

А. И. Губин, А. А. Лавринович, И. И. Миронов, Н. Т. Черпак
 Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
 12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
 E-mail: gubin@ire.kharkov.ua

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К МИКРОВОЛНОВОМУ МЕТОДУ
 ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОВОДНИКОВ ПРИ СКОЛЬЗЯЩИХ УГЛАХ ПАДЕНИЯ ВОЛНЫ**

Приводятся результаты анализа двух вариантов нерезонансного метода исследования проводников, включая высокотемпературные сверхпроводники, при скользящих углах падения электромагнитной волны на исследуемый объект. На основе данных численного моделирования и экспериментальных измерений проведен сравнительный анализ для волноводных секций прямоугольного сечения двух типов, а именно в виде уголкового изгиба и с наклонной закорачивающей плоскостью. Исследование проведено в 6-мм диапазоне длин волн при разных углах падения волны и разным поперечном сечении волноводной измерительной секции с плавными переходами на волновод стандартного сечения. Ил. 7. Табл. 1. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: скользящие углы падения, коэффициент отражения, коэффициент прохождения, микроволновая проводимость, высокотемпературные сверхпроводники.

Изучение микроволновых свойств различных материалов, включая высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), имеет важное значение как при исследовании их физических особенностей, так и при создании устройств на основе этих материалов. При этом для их исследования используют различные подходы и методы [1]. Один из них – это метод, когда при исследовании материала используется коэффициент отражения волны от образца при скользящих углах падения [2, 3]. Данный подход может быть реализован при расположении образца в прямоугольном волноводе в виде наклонной закорачивающей плоскости, при этом вектор E лежит в плоскости падения волны (p -поляризация) [4]. По мере увеличения угла падения, т. е. приближения его к углу Брюстера, увеличивается чувствительность коэффициента отражения к изменению проводимости образца. Это обстоятельство позволяет исследовать образцы в широком диапазоне частот, толщина которых, больше глубины проникновения поля. Однако он имеет и свои недостатки, связанные с неравномерностью частотной характеристики (высокие значения коэффициента стоячей волны (КСВН)) и влиянием микрошелевых эффектов в максимуме распределения поля между волноводной секцией и образцом [5]. Эти недостатки налагают дополнительные требования к стабильности источника электромагнитного излучения и технологии изготовления измерительных структур. Изложенных выше недостатков лишена волноводная секция в виде уголкового изгиба с исследуемым образцом, расположенном на его срезе. Однако при этом конструктивные особенности такой секции приводят к увеличению площади исследуемого образца, что не всегда является приемлемым при проведении исследований. Данный недостаток частично можно устранить при использовании волноводных секций пониженного сечения [6].

В настоящей работе приводятся результаты численного моделирования и экспериментальные исследования волноводной секции 6-мм диапазона длин волн в виде уголкового изгиба сечением $5,2 \times 0,8$ мм с волноводными переходами на стандартное сечение $5,2 \times 2,6$ мм. На основе полученных результатов проводится сравнительный анализ данной секции с секциями с наклонной закорачивающей плоскостью.

1. Численный анализ и моделирование.
 Для определения оптимальных характеристик волноводной измерительной секции в виде уголкового изгиба был проведен численный анализ с использованием программы *CST Microwave Studio*. Структурная схема измерительной секции в виде уголкового изгиба представлена на рис. 1.

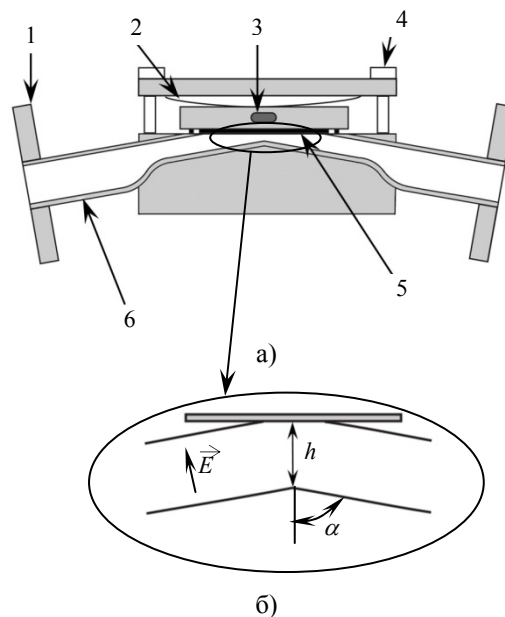


Рис. 1. Секция в виде уголкового изгиба: а) – общий вид измерительной ячейки (в сборе): 1 – фланец; 2 – прижимная пружина; 3 – датчик температуры; 4 – зажимной винт; 5 – исследуемый образец; 6 – волноводный переход; б) – уголкового изгиба

Использование геометрии сечения в виде уголкового изгиба приводит к увеличению площади волноводного среза для исследуемого образца до двух раз по сравнению с секцией с наклонной закорачивающей плоскостью (для одного и того же угла и поперечного сечения волноводной секции). Для уменьшения площади исследуемого образца можно предложить использование волноводной секции с пониженным сечением с плавными переходами на стандартное сечение. Как показано [6], для этого целесообразно использовать волноводные переходы, в которых высота изменяется по закону гиперболического тангенса в зависимости от продольной координаты. В этом случае, с одной стороны, уменьшается площадь образца, взаимодействующего с электромагнитным полем, с другой стороны, в волноводе с пониженной высотой увеличивается напряженность поля, что в принципе важно с точки зрения сохранения чувствительности. На рис. 2 представлены картины распределения компоненты электрического поля в двух плоскостях (вид сверху и вид сбоку) для двух измерительных секций: уголкового изгиба (рис. 2, а) и наклонной закорачивающей плоскости (рис. 2, б). Видно, что в обоих случаях в области расположения исследуемого образца наблюдается повышенная напряженность поля. Кроме того, для случая уголкового изгиба (рис. 2, а) она может изменяться с изменением высоты h .

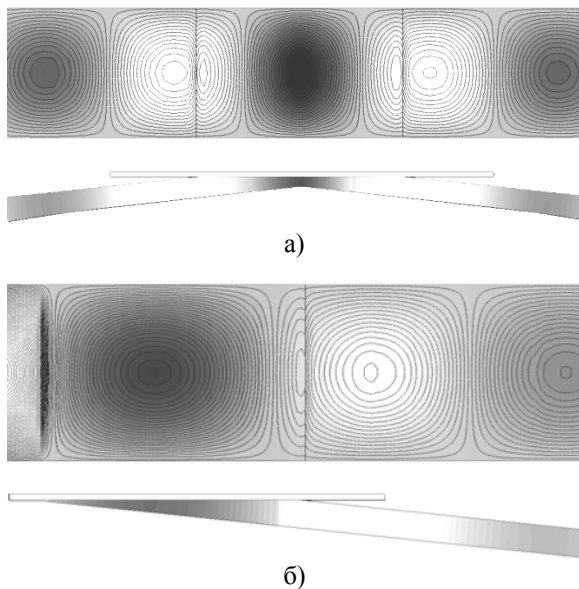


Рис. 2. Распределение электрического поля для секций в виде: а) – уголкового изгиба; б) – наклонной закорачивающей плоскости

Во втором случае (рис. 2, б) плотность поля максимальна в области острого угла секции. Последнее приводит к усилению роли микрощели в случае ее образования [5]. Также микрощель

усиливает изрезанность частотной характеристики коэффициента отражения (рис. 3, кривая 2), в отличие от уголкового изгиба (рис. 3, кривая 1).

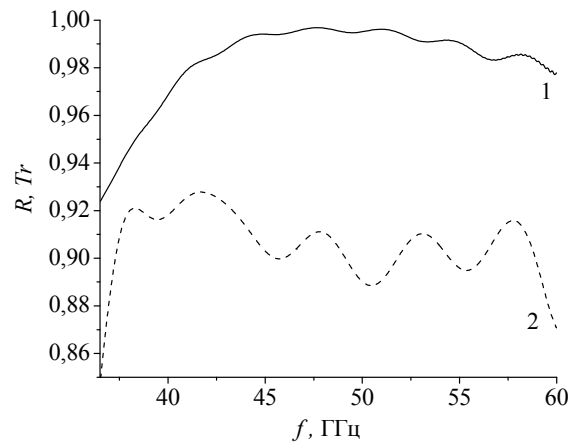


Рис. 3. Зависимость коэффициентов прохождения для уголкового изгиба (кривая 1) и отражения для секции с наклонной закорачивающей плоскостью (кривая 2)

Численный анализ проводился для волноводных секций в виде уголкового изгиба с двумя значениями поперечного сечения: 1) стандартного $5,2 \times 2,6$ мм; 2) с пониженной высотой волновода $5,2 \times 0,8$ мм. В обоих случаях волноводные измерительные секции соединяются с волноводными линиями передачи стандартного сечения $5,2 \times 2,6$ мм.

Для сравнения полученных результатов проведена нормировка по площади исследуемого образца. Зависимости разности коэффициентов прохождения $\Delta Tr = Tr_{Cu} - Tr_{ВТСП}$ через уголкового изгиба с образцами из меди (Cu , $\sigma_{Cu} = 5,96 \cdot 10^7$ См/м) и ВТСП (в нормальном состоянии, когда $T > T_c$, где T_c – критическая температура ВТСП, $\sigma_{ВТСП} = 3,37 \cdot 10^5$ См/м) от площади окна волноводного среза S (площадь волноводного среза равна минимальной площади исследуемого образца) для двух выше представленных секций показаны на рис. 4. При этом угол падения волны на исследуемый образец составлял $\alpha = 84^\circ$, а частота, на которой проводились исследования, равнялась 39,6 ГГц. Угол падения выбран как оптимальный с точки зрения площади измеряемого образца и повышения фактора увеличения чувствительности (определяемого как изменение коэффициента отражения/прохождения в зависимости от изменения проводимости исследуемого образца [4]), а также технологии изготовления волноводной секции.

Как видно из рис. 4, в секции с меньшей высотой разница в коэффициентах прохождения $\Delta Tr = Tr_{Cu} - Tr_{ВТСП}$ выше по сравнению с секцией со стандартным сечением волновода, что говорит о повышении фактора увеличения чувствитель-

ности коэффициента прохождения к изменению проводимости образца более чем в 3 раза (при сохранении площади образца).

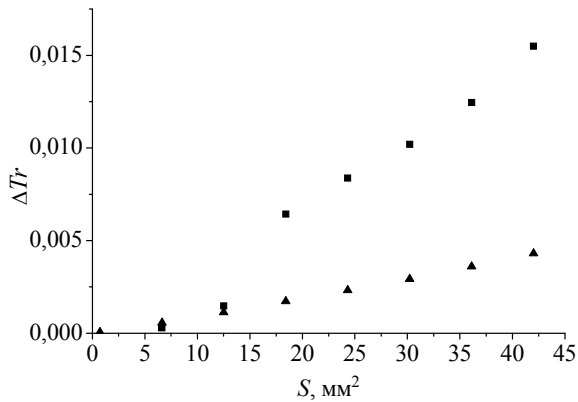


Рис. 4. Зависимость разности коэффициентов прохождения ΔTr (Cu – ВТСП) от площади S (сечении волноводов: ■ – $5,2 \times 0,8$ мм, ▲ – $5,2 \times 2,6$ мм)

Суть наблюдаемого эффекта заключается в том, что в волноводе с плавным переходом за счет уменьшения высоты h между образцом и волноводным каналом (см. рис. 1) увеличивается напряженность поля в области расположения исследуемого образца (см. рис. 2, а), а это в свою очередь приводит к тому, что большая часть энергии взаимодействует с образцом. На рис. 5 представлена зависимость разности коэффициентов прохождения ΔTr образцов Cu и ВТСП (в нормальном состоянии) от высоты h в угловом изгибе при угле падения $\alpha = 84^\circ$.

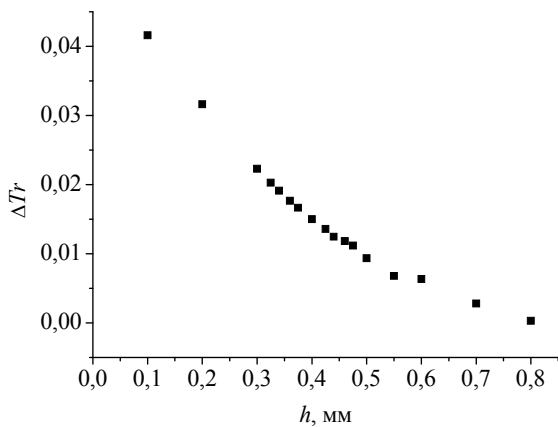


Рис. 5. Зависимость разности коэффициентов прохождения ΔTr от высоты h для образцов Cu – ВТСП в угловом изгибе при угле падения $\alpha = 84^\circ$

2. Экспериментальная техника. Для проверки полученных выше результатов численного анализа проведены экспериментальные исследования свойств волноводных секций в виде углового изгиба с измеряемыми проводниками при комнатной температуре (300 К) и температу-

ре кипения жидкого азота (77 К). С учетом вышеизложенного была изготовлена секция в виде углового изгиба, представляющая собой соединение двух волноводных переходов с сечения $5,2 \times 2,6$ мм на сечение с пониженной высотой $5,2 \times 0,8$ мм под углом 168° (угол падения волны на образец равен $\alpha = 84^\circ$) (см. рис. 1). Исследуемые образцы размещались на срезе углового изгиба на высоте $h = 0,4$ мм. Данная высота представляется оптимальной с точки зрения допустимой площади измеряемого образца и разности ΔTr , которую желательно максимально увеличивать. Измерения при низких температурах проведены с использованием разработанной авторами установки 6-мм диапазона длин волн, в основу которой положен принцип фазового моста [5]. На рис. 6 показана разработанная и изготовленная низкотемпературная вставка для проведения экспериментальных исследований.

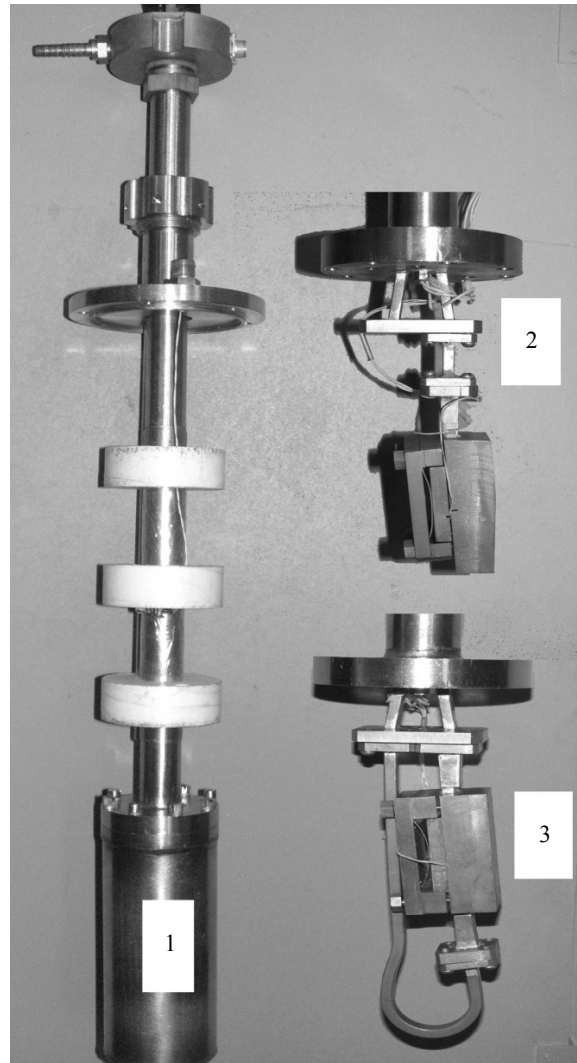


Рис. 6. Общий вид вставки прибора для низкотемпературных измерений 1 с измерительными секциями: с наклонной закорачивающей плоскостью 2 и в виде углового изгиба 3

На низкотемпературном крае вставки расположен фланец, к которому герметично закрепляется металлический стакан для изоляции волноводной секции и образца от жидкого хладагента. Данная конструкция криостата позволяет проводить исследования при температурах от комнатной до температуры кипения жидкого гелия. Исследования секций при комнатной температуре проводились с использованием панорамного измерителя КСВН и ослабления Р2-68.

3. Сравнительный анализ фактора увеличения чувствительности измерительных секций. Исследования при комнатной температуре. Ранее показано [5], что щель между исследуемым образцом и поверхностью волноводной секции образует микроканал, через который при определенных резонансных условиях излучается электромагнитная волна, что в свою очередь приводит к большому ошибкам измерения. Предложенная авторами конструкция измерительной ячейки позволила разместить область соприкосновения исследуемого образца и волноводной секции вне максимума поля, а следовательно, свести к минимуму влияние щели между образцом и волноводом, что значительно уменьшает погрешность измерений. Важным преимуществом данного подхода является то, что падающая и отраженная волны развязаны между собой естественным образом (реализуется «метод на проход»). Учитывая факт прохождения части микроволнового поля без взаимодействия с образцом, что ведет к снижению фактора увеличения чувствительности, были проведены сравнительные исследования с тремя различными измерительными секциями с наклонной закорачивающей плоскостью. Первая секция представляла собой волновод $5,2 \times 2,6$ мм с этой плоскостью, реализующей угол падения волны на образец $\alpha = 80^\circ$. Вторая и третья – аналогичные секции, но с высотой волновода $0,8$ мм и переходом на пониженное сечение (с тангенсгиперболическим законом изменения высоты [6]) и углами падения волны $\alpha = 80$ и 84° .

В исследованиях использовались 6 образцов, среди которых: поглотитель, текстурированный объемный ВТСП образец YBaCuO [7] в нормальном состоянии ($\sigma = 3,37 \cdot 10^5$ См/м), титан ($\sigma = 1,8 \cdot 10^6$ См/м), чугун ($\sigma = 1,9 \cdot 10^6$ См/м), дюраль ($\sigma = 10^7$ См/м) и медь ($\sigma = 5,7 \cdot 10^7$ См/м). Исследования проводились при комнатной температуре на частоте $39,6$ ГГц.

В таблице приведены результаты измерения коэффициентов отражения R (для трех секций с наклонной закорачивающей плоскостью) и прохождения Tr (для секции с уголкового изгибом) для различных образцов. Наибольшая разница коэффициентов прохождения/отражения для различных образцов наблюдается для секции с наклонной закорачивающей плоскостью без пе-

рехода на пониженное сечение волновода. Несколько меньшим фактором увеличения чувствительности обладают секции с наклонной закорачивающей плоскостью с переходом на высоту волновода $0,8$ мм и углами $\alpha = 80$ и 84° . Для уголкового изгиба фактор увеличения чувствительности коэффициента отражения к изменению проводимости образца наименьший.

Тип секции / Материал	НЗП-секция*, угол 80° , $b = 2,6$ мм (R)	НЗП-секция*, угол 80° , $b = 0,8$ мм (R)	НЗП-секция*, угол 84° , $b = 0,8$ мм (R)	УИ-секция**, угол 84° (Tr)
Поглотитель	0,047	0,152	0,178	0,254
ВТСП	0,442	0,405	0,226	0,642
Титан	0,890	0,830	0,663	0,677
Дюраль	0,928	0,855	0,707	0,694
Чугун	0,925	0,849	0,704	0,700
Медь	0,958	0,882	0,712	0,702

НЗП-секция* – секция с наклонной закорачивающей плоскостью

УИ-секция** – секция в виде уголкового изгиба

При этом следует отметить, что хоть фактор увеличения чувствительности для секции с поперечным сечением волновода $5,2 \times 2,6$ мм максимален, площадь исследуемого образца в данном случае тоже максимальна. Применение пониженного сечения приводит к снижению фактора увеличения чувствительности, но и к значительному уменьшению площади образца. Для уголкового изгиба фактор меньше вследствие того, что часть мощности падающей волны не взаимодействует с образцом. Такая ячейка, однако, обладает наименее изрезанной характеристикой (см. рис. 3, кривая 1) и максимальной повторяемостью, что приводит к уменьшению погрешности измерений.

Измерения при температуре жидкого азота. При низкотемпературных измерениях использовались 3 секции с наклонной закорачивающей плоскостью, из них одна секция на основе волновода $5,2 \times 2,6$ мм и углом падения 80° и две секции с пониженным сечением высоты $5,2 \times 0,8$ мм и отличающимися углами падения $\alpha = 80$ и 84° , а также одна измерительная секция в виде уголкового изгиба с углом 84° (см. рис. 6). Зависимость потерь L от температуры образца для различных измерительных секций показана на рис. 7. В качестве исследуемого образца использовалась пленка $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ толщиной 330 нм, напыленная магнетронным способом в фирме *THEVA* (Германия) на сапфировую подложку толщиной $0,3$ мм с буферным слоем CeO_2 .

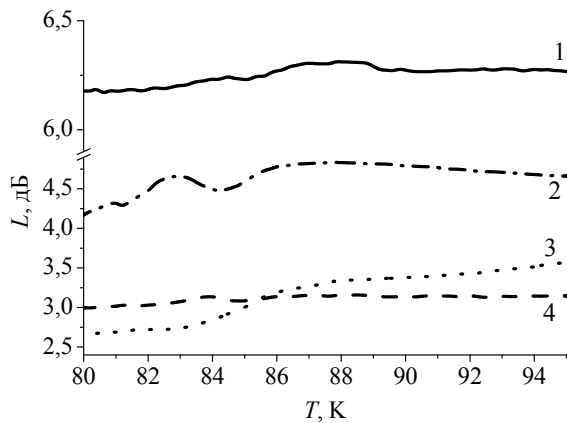


Рис. 7. Зависимость потерь L от температуры T для измерительных секций с ВТСП пленкой: 1 – в виде уголкового изгиба, $\alpha = 84^\circ$; 2 – НЗП-секции $5,2 \times 0,8$ мм, $\alpha = 84^\circ$; 3 – НЗП-секции $5,2 \times 0,8$ мм, $\alpha = 80^\circ$; 4 – НЗП-секции $5,2 \times 2,6$ мм, $\alpha = 80^\circ$

Наибольший фактор увеличения чувствительности (с величиной эффекта порядка 0,6 дБ) наблюдается для секции с наклонной закорачивающей плоскостью без перехода на пониженную высоту волновода (кривая 3 рис. 7). Это связано со сравнительно большой площадью исследуемого образца. Несколько меньшим фактором (с величиной эффекта порядка 0,45 дБ) обладает секция с наклонной закорачивающей плоскостью с переходом на пониженное сечение волновода $5,2 \times 0,8$ мм и углом $\alpha = 84^\circ$ (кривая 2). Этот результат можно объяснить тем, что влияние уменьшения площади исследуемого образца на снижение фактора увеличения чувствительности измерительной секции превышает эффект роста чувствительности по мере приближения угла падения волны к углу Брюстера [8]. При этом также наблюдается влияние микрощели, которое объясняет немонотонность на графике в диапазоне температур $82 \div 84,5$ К. Еще большее уменьшение фактора уменьшения чувствительности наблюдается для измерительной секции с наклонной закорачивающей плоскостью с переходом на пониженную высоту сечения волновода $5,2 \times 0,8$ мм и при значении угла падения волны на образец 80° (величина эффекта порядка 0,1 дБ) (кривая 4 рис. 7). Это объясняется небольшой площадью образца и влиянием микрощели [6]. Появление микрощели происходит за счет технологической сложности изготовления плоского фланца с требуемой плоскостностью в измерительной секции и проявляется в резонансном излучении из микроволновода при определенных условиях (частота излучения, высота микроканала, проводимость стенки). Для измерительной секции в виде уголкового изгиба (кривая 1) фактор увеличения чувствительности несколько выше, чем для описанной секции, но ниже, чем для двух первых измерительных секций (величина эффекта поряд-

ка 0,13 дБ). Относительно небольшое значение фактора увеличения чувствительности объясняется тем, что при скользких углах падения волны часть энергии не взаимодействует с образцом. Однако данная секция обладает наименее изрезанной характеристикой и максимальной повторяемостью в широком диапазоне частот, что приводит к уменьшению погрешности измерения.

Выводы. Таким образом, показано, что в измерительной секции в виде уголкового изгиба повышение фактора увеличения чувствительности наблюдается при понижении высоты расположения образца h . Измерительная секция в виде уголкового изгиба обладает менее изрезанной характеристикой коэффициента передачи и максимальной повторяемостью результатов, что ведет к уменьшению погрешности измерения. Измерительные секции с наклонной закорачивающей плоскостью обладают большей чувствительностью. Оптимальной для исследования ВТСП пленок выглядит секция с пониженным сечением высоты волновода ($5,2 \times 0,8$ мм) и углом $\alpha = 84^\circ$.

В зависимости от поставленной задачи и требований, предъявляемых к результатам измерений, можно использовать оба типа измерительных секций, выбор которых будет определяться свойствами объекта исследования. Если необходима максимальная чувствительность, следует выбирать измерительную секцию с наклонной закорачивающей плоскостью. При исследовании проводимости в определенной полосе частот более приемлемым вариантом может оказаться секция в виде уголкового изгиба, однако в этом случае необходима оптимизация устройства с точки зрения повышения чувствительности измерений для конкретных образцов.

Авторы благодарны С. Витусевич и ее коллегам (*Forschungszentrum Jülich, Germany*) за предоставленную возможность проведения численных исследований с использованием программы *CST Microwave Studio*.

Библиографический список

1. *Surface Resistance Measurement Technique* / A. P. Jenkins, K. S. Kale, D. Dew-Hughes, A. V. Narlikar // Nova Science Publishers, Inc., Studies of High Temperature Superconductors. – 1996. – 17. – P. 179–219.
2. *Feenstra B. J. Low Energy Electrodynamics of High- T_c Superconductors, Proefschrift* / B. J. Feenstra // University of Groningen, the Netherlands, 1997. – P. 162.
3. *Cherpak N. T. Microwave Reflectivity of HTS Film* / N. T. Cherpak, A. I. Gubin, A. A. Lavrinovich // Telecommunications and Radio Engineering. – 2001. – 55, N 3. – P. 81–89.
4. Губин А. И. Микроволновое отражение ВТСП образцов в волноводных E -структурах / А. И. Губин, А. А. Лавринович, Н. Т. Черпак // Письма в журн. техн. физики. – 2001. – 27, вып. 8. – С. 64–67.
5. Губин А. И. Grazing incidence reflectivity of high- T_c superconductors: mm wave technique of conductivity measu-

- rements / А. И. Губин, Н. Т. Черпак, А. А. Лавринович // Радиофизика и электрон. – 2010. – 1(15), № 2. – С. 87–91.
6. *Микроволновое* отражение в прямоугольном волноводе от проводящих образцов, размещенных на наклонном фланце с микроканалом / С. И. Тарабан, А. И. Губин, А. А. Лавринович, Н. Т. Черпак // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2009. – 14, № 3. – С. 350–357.
7. *Губин А. И.* Микроволновый метод исследования ВТСП и родственных материалов при скользящих углах падения / А. И. Губин, А. А. Лавринович, Н. Т. Черпак // 16-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2006): материалы конф. – Севастополь, 2006. – Т. 2. – С. 782–783.
8. *Борн М.* Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф; пер. с англ. под ред. Г. П. Мотулевич. – М.: Наука, 1973. – 720 с.

Рукопись поступила 31.01.2012.

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

COMPARATIVE ANALYSIS
OF THE APPROACHES TO A MICROWAVE
TECHNIQUE OF CONDUCTOR STUDY
AT WAVE GRAZING INCIDENCE

The results of the analysis of non resonant techniques of conductors including high temperature superconductors (HTS) studies, at the grazing angles of incidence of electromagnetic wave on the sample under test are shown. On the basis of the data of simu-

lation and experimental measurements the comparative analysis for different waveguide sections are presented, namely, for waveguide sections in the forms of corner bend and oblique short circuit termination. The study is carried out in K_a-band at different angles of wave incidence and different height of waveguide cross-sections.

Key words: grazing angles of incidence, reflection coefficient, transmission coefficient, microwave conductivity, superconductors.

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

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПІДХОДІВ
ДО МІКРОХВИЛЬОВОГО МЕТОДУ
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОВІДНИКІВ
ПРИ КОВЗНИХ КУТАХ ПАДІННЯ ХВИЛІ

Наведено результати аналізу нерезонансних методів дослідження провідників, у тому числі високотемпературні надпровідники, при ковзних кутах падіння електромагнітної хвилі на об'єкт, що досліджується. На основі даних числового моделювання та експериментальних вимірювань наведено порівняльний аналіз для хвилеводних секцій прямокутного перерізу двох типів, а саме у вигляді кутового вигину та з нахилоною закорочувальною площиною. Дослідження проведено в 6-мм діапазоні хвиль при різних кутах падіння хвилі та різному поперечному перерізі вимірювальної секції з плавними переходами на хвилевод стандартного перерізу.

Ключові слова: ковзні кути падіння, коефіцієнт відбиття, коефіцієнт проходження, мікрохвильова провідність, високотемпературні надпровідники.