

О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ КРИОГЕННОЙ РЕЗОНАНСНОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СИСТЕМЫ ИЗ МЕДИ, ЛЕГИРОВАННОЙ ИТТРИЕМ

В.А. Кутовой, А.И. Комир

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: kutovoy@kipt.kharkov.ua

Исследовано поверхностное сопротивление меди легированной иттрием, в областях нормального и аномального скин-эффекта в зависимости от частоты электромагнитного поля, температуры охлаждения, структуры материала. Показано, что иттрий формирует мелкозернистую, равноосную структуру в токопроводящем слое, придает меди пластичность, увеличивает ее прочностные свойства, уменьшает поверхностное сопротивление. Подтверждается возможность использования меди, легированной иттрием, как конструкционного материала для создания высокооборотных криогенных резонансных систем.

ВВЕДЕНИЕ

При разработке высокоэффективных криогенных резонансных высокочастотных систем используют сверхпроводники. Однако использование сверхпроводников при изготовлении криогенных высокочастотных систем затруднительно в связи с их дороговизной, сложностью обработки. Сверхпроводники эффективны только в узком диапазоне криогенных температур. Поэтому рассматриваются возможности изготовления высокоэффективных криогенных резонансных высокочастотных систем из несверхпроводящих металлов, например, из меди [1, 2]. Известно, что электропроводность меди, существенно зависит от наличия и распределения в ней примесей [3]. Сотые и тысячные доли процента примеси могут резко снижать ее тепло- и электропроводность. Вредное влияние легкоплавких примесей и эвтектик можно устранить путем введения специальных присадок, связывающих эти примеси в тугоплавкие химические соединения. При выборе таких присадок в первом приближении руководствуются диаграммами состояния, характеризующими взаимодействие примесей с различными элементами. Зная стехиометрический состав образующихся соединений при известном содержании примеси, можно примерно оценить необходимое количество нейтрализующей присадки [4]. Для снижения содержания газов в меди используются различные рафинирующие переплавы. Например, для удаления кислорода из меди, медь раскисляют при плавке в вакууме или ведут плавку меди в графитовом тигле. Рафинирование меди от газовых примесей и других "вредных" легкоплавких металлических примесей можно достичь путем легирования редкоземельными элементами. Образующиеся при этом тугоплавкие соединения редкоземельных металлов (РЗМ) с примесями частично всплывают при кристаллизации на поверхность слитка и удаляются при механической обработке. Некоторое количество таких соединений остается в структуре слитка в виде мелкодисперсных вторичных фаз. РЗМ являются хорошими модификаторами многих сплавов, они измельчают структуру матрицы. Малые добавки РЗМ в чистую медь незначительно изменяют ее электропроводность [5] и несколько повышают температуру рекристаллизации меди. Следует отметить, что основной эффект в

повышении температуры рекристаллизации достигается в области концентраций ниже 0,05 %. Дальнейшее повышение концентрации добавок не существенно влияет на рекристаллизацию.

Микролегированные иттрием медные сплавы известны давно. Так, например, в работах [6, 7] рассматривается влияние добавок иттрия на упругие и упругопластические свойства меди. Показано, что химически активные добавки не одинаково влияют на проводимость меди разных сортов. Иттрий среди других редкоземельных металлов, в области концентраций до 0,05 % по массе, не существенно изменяет электропроводность высококачественной меди при комнатной температуре, зато эффективно связывает примеси. Анализ литературных данных показывает, что на данное время не были проведены исследования поверхностного сопротивления микролегированных иттрием медных сплавов при криогенных температурах. Поэтому целесообразно исследовать поверхностное сопротивление микролегированных медных сплавов в зависимости от температуры охлаждения, процентного содержания иттрия в меди, структуры токопроводящего слоя, частоты электромагнитного поля.

1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ РЕЗОНАТОРОВ

Для проведения исследований по выбору материала для криогенных резонансных высокочастотных систем были выплавлены сплавы на основе меди марки МОб с добавками 0,01; 0,02 и 0,03 вес.% иттрия. Выплавка лабораторных партий слитков проводилась в электронно-лучевой установке с вакуумом $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па. В качестве исходной шихты использовалась медь марки МОб (ГОСТ 5657-70) и металлический иттрий (ТУ 484-708-72).

Плавку вели в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе с графитовой вставкой при ступенчатой вытяжке слитка. От полученного слитка отрезали прибыльные и донные части. После чего из слитков изготавливали резонаторы на токарном станке. Для уменьшения высоты микронеровностей рабочую поверхность резонаторов полировали сначала механическим способом, а потом электрохимическим способом по методике, описанной в работе [8]. После чего обработка токопроводящей поверхности резонатора соответствовала высоте неровностей профиля по

$R_a = 0,02$ мкм. Для снятия остаточных напряжений резонаторы отжигались. Из оставшегося слитка вырезали темплеты толщиной 10...15 мм для проб на химический и газовый анализы. Из результатов исследования было установлено, что усвоение иттрия находилось на уровне 75...90 %. Содержание газов в слитках $1 \cdot 10^{-3}$ для кислорода, $1 \cdot 10^{-4}$ для азота и водорода. Все темплеты после торцевания и травления в разбавленной кислоте HNO_3 проверялись на наличие макродефектов. Исследуемые образцы не содержали пор и трещин.

Для сравнения поверхностного сопротивления микролегированной меди с исходным материалом изготавливались резонаторы из бескислородной меди марки МОБ (ГОСТ 5657-70) и из бескислородной меди марки МОБ, переплавленной в вакуумной электронно-лучевой установке. Данные резонаторы изготавливались по такой же технологии, как и резонаторы из микролегированного медного сплава.

2. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Поверхностное сопротивление исследуемого материала при изменении температуры можно определить путем измерения собственной добротности объемного цилиндрического резонатора, изготовленного из исследуемого материала. Как известно, собственная добротность объемного резонатора определяется:

$$Q_0 = 2\pi f \frac{W}{P}, \quad (2.1)$$

где Q_0 – собственная добротность резонатора; W – энергия, запасенная в резонаторе, Дж; P – мощность, вводимая в резонатор, Вт.

Энергия, запасенная в резонаторе, выражается через амплитуду напряженности магнитного поля H в виде

$$W = \int_V \frac{\mu\mu_0 |H|^2}{2} dV, \quad (2.2)$$

где V – объем резонатора, m^3 ; μ – магнитная проницаемость диэлектрика, наполняющего резонатор, Гн/м; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м; H – вектор напряженности магнитного поля, А/м.

Если известны поля в резонаторе, то добротность может быть определена из соотношения [9]:

$$Q_0 = \frac{2\pi f \mu\mu_0 \int_V |H|^2 dV}{R \int_S |H|^2 dS} = \frac{G}{R}, \quad (2.3)$$

где G – геометрический фактор, зависящий только от размеров резонатора и типа колебаний в нем; R – поверхностное сопротивление, Ω .

Таким образом, измерив собственную добротность Q_0 резонатора при разных температурах, и зная его геометрический фактор G , можно вычислить поверхностное сопротивление металла из выражения:

$$R = \frac{G}{Q_0}. \quad (2.4)$$

Исследование поверхностного сопротивления меди марок МОБ, МОБВ и МОБВ+Y осуществлялось на цилиндрических резонаторах, у которых диаметр равен высоте, тип волны H_{111} , резонансная частота 5,25; 2,88 ГГц. Общий вид резонаторов приведен на Рис.1.

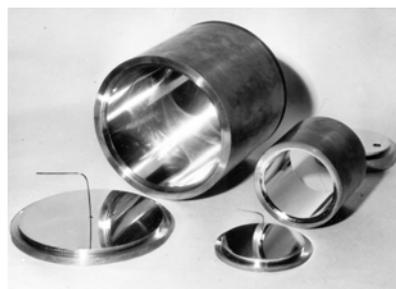


Рис.1. Общий вид резонаторов

Размеры внутренней полости цилиндрического резонатора определялись из уравнения:

$$\lambda_{0H_{111}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(3,41r)^2} + \frac{1}{4h^2}}}, \quad (2.5)$$

где $\lambda_{0H_{111}}$ – резонансная длина волны в резонаторе; тип волны H_{111} , м; r – радиус резонатора, м; h – высота резонатора, м.

Измерение поверхностного сопротивления налагает определенные требования на конструкцию резонатора, форму и размеры которого необходимо выбирать таким образом, чтобы высокочастотные токи рассматриваемого типа колебаний текли по внутренней части резонатора и не пересекали механические соединения в конструкции. Отсутствие потерь высокочастотной мощности в контактах между крышками и корпусом резонатора уменьшает погрешность измерений. Для измерения собственной добротности порядка 10^4 и выше использовался метод декремента затухания [10].

Блок-схема установки измерения собственной добротности резонатора приведена на Рис.2.

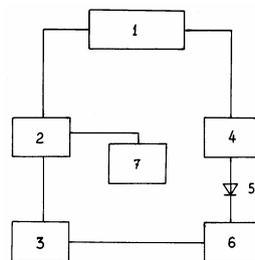


Рис.2. Блок-схема измерительной установки собственной добротности резонатора

Резонатор 1 возбуждается от высокочастотного генератора 2, работающего в режиме импульсной амплитудной модуляции. Амплитудная модуляция осуществляется прямоугольными импульсами, которые подаются от импульсного генератора 3. Сигнал, прошедший через резонатор 1, усиливается высокочастотным усилителем 4, детектируется детектором 5 и подается на запоминающий осциллограф 6, работающий в режиме ждущей развертки. Частота генератора измеряется частотомером 7. Относительная погрешность определения резонансной частоты с помощью частотомера, как правило, меньше 0,01 %. Определение времени затухания τ при визуальной обработке сигнала непосредственно по кривой на экране осциллографа с помощью масштабной сетки и калиброванных коэффициентов развертки не превышает 1 %.

При измерении добротности резонансной высокочастотной системы наибольший интерес представляет собственная добротность резонатора. Нагруженная добротность резонатора Q_n резко отличается от собственной добротности Q_0 . В устройстве для измерения добротности резонатор всегда связан непосредственно через линии связи с источником высокочастотной мощности и измерительной аппаратурой. Необходимо исключить влияние внешних цепей на собственную добротность резонатора. Для этого входной и выходной фидеры были изготовлены в виде коаксиальной линии, которая передвигалась в цилиндрических волноводах 3, закрепленных в верхней крышке 2 резонатора 1 (Рис.3).

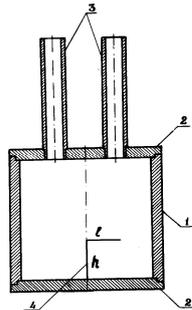


Рис.3. Схема цилиндрического резонатора

Высокочастотный усилитель 4 (см. Рис.2) обеспечивал усиление выходной высокочастотной мощности из резонатора в такой степени, что дало возможность использовать связь исследуемого резонатора с входным и выходным высокочастотными фидерами через запердельный волновод. Это привело к тому, что высокочастотные фидеры не вносили никаких возмущений в электромагнитное поле исследуемого резонатора. Величина погрешности измерения собственной добротности исследуемого резонатора не превышала 1%. Измерение собственной добротности исследуемого резонатора при различных температурах осуществлялось на одном и том же уровне высокочастотной мощности в измерительной цепи, чтобы исключить нелинейности измерительного высокочастотного тракта, состоящего из усилителя, детекторной головки и индикатора.

Изменяя температуру корпуса цилиндрического резонатора в диапазоне 293...4,2 К, было установлено, что в полосе частот резонансной кривой основного типа электромагнитных колебаний появляются близлежащие виды колебаний E_{010} и E_{011} , резонансная частота которых близка к резонансной частоте основного вида колебаний H_{111} [11]. Появление близлежащих видов колебаний в полосе частот основного вида колебаний приводит к ошибке измерения добротности резонатора. В связи с этим на основе известного метода возмущения резонатора, вызываемого металлическими иглами [12], была разработана методика подавления близлежащих видов колебаний к основному виду. С этой целью в резонатор вводится возмущающий элемент 4, Г-образной формы, у которого высота h равна $1/3...2$ высоты резонатора, а загнутая часть l имеет длину $2/3$ радиуса резонатора (см. Рис.3). При таком расположении возмущающего элемента в резонаторе вносимые возмущения будут максимальными для близлежащих видов колебаний и минимальными

для основного вида колебаний. Происходит изменение собственной частоты близлежащих видов колебаний, благодаря чему близлежащие виды колебаний уходят за пределы рабочей полосы основного вида колебания. Такая форма возмущающего элемента не нарушает энергетический баланс в резонаторе и не влияет на собственную добротность резонатора, так как объем стержня, из которого изготовлен возмущающий элемент, значительно меньше объема исследуемого резонатора, и стержень расположен перпендикулярно электрическим силовым линиям волны типа H_{111} . Возмущающий элемент может быть изготовлен из исследуемого материала, что исключает внесение примесей других металлов.

Охлаждение резонатора в диапазоне 293...4,2 К осуществлялось в вертикальном металлическом криостате КГ-100. Криостат был оснащен устройствами для регулирования и контроля высокочастотной мощности, вводимой в исследуемый резонатор, датчиками для измерения температуры исследуемого объекта и определения уровня жидкого гелия.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В начале исследования определяли, какие слитки микролегированной меди имеют лучшие электрофизические свойства. Для этого из приготовленных слитков вырезали образцы размером $0,2 \times 2 \times 100$ мм. Потом их отжигали в вакууме. После чего определяли относительное изменение сопротивления микролегированной меди на постоянном токе из выражения:

$$A = \frac{R_{293K}^*}{R_{4,2K}^*}, \quad (3.1)$$

где R_{293K}^* , $R_{4,2K}^*$ – удельное электрическое сопротивление при комнатной температуре и соответственно при температуре жидкого гелия, Ом/м. Измерения велись с помощью амперметра, измерительный ток $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ А, напряжение регистрировалось цифровым вольтметром. Результаты по остаточному сопротивлению меди приведены в Табл.1, где хорошо видно, что лучшей проводимостью при гелиевой температуре обладает медь с добавками 0,02 вес.% иттрия. Для сравнения также исследовалась проводимость при гелиевой температуре исходной меди марки МОб.

Таблица 1

Относительное изменение сопротивления на постоянном токе меди марок МОб и МОбВ+У

Сплав	МОб	МОбВ+0,01У	МОбВ+0,02У	МОбВ+0,03У
А	102,0	151,1	176,3	146,0

Зависимости механических характеристик меди марок МОбВ и МОбВ+0,02У от температуры отжига определялись при деформации плоских образцов сечением $0,5 \times 5$ мм с постоянной скоростью деформации $\varepsilon = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{с}^{-1}$. Для оценки технической пластичности материала использовался метод Эриксона (ГОСТ 10510-80). Результаты испытаний механических свойств микролегированного медного сплава меди марок МОбВ и МОбВ + 0,02У в зависимости от температуры отжига приведены в Табл. 2. Из результатов исследования видно, что после отжига прочностные свойства микролегированного сплава меди выше, чем меди марки МОбВ.

Для определения влияния структуры на поверхностное сопротивление материала некоторые резонаторы изготавливались из слитков, подвергшихся холодному прессованию. Были проведены экспериментальные исследования поверхностного сопротивления исходной меди марок МОБ и МОБВ + Y, дефор-

мированной и не деформированной до отжига и после отжига (Табл. 3-5), при частотах 5,25 и 2,88 ГГц. Из результатов исследования установлено, что самое низкое поверхностное сопротивление при гелиевой температуре после отжига имеет микролегированная медь с добавкой 0,02 вес.% иттрия.

Таблица 2

Прочностные свойства меди марок МОБВ и МОБВ + Y в зависимости от температуры отжига

Температура отжига, К	МОБ В			МОБВ+0,02Y		
	$\sigma_{\dot{A}}$ МПа	σ_{02} МПа	δ %	$\sigma_{\dot{A}}$ МПа	σ_{02} МПа	δ %
293	496	462	3,0	450	435	2,3
473	396	170	10,8	328	245	14,2
573	239	64	48,2	258	68	41,6
673	220	64	45,5	235	64	51,3
873	209	51	52,2	235	63	57,0
973	-----	-----	-----	223	56	57,0

Таблица 3

Экспериментальные исследования поверхностного сопротивления меди марок МОБ и МОБВ + Y после электрохимической полировки без отжига на частоте 5,25 ГГц

Материал	$R \cdot 10^3 \Omega$, T=293 К	$R \cdot 10^3 \Omega$, T=4,2 К	$R_{293K} / R_{4,2K}$	H_{μ} МПа	Обработка
МОБ	26,2	8,2	3,2	1150	не деформированная
МОБ	27,0	9,3	2,9	1210	деформированная
МОБВ + 0,02Y	29,0	6,0	4,8	1320	не деформированная
МОБВ + 0,02Y	25,0	7,9	3,3	1000	деформированная

Таблица 4

Экспериментальные исследования поверхностного сопротивления меди марок МОБ и МОБВ + Y после электрохимической полировки и отжига на частоте 5,25 ГГц

Материал	$R \cdot 10^3 \Omega$, T=293 К	$R \cdot 10^3 \Omega$, T=4,2 К	$R_{293K} / R_{4,2K}$	H_{μ} МПа	Обработка
МОБ	26,0	4,9	5,3	390	не деформированная
МОБ	26,3	5,7	4,6	390	деформированная
МОБВ + 0,02Y	25,0	4,4	5,6	350	не деформированная
МОБВ + 0,02Y	25,0	3,8	6,5	350	деформированная

Таблица 5

Результаты исследования поверхностного сопротивления деформированной меди марок МОБВ + 0,02Y и МОБ после электрохимической полировки, отжига на частоте 2,88 ГГц

Материал	$R \cdot 10^3 \Omega$, T=293 К	$R \cdot 10^3 \Omega$, T=4,2 К	$R_{293K} / R_{4,2K}$
МОБВ + 0,02Y	14,2	2,0	7,1
МОБ	16,0	3,2	5,0

Поверхностное сопротивление меди марки МОБВ+0,02Y после деформации при гелиевой температуре на частоте 5,25 ГГц уменьшилось в 6,5 раза, а на частоте 2,88 ГГц – в 7,1 раз по сравнению с поверхностным сопротивлением при комнатной температуре. Поверхностное сопротивление меди марки МОБ, деформированной при гелиевой температуре, увеличилось, по сравнению с медью марки МОБ не деформированной, в 1,16 раза (Табл.5). Очевидно, это связано со структурными изменениями токопроводящего слоя.

Частотная зависимость поверхностного сопротивления показывает, что с понижением частоты электромагнитного поля поверхностное сопротивление исследуемых материалов понижается, а отношение поверхностного сопротивления при комнатной температуре к поверхностному сопротивлению при температуре жидкого гелия растёт.

Из результатов исследования можно сделать вывод, что медь марки МОБВ + 0,02Y после электрохимической полировки, отжига и деформации имеет самое низкое поверхностное сопротивление при температуре жидкого гелия. Самое высокое поверхностное сопротивление при температуре жидкого гелия имеет медь марки МОБ после электрохимической полировки, отжига и деформации.

Изучая структуру меди марок МОБВ и МОБВ + 0,02 Y видим, что в литом состоянии она крупнозернистая с тонкими границами зерен, характерная для чистой меди (Рис.4, 5).

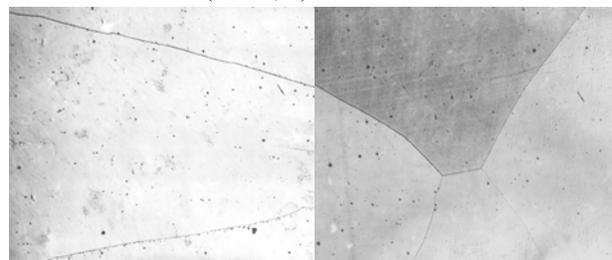


Рис.4. Структура меди МОБВ, $\times 100$

Рис.5. Структура меди Cu+0,02Y, $\times 100$

После отжига и холодного прессования существенных изменений в структуре меди марки МОБВ (Рис.6) не наблюдается, в то время как в меди марки МОБВ + 0,02Y появляется субзернистая структура, связанная с наличием в сплаве легирующей добавки иттрия (Рис.7).

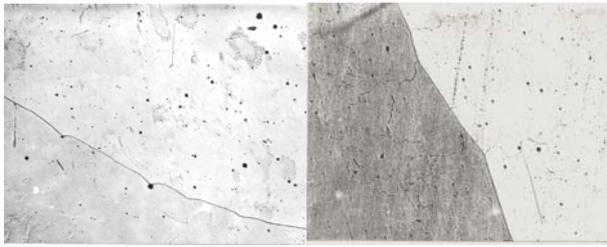


Рис.6. Структура меди МОБ, $\times 100$ Рис.7. Структура меди Cu + 0,02 Y, $\times 100$

Изучая рельеф токопроводящей поверхности цилиндрического резонатора, изготовленного из меди марки МОБ после холодного прессования, было установлено, что в поверхностном слое имеются трещины шириной 0,1...1 мкм (Рис.8). Появившиеся трещины в токопроводящем слое меди марки МОБ повышают поверхностное сопротивление при криогенных температурах.

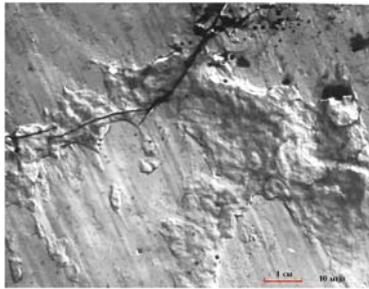


Рис.8. Структура токопроводящего слоя меди марки МОБ после деформации

Влияние температуры охлаждения на электропроводность меди исследовалось многими авторами и достаточно широко освещено в научной литературе. Однако не содержатся данные о влиянии температуры охлаждения на поверхностное сопротивление меди. Поэтому было проведено исследование поверхностного сопротивления меди марок МОБ, МОБВ и МОБВ + 0,02Y в области температур 100...4,2 К на частоте 5,25 ГГц (Рис.9).

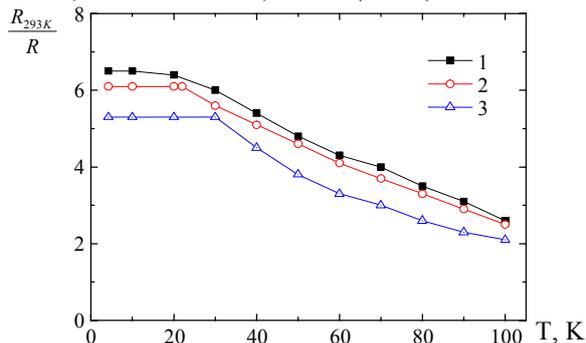


Рис.9. Относительное изменение поверхностного сопротивления меди марок МОБ, МОБВ, МОБВ+0,02Y в зависимости от температуры охлаждения на частоте 5,25 ГГц

Результаты исследования показывают, что с понижением температуры поверхностное сопротивление микролегированного медного сплава МОБВ + 0,02Y после холодной деформации, электрохимической полировки, отжига уменьшается до температуры $T \approx 10$ К (см. Рис.9, кривая 1), для меди марки МОБВ до температуры $T \approx 22$ К (см. Рис.9, кривая 2), а для меди марки МОБ не деформированной – до температуры $T \approx 30$ К (см. Рис.9, кривая 3). Неоднозначный

характер изменения $R(T)$, экспериментально обнаруженный в образцах для разных несверхпроводящих медных материалов при криогенных температурах, может быть объяснен структурой материала и различным количеством примесей в кристаллической решетке.

Неоднозначный характер изменения поверхностного сопротивления от температуры охлаждения можно использовать для параметрической стабильности резонансной системы.

Известно, что на стабильность резонансной частоты высокочастотной системы, работающей при криогенных температурах, оказывает влияние активная часть поверхностного импеданса [13]:

$$\Delta f = \frac{f_0 R_a^2}{8G^2}. \quad (3.2)$$

Поверхностное сопротивление несверхпроводящего металла в области аномального скин-эффекта при изменении температуры можно записать как

$$R_a = R(T) + R_{\text{ост.}}, \quad (3.3)$$

где $R_{\text{ост.}}$ – остаточное поверхностное сопротивление несверхпроводящего металла, Ω .

В выражение (3,2) подставим значение R_a из выражения (3.3). Получим

$$\Delta f = \frac{f_0 R(T) + R_{\text{ост.}}}{8G^2}. \quad (3.4)$$

Из выражения (3.4) следует, что резонансная система в диапазоне криогенных температур работает стабильно тогда, когда $R(T) = 0$. Это значит, что в некотором температурном диапазоне нет изменения геометрических размеров данной резонансной системы и остаточное сопротивление остается неизменным, $R_{\text{ост.}} = \text{const}$. Например, повышая температуру стенок резонансной высокочастотной системы, изготовленной из меди марки МОБВ, от 4,2 до 22 К резонансная частота высокочастотной системы остается постоянной, так как поверхностное сопротивление металла в данном диапазоне температур не изменяется (см. Рис.9, кривая 2). Коэффициент линейного расширения для меди марки МОБВ в данном интервале температур равен нулю [14], что дает возможность термостабилизировать электрофизические параметры резонансной высокочастотной системы. Таким образом, выбирая для изготовления криогенных резонансных высокочастотных систем материалы с высокой температурой Дебая и низким поверхностным сопротивлением, можно значительно уменьшить влияние нестабильности температуры на резонансную частоту.

Из приведенных результатов следует, что потери высокочастотной мощности в стенках криогенной резонансной высокочастотной системы, изготовленной из микролегированной меди, будут значительно ниже, чем у криогенной резонансной высокочастотной, изготовленной из меди марки МОБ. Медь, содержащая добавку 0,02 вес.% иттрия, проявляет более высокую прочность по сравнению с исходной медью и снижает значения микротвердости до минимума при температуре отжига 923 К. Добавка иттрия в медь существенно изменяет структуру сплава, повышает температуру рекристаллизации, меняет механизм пластической деформации, понижает поверхностное сопротивление при криогенных температурах и тем самым повышает КПД высокочастотной системы.

ВЫВОДЫ

Из приведенных результатов следует, что в резонансной высокочастотной системе, изготовленной из меди, с добавкой 0,02 вес. % иттрия, существенно изменяется структура металла, повышается температура рекристаллизации, меняется механизм пластической деформации, понижается поверхностное сопротивление при криогенных температурах.

Показано, что поверхностное сопротивление микролегированной меди при криогенной температуре ниже, чем поверхностное сопротивление исходной меди.

Обнаружено, что остаточное поверхностное сопротивление микролегированного медного сплава остается постоянным в диапазоне температур $T \leq 10$ К.

Металлографический анализ структуры микролегированного медного сплава показал, что после деформации в данном материале появляется субзернистая структура, способствующая уменьшению поверхностного сопротивления при криогенных температурах по сравнению с поверхностным сопротивлением при комнатной температуре.

Полученные результаты позволят установить взаимосвязь между изменением поверхностного сопротивления различных сортов несверхпроводящих металлов и диссипативными процессами, протекающими в токопроводящем слое при криогенных температурах.

Изучение поверхностного сопротивления несверхпроводящих металлов в областях нормального и аномального скин-эффекта, позволит получить более глубокое представление о возможности их использования как конструкционного материала для создания высокоэффективных криогенных резонансных систем.

Для продолжения развития данных работ целесообразно провести дальнейшие экспериментальные исследования резонансных высокочастотных систем при криогенных температурах, изготовленных из различных несверхпроводящих металлов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.А. Кутовой, А.А. Николаенко, П.И. Стоев. Исследование поверхностного сопротивления меди различной чистоты при температуре кипения

- жидкого азота в зависимости от обработки токопроводящего слоя // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»* (16). 2007, №4, с.38-43.
2. В.А. Кутовой, А.М. Егоров. Концепция создания криогенных ускоряющих структур ускорителя из меди // *ЖТФ*. 2008, т.78, в.3, с.86-90.
3. В.Н. Федоров, А.А. Журба. Влияние иттрия на свойства меди // *Металлы*. 1975, №1, с.166-169.
4. *Материалы в приборостроении и автоматике. Справочник* / Под ред. Ю.М. Пятина. М.: «Машиностроение», 1982. с.257-261.
5. Е.М. Савицкий, В.Ф. Терехова. *Металловедение редкоземельных металлов*. М.: «Наука», 1975. с.101-105.
6. Л.А. Воронцова, Л.П. Селезнев. Влияние РЗМ на свойства проводников меди // *МиТОМ*. 1977, №3, с.41-44.
7. И.М. Неклюдов, В.И. Сытин, В.Н. Воеводин, С.В. Шевченко. Влияние предварительных деформаций и отжигов на напряжение течения и модуль нормальной упругости микролегированной иттрием меди // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»* (13). 2003, №5, с.41-45.
8. С.Я. Грилихес. *Электрохимическое полирование*. Ленинград: «Машиностроение», 1976, с.207.
9. В.В. Никольский. *Теория электромагнитного поля*. М.: «Высшая школа», 1961, с.328-335.
10. В.А. Двинских, Ю.П. Науменко. Измерение добротности резонаторов СВЧ-диапазонов // *ПТЭ*. 1969, №1, с.5-12.
11. И.В. Лебедев. *Техника и приборы СВЧ*. М.: «Высшая школа», 1970, с.348.
12. Э.Л. Гинзтон. *Измерение на сантиметровых волнах* / Пер. с англ. под ред. Г.А. Ремеза. М.: «Иностранная литература», 1960, с.545-549.
13. Н.А. Семенов. *Техническая электродинамика*. М.: «Связь», 1973, с.480.
14. И.Г. Кожевников, Л.А. Новицкий. *Теплофизические свойства металлов при низких температурах* / Справочник. Издание 2-е. М.: «Машиностроение», 1982, с.31.

Статья поступила в редакцию 14.05.2012 г.

ON POSSIBILITY OF DEVELOPMENT OF HIGH-PERFORMANCE HIGH-FREQUENCY CRYOGENIC RESONANCE SYSTEM FROM YTTRIUM DOPED COPPER

V.A. Kutovoy, A.I. Komir

The surface resistance of yttrium doped copper in normal and anomalous skin effect region depending on electromagnetic field frequency, cooling temperature and structure of material has been investigated. It has been demonstrated that yttrium forms a fine grain, equiaxed structure in the current-conducting layer, plasticizes copper, enhances its strength characteristics, and reduces surface resistance. The possibility of using yttrium doped copper as a structural material for high-quality cryogenic resonance systems has been confirmed.

ПРО МОЖЛИВІСТЬ СТВОРЕННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНОЇ КРІОГЕННОЇ РЕЗОНАНСНОЇ ВИСОКЧАСТОТНОЇ СИСТЕМИ ІЗ МІДІ, ЛЕГОВАНОЇ ІТРИЄМ

В.О. Кутовой, А.І. Комір

Досліджено поверхневий опір міді, легованої ітрієм, в області нормального і аномального скин-ефекту в залежності від частоти електромагнітного поля, температури охолодження, структури матеріалу. Показано, що ітрій формує дрібнозернисту, рівноосну структуру в струмопровідному шарі, надає міді пластичність, збільшує її міцність, зменшує поверхневий опір. Підтверджується можливість використання міді, легованої ітрієм, як конструкційний матеріал для створення високоефективних криогенних резонансних систем.