое состояние и флуктуационная проводимость.

2. Микроволновый поверхностный импеданс и комплексная проводимость необычных сверхпроводников

2.1. Купратные ВТСП. Наиболее разработанной является технология синтеза ВТСП на основе $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. При этом высококачественные пленки этих сверхпроводников со сходными характеристиками получают вне зависимости от технологии производства [14]. Характеристики пленок в свою очередь подобны характеристикам высококачественных монокристаллов [15]. Стоит заметить, что измерение МВ-свойств пленок ВТСП важно как для физических исследований сверхпроводников, так и для приложений, так как именно пленки ВТСП используются для со-

здания микроволновых устройств [9]. Однако в пленках сложнее по сравнению с монокристаллами избавиться от дефектов, обусловленных наличием диэлектрической подложки, или дефектов типа двойников [14, 16]. С другой стороны, пленки имеют большие размеры в плоскости ab и поэтому требуют другой техники измерений $Z_s(T, \omega)$, если сравнивать ее с техникой измерений монокристаллов.

Обширные МВ-исследования $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ монокристаллов позволили обобщить результаты и сформулировать выводы [15, 17, 18]: 1) широкий максимум (или плато) в зависимости $R_s(T)$ при $T \sim T_c/2$, где T_c – критическая температура, обусловлен сильными конкурирующими температурными зависимостями плотности квазичастиц n_n и времени их рассеяния τ ; 2) температурная зависимость $Z_s(T, \omega)$ при низких температурах ($T < 10$ К) вместе с фазочувствительными исследованиями указывала, по всей видимости, на d -волновую симметрию параметра порядка; 3) невыясненная природа остаточного сопротивления $R_{res} = R_s(T \rightarrow 0)$ требовала дополнительных измерений R_s при низких температурах.

Наиболее спорными считались вопросы относительно волновой симметрии параметра порядка и природы остаточного сопротивления. Несмотря на ряд систематических исследований, которые подтверждали d -волновую симметрию [15, 17, 18], имелись работы с выводами о смешанной симметрии [14, 16].

Поэтому одной из задач данной работы являлось экспериментальное исследование зависимости поверхностного сопротивления R_s $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ в температурном интервале $T < T_c$, включая интервал $T = 2 \dots 20$ К, с использованием техники полусферического сапфирового КДР в 8-мм диапазоне волн, разработанной авторами и позволяющей повысить чувствительность при измерении R_s пленок при низких температурах. Была поставлена также задача сравнения результатов, полученных в данной работе, с данными исследований других авторов (в основном, полученных в течение предшествующего десятилетия). Детали эксперимента приведены в [19].

На рис. 3 приведена зависимость $R_s(T)$ пленки $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ в интервале от T_c до 2 К. Хотя она имеет вид, типичный для пленок этого состава, можно отметить практическое отсутствие широкого максимума, наблюдаемого в монокристаллах и некоторых пленках. Вместо этого наблюдается широкое плато в окрестности ~ 50 К. Подтверждается вывод [14, 15] о том, что высококачественные пленки независимо от подложки и толщины (в пределах 300...600 нм) имеют близкие характеристики. Наиболее важным результатом, следующим из этой зависимости, является линейный закон изменения $R_s(T)$ в области $T < 15$ К, что согласуется с представлениями о d -волновой симметрии параметра порядка [20, 21].

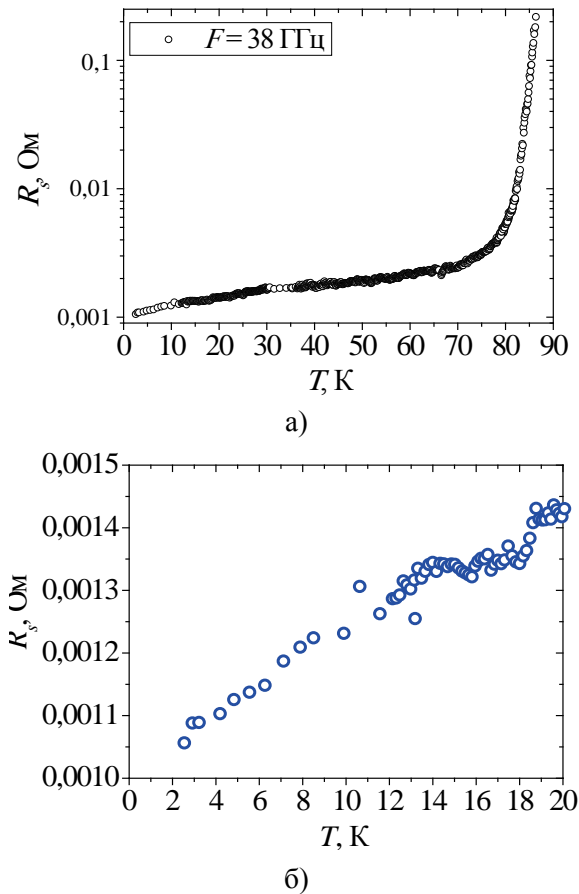


Рис. 3. Температурная зависимость поверхностного сопротивления пленки $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ в сверхпроводящем состоянии, подложка MgO , $f = 38,4$ ГГц, фирма-изготовитель *THEVA*

По имеющимся ко времени выполнения работы [19] данным, остаточное сопротивление

R_{res} зависит от частоты и от типа подложки [14]. Как следует из рис. 4, $R_{res}(\omega)$ для монокристаллов имеет частотную зависимость в виде $\sim \omega^{3/2}$. Функция $R_{res}(\omega)$ пленок, по данным [14–16, 22] и настоящей работы, близка как по частотной зависимости, так и по численным значениям, к $R_{res}(\omega)$ монокристаллов.

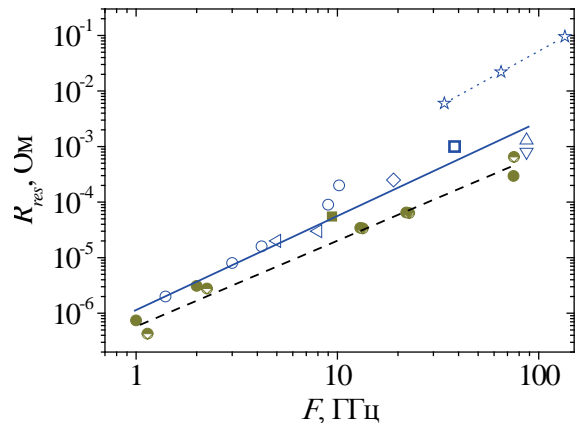


Рис. 4. Частотная зависимость остаточного поверхностного сопротивления для пленок и монокристаллов $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (нижняя прямая). Ссылки см. в [19]

Близость значений R_{res} для пленок и монокристаллов в достаточно большой полосе частот ($\sim 10...100$ ГГц) показывает, что их основные физические свойства близки.

Зависимость $R_{res}(\omega)$ представляет особый интерес с точки зрения выяснения природы этого явления. Известно, что величина R_{res} в ВТСП на несколько порядков больше, чем в сверхпроводниках Бардина–Купера–Шриффера (БКШ). С другой стороны, величины R_{res} , вычисленные в соответствии с моделями, основанными на наличии дефектов, оказываются меньше измеряемых [9]. Таким образом, измеряемые значения R_{res} можно считать внутренними характеристиками самого вещества. Зависимость $R_{res}(\omega)$ в виде $\omega^{3/2}$ показывает, что остаточные потери не связаны с нормальной проводимостью, так как вклад последней был бы пропорционален $\omega^{1/2}$. Диэлектрический «след» в R_{res} приводил бы к потерям, пропорциональным ω , а не $\omega^{3/2}$. Поэтому имеющиеся

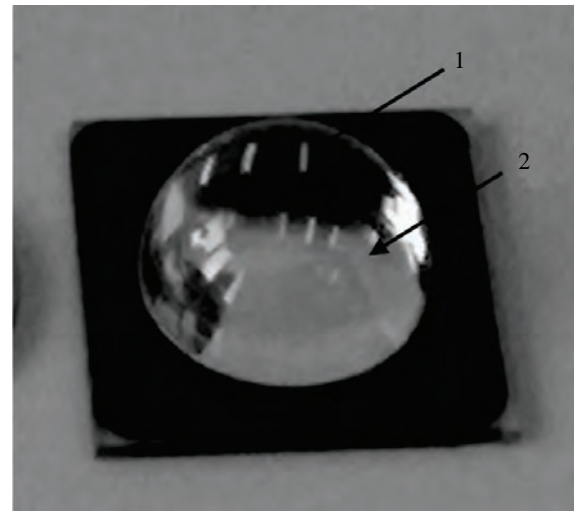
на сегодня данные указывают на внутренний эффект, приводящий к наблюдаемым величинам $R_{res}(\omega)$. Этот эффект в $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, по-видимому, обусловлен свойствами квазичастиц с малой энергией при d -волновой симметрии параметра порядка [19].

Ряд работ посвящен изучению импедансных свойств ВТСП-пленок в зависимости от толщины пленки d_f , однако ранее изученные пленки напылялись на подложки из Al_2O_3 и $LaAlO_2$. В то же время для практического применения часто используются подложки из MgO . Диэлектрическая проницаемость кристалла MgO близка к проницаемости Al_2O_3 , однако изотропность кристалла и возможность осаждения пленки ВТСП без буферного слоя являются преимуществами MgO . Это может быть полезно для разработки микроволновых устройств на основе ВТСП. В связи с этим необходима оптимизация толщины пленки для создания устройств, таких как фильтры или ограничители МВ-мощности.

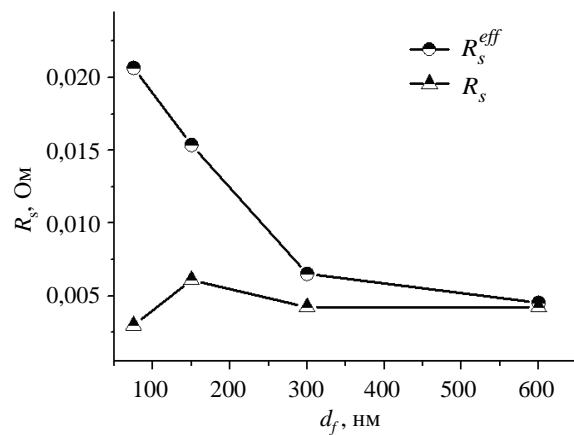
В данной работе изучались эпитаксиальные $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ пленки с толщиной $d_f = 75, 150, 300, 600$ нм, полученные методом магнетронного термического испарения на монокристаллических подложках MgO толщиной $0,5$ мм и площадью 20×20 мм² [23]. Пленки оптимизированы для обеспечения низкого R_s . Здесь также использовался резонатор в форме полусферы (рис. 5, а). Отклик резонатора s измерялся в K_a -диапазоне с помощью анализатора цепей HP8510С.

Результаты измерений показывают, что наиболее толстая пленка ($d_f = 600$ нм) имеет наименьшие потери при $T = 75$ К, а тонкие пленки ($d_f = 75$ и 150 нм) имеют заметно большие потери [23]. Теоретически значения $R_s(T)$ для всех d_f должны быть одинаковыми. Таким образом, общая тенденция к сближению кривых на рис. 5 понятна. Однако значительное снижение $R_s(T)$ для пленки с $d_f = 75$ нм по сравнению с другими пленками противоречит данным об ухудшении свойств пленок с малой толщиной. Полученные данные не достаточны для однозначной интерпретации зависимости $R_s(T)$ от d_f . Тем

не менее, можно утверждать, что если эта зависимость и существует, то она слабая.



а)



б)

Рис. 5. КДР в форме сапфировой полусферы (1) с ВТСП-пленкой (2); оптическая s -ось перпендикулярна проводящей плоскости, диаметр полусферы $14,8$ мм (а); зависимости поверхностного эффективного $R_s^{eff}(T)$ и объемного $R_s(T)$ сопротивлений тонких пленок $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ на подложке MgO от толщины пленки d_f (б)

Примерно год спустя, зависимости $R_s^{eff}(T)$ были измерены снова для всех пленок, изученных ранее. В качестве примера на рис. 6 показана зависимость $R_s^{eff}(T)$ для пленки $d_f = 300$ нм. Можно видеть, что новые значения примерно в 2 раза ниже (т. е. лучше) по сравнению с $R_s^{eff}(T)$, измеренными ранее (так называемый эффект «полезной», или «положительной», деградации) [23].

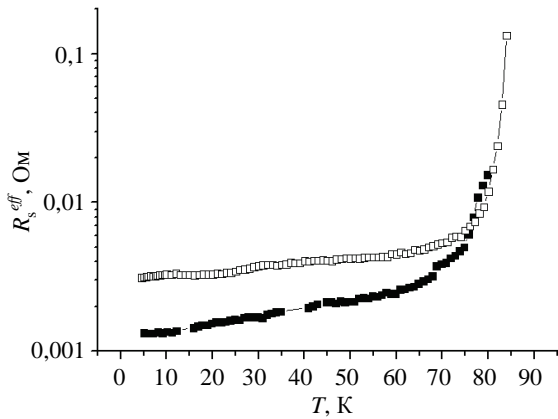


Рис. 6. Сравнение значений эффективного сопротивления R_s^{eff} , полученных в двух циклах измерений для пленки $d_f = 300$ нм: через 7 дней (пустые символы) и около года спустя (заполненные символы) после ее синтеза

2.2. Fe-содержащие сверхпроводники

2.2.1. Пниктид $\text{Ba}(\text{Fe}_{0,926}\text{Co}_{0,074})_2\text{As}_2$. Монокристалл пниктида $\text{Ba}(\text{Fe}_{0,926}\text{Co}_{0,074})_2\text{As}_2$ с оптимальным допированием ионами Co исследовался с помощью сапфирового КДР мм-диапазона, в радиальную щель которого помещался исследуемый образец (см. п. 4.1). Измерена зависимость МВ-отклика резонатора в виде $Q(T)$ и сдвига резонансной частоты $\Delta f(T)$ во всем доступном для эксперимента температурном интервале, откуда получена зависимость импеданса $Z_s(T)$ при $T < T_c$ (рис. 7) [24].

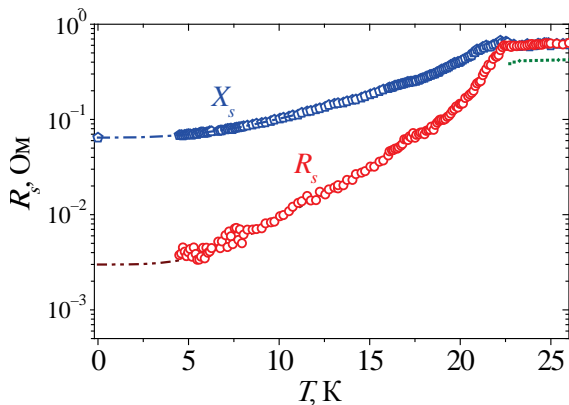


Рис. 7. Температурная зависимость поверхностного импеданса $Z_s = R_s + iX_s$ монокристалла пниктида $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ в 8-мм диапазоне волн

Из (1) получены зависимости $\sigma_1(T)$ и $\sigma_2(T)$, где последние представляют проводимость квазичастичной и сверхтекучей

компонент электронной системы соответственно. На рис. 8 и 9 представлены зависимости $\sigma_1(T)$ и плотности сверхтекучей компоненты (выраженной через квадрат глубины проникновения λ) соответственно.

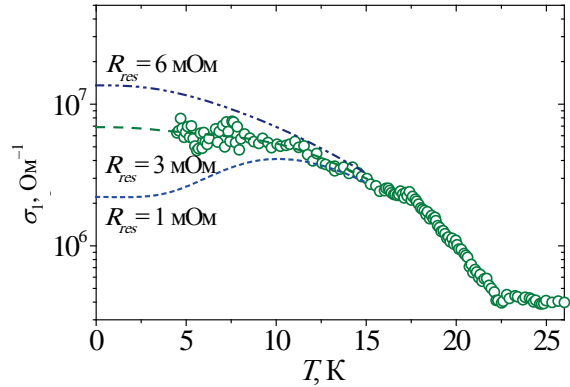


Рис. 8. Температурная зависимость квазичастичной проводимости в монокристалле $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ при различных значениях остаточного сопротивления R_{res}

Обе зависимости содержат ряд особенностей. Рис. 8 показывает, что $\sigma_1(T)$ растет с понижением T аналогично поведению $\sigma_1(T)$ в купратных ВТСП. Результат обработки экспериментальных данных при $T = 7 \dots 10$ К сильно зависит от значения R_{res} и нуждается в дальнейшем изучении. Наблюдаемая особенность может быть связана с сильным снижением скорости $\tau^{-1}(T)$ рассеяния квазичастиц при понижении T [25]. Другой важной особенностью зависимости $\sigma_1(T)$ на рис. 8 является отсутствие пика в окрестности T_c . Это противоречит результатам, полученным на основании измерений в терагерцевом и оптическом диапазонах [26, 27]. Однако в работе [28], выполненной в МВ-диапазоне, также высказывается предположение о возможном проявлении пика когерентности. Этот вопрос требует дальнейшего изучения.

На рис. 9 плотность $n_s(T)$ получена из $\lambda(T)$, определенной из $\sigma_2(T)$ при условии $\omega\tau \ll 1$ в выражении $\sigma_2 = \omega\mu_0(X_s^2 - R_s^2)/(R_s^2 + X_s^2)^2$. Непрерывная линия соответствует закону $T^{2,8}$ [29], штриховая линия – теории БКШ с одной s -волновой энергетической щелью $\Delta = 1,6k_B T_c$ в приближении слабой связи.

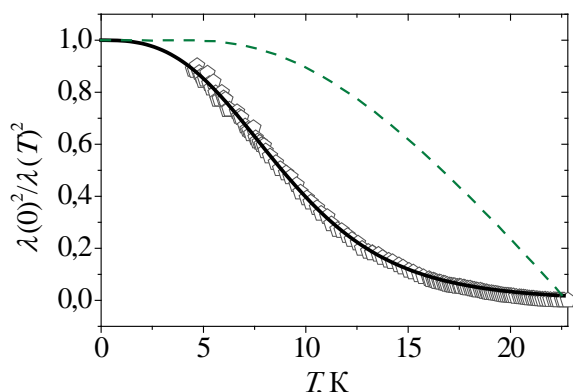


Рис. 9. Температурная зависимость сверхтекучей компоненты в $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$. Непрерывная линия соответствует закону $T^{2,8}$, штриховая линия – теории БКШ с энергетической щелью $\Delta = 1,76k_B T_c$.

Ясно, что можно сделать вывод о проявлении этой щели при низких температурах, однако во всем температурном интервале в сверхпроводящем состоянии невозможно дать описание $\sigma_2(T)$ с помощью одной энергетической щели. Этот вывод наиболее очевиден на основании изменения знака крутизны $n_s(T)$ на рис. 9 [24, 30]. Вывод соответствует сложившемуся сценарию с двуцелевой s_{\pm} -волновой функцией спаренных электронов [31].

2.2.2. Халькогенид $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$. Открытие сверхпроводимости в бинарных Fe-халькогенидах, свободных от As, представляет большой интерес, поскольку содержит только слой FeSe, идентичный структуре FeAs. При внедрении Te критическая температура в $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ может повышаться. Сверхпроводник удобен контролируемостью допирования. Для этого нового семейства сверхпроводников вопрос симметрии энергетической щели (аналогично пниктидам) является одним из ключевых в выяснении механизма сверхпроводимости. К началу выполнения данной работы все больше оснований накапливалось в пользу мультищелевых моделей сверхпроводимости, возможно, с необычным спариванием электронов посредством антиферромагнитных флуктуаций.

Исследуемые образцы в виде эпитаксиальных пленок халькогенида $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ ($x = 0,7; 0,5$), напыленных соответственно на монокристаллические подложки LaAlO_3 и CaF_2 , имели $T_c = 14,8$ и 19 К [32–34]. Здесь T_c представляет температуру начала перехода

в сверхпроводящее состояние. Пленка синтезирована в Институте физики Китайской академии наук. Микроотклик пленки измеряли в 3-см диапазоне волн, используя сапфировый резонатор с типом колебания TE_{011} . Эти образцы проявили особенности комплексной проводимости в зависимости от температуры в s -состоянии, аналогичные свойствам пниктида, соответствующим s_{\pm} -сценарию. Однако в температурной зависимости МВ-отклика с пленками в виде обратной добротности $Q^{-1}(T)$ обнаружена особенность в виде заметного холма ниже T_c . Специально проведенные эксперименты показали, что эта особенность не связана с пиком когерентности, не обусловлена размерным эффектом [32] и наблюдается только при перпендикулярной ориентации пленки относительно МВ магнитного поля резонатора (рис. 10). Они подтвердили предположение, что механизм эффекта обусловлен зависимостью распределения магнитного поля в пленке от температуры [33, 34].

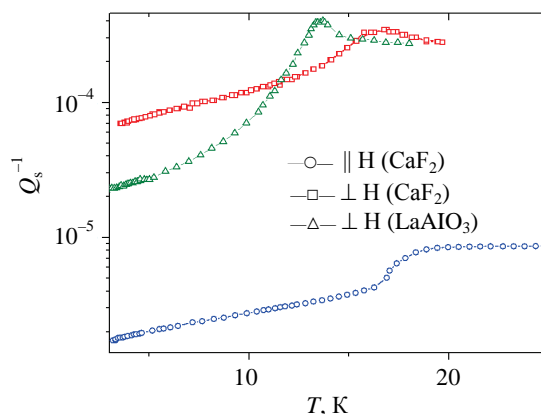


Рис. 10. Обратная величина добротности Q , соответствующая МВ-потерям в резонаторе со сверхпроводником для параллельной (\parallel) (окружности) и перпендикулярной (\perp) (квадраты и треугольники) ориентаций пленки $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$

2.3. Флуктуационная проводимость пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Для исследования флуктуационной проводимости методом отражения при скользящих углах падения была выбрана пленка $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ толщиной 300 нм, напыленная на сапфировую (Al_2O_3) подложку толщиной 0,3 мм с буферным тонким слоем CeO_2 . Как известно, флуктуационная проводимость проявляется в пленках с неоптимальным допированием. Выбор именно этой

пленки был обусловлен тем, что она была напылена около двух лет назад (имела оптимальное допирование) и несколько деградировала, о чем свидетельствуют измерения поверхностного импеданса с помощью сапфирового КДР ($R_s = 10$ мОм и $0,1$ Ом, соответственно после синтеза и спустя два года). Значения проводимости определялись при помощи калибровки по известным материалам – меди, титану и поглотителю на частоте $39,6$ ГГц во всем исследуемом диапазоне температур.

На рис. 11 изображена температурная зависимость реальной части проводимости пленки (точки) и линейная зависимость сопротивления, построенная с учетом того, что нормальная проводимость при T_c равна $\sigma_N = 1,35 \cdot 10^6$ См/м.

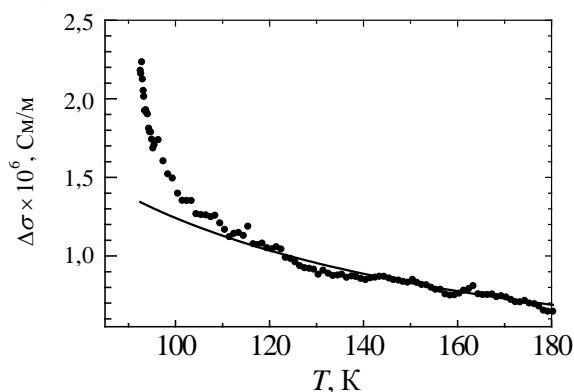


Рис. 11. Измеренная температурная зависимость проводимости пленки $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (точки) и аппроксимированная в область низких температур нормальная проводимость (сплошная линия)

Переход в сверхпроводящее состояние начинается при $T_c = 92$ К. На графике можно увидеть отклонение от нормальной проводимости, которое наступает при температуре примерно 115 К и увеличивается вплоть до T_c [35]. Вклад флуктуационной части проводимости хорошо просматривается в температурном интервале от 92 до 115 К. Значения этой части могут быть получены из [36, 37] для соответствующих размерностей при разных значениях параметра отсечки Λ (рис. 12).

На рис. 12 представлены также экспериментальные значения флуктуационной проводимости, полученные как разность экспериментальной и нормальной проводимостей.

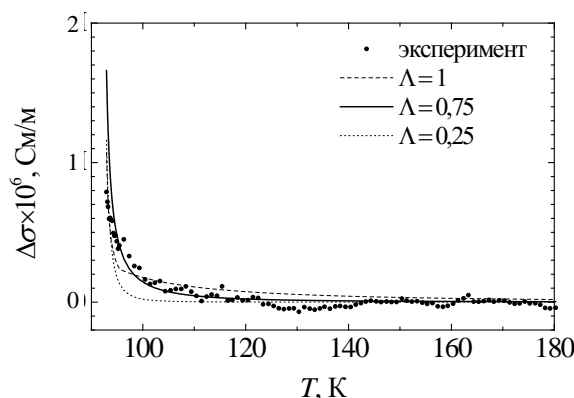


Рис. 12. Температурная зависимость флуктуационной части проводимости (точки) и теоретическая оценка $2D$ -проводимости для значений Λ : 1 – штриховая линия; $0,75$ – сплошная линия; $0,25$ – пунктирная линия

Как видно из рис. 12, теоретическая кривая для $2D$ -проводимости со значением параметра $\Lambda = 0,75$ хорошо описывает экспериментальные результаты в температурном интервале от $93,2$ до 120 К [38]. Очевидно, кроссовер от $3D$ - к $2D$ -проводимости имеет место в окрестности $93,2$ К. Отношение для температуры возникновения флуктуационной проводимости $T^c \sim 1,25T_c$ [37] хорошо согласуется с результатами эксперимента. В данном случае при $T_c = 92$ К температура возникновения флуктуационной составляющей проводимости составляет $T^c \approx 115$ К.

3. Лавинообразный эффект в нелинейной линии передачи со смещением на постоянном токе. В МВ-линиях передачи на основе ВТСП диссипативные потери энергии значительно снижаются [39]. Известно также, что в пассивных устройствах, созданных на основе ВТСП, могут наблюдаться эффекты, обусловленные зависимостью поверхностного импеданса Z_s от амплитуды МВ-поля [9]. При этом переход сверхпроводника, находящегося в слабом МВ-поле (т. е. в состоянии с линейным Z_s), в состояние с изменившимся импедансом под влиянием сильного поля (и при переходе в нормальное состояние) представляет практический интерес для возможного создания МВ-переключателей и ограничителей. Такие устройства могли бы иметь весьма короткие времена переключения, так как они, в принципе, характеризуются временем релаксации $10^{-10} \dots 10^{-11}$ с в электронной системе ВТСП (в отсутствие тепло-

вых эффектов) [40], которые значительно короче соответствующего времени в полупроводниках и низкотемпературных сверхпроводниках. Физическая природа перехода сверхпроводника в нормальное состояние под воздействием МВ-поля до сих пор досконально не выяснена, хотя к настоящему времени и накоплен значительный объем экспериментальных результатов [9, 41].

Интерес к нелинейности МВ-отклика сверхпроводящих пленок появился еще до открытия ВТСП, когда возникла необходимость в разработке высокочастотных резонаторов [42, 43]. Новая волна исследований нелинейных явлений в сверхпроводящих пленках началась после установления того факта, что во многих случаях указанные нелинейные эффекты ограничивают допустимую мощность в линейных МВ-устройствах (фильтры, мультиплексоры) на основе пленок ВТСП.

С другой стороны, нелинейные явления можно рассматривать как полезные эффекты при разработке МВ-устройств, которые уже не являются пассивными – детекторов, смесителей или ограничителей сигнала [9, 41, 44, 45]. Источниками нелинейности сверхпроводника могут быть слабые связи, нелинейный эффект Мейсснера, генерация вихрей внешним высокочастотным полем, локальный перегрев при больших значениях МВ-тока [9, 41, 44].

Авторами работ [46–48] проведены исследования копланарной линии передачи (КПЛ) на основе ВТСП при воздействии МВ-излучения с целью изучения режима переключения структуры в широком диапазоне мощностей. Был показан значительный рост затухания в ВТСП-линии при увеличении входной мощности, который можно объяснить переходом из сверхпроводящего в резистивное состояние. Невыясненная природа полученных зависимостей и временные характеристики переходных процессов при включении и выключении МВ-поля требовали дальнейшего изучения.

Несмотря на установленную принципиальную возможность построения ограничителя мощности [47, 49], при реализации концепции были обнаружены серьезные препятствия в реальных устройствах – трудности контроля входной мощности P_{in} [49] и

нестабильность КПЛ при переходе в сильно диссипативное состояние [47]. В [11] было предложено управлять нелинейным импедансом КПЛ на основе ВТСП с помощью постоянного тока (ПТ). В [50] авторы сообщали об эффекте сильного изменения МВ-потерь в КПЛ на основе ВТСП при определенных значениях входной мощности P_{in} и ПТ I_{dc} . Резкий переход структуры ВТСП в сильно диссипативное состояние (*quenching effect*) наблюдался при пропускании ПТ через структуру и определенных значениях P_{in} и I_{dc} , которые зависят от температуры [51]. Это явление было изучено на двух КПЛ, изготовленных из эпитаксиальных пленок YBCO толщиной 150 и 75 нм. Измерены вносимые потери IL КПЛ ($IL = 10 \lg(P_{out}/P_{in})$) при изменении температуры охлажденной камеры и фиксированном уровне входного импульсного МВ-сигнала P_{in} в 3-см диапазоне (рис. 13).

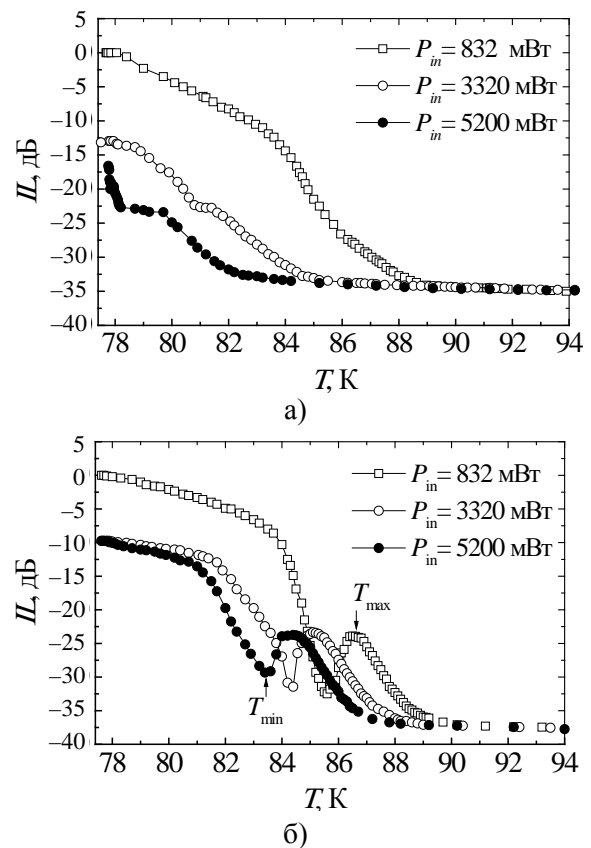


Рис. 13. Изменение вносимых потерь (IL) в КПЛ-150 (а) и КПЛ-75 (б) в зависимости от температуры при различных уровнях входной МВ-мощности при длительности импульса 5 мкс

Зависимости $IL(T)$ в КПЛ-75 представлены на рис. 13, б для нескольких значений P_{in} . Два экстремума (минимум и максимум) имеют место в каждой из кривых – вместо ступенек, наблюдаемых в КПЛ-150 (рис. 13, а). Увеличение мощности приводит к сдвигу «максимума горба» в область более низких температур и его расширению в верхней части.

Эта зависимость резко меняется, когда ПТ I_{dc} пропускают через КПЛ-150 (рис. 14, а).

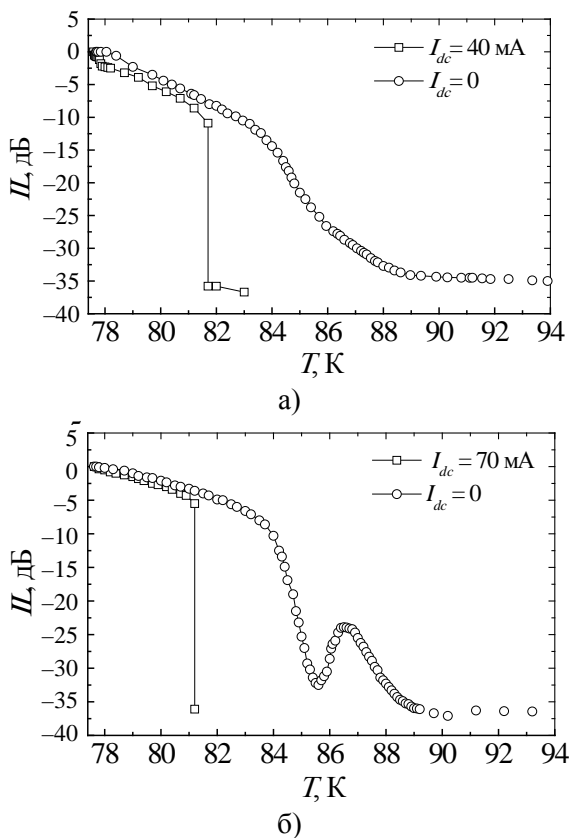


Рис. 14. Изменение вносимых потерь (IL) в КПЛ-150 (а) и КПЛ-75 (б) в зависимости от температуры при уровне входной мощности $P_{in} = 832$ мВт при длительности импульсов 5 мкс, постоянном токе ($I_{dc} = 40$ мА для КПЛ-150 и $I_{dc} = 70$ мА для КПЛ-75) и без него ($I_{dc} = 0$)

Здесь видно, что при фиксированных значениях P_{in} и I_{dc} с понижением температуры при ее определенном значении наблюдается резкий переход КПЛ в сильно диссипативное состояние. В случае $I_{dc} = 40$ мА наблюдается скачок IL почти на три порядка величины [50]. Сильный эффект переключения также наблюдается для КПЛ-75 (рис. 14, б).

Стимулируемый постоянным током лавинный рост МВ-потерь IL , в зависимости от

рабочей температуры, наблюдается как на зависимостях $IL(I_{dc})$ при $T = \text{const}$ и различных значениях P_{in} (рис. 15), так и на $IL(P_{in})$ при $I_{dc} = \text{const}$ (не показано на рисунке). Лавинообразный эффект проявляется при определенном значении I_{dc} , которое уменьшается с увеличением P_{in} . Таким образом, для обнаруженного эффекта обе компоненты тока (как МВ I_{ω} , так и ПТ I_{dc}) играют идентичную роль.

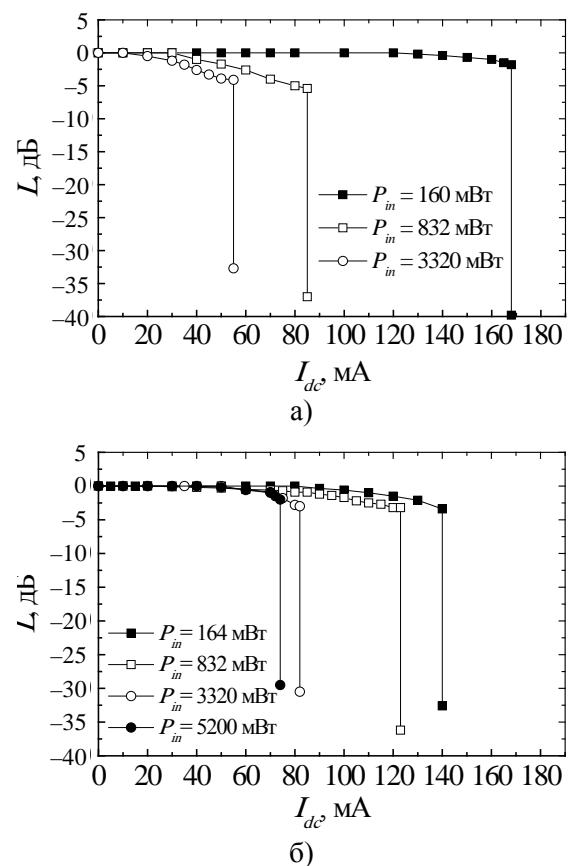


Рис. 15. Изменение вносимых потерь (IL) в КПЛ-150 (а) и КПЛ-75 (б) в зависимости от постоянного тока I_{dc} при различных значениях входной мощности P_{in} при $T = 77$ К

Таким образом, в работах [50, 51] показано, что в КПЛ на основе пленки ВТСП при определенных значениях входной мощности P_{in} имеет место стимулированный постоянным током резкий переход в сильно диссипативное состояние. Есть предположение [52], что обнаруженный эффект можно объяснить самонагревом ВТСП-структуры, вызванным течением потока под суммарным воздействием микроволнового и постоянного токов.

Этот эффект, по-видимому, может быть использован при построении различного типа переключающих устройств и ограничителей сигналов различной мощности.

4. Приложения в физике и технике миллиметрового диапазона.

4.1. Квазиоптический диэлектрический резонатор с ВТСП торцевыми стенками в исследованиях Fe-содержащих сверхпроводников. Одним из применений ВТСП в физике и технике мм-диапазона является использование сверхпроводящих пленок как конструктивных элементов сенсоров для исследования Fe-содержащих сверхпроводников на базе КДР. Так как монокристаллы Fe-содержащих сверхпроводников имеют небольшие размеры по сравнению с КДР, для их исследования был модифицирован дисковый КДР с ВТСП торцевыми стенками путем добавления радиальной щели в диэлектрический диск, в которой располагался исследуемый образец (рис. 16) [24, 53].

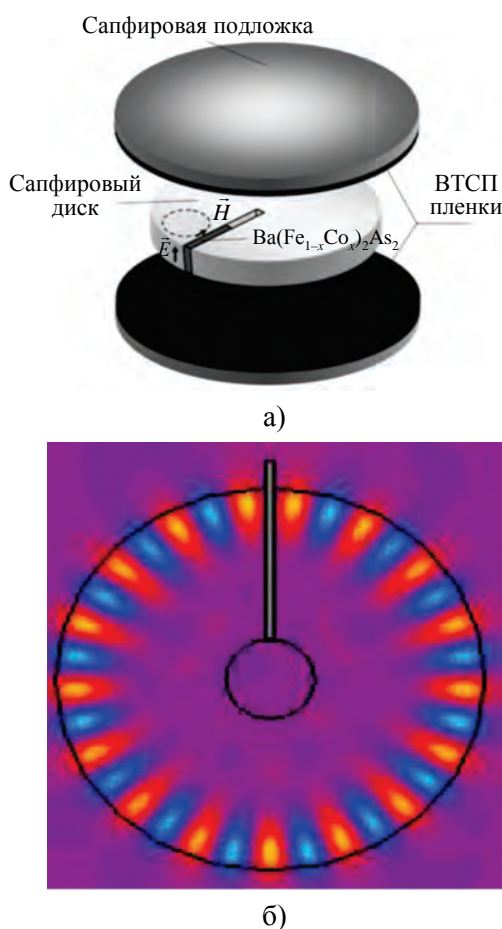


Рис. 16. Дисковый КДР с ВТСП торцевыми стенками и радиальной щелью, в которой располагается исследуемый образец (а); E_z -компонента электромагнитного поля (б)

Таким образом, в данном резонаторе ВТСП торцевые стенки превратились из объекта исследования в конструктивные элементы. При исследовании Fe-содержащих сверхпроводников требуется проведение двух измерений характеристик резонатора – с образцом и без него. Для примера на рис. 17 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) сапфирового дискового резонатора с ВТСП торцевыми стенками и образцом $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ при температуре 4 К.

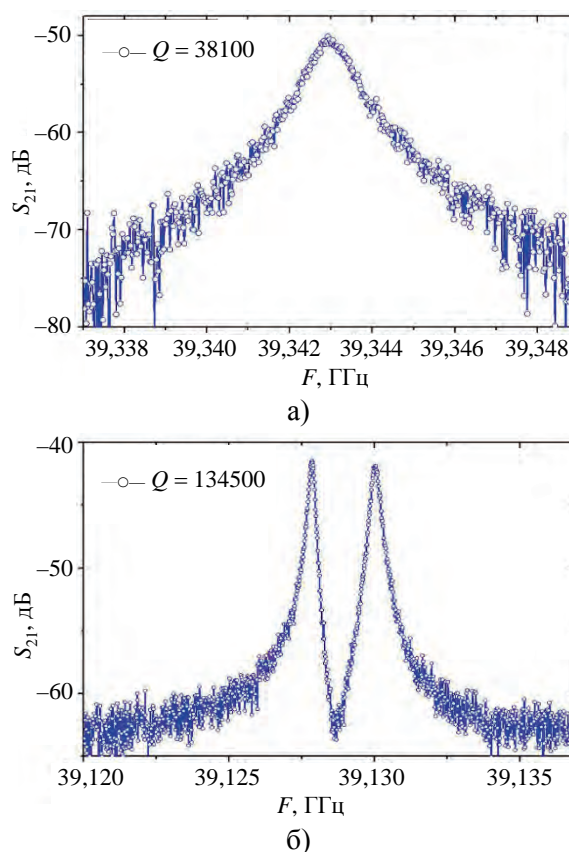


Рис. 17. АЧХ сапфирового дискового резонатора с ВТСП торцевыми стенками с исследуемым образцом $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ и без него при $T = 4$ К

Следует отметить, что щель с воздушным заполнением (резонатор без образца) приводит к небольшому расщеплению резонансной линии и требует специальной обработки АЧХ для получения значений добротности и резонансной частоты [54]. Помещение образца в щель приводит к такому расщеплению (резонансные частоты расщепленных мод отличаются на 1 ГГц), что АЧХ выглядят как одиночные резонансные линии, и это позволяет использовать для получения значений добротности и резонансной частоты

традиционный подход. Таким образом, получив температурные зависимости резонансных частот и добротностей резонатора с образцом и без него, дает возможность получить температурную зависимость поверхностного импеданса Fe-содержащих сверхпроводников.

4.2. Техника тестирования однородности свойств массивных сверхпроводников. Прогресс в изготовлении объемных текстурированных ВТСП открывает возможности использовать их в прикладных целях, в частности в высокоточных приложениях [55]. В данном случае важно иметь метод тестирования образцов, пригодный для прикладных целей. Известные методы, основанные на исследовании силы левитации и захваченного магнитного потока [56], требуют измерения при температурах кипения жидкого азота. Более подходящим в данном случае является метод, основанный на особенностях отражения при скользящих углах падения [12] и позволяющий оценить качество образца при комнатной температуре.

Для исследования текстурированного образца $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ размером $20 \times 20 \times 15,5$ мм при комнатной температуре его поверхность была разбита на полосы шириной 5 мм, приблизительно равной ширине волноводного окна измерительной секции, и пронумерована от ребра граней *side 2* до *bottom* по часовой стрелке от 1 до 14 (рис. 18). На грани образца *top* в центре расположен затравочный кристалл $SmBa_2Cu_3O_x$.

Проведены исследования в диапазоне температур от 77 К до комнатной температуры, в частности в сверхпроводящем состоянии, при помощи метода исследования отражения при скользящих углах падения как по всем поверхностям образца, так и после разрезания образца на пластины, для определения его объемных свойств. Данные зависимости качественно указывали на улучшение сверхпроводящих свойств образца по мере приближения от *bottom* к *top* грани, содержащей затравочный кристалл, с некоторым ухудшением качества этого кристалла. Измерение на грани *side 4* хотя и проводилось в другой плоскости, содержащей ось *c*, находится между кривыми для *top* и *bottom* и качественно подтверждает улучшение свойств образца по высоте по мере приближения к плоскости с затравочным кристаллом [57].

Результаты исследований образца при комнатной температуре показаны на рис. 18, б.

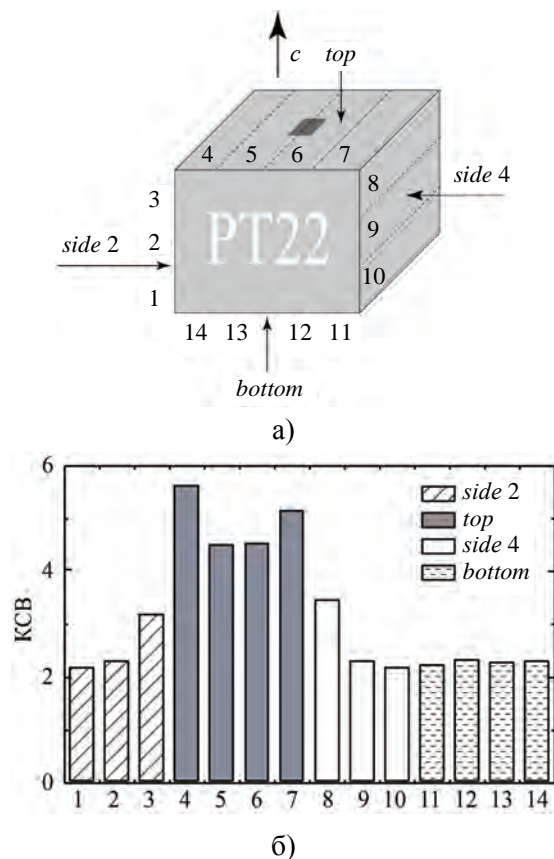


Рис. 18. Схематический рисунок разбиения поверхности образца (а) и зависимость КСВ от положения волноводного окна на поверхности образца (б)

При размещении секции в зоне, условно обозначенной 1, наблюдается минимальный КСВ по всей поверхности образца. Далее, как и следовало ожидать, при продвижении по боковой поверхности к грани *top* (зона 2 и 3) происходит увеличение КСВ и в зоне 4 наблюдается максимальное значение, что обусловлено тем, что на грани *top* образец имеет лучшие свойства. В центре грани *top* (зона 5 и 6) происходит некоторое снижение КСВ по сравнению с зонами 4 и 7 на этой же грани в связи с наличием в его центре затравочного кристалла. При продвижении по грани *side 4* (зоны 8–10) наблюдается снижение КСВ, которое практически зеркально отображает картину при движении по другой боковой грани *side 2* (зоны 1–3). Значение КСВ на грани *bottom* (зоны 11–14) несколько выше, чем для зон 1 и 10, поскольку свойства кристалла в плоскости *ab* лучше, чем в плоскости, содержащей ось *c* [58].

4.3. *Планарный ВТСП-резонатор с волнами шепчущей галереи.* Микрополосковые элементы, в частности резонаторы, широко применяются для различных приложений в мм-диапазоне длин волн. В работе [59] было показано, что дисковые микрополосковые резонаторы с волнами шепчущей галереи имеют преимущество по сравнению с резонаторами на низших типах волн, что обусловлено меньшими радиационными потерями. Естественным следующим шагом является использование ВТСП-пленок для создания дисковых микрополосковых резонаторов с волнами шепчущей галереи, что было реализовано в работе [60]. Структура в виде двух микрополосковых резонаторов была рассчитана в *CST Microwave Studio* и затем изготовлена (рис. 19).

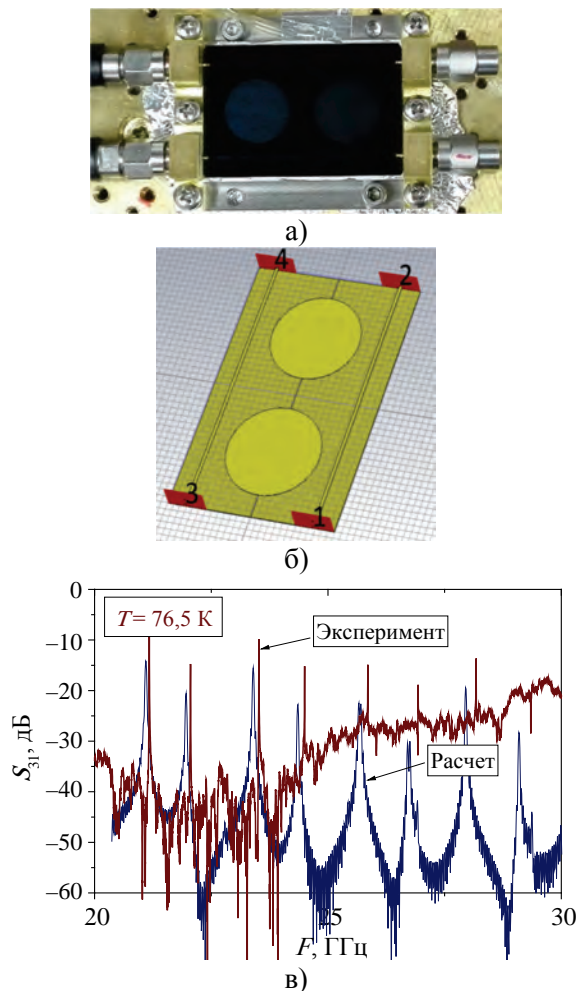


Рис. 19. Экспериментальное устройство с двумя микрополосковыми резонаторами и двумя микрополосковыми линиями (а); проект для численного эксперимента, с предлагаемым микрополосковым квазиоптическим резонатором (б); рассчитанный и измеренный частотные спектры при $T = 24,25$ К (в)

Для изготовления структуры использовалась эпитаксиальная пленка $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ толщиной 600 нм и $T_c = 89$ К, напыленная на монокристаллическую подложку MgO толщиной 0,5 мм. Температурная зависимость обратной величины добротности и изменение резонансной частоты для $HE_{81\delta}$ -моды представлены на рис. 20.

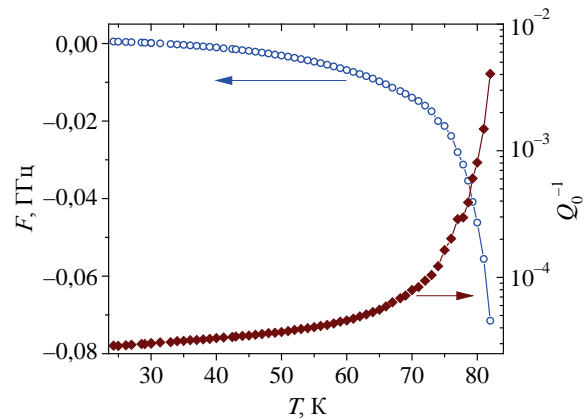


Рис. 20. Температурная зависимость обратной величины добротности и изменения резонансной частоты для HE_{811} -моды

Хорошая согласованность рассчитанного и измеренного частотных спектров (рис. 19), а также высокое значение добротности ($> 67\ 000$), малое изменение резонансной частоты, особенно при температурах ниже 30 К (рис. 20), указывают на возможность проектирования и изготовления планарных структур в мм-диапазоне длин волн, в частности для полосно-пропускающих и полосно-заграждающих фильтров.

4.4. *Полосно-пропускающий фильтр с ВТСП E-вставкой в прямоугольном волноводе.* Полосно-пропускающий фильтр (ППФ), устанавливаемый на входе малошумящих усилителей (МШУ), предназначен для обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, а именно для защиты входных цепей высокочувствительных приемников от электромагнитных излучений вне рабочей полосы частот радиолнии. Шумовая температура ППФ T_F зависит от его физической температуры T_0 и вносимых потерь $L_{\text{дБ}}$. Отсюда очевидны преимущества технических решений, в которых входная цепь приемника, включающая МШУ и ППФ, охлаждается до криогенных температур. Очевидно, что преимущество имеют ППФ,

изготовленные из материалов с низким значением МВ-сопротивления R_s . В этой связи особый интерес представляют ППФ, в составе которых используются ВТСП-материалы. Величина R_s ВТСП-материалов при 77 К на несколько порядков ниже R_s нормальных металлов (см. п. 2.1).

Известны многозвенные ППФ с так называемой E -плоскостной металлической вставкой в прямоугольном волноводе (см. работу [61] и ссылки в ней). Показано, что преимущества E -плоскостных ППФ со вставкой из ВТСП-материала невозможно реализовать, если не решить проблему обеспечения качественного контакта между ВТСП-вставкой и стенками волновода [61]. Область контакта должна обладать малыми потерями МВ-мощности, обеспечивать хороший тепловой контакт между ВТСП-вставкой и стенками волновода и не допускать разрушения хрупкой пластины-подложки в термоциклах охлаждения–нагрева фильтра.

Для преодоления указанного противоречия авторами предложено использовать крестообразный волновод с ВТСП E -вставкой, в котором в области теплового контакта имеет место снижение плотности МВ-токов [62]. Следовательно, при одинаковых сопротивлениях контактов потери в них для случая крестообразного волновода будут меньшими. Это обстоятельство позволяет улучшить тепловой контакт без роста МВ-потерь при приемлемых механических напряжениях, исключая разрушение подложек с ВТСП-структурой. Подробности синтеза предложенного фильтра приведены в [62, 63]. Пример АЧХ синтезированного фильтра приведен на рис. 21.

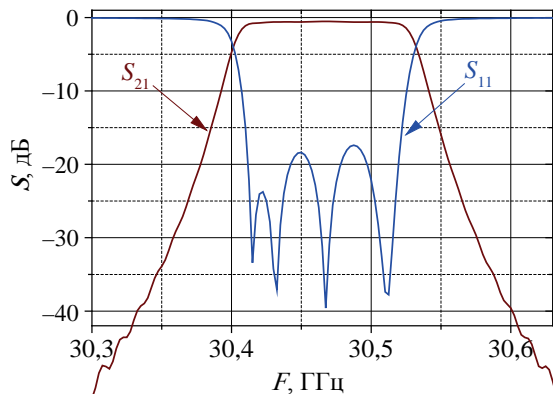


Рис. 21. АЧХ синтезированного фильтра с ВТСП E -вставкой в крестообразном волноводе

Как показали измерения характеристик изготовленного фильтра и их численный анализ, точность изготовления резонансных окон в ВТСП-пленке должна быть в пределах $\pm 0,2$ мкм [63], что доступно для современной технологии.

Выводы. Таким образом, в работе изложены результаты экспериментальных исследований микроволновых импедансных исследований необычных сверхпроводников и их комплексной проводимости радиофизическими методами в миллиметровом диапазоне волн, а также результаты разработок ряда приборов на основе купратных ВТСП в мм-диапазоне волн, полученные в течение последних 10–15 лет. Для проведения физических исследований авторами разработана техника измерений на основе квазиоптических сапфировых резонаторов и техника с использованием особенностей отражения при скользких углах падения.

Найдены количественные характеристики поверхностного сопротивления и флуктуационной проводимости сверхпроводника в виде эпитаксиальной пленки. При этом найдена частотная зависимость остаточного поверхностного сопротивления $R_{res} = R_s(T=0) \sim \omega^{3/2}$, получено общее соответствие представлениям о d -волновой симметрии щелевой функции в $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. Получена температурная зависимость флуктуационной проводимости вблизи критической температуры, которая хорошо согласуется с теоретической моделью. В нелинейной КЛП на основе пленки этого сверхпроводника с постоянным током обнаружен ярко выраженный эффект лавинообразного перехода в сильно диссипативное состояние.

При исследовании Fe-содержащих сверхпроводников, а именно монокристалла пниктида $BaFeCoAs$ и эпитаксиальной пленки $FeSeTe$ получены температурные зависимости комплексной проводимости и связанные с ней физические характеристики электронной системы, которые подтверждают s_{\pm} -волновой сценарий s -состояния этих сверхпроводников. При этом обнаружено необычное поведение квазичастичной проводимости вблизи критической температуры (ниже ее), которое может быть обусловлено резким изменением скорости рассеяния квазичастиц и/или проявлением пика когерент-

ности. Обнаружен также эффект в температурной зависимости микроволнового отклика полого резонатора с тонкой пленкой FeSeTe, природа которого, как было установлено авторами, имеет электродинамическое происхождение.

Наряду с физическими исследованиями, разработаны и созданы микроволновые устройства на основе купратных ВТСП-пленок в мм-диапазоне волн, а также показана возможность бесконтактного тестирования однородности свойств массивных сверхпроводников при комнатной температуре.

Экспериментально подтверждена ранее высказанная оценка возможности создания пассивных микроволновых устройств на основе ВТСП с рабочими частотами вплоть до 40 ГГц [64].

Библиографический список

1. Cherpak N., Barannik A., He Y., Sun L., Zhang X., Prozorov R., Tanatar M. Microwave Surface Impedance and Complex Conductivity of $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.926}\text{Co}_{0.074})_2\text{As}_2$ Single Crystals. *The 12th Int. Conf. Materials and Mechanisms of Superconductivity and High-Temperature Superconductivity* (M²S-2018): Abstract Book (Beijing, China, 20–24 August 2018). Beijing, 2018. P. 312.
2. Kordyuk A. A. Electronic band structure of optimal superconductors: from cuprates to ferropnictides and back again. *Low Temp. Phys.* 2018. Vol. 44, N 6. P. 477–486. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5037550>
3. Ma Y. Recent progress in the development of Fe-based superconducting wires and tapes. *The 12th Int. Conf. Materials and Mechanisms of Superconductivity and High-Temperature Superconductivity* (M²S-2018): Abstract Book (Beijing, China, 20–24 August 2018). Beijing, 2018. P. 176.
4. Barannik A., Cherpak N., Kirichenko A., Prokopenko Y., Vitusevich S., Yakovenko V. Whispering gallery mode resonators in microwave physics and technologies. *Int. J. Microw. Wirel. T.* 2017. Vol. 9, N 4. P. 781–796. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1759078716000787>
5. Cherpak N. T., Barannik A. A., Prokopenko Yu. V., Filipov Yu. F., Vitusevich S. Accurate Microwave Technique of Surface Resistance Measurement of Large-area HTS Films using Sapphire Quasioptical Resonator. *IEEE Trans. on Appl. Supercon.* 2003. Vol. 13, N 2. P. 3570–3573. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2003.812400>
6. Barannik A. A., Bunyaev S. A., Cherpak N. T., Prokopenko Yu. V., Kharchenko A. A., Vitusevich S. A. Whispering gallery mode hemisphere dielectric resonators with impedance plane. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 2010. Vol. 58, N 10. P. 2682–2691. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2010.2065870>
7. Barannik A. A., Bunyaev S. A., Cherpak N. T. and Vitusevich S. A., Quasi-Optical Sapphire Resonators in the Form of a Truncated Cone. *J. Lightwave Technol.* 2008. Vol. 26, N 17. P. 3118–3123. DOI: <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.925039>
8. Barannik A. A., Cherpak N. T., Torokhtiy K. I. and Vitusevich S. Slotted-Disk Sapphire Quasi-Optical Resonator with Conducting Endplates. *Proceedings of the 41st European Microwave Conference* (EuMC 2011). (Manchester, UK, 12–14 Oct. 2011). Manchester, 2011. P. 830–833.
9. Hein M. *High-Temperature-Superconductor Thin Films at Microwave Frequencies*. Berlin: Springer, 1999. 281 p.
10. Wu P. H., Min Q. Calculations of the microwave conductivity of high- T_C superconducting thin films from power transmission measurements. *J. Appl. Phys.* 1992. Vol. 71, N 11. P. 5550–5553. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.350530>
11. Somal H. S., Feenstra B. J., Schützmann J., Hoon Kim J., Barber Z. H., Duijn V. H., Hien N. T., Menovsky A. A., Palumbo M., van der Marel D. Grazing incidence infrared reflectivity of $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ and NbN . *Phys. Rev. Lett.* 1996. Vol. 76, N 9. P. 1525–1528. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.1525>
12. Cherpak N. T., Gubin A. I., Lavrinovich A. A. Microwave Reflectivity of HTS Film. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2001. Vol. 55, N 3. P. 81–89. DOI: <http://dx.doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v55.i3.120>
13. Gubin A. I., Lavrinovich A. A., Cherpak N. T. Microwave-band reflection coefficient of high-temperature superconductor specimens in E -plane waveguide structures. *Tech. Phys. Lett.* 2001. Vol. 27, N 4. P. 336–337. DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1370219>
14. Hein M., Kaiser T., and Muller G. Surface resistance of epitaxial $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ films on various substrates: Effects of pair condensation and quasiparticle scattering. *Phys. Rev. B*. 2000. Vol. 61, Iss. 1. P. 640–647. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.640>
15. Hensen S., Müller G., Rick C. T. and Shambert K. In-plane surface impedance of epitaxial $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films: Comparison of experimental data taken at 87 GHz with d- and s-wave models of superconductivity. *Phys. Rev. B*. 1997. Vol. 56, Iss. 10. P. 6237–6264. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.56.6237>
16. Pan V. M., Kalenyuk O. A., Kasatkin O. L., Komashko V. A., Ivanyuta O. M. and Melkov G. A. Microwave response of single crystal $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films as a probe for pairing symmetry. *Low Temp. Phys.* 2006. Vol. 32, Iss. 4. P. 497–504. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2199453>
17. Harris R., Turner P. J., Kamal Saeid, Hosseimi A. R., Dosajh P., Mullins G. K., Bobowski J. S., Bidinosti C. P., Broun D. M., Liang Ruixing, Hardy W. V., and Bonn D. A. Phenomenology of a-axis and b-axis charge dynamics from microwave spectroscopy of highly ordered $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.50}$ and $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.993}$. *Phys. Rev. B*. 2006. Vol. 74, Iss. 10. P. 104508(16 p.). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.74.104508>
18. Trunin M. R., Nefyodov Y. A., and Fink H. J. Phenomenological description of the microwave surface impedance and complex conductivity of high- T_C single crystals. *J. Exp. Theor. Phys.* 2000. Vol. 91, Iss. 4. P. 801–816. DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1326973>
19. Barannik A. A., Bunyaev S. A., Cherpak N. T. On the low-temperature microwave response of a $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ epitaxial film determined by a new measurement technique. *Low Temp. Phys.* 2008. Vol. 34, N 12. P. 977–981. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3029749>

20. Hosseini A., Harris R., Kamal S., Dosanjh P., Preston J., Liang R., Hardy W. N. and Bonn D. A. Microwave spectroscopy of thermally excited quasiparticles in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.99}$. *Phys. Rev. B*. 1999. Vol. 60, Iss. 2. P. 1349–1359. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.60.1349>
21. Harris R., Hosseini A., Kamal S., Dosanjh P., Liang R., Hardy W. N. and Bonn D. A. Microwave spectroscopy of quasiparticle transport in the b direction of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.993}$. *Phys. Rev. B*. 2001. Vol. 64, Iss. 6. P. 064509. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.64.064509>
22. Klein N. Electrodynamic properties of oxide superconductors. *Berichte des Forschungszentrums Jülich. Juel-3773*. Juelich, 2000. P. 101.
23. Barannik A. A., Cherpak N. T., Kharchenko M. S., Semerad R., Vitusevich S. Surface impedance of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films grown on MgO substrate as a function of film thickness. *J. Supercond. Novel Magn.* 2013. Vol. 26, N 1. P. 43–48. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10948-012-1695-x>
24. Barannik A. A., Cherpak N. T., Tanatar M. A., Vitusevich S., Skresanov V., Canfield P. C. and Prozorov R. Millimeter-wave surface impedance of optimally-doped $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ single crystals. *Phys. Rev. B*. 2013. Vol. 87, N 1. P. 014506 (7 p.). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.87.014506>
25. Cherpak N. T., Barannik A. A., Prozorov R., Tanatar M. A., Velichko A. V. On the determination of the quasiparticle scattering rate in unconventional superconductors by microwave surface impedance. *Low Temp. Phys.* 2013. Vol. 39, N 12. P. 1110–1112. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4830422>
26. Valdés Aguilar R., Bilbro L. S., Lee S., Bark C. W., Jiang J., Weiss J. D., Hellstrom E. E., Larbalestier D. C., Eom C. B. and Armitage N. P. Pair-breaking effects and coherence peak in the terahertz conductivity of superconducting $\text{BaFe}_{2-2x}\text{Co}_{2x}\text{As}_2$ thin films. *Phys. Rev. B*. 2010. Vol. 82, N 18. P. 180514 (4 p.). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.180514>
27. Fischer T., Pronin A. V., Wosnitza J., Iida K., Kurth F., Haindl S., Schultz L., Holzapfel B., and Schachinger E. Highly anisotropic energy gap in superconducting $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.9}\text{Co}_{0.1})_2\text{As}_2$ from optical conductivity measurements. *Phys. Rev. B*. 2010. Vol. 82, N 22. P. 224507. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.224507>
28. Ghigo G., Gerbaldo R., Gozzelino L., Laviano F. and Tamegai T. Penetration Depth and Quasiparticle Conductivity of Co- and K-Doped BaFe_2As_2 Crystals, Investigated by a Microwave Coplanar Resonator Technique. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2016. Vol. 26, Iss. 3, article 7300104. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2529419>
29. Barannik A. A., Cherpak N. T., Ni N., Tanatar M. A., Vitusevich S. A., Skresanov V. N., Canfield P. C., Prozorov R., Glamazdin V. V. and Torokhtii K. I. Millimeter-wave study of London penetration depth temperature dependence in $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.926}\text{Co}_{0.074})_2\text{As}_2$ single crystal. *Low Temp. Phys.* 2011. Vol. 37, N 11. P. 775–728. DOI: <https://dx.doi.org/10.1063/1.3660321>
30. Cherpak N. T., Barannik A. A., He Y.-S., Prozorov R. and Tanatar M. Microwave response, complex conductivity and effect of order parameter symmetry in Fe-based superconductors. *Proc. Int. Kharkov Symp. Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Sub-Millimeter waves (MSMW-2013)*. (Kharkiv, Ukraine, 23–28 June 2013). Kharkiv: 2013. P. 163–168. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSMW.2013.6622174>
31. Prozorov R., Kogan V. G. London penetration depth in iron-based superconductors. *Rep. Prog. Phys.* 2011. Vol. 74, N 12. P. 124505 (20 p.). DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/74/12/124505>
32. Barannik A. A., Cherpak N. T., Kharchenko M. S., Wu Yun, Luo Sheng, He Yusheng and Porch A. Unusual microwave response and bulk conductivity of very thin $\text{FeSe}_{0.3}\text{Te}_{0.7}$ films as a function of temperature. *Low Temp. Phys.* 2014. Vol. 40, N 7. P. 492–504. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4881178>
33. Cherpak N. (M.) T., Barannik A. A., He Y.-S., Sun L., Zhang X., Ma Y., Bian Y. and Li G. On Nature of Microwave Response of the Resonator with Thin $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ Film near Critical Temperature. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2018. Vol. 28, N 4. P. 1501104. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2018.2804095>
34. Barannik A. A., Cherpak N. T., He Y.-S., Sun L., Zhang X., Vovnyuk M. V., Wu Y. Microwave response of cavity resonator with thin superconductor film depending on film temperature and orientation. *Low Temp. Phys.* 2018. Vol. 44, N 3. P. 247–251. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5024545>
35. Cherpak N. T., Gubin A. I., Lavrinovich A. A. Rectangular microwaveguide with high- T_C superconducting wall. *Proc. Int. Kharkov Symp. Physics and Engineering of Millimeter and Sub-millimeter Waves (MSMW-2007)* (Kharkov, Ukraine, 25–30 June 2007). IEEE, 2007. P. 392–394. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSMW.2007.4294673>
36. Silva E., Marcon R., Sarti, Fastampa R., Giura M., Cucolo A.M. Microwave fluctuational conductivity in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. *Eur. Phys. J. B*. 2002. Vol. 37, N 3. P. 277–284. DOI: <http://dx.doi.org/10.1140/epjb/e2004-00057-5>
37. Silva E., Marcon R., Fastampa R., Giura M., Sarti S. High-Frequency Fluctuational Conductivity in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. 2003. *J. Low Temp. Phys.* Vol. 131, N 5–6. P. 831–835. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1023479010670>
38. Gubin A. I., Cherpak N. T., Lavrinovich A. A., Ogansian K. V. Temperature dependence of the microwave conductivity of a YBCuO film in the normal state. *Low Temp. Phys.* 2007. Vol. 33, N 10. P. 818–820. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2746852>
39. Черпак Н. Т., Величко А. В. Высокотемпературные сверхпроводники в микроволновой технике. 2000. *Успехи совр. радиоэлектрон.* № 4. С. 3–47.
40. Vendik I. O., Vendik O. G. *High-Temperature Superconductor Devices for Microwave Signal Processing*. St.-Petersburg: TOO Складень, 1997. Part 1. 110 p.
41. Oates O. D. E., Agassi D., Wong E., Leese de Escobar A. Irgmaier K. Nonlinear Meissner effect in a high-temperature superconductor: Local versus nonlocal electrodynamics. *Phys. Rev. B*. 2008. Vol. 77, Iss. 21. P. 214521 (8 p.). DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.77.214521>
42. Halbritter J. Change of eigenstate in a superconducting RF cavity due to a nonlinear response. *J. Appl. Phys.* 1970. Vol. 41, N 11. P. 4581–4588. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1658500>

43. Hartwig W. H. Superconducting resonator and devices. *Proc. of the IEEE*. 1973. Vol. 61, N 1. P. 58–69. DOI: <https://doi.org/10.1109/PROC.1973.8971>
44. Velichko A. V., Cherpak N. T. Response of high temperature superconductors to electromagnetic radiation: (A Review). *Low Temp. Phys.* 1998. Vol. 24, Iss. 5. P. 297–323. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.593592>
45. Gaidukov M. M., Vendik O. G., Kolesov S. G. Microwave power limiter based on high T_c superconducting film. *Electron. Lett.* 1990. Vol. 26, Iss. 16. P. 1229–1230. DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/el:19900792>
46. Бондаренко И. Н., Лавринович А. А. Исследование тонкопленочной копланарной линии на основе высокотемпературного сверхпроводника. *Радиофизика и электроника*: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон НАН Украины. Харьков, 2006. Т. 11, № 2. С. 318–322.
47. Лавринович А. А., Храмота Е. В., Черпак Н. Т. Исследование сверхпроводящей микроволновой линии передачи в сильных электромагнитных полях. *Радиофизика и электроника*: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон НАН Украины. Харьков, 2009. Т. 14, № 1. С. 64–68.
48. Cherpak N. T., Lavrinovich A. A., Kalenyuk A. A., Pan V. M., Gubin A. I., Khramota V., Kurakin A. A., Vitusevich S. A. DC-biased coplanar waveguide on the basis of high- T_c superconducting thin film with nonlinear impedance. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2010. Vol. 69, N 15. P. 1357–1364. DOI: [10.1615/TelecomRadEng.v69.i15.40](https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v69.i15.40)
49. Booth J. C., Rudman D. A., Ono R. H. A Self-Attenuating Superconducting Transmission Line for Use as a Microwave Power Limiter. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2003. Vol. 13, Iss. 2. P. 305–310. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2003.813716>
50. Cherpak N. T., Lavrinovich A. A., Gubin A. I., and Vitusevich S. A. Direct-current-assisted microwave quenching of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ coplanar waveguide to a highly dissipative state. *Appl. Phys. Lett.* 2014. Vol. 105, Iss. 2. P. 022601 (3 p.). DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4890123>
51. Cherpak N. T., Gubin A. I., Lavrinovich A. A., and Vitusevich S. A. Microwave quenching in DC-biased coplanar waveguide based on $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin film. *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* 2016. Vol. 26, Iss. 3. P. 1501204. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2537138>
52. Ruibal M., Ferro G., Osorio M. R., Maza J., Veira J. A., Vidal F. Size effects on the quenching to the normal state of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin-film superconductors. *Phys. Rev. B*. 2007. Vol. 75, N 1. P. 012504 (4 p.) DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.012504>
53. Wu Y., Cui B., Luo S., Jiang X., Zhou F., Bian Y., He Y., Barannik A. A., Cherpak N. T. and Skresanov V. N. A Unique Ka-Band Measurement System Based on Quasi-Optical Dielectric Resonator Technology for Studying Small Superconducting Samples. *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* 2013. Vol. 23, N 3. P. 9000204. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2012.2233836>
54. Skresanov V. N., Glamazdin V. V., Cherpak N. T. The novel approach to coupled modes parameters recovery from microwave resonator amplitude-frequency response. *Proceedings of the 41st European Microwave Conference (EuMC 2011)* (Manchester, UK, 12–14 Oct. 2011). Manchester, 2011. P. 830–833. DOI: <https://doi.org/10.23919/EuMC.2011.6101922>
55. Surzhenko A. B., Schaurroth S., Litzkendorf D., Zeisberger M., Habisrenther T., Gawalek W. Growth-related profiles of remanent flux in bulk melt-textured YBaCuO crystal magnetized by pulsed fields. *Supercond. Sci. Technol.* 2001. Vol. 14, N 9. P. 770–775. DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/14/9/328>
56. Chiang C. H., Yang C. W., Hsieh P. L., Chan W. C. Levitation Force Measurement at Different Temperatures for YBCO Superconductor. *Journal of Low Temperature Physics*. 2003. Vol. 131, N 3–4. P. 743–746. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1022925419581>
57. Cherpak N. T., Gubin A. I., Lavrinovich A. A., Gawalek W., Litzkendorf D. Microwave bulk properties of melt-textured high- T_c $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconductors. *Supercond. Sci. Technol.* 2004. Vol. 17, N 4. P. 645–648. DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/17/4/013>
58. Cherpak N. T., Gawalek W., Golubnichaya G. V., Gubin A. I., Kirichenko A. Ya., Lavrinovich A. A., Litzkendorf D., Maximchuk I. G. High-frequency absorption in melt-textured high- T_c YBaCuO superconductors. *Physica C*. 2002. Vol. 372–376, Pt. 2. P. 1123–1126. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(02\)00864-X](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(02)00864-X)
59. Bunyaev S. A., Barannik A. A., and Cherpak N. T. Microstrip Whispering-Gallery-Mode Resonator. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 2015. Vol. 63, Iss. 9. P. 2776–2781. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2457898>
60. Sun L., Cherpak N., Barannik A., He Y., Glamazdin V., Zhang X., Wang J., Zolotaryov V. New Type of Microwave High- T_c Superconductor Microstrip Resonator and Its Application Prospects. *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* 2017. Vol. 27, N 4. P. 1501304. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2631882>
61. Skresanov V. N., Barannik A. A., Cherpak N. T., He Y., Glamazdin V. V., Zolotaryov V. A., Shubny A. I., Sun L., Wang J., Wu Y. Experience in developing Ka-band waveguide filter with HTS E-plane insert. *Proc. of the Int. Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Sub-Millimeter waves (MSMW-2016)* (Kharkov, Ukraine, 20–24 June 2016). Kharkov, 2016. 4 p. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSMW.2016.7538050>
62. He Y., Barannik A., Cherpak N., Sun L., Skresanov V., Bian Y., Wang J., Natarov M., Zolotaryov V. Novel Design of Band-Pass Waveguide Filter with HTS E-Plane Insert. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2017. Vol. 27, N 4. P. 1501604. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2017.2654350>
63. Rectangular band-pass filter having recesses of less than one-quarter wavelength depth dielectric insert with superconductive film within the recesses: Pat. 9,537,195 U.S.: Sun L., Wang X., Wang J., Wu Y., He Y., Li H., Huang J., Luo S., Skresanov V., Barannik O., Glamazdin V., Zolotarev V., Natarov M., Cherpak M., O. Shubnyj. 2017.
64. Cherpak N. T. High-temperature superconductors and MM wave technology: challenge and perspectives. *Proc. 5th Int. Kharkiv Symp. Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Sub-Millimeter Waves, (MSMW-2004)* (Kharkov, Ukraine, 21–26 June 2004).

Kharkov: 2004. Vol. 1. P. 412–414. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSMW.2004.1345912>

REFERENCES

- Cherpak, N., Barannik, A., He, Y., Sun, L., Zhang, X., Prozorov, R., Tanatar, M., 2018. Microwave Surface Impedance and Complex Conductivity of $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.926}\text{Co}_{0.074})_2\text{As}_2$ Single Crystals. In: *The 12th Int. Conf. Materials and Mechanisms of Superconductivity and High-Temperature Superconductivity* (M²S-2018). Abstract Book. Beijing, China, 20–24 August, p. 312.
- Kordyuk, A. A., 2018. Electronic band structure of optimal superconductors: from cuprates to ferropnictides and back again. *Low Temp. Phys.*, **44**(6), pp. 477–486. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5037550>
- Ma, Y., 2018. Recent progress in the development of Fe-based superconducting wires and tapes. In: *The 12th Int. Conf. Materials and Mechanisms of Superconductivity and High-Temperature Superconductivity* (M²S-2018). Abstract Book. Beijing, China, 20–24 August, p. 176.
- Barannik, A., Cherpak, N., Kirichenko, A., Prokopenko, Y., Vitusevich, S., Yakovenko, V., 2017. Whispering gallery mode resonators in microwave physics and technologies. *Int. J. Microw. Wirel. T.*, **9**(4), pp. 781–796. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1759078716000787>
- Cherpak, N. T., Barannik, A. A., Prokopenko, Yu. V., Filipov, Yu. F., Vitusevich, S., 2003. Accurate Microwave Technique of Surface Resistance Measurement of Large-area HTS Films using Sapphire Quasioptical Resonator. *IEEE Trans. on Appl. Supercon.*, **13**(2), pp. 3570–3573. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2003.812400>
- Barannik, A. A., Bunyaev, S. A., Cherpak, N. T., Prokopenko, Yu. V., Kharchenko, A. A., Vitusevich, S. A., 2010. Whispering gallery mode hemisphere dielectric resonators with impedance plane. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **58**(10), pp. 2682–2691. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2010.2065870>
- Barannik, A. A., Bunyaev, S. A., Cherpak, N. T. and Vitusevich, S. A., 2008. Quasi-Optical Sapphire Resonators in the Form of a Truncated Cone. *J. Lightwave Technol.*, **26**(17), pp. 3118–3123. DOI: <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.925039>
- Barannik, A. A., Cherpak, N. T., Torokhtiy, K. I. and Vitusevich, S., 2011. Slotted-Disk Sapphire Quasioptical Resonator with Conducting Endplates. In: *Proceedings of the 41st European Microwave Conference* (EuMC 2011). Manchester, UK, 12–14 Oct. 2011, pp. 830–833.
- Hein, M., 1992. *High-Temperature-Superconductor Thin Films at Microwave Frequencies*. Berlin: Springer.
- Wu, P.H., Min, Q., 1992. Calculations of the microwave conductivity of high- T_c superconducting thin films from power transmission measurements. *J. Appl. Phys.*, **71**(11), pp. 5550–5553. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.350530>
- Somal, H. S., Feenstra, B. J., Schützmann, J., Hoon Kim, J., Barber, Z. H., Duijn, V. H., Hien, N. T., Menovsky, A. A., Palumbo, M., van der Marel, D., 1996. Grazing incidence infrared reflectivity of $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ and NbN . *Phys. Rev. Lett.*, **76**(9), pp. 1525–1528. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.1525>
- Cherpak, N. T., Gubin, A. I., Lavrinovich, A. A., 2001. Microwave Reflectivity of HTS Film. *Telecommunications and Radio Engineering*, **55**(3), pp.81–89. DOI: <http://dx.doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v55.i3.120>
- Gubin, A. I., Lavrinovich, A. A., Cherpak, N. T., 2001. Microwave-band reflection coefficient of high-temperature superconductor specimens in E -plane waveguide structures. *Tech. Phys. Lett.*, **27**(4), pp. 336–337. DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1370219>
- Hein, M., Kaiser, T. and Muller, G., 2000. Surface resistance of epitaxial $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ films on various substrates: Effects of pair condensation and quasiparticle scattering. *Phys. Rev. B*, **61**(1), pp. 640–647. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.640>
- Hensen, S., Müller, G., Rick, C. T. and Shamberg, K., 1997. In-plane surface impedance of epitaxial $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films: Comparison of experimental data taken at 87 GHz with d- and s-wave models of superconductivity *Phys. Rev. B*, **56**(10), pp. 6237–6264. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.56.6237>
- Pan, V. M., Kalenyuk, O. A., Kasatkin, O. L., Komashko, V. A., Ivanyuta, O. M. and Melkov, G. A., 2006. Microwave response of single crystal $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films as a probe for pairing symmetry. *Low Temp. Phys.*, **32**(4), pp. 497–504. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2199453>
- Harris, R., Turner, P. J., Kamal Saeid, Hosseini, A. R., Dosanjh, P., Mullins, G. K., Bobowski, J. S., Bidinosti, C. P., Broun, D. M., Liang Ruixing, Hardy, W. V. and Bonn, D. A., 2006. Phenomenology of a-axis and b-axis charge dynamics from microwave spectroscopy of highly ordered $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.50}$ and $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.993}$. *Phys. Rev. B*, **74**(10), pp. 104508(16 p.). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.74.104508>
- Trunin, M. R., Nefyodov, Y. A. and Fink, H. J., 2000. Phenomenological description of the microwave surface impedance and complex conductivity of high- T_c single crystals. *J. Exp. Theor. Phys.*, **91**(4), pp. 801–816. DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1326973>
- Barannik, A. A., Bunyaev, S. A., Cherpak, N. T., 2008. On the low-temperature microwave response of a $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ epitaxial film determined by a new measurement technique. *Low Temp. Phys.*, **34**(12), pp. 977–981. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3029749>
- Hosseini, A., Harris, R., Kamal, S., Dosanjh, P., Preston, J., Liang, R., Hardy, W. N. and Bonn, D. A., 1999. Microwave spectroscopy of thermally excited quasiparticles in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.99}$. *Phys. Rev. B*, **60**(2), pp. 1349–1359. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.60.1349>
- Harris, R., Hosseini, A., Kamal, S., Dosanjh, P., Liang, R., Hardy, W. N. and Bonn, D. A., 2001. Microwave spectroscopy of quasiparticle transport in the \hat{b} direction of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.993}$. *Phys. Rev. B*, **64**(6), p. 064509. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.64.064509>
- Klein, N., 2000. Electrodynamic properties of oxide superconductors. *Berichte des Forschungszentrums Jülich. Juel-3773*. P. 101.
- Barannik, A. A., Cherpak, N. T., Kharchenko, M. S., Semerad, R., Vitusevich, S., 2013. Surface impedance of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films grown on MgO substrate as a function of film thickness. *J. Supercond. Novel Magn.*, **26**(1), pp. 43–48. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10948-012-1695-x>

24. Barannik, A. A., Cherpak, N. T., Tanatar, M. A., Vitusevich, S., Skresanov, V., Canfield, P. C. and Prozorov, R., 2013. Millimeter-wave surface impedance of optimally-doped $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ single crystals. *Phys. Rev. B*, **87**(1), pp. 014506 (7 p.). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.87.014506>
25. Cherpak, N. T., Barannik, A. A., Prozorov, R., Tanatar, M. A., Velichko, A. V., 2013. On the determination of the quasiparticle scattering rate in unconventional superconductors by microwave surface impedance. *Low Temp. Phys.*, **39**(12), pp. 1110–1112. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4830422>
26. Valdés Aguilar, R., Bilbro, L. S., Lee, S., Bark, C. W., Jiang, J., Weiss, J. D., Hellstrom, E. E., Larbaestier, D. C., Eom, C. B. and Armitage, N. P., 2010. Pair-breaking effects and coherence peak in the terahertz conductivity of superconducting $\text{BaFe}_{2-2x}\text{Co}_{2x}\text{As}_2$ thin films. *Phys. Rev. B*, **82**(18), pp. 180514 (4 p.). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.180514>
27. Fischer, T., Pronin, A. V., Wosnitzer, J., Iida, K., Kurth, F., Haindl, S., Schultz, L., Holzapfel, B. and Schachinger, E., 2010. Highly anisotropic energy gap in superconducting $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.9}\text{Co}_{0.1})_2\text{As}_2$ from optical conductivity measurements. *Phys. Rev. B*, **82**(22), p. 224507. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.224507>
28. Ghigo G., Gerbaldo R., Gozzelino L., Laviano F. and Tamegai T. 2016. Penetration Depth and Quasiparticle Conductivity of Co- and K-Doped BaFe_2As_2 Crystals, Investigated by a Microwave Coplanar Resonator Technique. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **26**(3), article 7300104. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.224507>
29. Barannik, A. A., Cherpak, N. T., Ni, N., Tanatar, M. A., Vitusevich, S. A., Skresanov V. N., Canfield P. C., Prozorov R., Glamazdin V. V. and Torokhtii K. I., 2011. Millimeter-wave study of London penetration depth temperature dependence in $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.926}\text{Co}_{0.074})_2\text{As}_2$ single crystal. *Low Temp. Phys.*, **37**(11), p. 725–728. DOI: <https://dx.doi.org/10.1063/1.3660321>
30. Cherpak, N. T., Barannik, A. A., He, Y.-S., Prozorov, R. and Tanatar, M., 2013. Microwave response, complex conductivity and effect of order parameter symmetry in Fe-based superconductors. In: *Proc. of the Int. Kharkov Symp. Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Sub-Millimeter waves* (MSMW-2013). Kharkiv, Ukraine, 23–28 June 2013, pp. 163–168. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSMW.2013.6622174>
31. Prozorov, R., Kogan, V. G., 2011. London penetration depth in iron-based superconductors. *Rep. Prog. Phys.*, **74**(12), pp. 124505 (20 p.). DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/74/12/124505>
32. Barannik, A. A., Cherpak, N. T., Kharchenko, M. S., Wu, Yun, Luo, Sheng, He, Yusheng and Porch, A., 2014. Unusual microwave response and bulk conductivity of very thin $\text{FeSe}_{0.3}\text{Te}_{0.7}$ films as a function of temperature. *Low Temp. Phys.*, **40**(7), pp. 492–504. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4881178>
33. Cherpak, N. (M.) T., Barannik, A. A., He, Y.-S., Sun, L., Zhang, X., Ma, Y., Bian, Y. and Li, G., 2018. On Nature of Microwave Response of the Resonator with Thin $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ Film near Critical Temperature. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **28**(4), pp. 1501104. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2018.2804095>
34. Barannik, A. A., Cherpak, N. T., He, Y.-S., Sun, L., Zhang, X., Vovnyuk, M. V., Wu, Y., 2018. Microwave response of cavity resonator with thin superconductor film depending on film temperature and orientation. *Low Temp. Phys.*, **44**(3), p. 247–251. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5024545>
35. Cherpak, N. T., Gubin, A. I., Lavrinovich, A. A., 2007. Rectangular microwaveguide with high- T_C superconducting wall. In: *Proc. Int. Kharkov Symp. Physics and Engineering of Millimeter and Sub-millimeter Waves* (MSMW-2007). Kharkov, Ukraine, 25–30 Jun. 2007, pp. 392–394. IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSMW.2007.4294673>
36. Silva, E., Marcon, R., Sarti, Fastampa, R., Giura, M., Cucolo, A. M., 2002. Microwave fluctuational conductivity in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. *Eur. Phys. J. B*, **37**(3), pp. 277–284. DOI: <http://dx.doi.org/10.1140/epjb/e2004-00057-5>
37. Silva, E., Marcon, R., Fastampa, R., Giura, M., Sarti, S., 2003. High-Frequency Fluctuational Conductivity in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. *J. Low Temp. Phys.*, **131**(5–6), pp. 831–835. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1023479010670>
38. Gubin, A. I., Cherpak, N. T., Lavrinovich, A. A., Oganisian, K. V., 2007. Temperature dependence of the microwave conductivity of a YBCuO film in the normal state. *Low Temp. Phys.*, **33**(10), pp. 818–820. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2746852>
39. Cherpak, N. T., Velichko, A. V., 2000. High-Temperature Superconductor in microwave technique (review). *Usp. sovremennoy radioelektroniki*, **4**, pp. 3–47 (in Russian).
40. Vendik, I. O., Vendik, O. G. 1997. *High-Temperature Superconductor Devices for Microwave Signal Processing*. St.-Petersburg, TOO Skladen Publ. Part 1.
41. Oates, O. D. E., Agassi, D., Wong, E., Leese de Escobar, A., Irgmaier, K., 2008. Nonlinear Meissner effect in a high-temperature superconductor: Local versus nonlocal electrodynamics. *Phys. Rev. B*, **77**(21), P. 214521 (8 p.). DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.77.214521>
42. Halbritter, J., 1970. Change of eigenstate in a superconducting RF cavity due to a nonlinear response. *J. Appl. Phys.*, **41**(11), pp. 4581–4588. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1658500>
43. Hartwig, W. H., 1973. Superconducting resonator and devices. *Proc. IEEE*, **61**(1), pp. 58–69. DOI: <https://doi.org/10.1109/PROC.1973.8971>
44. Velichko, A. V., Cherpak, N. T., 1998. Response of high-temperature superconductors to electromagnetic radiation: (A Review). *Low Temp. Phys.*, **24**(5), pp. 297–323. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.593592>
45. Gaidukov, M. M., Vendik, O. G., Kolesov, S. G., 1990. Microwave power limiter based on high T_C superconducting film. *Electron. Lett.*, **26**(16), pp. 1229–1230. DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/el:19900792>
46. Bondarenko, I. N., Lavrinovich, A. A., 2006. Thing film high temperature superconductivity coplanar line investigation. In: V. M. Yakovenko, ed. 2006. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **11**(2), pp. 318–322 (in Russian).
47. Lavrinovich, A. A., Khramota, E. V., Cherpak, N. T., 2009. Study of microwave superconducting transmission line in the strong electromagnetic fields. In: V. M. Yakovenko, ed. 2009. *Radiofizika i elektronika*.

- Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **14**(1), pp. 64–68 (in Russian).
48. Cherpak, N. T., Lavrinovich, A. A., Kalenyuk, A. A., Pan, V. M., Gubin, A. I., Khrumota, E. V., Kurakin, A. A., Vitusevich, S. A., 2010. DC-biased coplanar waveguide on the basis of high- T_c superconducting thin film with nonlinear impedance. *Telecommunications and Radio Engineering*, **69**(15), pp. 1357–1364. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v69.i15.40
 49. Booth, J. C., Rudman, D. A., Ono, R. H., 2003. A Self-Attenuating Superconducting Transmission Line for Use as a Microwave Power Limiter. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **13**(2), pp. 305–310. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2003.813716>
 50. Cherpak, N. T., Lavrinovich, A. A., Gubin, A. I., and Vitusevich, S. A., 2014. Direct-current-assisted microwave quenching of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ coplanar waveguide to a highly dissipative state. *Appl. Phys. Lett.*, **105**(2), pp. 022601 (3 p.). DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4890123>
 51. Cherpak, N. T., Gubin, A. I., Lavrinovich, A. A., Vitusevich, S. A., 2016. Microwave quenching in DC-biased coplanar waveguide based on $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin film. *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **26**(3), pp. 1501204. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2537138>
 52. Ruibal, M., Ferro, G., Osorio, M. R., Maza, J., Veira, J. A., Vidal, F., 2007. Size effects on the quenching to the normal state of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin-film superconductors. *Phys. Rev. B*, **75**(1), pp. 012504 (4 p.). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.012504>
 53. Wu, Y., Cui, B., Luo, S., Jiang, X., Zhou, F., Bian, Y., He, Y., Barannik, A. A., Cherpak, N. T. and Skresanov, V. N., 2013. A Unique Ka-Band Measurement System Based on Quasi-Optical Dielectric Resonator Technology for Studying Small Superconducting Samples. *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **23**(3), pp. 9000204. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2012.2233836>
 54. Skresanov, V. N., Glamazdin, V. V., Cherpak, N. T., 2011. The novel approach to coupled modes parameters recovery from microwave resonator amplitude-frequency response. In: *Proceedings of the 41st European Microwave Conference* (EuMC 2011). Manchester, UK, 12–14 Oct. 2011, pp. 830–833. DOI: <https://doi.org/10.23919/EuMC.2011.6101922>
 55. Surzhenko, A. B., Schauroth, S., Litzkendorf, D., Zeisberger, M., Habisreuther, T., Gawalek, W., 2001. Growth-related profiles of remanent flux in bulk melt-textured YBaCuO crystal magnetized by pulsed fields. *Supercond. Sci. Technol.* **14**(9), pp. 770–775. DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/14/9/328>
 56. Chiang, C. H., Yang, C. W., Hsieh, P. L., Chan, W. C., 2003. Levitation Force Measurement at Different Temperatures for YBCO Superconductor. *J. Low Temp. Phys.*, **131**(3–4), pp. 743–746. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1022925419581>
 57. Cherpak, N. T., Gubin, A. I., Lavrinovich, A. A., Gawalek, W., Litzkendorf, D., 2004. Microwave bulk properties of melt-textured high- T_C $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconductors. *Supercond. Sci. Technol.* **17**(4), pp. 645–648. DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/17/4/013>
 58. Cherpak, N. T., Gawalek, W., Golubnichaya, G. V., Gubin, A. I., Kirichenko, A. Ya., Lavrinovich, A. A., Litzkendorf, D., Maximchuk I. G., 2002. High-frequency absorption in melt-textured high- T_c YBaCuO superconductors. *Physica C*, **372–376**(pt. 2), pp. 1123–1126. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(02\)00864-X](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(02)00864-X)
 59. Bunyaev, S. A., Barannik, A. A. and Cherpak, N. T., 2015. Microstrip Whispering-Gallery-Mode Resonator. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **63**(9), pp. 2776–2781. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2457898>
 60. Sun, L., Cherpak, N., Barannik, A., He, Y., Glamazdin, V., Zhang, X., Wang, J., Zolotaryov, V., 2017. New Type of Microwave High- T_c Superconductor Microstrip Resonator and Its Application Prospects. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **27**(4), pp. 1501304. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2631882>
 61. Skresanov, V. N., Barannik, A. A., Cherpak, N. T., He, Y., Glamazdin, V. V., Zolotaryov, V. A., Shubny, A. I., Sun, L., Wang, J., Wu, Y., 2016. Experience in developing Ka-band waveguide filter with HTS E-plane insert. In: *Proc. of the Int. Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Sub-Millimeter waves* (MSMW-2016). Kharkov, Ukraine, 20–24 June 2016, 4 p. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSMW.2016.7538050>
 62. He, Y., Barannik, A., Cherpak, N., Sun, L., Skresanov, V., Bian, Y., Wang, J., Natarov, M., Zolotaryov, V., 2017. Novel Design of Band-Pass Waveguide Filter with HTS E-Plane Insert. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **27**(4), p. 1501604. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2017.2654350>
 63. Sun L., Wang X., Wang J., Wu Y., He Y., Li H., Huang J., Luo S., Skresanov V., Barannyk O., Glamazdin V., Zolotarev V., Natarov M., Cherpak M., O. Shubnyj. Rectangular band-pass filter having recesses of less than one-quarter wavelength depth dielectric insert with superconductive film within the recesses. U.S. Pat. 9,537,195.
 64. Cherpak N.T. 2004. High-temperature superconductors and MM wave technology: challenge and perspectives. In: *Proc. 5th Int. Kharkiv Symp. Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Sub-Millimeter Waves* (MSMW-2004) Kharkov, Ukraine, 21–26 June 2004, **1**, pp. 412–414. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSMW.2004.1345912>

Рукопись поступила 11.10.2018.

A. A. Barannik, A. I. Gubin,
A. A. Lavrinovich, N. T. Cherpak

MICROWAVE RADIOPHYSICS OF UNCONVENTIONAL SUPERCONDUCTORS

Subject and purpose. A review of the main results obtained by the authors in the process of microwave (MW) research of unconventional superconductors and the development of MW devices based on cuprate high-temperature superconductors (HTS) over the past 10–15 years is presented.

Methods and methodology. Experimental studies were carried out by the methods of impedance measurements of superconducting samples. To this end, the authors developed two measurement techniques in the mm wave-

length range: based on quasi-optical sapphire resonators and using the feature of reflection of a p -polarized wave from the surface of a superconductor at grazing angles of incidence.

Results. The epitaxial films of the cuprate $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconductor and Fe-containing superconductors in the form of single crystals of pnictide $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.926}\text{Co}_{0.074})_2\text{As}_2$ and epitaxial films of chalcogenide $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.5$ and 0.7) are investigated. The results of the MW response of the electrodynamic structures with the samples under study served as the basis for finding the complex conductivity, including fluctuation one, and physical quantities related to it. In general, the results obtained confirm the scenario of d -wave symmetry of the gap function for cuprate superconductors and s_{\pm} -wave symmetry for Fe superconductors. However, a number of detected features and effects, namely, an unusual frequency dependence of the residual surface resistance in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ in the form of $\omega^{3/2}$, the growth of quasiparticle conductivity with decreasing temperature, starting from the critical one, as well as the avalanche-like transition from the superconducting to the strongly dissipative state in the nonlinear coplanar transmission line, require further study.

New MW devices based on cuprate HTS films in the mm wavelength range have been developed and created: 1) a quasi-optical sapphire resonator with a radial gap and HTS end walls for studying Fe – superconductors in the form of small (1–2 mm in the plane a – b) samples; 2) planar quasi-optical resonator; 3) a band-pass filter with an E-plane insert in a cross-shaped waveguide. The possibility of contactless testing of the homogeneity of the properties of massive superconductors at room temperature is also shown.

Conclusions. The temperature dependence of the complex conductivity of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.926}\text{Co}_{0.074})_2\text{As}_2$ and $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.5$ and 0.7) superconductors and physical quantities related with it was obtained, which allows us to judge the confirmation of the corresponding wave symmetry scenarios of gap function in the investigated superconductors. However, a number of detected features and effects require further study. The previously expressed assessment of the possibility of creating passive HTS-based MW devices with operating frequencies up to 40 GHz has been experimentally confirmed.

Key words: unconventional superconductors, microwave surface impedance, complex conductivity, quasi-optical sapphire resonator, nonlinear coplanar transmission line, passive microwave devices.

О. А. Баранник, О. І. Губін,
О. А. Лавринович, М. Т. Черпак

МІКРОХВИЛЬОВА РАДІОФІЗИКА НЕЗВИЧАЙНИХ НАДПРОВІДНИКІВ

Предмет і мета роботи. Представлено огляд основних результатів, отриманих авторами в процесі мікрохвильових (МХ) досліджень незвичайних надпровідників і розробок МХ-пристроїв на основі купратних висо-

котемпературних надпровідників (ВТНП) протягом останніх 10–15 років.

Методи і методологія роботи. Експериментальні дослідження проводилися методами імпедансних вимірювань надпровідникових зразків. З цією метою авторами розроблено дві техніки вимірювань у мм-діапазоні хвиль: на базі квазіоптичних сапфірових резонаторів і з використанням особливості відбиття p -поляризованої хвилі від поверхні надпровідника при ковзних кутах падіння.

Результати роботи. Досліджено епітаксціальні плівки купратного $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ і Fe-місткого надпровідників у вигляді монокристалів пніктиду $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.926}\text{Co}_{0.074})_2\text{As}_2$ і епітаксціальних плівок халькогеніду $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0,5$ і $0,7$). Результати МХ-відгуку електродинамічних структур з досліджуваними зразками служили основою для знаходження комплексної провідності, в тому числі флуктуаційної, і пов'язаних з нею фізичних величин. В цілому отримані результати підтверджують сценарій d -хвильової симетрії щільної функції для купратних надпровідників і s_{\pm} -хвильової симетрії для Fe-надпровідників. Однак низка виявлених особливостей і ефектів, а саме незвичайна частотна залежність залишкового поверхневого опору в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ у вигляді $\omega^{3/2}$, зростання квазічастинкової провідності з пониженням температури, починаючи з критичної, а також лавиноподібний перехід з надпровідного в сильнодисипативний стан в нелінійній копланарній лінії передачі, вимагають подальшого вивчення.

Розроблено та створено нові МХ-пристрої на основі купратних ВТНП-плівок у мм-діапазоні хвиль: 1) квазіоптичний сапфіровий резонатор з радіальною щілиною і ВТНП торцевими стінками для досліджень Fe-надпровідників у вигляді малих (1–2 мм в площині a – b) зразків; 2) планарний квазіоптичний резонатор; 3) смугопропускний фільтр з E -площинною вставкою в хрестоподібному хвилеводі. При цьому експериментально підтверджено раніше висловлену оцінку можливості створення пасивних МХ-пристроїв на основі ВТНП з робочими частотами до 40 ГГц. Також показано можливість безконтактного тестування при кімнатній температурі однорідності властивостей масивних надпровідників.

Висновок. Отримано температурну залежність комплексної провідності надпровідників $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.926}\text{Co}_{0.074})_2\text{As}_2$ і $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0,5$ і $0,7$) і пов'язаних з нею фізичних величин, що дозволяє судити про підтвердження відповідних сценаріїв хвильової симетрії щільної функції в досліджених надпровідниках. Однак ряд виявлених особливостей і ефектів вимагають подальшого вивчення. Експериментально підтверджена раніше висловлена оцінка можливості створення пасивних МХ-пристроїв на основі ВТНП з робочими частотами до 40 ГГц.

Ключові слова: незвичайні надпровідники, мікрохвильовий поверхневий імпеданс, комплексна провідність, квазіоптичний сапфіровий резонатор, нелінійна копланарна лінія передачі, пасивні мікрохвильові пристрої.