

РЕЗОНАНСНАЯ ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА ИЗ *Al-Be*-СПЛАВА ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В.А. Кутовой, А.А. Николаеко, П.И. Стоев

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

E-mail: kutovoy@kipt.kharkov.ua

Проведены исследования поверхностного сопротивления *Al*, *Be* и *Al-Be*-сплава в диапазоне температур 293...4,2 К при частоте 5,0 ГГц. Показано, что поверхностное сопротивление *Al-Be*-сплава при температуре жидкого азота ниже, чем поверхностное сопротивление каждого компонента в отдельности. Обнаружено, что поверхностное сопротивление *Al-Be*-сплава остается постоянным при $T \geq 50$ К. Анализ металлографической и электронно-микроскопической структур *Al-Be*-сплава показал, что после термомеханической обработки в поверхностном слое материала создается эвтектическая структура, которая характеризуется низкой плотностью дислокаций, приводящей к понижению поверхностного сопротивления сплава при криогенных температурах. Результаты исследования позволяют сделать вывод, что *Al-Be*-сплав может с успехом использоваться как конструкционный материал для создания криогенных резонансных высокочастотных систем, работающих в диапазоне температур 77,4...4,2 К.

Анализ литературных данных показывает, что для создания криогенных резонансных высокочастотных систем с высокой добротностью можно применять медь [1,2]. Наряду с медью перспективными материалами для изготовления резонансных высокочастотных систем являются алюминий, бериллий и сплавы на их основе. Как известно, характерными свойствами чистого и особо чистого алюминия являются: малый удельный вес, низкая температура плавления, высокая электропроводность и пластичность. Малая плотность алюминия дает возможность изготавливать криогенные резонансные системы небольшого веса. Высокая пластичность позволяет применять к алюминию все виды обработки давлением. Высокая электро- и теплопроводность при низких температурах дает большую перспективу для использования алюминия в криогенных резонансных высокочастотных системах [3].

Бериллий, как и алюминий, также является перспективным материалом для создания криогенных резонансных высокочастотных систем. В работах [4-6] отмечается, что удельное сопротивление на постоянном токе сверхчистого бериллия при охлаждении до гелиевой температуры уменьшается на два порядка в зависимости от концентрации примесей, а при температуре жидкого азота электросопротивление в 68 раз ниже, чем при комнатной температуре [7]. Бериллий в соединении с алюминием образует сплав, который уже при температуре жидкого азота на постоянном токе имеет низкое удельное сопротивление. Это позволяет предположить, что данный материал может успешно применяться для создания криогенных резонансных высокочастотных систем, работающих при температурах 77,4...4,2 К.

Как известно, электропроводность сплавов (замещения или внедрения) при любых температурах всегда значительно ниже проводимости исходных металлов [8]. Это является общим правилом для сплавов. Объясняется это тем, что при внедрении в пространственную решетку атомов растворенного жидкого металла, решетка исходного материала ис-

кажется, что приводит к увеличению рассеяния электронов на атомах замещения, вследствие чего проводимость падает. Электросопротивление на постоянном токе становится тем больше, чем дальше по своему составу сплав отстоит от чистых компонентов. При этом сопротивление сплава может в несколько раз превышать сопротивление исходных компонентов. Химическое взаимодействие компонентов также приводит к уменьшению электропроводности вследствие того, что валентные электроны могут переходить на низкоэнергетические оболочки, в связи с чем число электронов, участвующих в переносе электрического тока, уменьшается. На электрическое сопротивление в металлах при криогенных температурах также оказывают влияние примеси, которые могут ухудшить проводимость металла на порядок [9]. Из вышесказанного следует, что проводимость на постоянном токе при криогенных температурах *Al*, *Be*, и *Al-Be*-сплава хорошо изучена. Однако, экспериментальных данных по изучению изменения поверхностного сопротивления этих материалов на СВЧ при охлаждении их от комнатной до гелиевой температуры недостаточно. Определение поверхностного сопротивления *Al*, *Be*, и *Al-Be*-сплава при изменении температуры проводили путем измерения добротности цилиндрических резонаторов, у которых высота равнялась диаметру, тип волны H_{111} , частота электромагнитного поля 5,0 ГГц. Общий вид резонатора приведен на Рис.1. Для изготовления резонаторов использовали литые заготовки исследуемых материалов. С двух сторон резонатор 1 закрывается крышками 2.

К верхней крышке резонатора 1 крепятся патрубki 3, в которые вводятся элементы связи (фидеры). Один из них служит для ввода высокочастотной энергии в резонатор, а другой – для подключения к индикаторной цепи измерителя добротности.

Изменяя температуру корпуса цилиндрического резонатора в диапазоне 293...4,2 К, было установлено, что в полосе частот резонансной кривой основного типа колебаний появляются близлежащие виды

колебаний E_{010} и E_{011} , резонансная частота которых близка к резонансной частоте основного вида колебаний H_{111} [10].

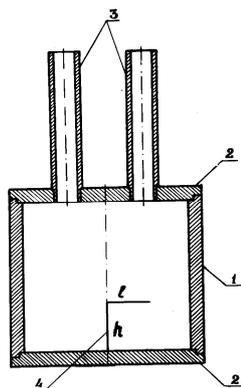


Рис.1. Общий вид резонатора

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 [11], была разработана методика подавления близлежащих к основному виду колебаний. С этой целью в резонатор вводится возмущающий элемент 4 Г-образной формы, у которого высота h равна $1/3 \dots 1/2$ высоты резонатора, а загнутая часть l имеет длину $2/3$ радиуса резонатора. 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 эти 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 в исследуемый. Толщина возмущающего стержня может быть минимальной, на сколько позволяют конструктивные возможности при его исполнении. Рабочую поверхность исследуемых резонаторов полировали до 10 класса обработки и отжигали. Резонатор из бериллия отжигали при температуре 1273 К в вакууме 10^{-4} мм рт.ст., резонатор из алюминия – при температуре 673 К в вакууме 10^{-5} мм рт.ст. в течение одного часа. Резонатор из $Al-Be$ -сплава отжигался при температуре 918 К в атмосфере воздуха в течение 10 часов. Охлаждение до комнатной температуры проводили вместе с печью.

Если известен тип электромагнитных колебаний в резонаторе, то поверхностное сопротивление R материала, из которого изготовлен резонатор, определяется из выражения:

$$R = \frac{G}{Q}, \quad (1)$$

где G – геометрический фактор резонатора; Q – собственная добротность резонатора при разных температурах.

Для измерения собственной добротности резонансной системы порядка 10^3 использовался резонансный метод [12]. Собственная добротность резонатора определялась из выражения:

$$Q_0 = \frac{f}{2\Delta f}, \quad (2)$$

где f – резонансная частота, Гц; Δf – полуширина полосы пропускания резонансной системы на уровне 0,7 по напряжению, Гц.

Для измерения собственной добротности порядка 10^4 и выше использовался метод декремента затухания, а добротность резонатора определялась из выражения:

$$Q_0 = 2\pi f\tau, \quad (3)$$

где τ – время, в течение которого амплитуда напряжения электромагнитных колебаний в резонаторе изменится в 2,7 раза.

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 тракты высокочастотной мощности были изготовлены в виде подвижной коаксиальной линии, которая передвигалась в патрубках 3 (см. Рис.1). Высокочастотный усилитель обеспечивал усиление выходной высокочастотной мощности из резонатора в такой степени, что дало возможность использовать связь исследуемого резонатора с входным и выходным высокочастотными вводами через запредельный волновод. Это привело к тому, что высокочастотные вводы не вносили никаких возмущений в электромагнитное поле исследуемого резонатора, а величина погрешности измерения собственной добротности исследуемого резонатора составляла 3%.

$Al-Be$ -сплав был получен методом индукционной плавки в среде инертного газа. Структура полученного сплава приведена на Рис.2.

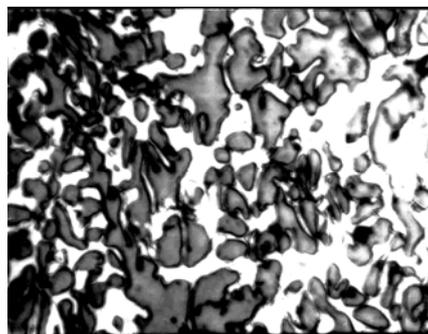


Рис.2. Структура $Al-Be$ -сплава, $\times 350$. Бериллиевая фаза – темные вкрапления, алюминий – белые

Металлографические исследования показали, что $Al-Be$ -сплав представляет собой эвтектическую

структуру, в которой алюминиевая фаза плотно расположена между кристаллами бериллия, имеет разную форму и образует конгломерат с бериллием.

Структура токопроводящего слоя резонатора из *Al-Be*-сплава до и после отжига изучалась на электронном микроскопе (см. Рис.2,3). Фольги на про- свет готовились по методике [13].

Электронно-микроскопический снимок показывает, что структура сплава после выплавки не упорядочена, имеет плотность дислокаций 10^{12}см^{-2} с размером ячеек 3...4 мкм (Рис.3). Отжиг сплава приводит к рафинированию бериллиевой компоненты и аннигиляции дислокаций. Часть дислокаций уходит на границу ячеек, их плотность понижается до 10^9см^{-2} , при этом ячейки *Al*, *Be*, и *Al-Be*-сплава возрастают до 6...8 мкм (Рис.4).

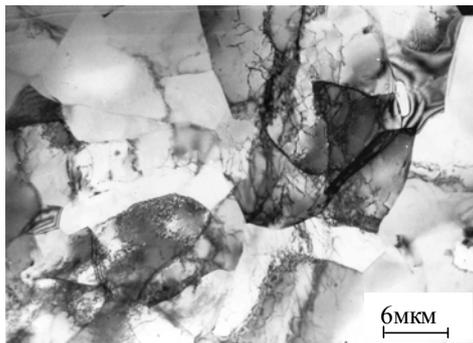


Рис.3. Структура *Al-Be*-сплава до отжига

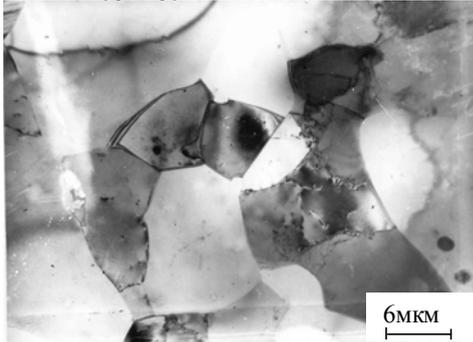


Рис.4. Структура *Al-Be*-сплава после отжига

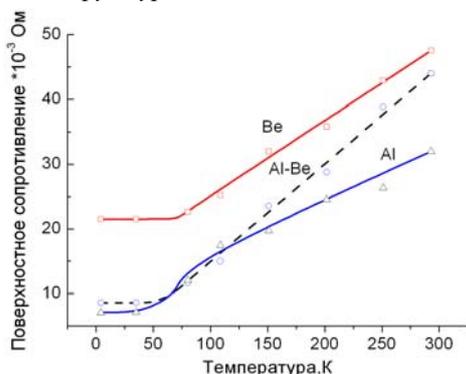


Рис.5. Зависимость поверхностного сопротивления *Al-Be*-сплава, алюминия и бериллия от температуры охлаждения

На Рис.5 приведены результаты измерения поверхностного сопротивления на частоте 5,0 ГГц алюминия, бериллия, алюминий-бериллиевого сплава в диапазоне температур 4,2...293 К. Из результатов эксперимента следует, что *Al-Be*-сплав имеет поверхностное сопротивление в области азотной температуры ниже, чем поверхностное сопротивление ис-

ходных компонентов (*Al*, *Be*) и остается постоянным в интервале температур 50...4,2 К. Для алюминия чистотой 99,95 вес.% поверхностное сопротивление становится минимальным при $T \approx 35$ К, а для бериллия чистотой 99,96 вес.% – при $T \approx 70$ К.

Из результатов исследования следует, что при комнатной температуре поверхностное сопротивление *Al-Be*-сплава ниже, чем поверхностное сопротивление *Be*, на 7% и выше поверхностного сопротивления *Al* на 22%. При понижении температуры поверхностное сопротивление *Al-Be*-сплава уменьшается быстрее, чем поверхностное сопротивление *Al* и *Be*. При $T \approx 110$ К поверхностное сопротивление *Al-Be*-сплава сравнивается с поверхностным сопротивлением *Al* и остается ниже, чем поверхностное сопротивление алюминия до $T \approx 63$ К. Это значит, что длина свободного пробега электронов проводимости в *Al-Be*-сплаве больше по сравнению с исходными материалами. Это обусловлено высокой дебаевской температурой, меньшей загрязненностью материала и низким электрон-фононным рассеянием. *Al-Be*-сплав переходит в область аномального скин-эффекта при $T \leq 150$ К [14], в то время как алюминий переходит в область аномального скин-эффекта при $T = 62$ К [15]. При охлаждении на частоте 5,0 ГГц поверхностное сопротивление *Al-Be*-сплава уменьшилось в 5,1 раза, алюминия чистотой 99,95 вес.% – в 4,7 раза, бериллия чистотой 99,96 вес.% – в 2,2 раза.

Анализ металлографической и электронно-микроскопической структур *Al-Be*-сплава показал, что существенное влияние на характеристики поверхностного сопротивления оказывают режимы механической обработки токопроводящего слоя и его отжиг.

Так для уменьшения поверхностного сопротивления необходимо выбрать такие режимы механической обработки, чтобы в токопроводящем слое материала формировалась эвтектическая структура, которая характеризовалась бы низкой плотностью дислокаций. Именно это, по нашему мнению, приводит к понижению поверхностного сопротивления сплава при криогенных температурах. Также можно предположить, что величина поверхностного сопротивления *Al-Be*-сплава может быть значительно уменьшена за счет применения *Al* и *Be* высокой чистоты в качестве исходных компонентов.

Таким образом, для существенного увеличения добротности и уменьшения потерь высокочастотной энергии в токопроводящем слое, а также повышения стабильности и постоянства электрофизических свойств резонансной системы при температуре 77,4 К необходимо применять *Al-Be*-сплав, это позволит резко сократить расходы дорогостоящих криогенных жидкостей (гелия, водорода).

Эксплуатационное преимущество *Al-Be*-сплава, как конструкционного материала, по сравнению с алюминием и бериллием, заключается в том, что его применение в криогенных высокочастотных резонансных системах позволяет существенно уменьшить потери вводимой мощности уже при температуре жидкого азота, так как *Al-Be*-сплав при этой температуре имеет поверхностное сопротивление ниже, чем поверхностное сопротивление алюминия и бериллия. Он также обладает постоянством коэффици-

ента линейного расширения в значительном интервале низких температур, имеет малую плотность и высокую упругость, высокую технологичность при изготовлении изделий заданной формы выдавливанием, прокаткой, механической обработкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изучена температурная зависимость поверхностного сопротивления алюминия, бериллия и *Al-Be*-сплава. Показано, что *Al-Be*-сплав, полученный из алюминия и бериллия технической чистоты, имеет поверхностное сопротивление на частоте 5,0 ГГц при температуре кипения жидкого азота ниже, чем поверхностное сопротивление исходных компонентов.

2. Показано, что существенное влияние на параметры поверхностного сопротивления *Al-Be*-сплава оказывает характер сформированной структуры в токопроводящем слое материала. Режимы механико-термической обработки, которые применяются при изготовлении криогенной резонансной высокочастотной системы, должны формировать в поверхностном слое материала эвтектическую структуру, для которой была бы характерна низкая плотность дислокаций.

3. Установлено, что *Al-Be*-сплав может успешно применяться в качестве конструкционного материала для изготовления резонансных высокочастотных систем, работающих в широком диапазоне температур 100...4,2 К.

ЛИТЕРАТУРА

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.53, в.3, с.371-375.
3. *Справочник по физико-техническим основам криогеники* / Под ред. М.П. Малкова. 3-е изд., перераб. М.: «Энергоатомиздат», 1985, с.150-156.
4. В.М. Амоненко, В.Е. Иванов, Г.Ф. Тихинский и др. Высокотемпературный полиморфизм бериллия // *Физика металлов и металловедение*. 1961, т.12, в.6, с.865-872.
5. А.А. Круглых, В.С. Павлов, Г.Ф. Тихинский. Рекристаллизация бериллия // *Физика металлов и металловедение*. 1960, т.9, в.1, с.148-151.
6. В.М. Амоненко, В.Е. Иванов, Г.Ф. Тихинский, В.А. Финкель. К вопросу о растворимости примесей в бериллии // *Физика металлов и металловедение*. 1962, т.14, в.1, с.128-130.
7. Г.Е. Плетенецкий, Г.С. Кошкарев, Г.Ф. Тихинский. Влияние размерного фактора на электропроводность бериллия при 77 К // *Физика металлов и металловедение*. 1979, т.48, в.4, с.889-891.
8. Б.Г. Лившиц. *Физические свойства металлов и сплавов*. М.: «Машгиз», 1956, с.185-210.
9. Б.Н. Александров. Остаточное электросопротивление как критерий чистоты металлов // *Физика конденсированного состояния*. 1970, в.VI, с.52-101.
10. И.В. Лебедев. *Техника и приборы СВЧ*. М.: «Высшая школа», 1970, 348 с.
11. Э.Л. Гинзтон. *Измерение на сантиметровых волнах* / Пер. с англ. под ред. Г.А. Ремеза. М.: «Иностранная литература», 1960, с.545-549.
12. В.А. Двинских, Ю.П. Науменко. Измерение добротности резонаторов СВЧ-диапазонов // *ПТЭ*. 1969, №1, с.5-12.
13. А.А. Корниенко, А.А. Николаенко, И.А. Тараненко. Рекристаллизация гидроэкструдированного бериллия // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1975, №1, с.53-57.
14. В.М. Ажажа, К.В. Ковтун, В.А. Кутовой, Н.А. Хижняк. Исследование поверхностного сопротивления *Al*, *Be* и *Al-Be*-сплава при низких температурах // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2000, №2, с.94-96.
15. Ф.Ф. Менде, А.И. Спицин. *Поверхностный импеданс сверхпроводников*. Киев: «Наукова думка», 1985, с.22-33.

Статья поступила в редакцию 13.01.2010 г.

HIGH-FREQUENCY CRYOGENIC RESONANCE *Al-Be*-SYSTEM

V.A. Kutovoy, A.A. Nikolayenko, P.I. Stoyev

This work presents investigations into surface resistance of *Al-Be* alloy and *Al*, *Be* in the temperature range of 293...4.2 K, at the frequency of 5.0 GHz. It was demonstrated that the surface resistance of *Al-Be* alloy at liquid nitrogen temperature is below the surface resistance of each separate component. It was found that the surface resistance of *Al-Be* alloy remains constant at $T \geq 50$ K. A metallographic and electron-microscopic structure analysis of *Al-Be* alloy demonstrated that after thermomechanical treatment a eutectic structure is formed in the outer layer of the material characterized by low dislocation density, which results in reduction of surface resistance of the alloy at cryogenic temperatures. The investigation results allow to make a conclusion that *Al-Be* alloy can be successfully employed as a structural material for high-frequency cryogenic resonance systems operating in the temperature range of 77,4...4,2 K.

РЕЗОНАНСНА ВИСОКОЧАСТОТНА СИСТЕМА ІЗ *Al-Be*-СПЛАВУ ПРИ КРИОГЕННИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В.О. Кутовой, А.А. Ніколаєнко, П.І. Стоєв

Проведено дослідження поверхневого опору *Al-Be*-сплаву та *Al*, *Be* у діапазоні температур 293...4,2 К при частоті 5,0 ГГц. Показано, що поверхневий опір *Al-Be*-сплаву при температурі рідкого азоту нижче, ніж поверхневий опір кожного компонента окремо. Виявлено, що поверхневий опір *Al-Be*-сплаву залишається постійним при $T \geq 50$ К. Аналіз металографічної і електронно-мікроскопічної структур *Al-Be*-сплаву показав, що після термомеханічної обробки в поверхневому шарі матеріалу створюється евтектична структура, що характеризується низькою щільністю дислокацій, що приводить до зниження поверхневого опору сплаву при криогенних температурах. Результати дослідження дозволяють зробити висновок, що *Al-Be*-сплав може з успіхом використовуватися як конструкційний матеріал для створення криогенних резонансних високочастотних систем, які працюють у діапазоні температур 77,4...4,2 К.