

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*

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина
4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина*

**Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*

E-mail: sergeytaraban@gmail.com; gubin@ire.kharkov.ua;
lavr@ire.kharkov.ua; cherpak@ire.kharkov.ua

Исследовано влияние микроканала в наклонном фланце прямоугольного волновода на коэффициент отражения от расположенных на нем образцов с различной проводимостью. Путем численного моделирования и экспериментальных исследований в 6-мм диапазоне длин волн показано снижение влияния микроканала на измеряемый коэффициент отражения при использовании прямоугольной канавки в наклонном фланце. Ил. 6. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: микроканал, коэффициент отражения, наклонный фланец, проводящий образец, прямоугольный волновод.

Микроволновый отклик сверхпроводников (СП) определяется их комплексной проводимостью, которая в свою очередь определяет такую важную характеристику СП, как поверхностный импеданс [1]. Измерение проводимости (или поверхностного импеданса) является важной задачей при исследовании сверхпроводниковых материалов, а также при применении этих материалов в микроволновой технике [2].

В большинстве случаев для измерений поверхностного импеданса используются резонаторные методы [1], имеющие высокую чувствительность при температурах ниже критической T_c . При температурах же в окрестности T_c и выше чувствительность резонаторных методов снижается. В этом случае можно обратиться к нерезонаторным методам. Известен метод на основе измерения коэффициента прохождения волны через тонкую пленку (см., например, [3] и ссылки в этой работе). В случае толстых СП микроволновую проводимость, в принципе, можно определить из комплексного коэффициента отражения электромагнитной (ЭМ) волны от СП-образца. При падении волны на границу раздела воздух-проводник часть мощности проходит в глубину образца на величину скинслоя и поглощается, а часть – отражается. При нормальном падении волны в образец проходит лишь очень небольшая часть поля, а большая часть отражается. Этим определяется невысокая чувствительность коэффициента отражения к изменению проводимости образца, что хорошо видно из соотношения между абсолютной величиной коэффициента отражения Γ и поверхностным сопротивлением проводника R_s [3]:

$$\Gamma \cong 1 - \frac{4R_s}{Z_0},$$

где Z_0 – характеристический импеданс свободного пространства. Для всех проводников, включая сверхпроводники, справедливым является неравенство $R_s \ll Z_0$.

В ИК диапазоне было показано, что для увеличения чувствительности, а следовательно, и точности определения проводимости, угол падения волны нужно выбирать близким к скользящему [4]. Эффект наблюдался для p -поляризованной волны. Позже тот же эффект наблюдался в микроволновом диапазоне при использовании прямоугольного волновода, когда образец размещался под наклонным углом к широкой стенке волновода [5]. Эффект объясняется в рамках представлений об угле Брюстера [6].

Использование наклонного волноводного фланца, на котором размещается исследуемый образец, имеет существенную особенность: нередко из-за неидеальности поверхностей исследуемого образца и фланца между ними может возникать микрощель в виде микроканала (микроволновода), которая может оказывать влияние на результаты измерений [7].

Известно, что микрощель часто возникает между волноводными фланцами при сочленении отрезков волноводов [8, 9]. Для снижения влияния зазора или щели между ними применяют дроссельные фланцы. Однако не очевидным является возможность такого подхода при использовании наклонного фланца.

В данной работе поставлена задача найти и обосновать метод снижения влияния микроканала, возникающего между наклонным фланцем волновода и измеряемым образцом на коэффициент отражения от образца. Общий вид исследуемой структуры представлен на рис. 1, а.

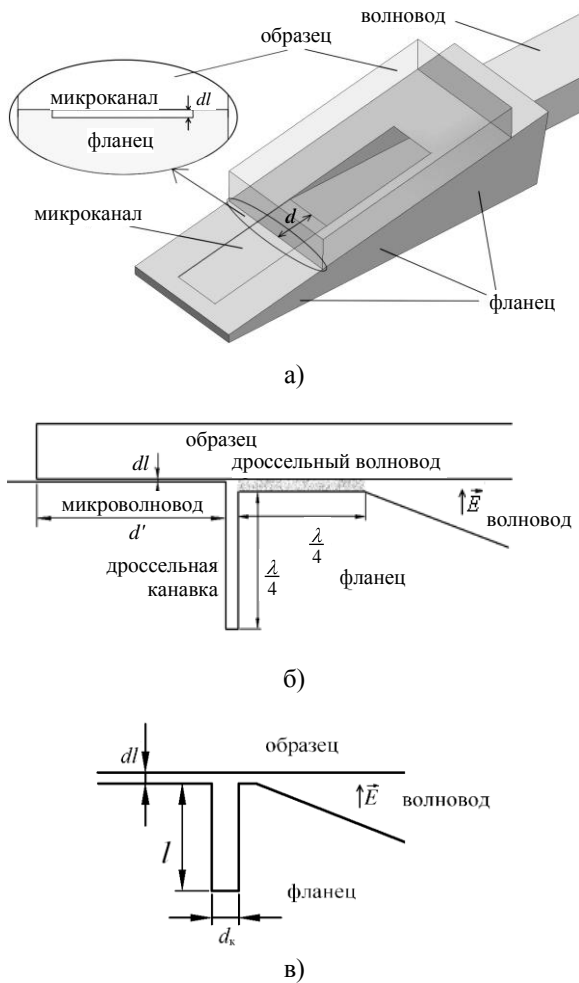


Рис. 1. Исследуемая структура: а) – общий вид наклонного фланца с образцом и микроканалом, реализующим падение волны под углом $\Theta = 80^\circ$; сечение участка фланца по широкой стенке волновода с использованием: б) – дрессельной канавки; в) – прямоугольной канавки

Как видно из рис. 1, а, между наклонным фланцем и размещенным на нем образцом имеет место микрощель в виде микроканала, глубина которого предполагается постоянной вдоль его длины. Микроканал, накрытый сверху образцом, является, по сути, микроволноводом, в котором высота узкой стенки равна глубине микроканала, а ширина остается равной ширине стандартного волновода. Длина микроволновода d выбирается равной расстоянию между краем волновода и краем покрывающего микроканал образца (см. рис. 1, а).

1. Численное исследование влияния микроканала на коэффициент отражения от наклонного образца в волноводе. Путем численного эксперимента с использованием пакета программ *CST Microwave Studio* получены зависимости коэффициента отражения от частоты $\Gamma(f)$ для значений $dl = 10$ мкм и длины микроволновода $d = 4$ мм. При этом использовались образцы меди ($\sigma = 5,8 \cdot 10^7$ См/м) и высоко-

температурного сверхпроводника (ВТСП) ($\sigma = 0,33 \cdot 10^6$ См/м) при $T = 300$ К, размещенные под углом $\Theta = 80^\circ$ относительно широкой стенки волновода. Угол Θ равнялся углу падения волноводной моды на образец, при этом вектор E -поля лежит в плоскости падения волны. Таким образом, выполнялось условие для измерения отражения p -поляризованной волны. Полученные кривые приведены на рис. 2.

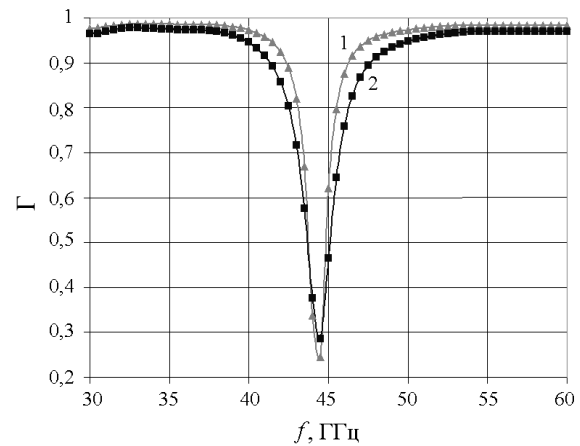


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения от частоты ($dl = 10$ мкм, $d = 4$ мм) при размещении плоских образцов (1 – медь, 2 – ВТСП) на наклонном фланце под углом $\Theta = 80^\circ$

Видно, что на зависимостях $\Gamma(f)$ имеет место ярко выраженный резонанс. Длина волны, при которой он наблюдается, соответствует значению $\lambda_b = 2d$, где λ_b – длина волны в волноводе. При этом условии происходит наиболее эффективное излучение ЭМ-поля в свободное пространство из микроканала.

Данный эффект усложняет измерение истинного коэффициента отражения от образца, в том числе снижает чувствительность измерения.

2. Численное исследование возможности снижения влияния микроканала на коэффициент отражения. Для уменьшения влияния микроканала на коэффициент отражения от наклонного образца необходимо устранить или значительно снизить резонансное излучение ЭМ-энергии из микроканала в свободное пространство. Это возможно выполнить либо путем поглощения ЭМ-волны, прошедшей в микроканал, либо путем отражения ее обратно в волновод. Очевидно, наиболее приемлемым вариантом могло бы быть использование контактного фланца. Однако ухудшение свойств прокладки из мягкого материала (бронза, индий) при многократном ее использовании, диффузия материала уплотнителя в исследуемые образцы, со временем значительно ухудшает свойства последних. Поглощение части ЭМ-энергии материалом уплотнителя, влияние его температурной зависимости проводимости

при низкотемпературных измерениях и температурные деформации при низкотемпературных измерениях исключают этот вариант.

Применение согласованной нагрузки для поглощения энергии в данном случае также не представляется возможным ввиду малости высоты микроканала. Кроме того, такой подход снижал бы чувствительность метода измерения.

В дроссельном фланце контакт между волноводами осуществляется через последовательный короткозамкнутый шлейф длиной $\lambda_v/4$, выполненный в форме канавок и углубления внутри фланца. В микроволновой технике наиболее часто используют три типа дроссельных фланцев: *A* – кольцо, *B* – полукольцо и *C* – сегмент [9].

Использование дроссельных фланцев типа *A* в нашем случае не представляется возможным, так как в результате сильного наклона фланца с целью реализации условия скользящего угла падения возникает область на фланце, где толщина стенок на порядок меньше глубины, на которую необходимо выполнить углубление дроссельной канавки.

В данной работе для снижения нежелательного эффекта микроканала было проведено исследование применения дроссельной канавки при использовании наклонного фланца типа *C* (сегмент). При этом дроссельная канавка в наклонном фланце с глубиной, равной четверти длины волны, располагалась на расстоянии четверти длины волны от края волновода. Вид структуры в сечении по широкой стенке волновода показан на рис. 1, б.

Величина $\lambda_v/4$ выбиралась равной 2,83 мм, что позволяло получить дроссельный эффект, т. е. электрический контакт на частоте $f_{\text{дрос}} = 40$ ГГц.

Численное моделирование позволило получить зависимость коэффициента отражения от частоты $\Gamma(f)$ для наклонного фланца с образцом ВТСП ($T = 300$ К) при различных длинах микроволновода d (рис. 3). На приведенных зависимостях имеется резонанс, природа которого аналогична кривым рис. 2.

В случае использования дроссельного фланца часть микроволновода значительно углубляется для создания дроссельного волновода длиной $\lambda_v/4$ (рис 1, б). Высота дроссельного волновода на несколько порядков превышает высоту микроволновода, поэтому дроссельный волновод хорошо согласован со стандартным волноводом. Это приводит к тому, что влияние неоднородности, возникающей в месте соединения волновода и микроканала, значительно снижается. Однако имеет место другая неоднородность, а именно, неоднородность, возникающая при изменении высоты микроволновода в связи с присутствием дроссельной канавки, т. е. наличие дроссельного фланца фактически уменьшает длину микровол-

новода. Поэтому длина волны, при которой наблюдается резонанс, соответствует значению $\lambda_v = 2d'$, где d' – длина микроволновода от конца дроссельной канавки до конца покрывающего микроканал образца (рис. 1, б). Величина

$$d' \approx d - \frac{\lambda_v}{4}, \text{ т. е. } d' < d. \text{ Это объясняет, почему}$$

при длине микроволновода $d = 6$ мм резонанс находится в высокочастотной области, а не в низкочастотной, как в случае отсутствия дроссельного фланца.

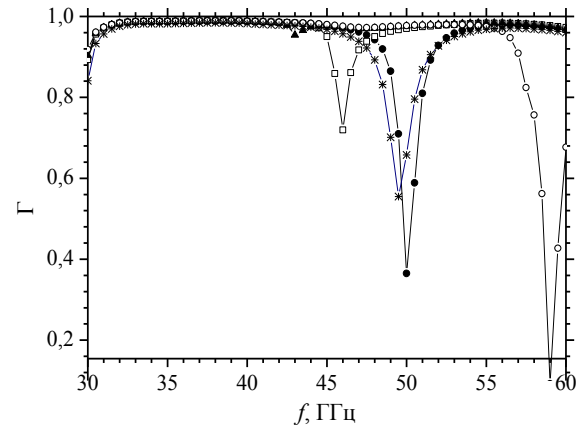


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения от частоты с использованием дроссельной канавки в наклонном фланце с микроканалом глубиной $dl = 10$ мкм при различной длине микроволновода d и образцов (медь, ВТСП ($T = 300$ К): —●— $d = 6,0$ мм (медь); —□— $d = 6,5$ мм (медь); —▲— $d = 7,0$ мм (медь); —○— $d = 8,0$ мм (медь); —*— $d = 6,0$ мм (ВТСП)), размещенных на фланце под углом $\Theta = 80^\circ$

При увеличении длины микроволновода частота, при которой наблюдается резонанс, смещается в область низких частот. По мере приближения резонансной частоты к частоте эффективной работы дроссельного фланца (40 ГГц) величина резонанса, т. е. величина потерь на излучение, обусловленная наличием микроволновода, снижается. При длине микроволновода $d = 8$ мм, которая соответствует положению резонанса при резонансной частоте, близкой к частоте эффективной работы дроссельного фланца (40 ГГц), резонанс исчезает.

Таким образом, в результате численных исследований установлено, что использование дроссельного фланца позволяет значительно снизить влияние микроканала на одной частоте $f_{\text{дрос}}$ и небольшой области около нее.

Дроссельный фланец обладает рядом недостатков. Во-первых, он позволяет снизить влияние микроканала только в относительно узкой полосе частот $f_{\text{дрос}} \pm 5\%$. Во-вторых, при проведении измерений необходимо, чтобы образец покрывал дроссельный фланец, иначе наличие открытого волновода приведет к значительным

радиационным потерям. Эти недостатки налагают значительные ограничения на размеры исследуемых образцов и частоты, на которых возможно проводить измерения.

Полученный результат указывает на необходимость поиска иного подхода, обеспечивающего снижение влияния микроканала в широкой полосе частот.

Коэффициент отражения Γ волны от нагрузки в любой линии передачи определяется по формуле [8]

$$\Gamma = \frac{Z_B - Z_H}{Z_B + Z_H}, \quad (1)$$

где Z_H – сопротивление нагрузки.

Для случая прямоугольного волновода с основным типом волны, если нагрузкой служит другой прямоугольный волновод, формула (1) принимает вид

$$\Gamma = \frac{b_B - b_H}{b_B + b_H}, \quad (2)$$

где b_B, b_H – размеры узкой стенки волноводов.

Размер узкой стенки микроволновода, с которым отождествляется микроканал, равен $b_B = dl = 10$ мкм. Если на фланце в микроканале (рис. 1, а) выполнить прямоугольную канавку с определенными глубиной и шириной перпендикулярно микроканалу (рис. 1, в), последний будет нагружен на волновод с другим волновым сопротивлением Z_H . В этом случае коэффициент отражения от такой неоднородности может быть весьма близким к 1. Например, при глубине канавки $l = 1,0$ мм коэффициент Γ будет равен 0,98.

Вид подобной структуры в сечении по широкой стенке волновода показан на рис. 1, в.

Расстояние от конца волновода до канавки выбрано наименьшим, что позволяет исключить создание резонансных условий между концом волновода и началом прямоугольной канавки.

Путем численного моделирования был исследован наклонный фланец при $\Theta = 80^\circ$ с микроканалом длиной $d = 4$ мм и глубиной $dl = 10$ мкм при использовании прямоугольной канавки глубиной 0,0; 0,2; 0,5; 1 и 2 мм; шириной 0,3 мм и длиной 5,2 мм.

Полученные зависимости $\Gamma(f)$ приведены на рис. 4, из которых видно, что с появлением прямоугольной канавки вместо одного резонанса возникает два, один из которых расположен в области низких частот, а другой – в области высоких частот. По мере увеличения глубины канавки резонанс в области высоких частот уменьшается, а резонанс в области низких частот смещается в область более низких частот, ближе к критической частоте.

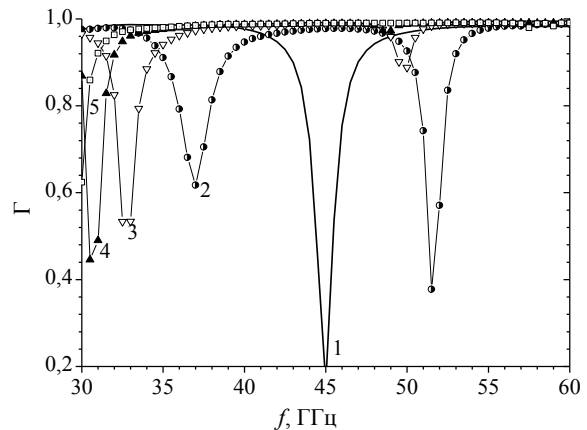


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения от частоты $\Gamma(f)$ в наклонном фланце ($\Theta = 80^\circ$) с медным образцом ($d = 4$ мм) при использовании канавки шириной $d_k = 0,3$ мм и различной глубиной $l = \text{var}$: 1 – $l = 0,0$ мм; 2 – $l = 0,2$ мм; 3 – $l = 0,5$ мм; 4 – $l = 1,0$ мм; 5 – $l = 2,0$ мм

Из рисунка видно, что при глубине прямоугольной канавки 2 мм коэффициент Γ в полосе частот 35-60 ГГц является практически частотно независимым. Это объясняется тем, что канавка, начиная с глубины 2 мм, создает скачок импеданса, достаточный для существенного снижения прохождения ЭМ-поля в микроканал. Дальнейшее увеличение глубины канавки ведет к несущественному улучшению характеристик, но потребует изготовления фланца большей толщины. Поэтому глубина прямоугольной канавки, равная 2 мм, является оптимальной в данном диапазоне частот. Таким образом, полученный результат указывает на возможность использования указанного подхода для снижения влияния микроканала.

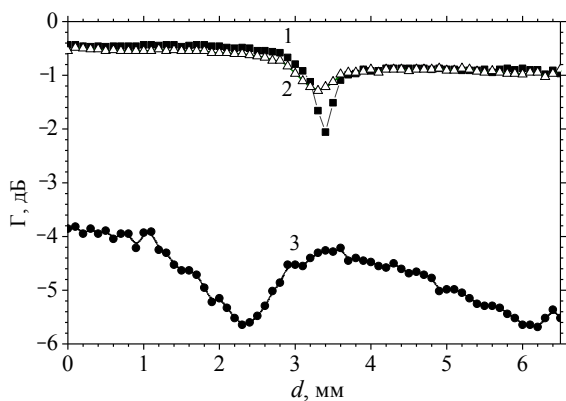
Рассмотренные подходы позволяют снизить эффект микроканала. Работа дроссельного фланца основана на электрическом контакте между поверхностями образца и фланца, который обеспечивается созданием определенных резонансных условий, препятствующих прохождению ЭМ-поля в микроканал. Такой контакт возможно осуществить только в небольшой области частот. Работа же прямоугольной канавки основана на скачке импеданса в микроканале, что позволяет обеспечить отражение поля от данного скачка без его дальнейшего прохождения в микроканал, что говорит об очевидном различии этих двух подходов.

3. Экспериментальная техника. Для проверки результатов численного анализа проведены экспериментальные исследования влияния микроканала на коэффициент отражения от образца, расположенного на наклонном фланце волновода. Для этого использовались образцы с различной проводимостью: медь, чугун, и объемный текстурованный образец ВТСП ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) толщи-

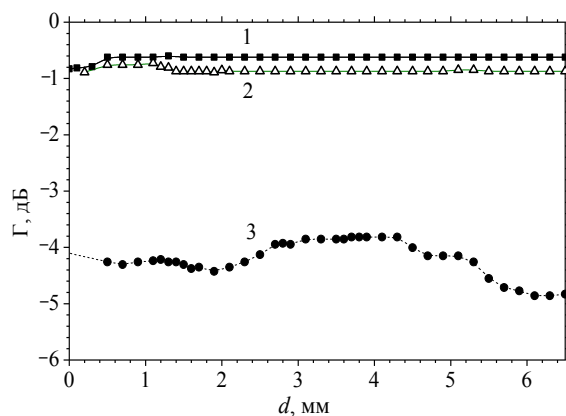
ной 15,5 мм. Измерения проводились при комнатной температуре (300 К). При этом измерялись зависимости значений коэффициента стоячей волны (КСВН) от расстояния l между образцом и фиксирующей пластиной на частоте 41 ГГц, которые затем пересчитывались в длины микроканала d как $d = l - 0,5$. Это связано с тем, что при $l < 0,5$ образец слегка открывает волновод, поэтому отрицательные значения d не являются длинами микроканала. Глубина микроканала лежит в пределах 0,1–10 мкм.

Измерения КСВН проводились с использованием панорамного измерителя КСВН и ослаблений P2-68.

4. Исследование влияния микроканала на коэффициент отражения. Проведены исследования зависимости КСВ микроканала от его длины d для трех образцов. Для удобства анализа значения КСВ пересчитаны в коэффициент отражения по мощности (рис. 5, а).



а)



б)

Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения Γ от ширины микроканала d при размещении на наклонном фланце образцов с различной проводимостью (1 – $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$ См/м (медь); 2 – $\sigma = 1,03 \cdot 10^7$ См/м (чугун); 3 – $\sigma = 0,33 \cdot 10^6$ См/м (ВТСП при $T = 300$ К)): а) – отсутствие прямоугольной канавки; б) – наличие прямоугольной канавки

Видно, что коэффициент отражения $\Gamma(d)$ для меди незначительно превышает значения, полученные для чугуна. Однако эта разница значительна между данными металлами и ВТСП. Такой характер поведения зависимостей $\Gamma(d)$ объясняется различным уровнем поглощения волны в материалах с различной проводимостью.

На кривых $\Gamma(d)$ наблюдается область минимума коэффициента отражения, которая носит резонансный характер. Как отмечалось выше, частота резонанса должна соответствовать длине микроволновода $d = \lambda_B/2$ и совпадать для всех образцов.

В этом случае длина микроволновода d_p , при которой ожидается резонанс, должна быть равной 5,15 мм. Однако в действительности для образцов меди длина микроволновода, при которой наблюдается резонанс, оказывается равной $d_p^{\text{медь}} = 3,4$ мм, для чугуна $d_p^{\text{чугун}} = 3,3$ мм и для ВТСП $d_p^{\text{ВТСП}} = 2,3$ мм, т. е. положение экспериментально наблюдаемых резонансов не согласуется с численным экспериментом, что впервые было отмечено еще в работе [7]. Более того, ВТСП-образец, в отличие от образцов меди и чугуна, имеет еще один минимум при $d = 6,1$ мм.

Из полученных результатов следует, что выбранная выше теоретическая модель является несовершенной. В работе [7] рассмотрена более точная модель, описывающая поле в микроканале, имеющем форму прямоугольного волновода, у которого хотя бы одна из стенок имеет конечную проводимость.

5. Модель волновода с импедансной стенкой. При конечной проводимости одной из стенок волновода при распространении основной моды H_{10} в прямоугольном волноводе появляется компонента E_z , для описания которой вводится дополнительная мода $E_{1\delta}$. Таким образом, в волноводе с импедансными стенками будет существовать комбинация двух мод H_{10} и $E_{1\delta}$ [10].

Коэффициент распространения волны в прямоугольном волноводе $\Gamma_{mn} = \alpha + i\beta$ определяется по формуле

$$\Gamma_{mn}^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - k^2, \quad (3)$$

где α, β – постоянные затухания и фазы; a, b – размеры широкой и узкой стенок волновода; k – постоянная распространения в вакууме, которая равна

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_0}, \quad (4)$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве. Если импеданс стенок волновода Z_s близок к 0, коэффициентом α можно пренебречь, тогда

$$\Gamma_{mm} = i\beta. \quad (5)$$

Индекс δ описывается выражением [10]

$$\delta = \sqrt{\frac{ib}{\xi ka^2}} \sqrt{Z_s + Z_s \left(\frac{k'a}{\pi}\right)^2}, \quad (6)$$

где

$$k' = \sqrt{k^2 - \frac{\pi^2}{a^2}}, \quad (7)$$

Z_s – нормированный поверхностный импеданс стенок волновода; ξ – нормированное характеристическое сопротивление среды ($\xi = 1$ для волновода с воздушным заполнением). Длина волны в волноводе для моды $E_{1\delta}$ определяется выражением

$$\lambda_b = \frac{2\pi}{\beta}. \quad (8)$$

Тогда, подставляя (6) в (3), получаем выражение для $\Gamma_{1\delta}$:

$$\Gamma_{1\delta} = \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 \left(\frac{ib}{ka^2}\right) Z_s \left(1 + \left(\frac{k'a}{\pi}\right)^2\right)} - k^2. \quad (9)$$

Из выражений (3), (5) и (8) путем несложных преобразований получена формула для нахождения длины волны в волноводе для моды $E_{1\delta}$:

$$\lambda_b = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{2}{\lambda_0}\right)^2 - \left(\frac{1}{a}\right)^2 - \left(\frac{\delta}{b}\right)^2}}, \quad (10)$$

где δ определяется из выражения (6), а Z_s – из выражения

$$Z_s = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma}}, \quad (11)$$

где σ – электрическая проводимость материала; μ – магнитная проницаемость среды, которая принимается равной 1. Выражение (10) показывает, что λ_b зависит от высоты и проводимости стенок волновода даже для основного типа волны в прямоугольном волноводе, что на примере микроволновода было впервые показано в работах [7, 11].

Используя полученную формулу, аналитически была вычислена зависимость λ_b как функция высоты волновода для трех значений проводимости одной из его стенок в сравнении со случаем, когда стенки волновода являются идеально проводящими (рис. 6).

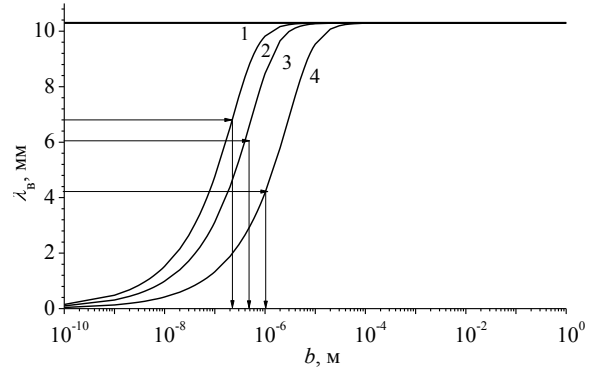


Рис. 6. Зависимость длины волны в волноводе λ_b для моды $E_{1\delta}$ от его высоты b при различной проводимости одной из его широких стенок: 1 – $\sigma = \text{infinity}$ (PEC); 2 – $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$ См/м (медь); 3 – $\sigma = 1,03 \cdot 10^7$ См/м (чугун); 4 – $\sigma = 0,33 \cdot 10^6$ См/м (ВТСП при $T = 300$ К)

Из зависимости $\lambda_b(b)$ следует, что при определенных, достаточно малых, значениях высоты волновода длина волны в волноводе для моды $E_{1\delta}$ будет уменьшаться, в пределе стремясь к 0. Чем меньше проводимость стенок волновода, тем при большей высоте будет проявляться отклонение длины волны от постоянного значения, определяемого для волновода со стандартной высотой.

Как говорилось ранее, микроканал в области, где его покрывает проводящий образец, является волноводом малой высоты, т. е. микроволноводом. В этом случае экспериментально наблюдаемая зависимость резонансной частоты от проводимости образца легко объясняется более точной теорией волноводов с импедансными стенками [10]. Для ВТСП-образца, проводимость которого является наименьшей, резонанс наиболее сильно смещен в область малой длины волны, так как для образца с наименьшей проводимостью отклонение частоты будет наиболее значительным.

Для других образцов, с большей проводимостью, резонансы смещены в область большей длины волны, при этом у чугуна резонанс смещен относительно резонанса медного образца в область меньшей длины волны, так как проводимость чугуна меньше проводимости меди.

На кривых рис. 6 горизонтальными стрелками отмечены значения λ_b , при которых создаются резонансные условия в микроволново-

де для каждого из исследуемых образцов. Вертикальными прямыми отмечены соответствующие значения высоты микроволновода или глубин микроканала, при которых при данной проводимости образца могут создаваться резонансные условия. Полученные таким образом высоты позволяют оценить глубину микроканала. Из оценки следует, что глубина микроканала составляет от 0,2 до 1 мкм.

Существенный разброс значений глубины микроканала, очевидно, связан с некоторым несоответствием используемой теоретической модели экспериментальной, в частности, с предположением, что только одна из стенок волновода имеет конечную проводимость. Разброс может быть обусловлен также отождествлением микроканала с однородным прямоугольным волноводом правильной формы, хотя размеры и форма поперечного сечения микроканала могут случайным образом изменяться вдоль его длины.

Из данных следует, что наличие микроканала оказывает существенное влияние на коэффициент отражения. Наличие резонанса на кривой коэффициента отражения и зависимость положения резонанса от проводимости образцов налагает существенные ограничения на размеры образцов и полосу частот, при которых возможно проводить измерения, исключаяющие наличие резонансов на кривой коэффициента отражения.

6. Экспериментальное исследование возможности снижения влияния микроканала на коэффициент отражения. Для проведения экспериментальных исследований на фланце была выполнена прямоугольная канавка глубиной $l = 2$ мм и шириной $d_k = 0,3$ мм (рис. 1), что реализует наилучшее снижение влияния микроканала на коэффициент отражения. Полученные при этом зависимости коэффициента отражения Γ от ширины микроволновода d для частоты 41 ГГц представлены на рис. 5, б.

Из рисунка видно, что резонансы, которые имели место при отсутствии прямоугольной канавки, не наблюдаются, как и зависимость Γ от длины микроволновода при исследовании образцов из меди и чугуна. Коэффициент Γ при исследовании ВТСП-образца также существенно не зависит от d по сравнению со случаем отсутствия прямоугольной канавки, а уровень излучения на резонансной частоте снизился. Так как ВТСП-образец является пористым материалом, его поверхность сама собой образует микроканалы, т. е. эффективная глубина микроканала в этом случае за счет образца будет больше. Увеличение глубины микроканала приводит к ухудшению работы канавки, что, исходя из выражения (2), связано с уменьшением импеданса, создаваемого канавкой.

Этим и обусловлены отличия в поведении зависимостей $\Gamma(d)$, полученных при использовании ВТСП-образца, от зависимостей, полученных при использовании металлических образцов.

При наличии прямоугольной канавки эффекты, связанные с прохождением микроволнового поля в микроканавку и излучением из нее при использовании образцов из меди и чугуна, не обнаруживались. При использовании ВТСП-образца при $T = 300$ К выявлено снижение указанных нежелательных эффектов более чем в 5 раз.

Выводы. Таким образом, показано, что наличие микроканала между плоским проводящим образцом и наклонным фланцем прямоугольного волновода приводит к искажению зависимости коэффициента отражения волны, несущей информацию о проводимости образца.

Для устранения или снижения нежелательного эффекта микроканала предложено использовать прямоугольную канавку в наклонном фланце, расположенную перпендикулярно микроканалу. Экспериментально показано, что предложенный подход позволяет устранить или значительно ослабить эффект микроканала.

Экспериментально получена зависимость длины волны основного типа в микроволноводе от проводимости его стенок.

Авторы благодарят сотрудников *Forschungszentrum Jülich (Germany)* *N. Klein* и *S. Vitusevich* за предоставленную возможность проведения численных исследований с использованием программы *CST Microwave Studio*.

1. *Hein M.* High-Temperature-Superconductor Thin Films at Microwave Frequencies. – New York: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1999. – 394 p.
2. *Черпак Н. Т., Величко А. В.* Высокотемпературные сверхпроводники в микроволновой технике // Зарубеж. радиоэлектрон. Успехи совр. радиоэлектрон. – 2000. – № 4. – С. 3–47.
3. *Klein N.* Electrodynamic properties of oxide superconductors. – Forschungszentrum Jülich, 1997. – 101 p. – (Bundesrepublik Deutschland, Institut für Schicht-und Ionentechnik.; Jul-3773).
4. *Feenstra B. J.* Low Energy Electrodynamics of High- T_c Superconductors: Proefschrift. – Groningen, 1997. – P. 162. – (University of Groningen, the Netherlands).
5. *Губин А. И., Лавринович А. А., Черпак Н. Т.* Микроволновое отражение ВТСП образцов в волноводных E -структурах // Письма в журн. техн. физики. – 2001. – 27, вып. 8. – С. 64–67.
6. *Черпак Н. Т., Губин А. И., Лавринович А. А.* Microwave reflectivity of the HTS oblique plate in a waveguide // Telecom. and Radio Engineering. – 1999. – 53, No. 11. – P. 39–41.
7. *Губин А. И.* Микроволновый отклик сверхпроводников при скользящих углах падения волны: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Харьков, 2007. – 19 с.
8. *Пименов Ю. В., Вольман В. И., Муравцов А. Д.* Техническая электродинамика. – М.: Радио и связь, 2002. – 536 с.
9. *Харвей А. Ф.* Техника сверхвысоких частот. В 2-х т. / Пер. с англ. под ред. В. И. Сушкевича. – М.: Сов. радио, 1965. – Т. 1. – 784 с.
10. *Левин Л.* Теория волноводов / Пер. с англ. под ред. В. И. Вольмана. – М.: Наука, 1981. – 310 с.

11. Cherpak N. T., Gubin A. I., Lavrinovich A. A. Extremely small-height rectangular waveguide with impedance walls // 37-rd European Microwave Conf. – Munich, 2007. – P. 1272–1274.

MICROWAVE REFLECTION
IN RECTANGULAR WAVEGUIDE
FROM CONDUCTIVE SAMPLES LOCATED
ON INCLINED FLANGE WITH MICROCHANNEL

S. I. Taraban, A. I. Gubin, A. A. Lavrinovich,
N. T. Cherpak

Microchannel effect in inclined flange to the reflection coefficient from samples with various conductivity located on flange has been investigated. By means of numeric modeling and experimental investigation decrease of microchannel effect by using rectangular groove in inclined flange has been shown.

Key words: microchannel, reflection coefficient, inclined flange, conductive samples, rectangular waveguide.

МІКРОХВИЛЬОВЕ ВІДБИТТЯ
У ПРЯМОКУТНОМУ ХВИЛЕВОДІ
ВІД ПРОВІДНИХ ЗРАЗКІВ, РОЗТАШОВАНИХ
У ПОХИЛОМУ ФЛАНЦІ З МІКРОКАНАЛОМ

С. І. Тарабан, О. І. Губин, О. А. Лавринович,
М. Т. Черпак

Досліджено вплив мікроканалу в похилому фланці прямокутного хвилевода на коефіцієнт відбиття від розташованих на ньому зразків із різною провідністю. Чисельним моделюванням та експериментальними дослідженнями у 6-мм діапазоні довжин хвиль показано зниження впливу мікроканалу на вимірюваний коефіцієнт відбиття при застосуванні прямокутної канавки в похилому фланці.

Ключові слова: мікроканал, коефіцієнт відбиття, похилий фланець, провідний зразок, прямокутний хвилевід.

Рукопись поступила 14 августа 2009 г.