

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕДИ В ОБЛАСТИ КЛАССИЧЕСКОГО И АНОМАЛЬНОГО СКИН-ЭФФЕКТА

В.А. Кутовой, А.М. Егоров

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

E-mail: kutovoy@ kipt.kharkov.ua

Проведены исследования поверхностного сопротивления меди в области классического и аномального скин-эффекта и определен коэффициент выигрыша по поверхностному сопротивлению, равный отношению поверхностного сопротивления меди при комнатной температуре к поверхностному сопротивлению при гелиевой температуре в зависимости от частоты электромагнитного поля. Показано, что коэффициент выигрыша имеет обратную степенную зависимость от частоты. Определены частоты, на которых коэффициент выигрыша для меди равен 10. Установлено, что добротность резонансной ВЧ-системы, изготовленной из меди, при температуре $T \geq 4,2$ К, может быть увеличена в 10 и более раз по сравнению с резонансной ВЧ-системой, работающей при комнатной температуре.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время идет разработка высокодобротных резонансных высокочастотных систем. Как известно, для достижения высокой эффективности резонансных систем используются сверхпроводники [1]. Однако, сверхпроводящие резонансные системы эффективны только при температурах 1,5...4,2 К, что требует больших затрат на криогенное оборудование, а высокая добротность сверхпроводящего резонатора порядка $10^8 \dots 10^{10}$ приводит к серьезным проблемам высокочастотного питания. В этом случае к высокочастотному генератору предъявляются значительные требования по стабильности частоты, что приводит к усложнению конструкции и увеличению себестоимости. Огромные трудности при использовании сверхпроводников связаны с возникновением эмиссионных токов и устранением условий возникновения термомагнитного пробоя, так как все это ведет к нестабильности параметров сверхпроводящих систем.

Полное или частичное устранение вышеперечисленных преград облегчило бы проблему создания криогенных резонансных высокочастотных систем.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При разработке и создании криогенных резонансных систем существенное место занимает проблема достижения высокой добротности при $T \geq 4,2$ К без применения сверхпроводимости с использованием несверхпроводящих металлов. В связи с этим возникает интерес к исследованиям поверхностного сопротивления несверхпроводящих металлов при криогенных температурах, с целью выяснения во сколько раз уменьшатся потери высокочастотной мощности в стенках резонансной высокочастотной системы, по сравнению с резонансной высокочастотной системой, работающей при комнатной температуре.

Так в работе [1] авторы предполагают, что при создании высокоэффективной криогенной резонанс-

ной высокочастотной системы, изготовленной из несверхпроводящего металла, наилучшие результаты могут быть достигнуты при использовании чистой меди с применением последовательного ряда технологий при обработке: это уменьшения шероховатости токопроводящей поверхности, снятия внутренних напряжений.

Задачей настоящей работы является проведение исследований поверхностного сопротивления меди в области классического и аномального скин-эффекта и определение коэффициента выигрыша по поверхностному сопротивлению, равному отношению поверхностного сопротивления меди при комнатной температуре к поверхностному сопротивлению при криогенной температуре в зависимости от частоты электромагнитного поля. Предпринята попытка определения оптимальной рабочей частоты криогенной резонансной высокочастотной системы, при которой затраты высокочастотной энергии будут наименьшими.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При расчете электродинамических характеристик резонансных высокочастотных систем особое место занимают вопросы, связанные с вычислением потерь высокочастотной мощности в стенках резонаторов. Известно, что диссипативные характеристики являются определяющими для таких величин, как шунтовое сопротивление и добротность резонансной системы. Если полная поверхность металла S , для которой справедливы граничные условия Леонтовича [2], то высокочастотная мощность, которая диссипируется в его стенках, определяется из уравнения:

$$P_1 = \frac{R}{2} \int \bar{H}^2 dS, \quad (1)$$

где P_1 – мощность потерь, Вт; R – поверхностное сопротивление, Ом; \bar{H} – вектор напряженности магнитного поля, А/м; S – площадь поверхности, м².

Из уравнения (1) следует, что ответственность за потери высокочастотной мощности есть поверхностное сопротивление R .

В области классического скин-эффекта поверхностное сопротивление несверхпроводящего металла R_k имеет вид:

$$R_k = \left(\frac{\omega \mu_0}{2\sigma} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где σ – удельная проводимость нормального металла на постоянном токе, См/м; ω – угловая частота, рад/с; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума Гн/м.

В области аномального скин-эффекта поверхностное сопротивление несверхпроводящего металла R_a определяется из выражения, [3].

$$R_a = \left(\frac{1}{b} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{l}{\sigma} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\omega \mu_0}{2} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (3)$$

где b – коэффициент, который характеризует отражение электронов проводимости от поверхности проводника; l – длина свободного пробега электрона, м.

Из выражений (2) и (3) следует, что потери высокочастотной мощности в стенках ускоряющей структуры ускорителя в области классического и аномального скин-эффекта, во многом зависят от частоты электромагнитного поля. Так, при классическом скин-эффекте потери пропорциональны $\omega^{\frac{1}{2}}$, а

при аномальном скин-эффекте – $\omega^{\frac{2}{3}}$. В связи с

этим возникает интерес к исследованиям поверхностного сопротивления несверхпроводящих металлов при криогенных температурах в зависимости от частоты электромагнитного поля. Для этого следует провести анализ коэффициента выигрыша η , который равен отношению поверхностного сопротивления несверхпроводящего металла при комнатной температуре R_{293} к поверхностному сопротивлению этого же металла при криогенных температурах R_T ,

$$\eta = \frac{R_{293}}{R_T}. \text{ Коэффициент } \eta \text{ зависит не только от ча-}$$

стоты электромагнитного поля, но и от технологии обработки, состава материала, температуры охлаждения. Поэтому необходимо провести целый комплекс исследований поверхностного сопротивления несверхпроводящих металлов в широком температурном интервале и частотном диапазоне. Это позволит определить, какой металл имеет минимальные потери высокочастотной мощности при криогенных температурах и во сколько раз увеличится добротность охлажденной резонансной высокочастотной системы, по сравнению с резонансной высокочастотной системой, работающей при комнатной температуре.

Определим коэффициент выигрыша η несверхпроводящих металлов в зависимости от частоты электромагнитного поля.

Используя выражения (2) и (3), получим уравнение для коэффициента выигрыша.

$$\eta = \frac{R_k}{R_a} = \frac{\left(\frac{\omega \mu_0}{2\sigma} \right)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{1}{b} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{l}{\sigma} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\omega \mu_0}{2} \right)^{\frac{2}{3}}}. \quad (4)$$

После преобразования уравнение (4) примет вид

$$\eta = \sqrt[6]{\frac{2}{\mu_0 \omega \sigma^3 \left(\frac{l}{b \sigma} \right)^2}}. \quad (5)$$

Решаем это уравнение относительно ω

$$\omega = \frac{2}{\eta^6 \sigma^3 \mu_0 \left(\frac{l}{b \sigma} \right)^2}. \quad (6)$$

Так как $\omega = 2\pi f$, получим уравнение для резонансной частоты, f .

$$f = \frac{1}{\eta^6 \pi \mu_0 \sigma^3 \left(\frac{l}{b \sigma} \right)^2}. \quad (7)$$

Анализируя уравнения (4,7), приходим к выводу, что для идеальных несверхпроводящих металлов, когда $\eta = 1$, частота электромагнитного поля f стремится к значению f_1 , при котором $R_k = R_a$. В случае, когда частота электромагнитного поля $f > f_1$ то поверхностное сопротивление $R_a > R_k$, а коэффициент выигрыша $\eta < 1$. При $\eta \rightarrow \infty$, частота $f \rightarrow 0$.

Рассмотрим зависимость коэффициента выигрыша η от частоты f . Для этого определим поверхностное сопротивление несверхпроводящего металла в области классического и аномального скин-эффекта, например, на частоте f_2 . В области классического скин-эффекта поверхностное сопротивление R_{k2} на частоте f_2 будет иметь вид:

$$R_{k2} = \left(\frac{\pi \cdot f_2 \cdot \mu_0}{\sigma} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

В области аномального скин-эффекта поверхностное сопротивление R_{a2} на частоте f_2 будет иметь вид:

$$R_{a2} = \left(\frac{1}{b} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{l}{\sigma} \right)^{\frac{1}{3}} (\pi \cdot f_2 \cdot \mu_0)^{\frac{2}{3}}. \quad (9)$$

Из уравнений (8), (9) определим σ , и $\frac{l}{\sigma}$.

$$\sigma = \frac{\pi \cdot f_2 \cdot \mu_0}{R_{k2}^2}, \quad (10)$$

$$\frac{l}{\sigma} = \frac{R_{a2}^3}{\frac{1}{b}(\eta \cdot f_2 \cdot \mu_0)^2} \quad (11)$$

Подставив значения этих величин в уравнение (7), получим;

$$f = \frac{R_{k2}^6 \left(\frac{1}{b}\right)^2 \pi^4 f_2^4 \mu_0^4}{\eta^6 \pi^4 f_2^3 \mu_0^4 \left(\frac{1}{b}\right)^2 R_{a2}^6} \quad (12)$$

После преобразования уравнение (12) примет вид:

$$f = \frac{f_2 R_{k2}^6}{\eta^6 R_{a2}^6} \quad (13)$$

так как $\frac{R_{k2}^6}{R_{a2}^6} = \eta_2^6$, выражение (13) примет вид:

$$\frac{f}{f_2} = \frac{\eta_2^6}{\eta^6} \quad (14)$$

Из уравнения (14) следует, что коэффициент выигрыша η имеет обратную степенную зависимость от частоты. Таким образом, измерив коэффициент выигрыша η исследуемого металла на частоте f , можно определить коэффициент выигрыша η_2 на частоте f_2 из выражения (15):

$$\eta_2 = \eta \cdot \sqrt[6]{\frac{f}{f_2}} \quad (15)$$

Из выражения (7) определим частотную зависимость коэффициента выигрыша для Cu при диффузном и зеркальном отражении электронов от поверхности (Табл.1).

Из результатов расчета следует, для того чтобы поверхностное сопротивление меди уменьшилось в 10 и более раз, при криогенной температуре, необходимо работать на частотах $f \leq 173$ МГц при диффузном отражении электронов проводимости от поверхности, а при зеркальном отражении – на частотах $f \leq 346$ МГц. Коэффициент выигрыша η будет равен единице на частотах $f = (173 \dots 346) \cdot 10^6$ МГц.

Таблица 1. Зависимость коэффициента выигрыша η для меди от частоты

R·10 ³ , Ом	T, К	η	f, МГц	b
3,5	293	10	173	диффузное
0,35	4,2		173	
4,9	293	10	346	
0,49	4,2		346	
3,5·10 ³	293	1	173·10 ⁶	диффузное
3,5·10 ³	4,2		173·10 ⁶	
4,9·10 ³	293	1	346·10 ⁶	
4,9·10 ³	4,2		346·10 ⁶	

В Табл.2 приведены результаты расчета поверхностного сопротивления меди в области классическо-

го и аномального скин-эффекта на частотах 150 МГц, 5·10³ МГц, определен коэффициент выигрыша η по поверхностному сопротивлению при зеркальном отражении электронов от поверхности металла, а также получены значения глубины проникновения высокочастотного поля в медь из выражений [3]

$$\delta_k = \left(\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma} \right), \quad (16)$$

где δ_k – глубина проникновения электромагнитного поля в нормальный металл в области классического скин-эффекта, м.

$$\delta_a = \left[\left(\frac{1}{b} \right) \left(\frac{l}{\sigma} \right) \left(\frac{2}{\omega \mu_0} \right) \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (17)$$

где δ_a – глубина проникновения электромагнитного поля в нормальный металл в области аномально-го скин-эффекта, м.

Таблица 2. Зависимость поверхностного сопротивления R, коэффициента выигрыша η , скин-слоя δ для меди от частоты

R·10 ³ , Ом	T, К	η	f, МГц	δ , мкм
3.2	293	11.42	150	5.39
0.28	4.2		150	0.47
19.0	293	6.33	5·10 ³	0.91
3.0	4.2		5·10 ³	0.15

Из приведенных результатов видно, что с увеличением частоты коэффициент выигрыша η и глубина проникновения электромагнитного поля в металл уменьшаются.

Таким образом, данные таблицы свидетельствуют о зависимости коэффициента выигрыша η не только от частоты колебаний электромагнитного поля, но и от материала и состояния токопроводящей поверхности.

Выше рассматривалось поверхностное сопротивление идеальных металлов с абсолютно гладкими поверхностями, на которых предполагалось выполнение условий Леонтовича. На реальных поверхностях обязательно присутствуют шероховатости, т.е. несовершенства, связанные с отклонением формы поверхности от плоской. Неровности могут быть обусловлены как корпускулярным строением материи, так и дефектами, имеющими различный характер. Некогерентное рассеяние электронов проводимости на таких областях оказывается причиной различного отличия поверхностного сопротивления в низкотемпературной области для реальных металлов по сравнению с идеальными. С практической точки зрения всегда важно знать, какой металл имеет минимальное поверхностное сопротивление при криогенных температурах. С этой целью нужно провести целый комплекс исследований на несверхпроводящих металлах.

Для сравнения поверхностного сопротивления реального металла с идеальным, при криогенных температурах, были проведены экспериментальные

исследования поверхностного сопротивления меди. Исследования проводились на цилиндрических резонаторах при комнатной и гелиевой температурах, резонансная частота $5 \cdot 10^3$ МГц.

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены цилиндрические резонаторы, у которых высота равнялась диаметру. Один резонатор был изготовлен из бескислородной меди марки МОб, (ГОСТ 5657-70), другой – из бескислородной меди марки МОб, переплавленной в вакуумной электронно-лучевой установке с добавлением металлического иттрия, (ТУ 484-708-72). Плавку вели в медный водоохлаждаемый кристаллизатор с графитовой вставкой при ступенчатой вытяжке слитка. От полученного слитка отрезали прибыльные и донные части. Изготавливались резонаторы на токарном станке алмазным резцом. Для уменьшения высоты микронеровностей рабочую поверхность резонаторов полировали электрохимически. После чего обработка токопроводящей поверхности резонатора соответствовала высоте неровностей профиля по $R_a = 0,02$ мкм. Как видим, шероховатость токопроводящего слоя значительно меньше глубины проникновения электромагнитного поля в металл при криогенных температурах (см. Табл.2). Для снятия остаточных напряжений резонаторы отжигались в вакууме [4].

Охлаждение резонатора до гелиевой температуры осуществлялось в вертикальном металлическом криостате, который оснащен устройствами для регулирования и контроля высокочастотной мощности, вводимой в исследуемый резонатор, датчиками для измерения температуры исследуемого объекта и определения уровня жидкого гелия. Результаты исследования приведены в табл. 3.

Таблица 3. Экспериментальные исследования поверхностного сопротивления меди при комнатной и гелиевой температурах

Металл	$R \cdot 10^3$, Ом	T, К	η	Тип волны
Cu+Y	21,0	293	6,56	H ₁₁₁
Cu+Y	3,2	4,2		H ₁₁₁
Cu	26,0	293	4,8	H ₁₁₁
Cu	5,4	4,2		H ₁₁₁

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 механических соединений в конструкции. Отсутствие потерь высокочастотной мощности в контактах между крышками и корпусом резонатора уменьшает погрешность измерений. Как известно, высокая добротность цилиндрического резонатора достигается при колебании типа H₁₁₁, [5]. Таким образом, измерив собственную добротность Q резонатора при разных температурах и зная его геометрический фактор G, можно вычислить поверхностное сопротивление металла из выражения

$$R = \frac{G}{Q}. \quad (18)$$

Для измерения собственной добротности резонатора, при гелиевой температуре, использовался метод декремента затухания, а добротность определялась из выражения

$$Q = 2\pi \cdot f \cdot \tau, \quad (19)$$

где τ – время, в течение которого амплитуда напряжения изменяется в e раз, с.

Чтобы исключить влияние внешних электрических цепей на собственную добротность резонатора, связь резонатора с генератором и индикатором осуществлялась через заградительный зонд, который был изготовлен в виде подвижной коаксиальной линии. Зонд перемещался в полости круглого волновода, соединенного с резонатором отверстием связи. Измерение 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.

Из результатов исследования следует, что при указанной технологии изготовления и обработки медного цилиндрического резонатора, поверхностное сопротивление меди с добавкой иттрия при комнатной температуре в 1,24 раза ниже, чем у меди марки МОб, а при гелиевой температуре – в 1,68 раза, причем значения поверхностного сопротивления меди с добавкой иттрия близко к расчетным.

ВЫВОДЫ

Для того, чтобы при криогенных температурах поверхностное сопротивление реальной меди приблизить к идеальной, необходимо уменьшить шероховатость токопроводящей поверхности. Высота микронеровностей должна быть меньше, чем глубина проникновения электромагнитного поля в металл. Для снятия остаточных напряженностей, которые возникают во время изготовления, изделие необходимо отжечь. Медь должна содержать как можно меньше примесей и иметь мелкозернистую структуру.

Для увеличения добротности криогенной резонансной высокочастотной системы, изготовленной из меди, в 10 и более раз необходимо, чтобы резонансная частота электромагнитного поля не превышала $f_p < 346$ МГц.

Из приведенных результатов следует, что в резонансной высокочастотной системе, изготовленной из меди, при криогенных температурах, можно уменьшить потери высокочастотной мощности, в 10 и более раз по сравнению с резонансной высокочастотной системой, работающей при комнатной температуре.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Кутовой, Л.А. Корниенко, В.И. Маханьков и др. Исследование поверхностного сопротивления меди при криогенных температурах в зависимости от обработки токопроводящей поверхности // *Вопросы атомной науки и техники, Серия: Общая и ядерная физика*. 1987, вып.2(8), с.30-33.
2. М.А. Леонтович. О приближенных граничных условиях для электромагнитного поля на поверхности хорошо проводимых тел // *Исследования по распространению радиоволн*. М.: «Изд-во АН СССР», 1948. с.5-12.
3. Ф.Ф. Менде, А.И. Спицын. *Поверхностный импеданс сверхпроводников*. Киев: «Наукова думка», 1985. с.20-36.
4. В.А. Кутовой, А.А. Николаенко, П.И. Стоев. Влияние термической обработки на поверхностный импеданс меди в области аномального скин-эффекта // *15-ая Международная конференция по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению*. Алушта, Крым, 10-15 июня, 2002.
5. А.Н. Диденко. *Сверхпроводящие волноводы и резонаторы*. М.: «Советское радио», 1973. с.61-67.

INVESTIGATION OF SURFACE RESISTANCE OF COPPER IN CLASSICAL AND ANOMALOUS SKIN-EFFECT REGION

V.A. Kutovoy, A.M. Yegorov

The surface resistance of copper in classical and anomalous skin-effect region has been investigated, and the surface resistance improvement factor equal to the ratio of the surface resistance of copper at room temperature to that of helium temperature, depending on the electromagnetic field frequency, has been determined. The improvement factor has been shown to have inverse power law dependence on frequency. The frequencies at which the improvement factor of copper equals 10 have been determined. It has been found that the quality factor of a resonance high-frequency system made of copper, operating at temperature $T \geq 4.2$ K can be increased 10 times or more as against a quality factor of a resonance high-frequency system operating at room temperature.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ОПОРУ МІДІ В ОБЛАСТІ КЛАСИЧНОГО ТА АНОМАЛЬНОГО СКІН-ЕФЕКТУ

В.О. Кутовой, О.М. Єгоров

Проведено дослідження поверхневого опору міді в області класичного та аномального скін-ефекту і знайдено коефіцієнт виграшу по поверхневому опору, який визначається як відношення поверхневого опору міді при кімнатній температурі до поверхневого опору при гелієвій температурі в залежності від частоти електромагнітного поля. Показано, що коефіцієнт виграшу має зворотну степінь в залежності від частоти. Визначено діапазон частот, на яких коефіцієнт виграшу для міді дорівнює 10. Установлено, що добротність резонансної ВЧ-системи виготовленої з міді при температурі $T \geq 4,2$ К може бути збільшена в 10 і більше разів у порівнянні з резонансною ВЧ-системою, котра працює при кімнатній температурі.