

БЕРИЛЛИЙ – КОНСТРУКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ КРИОГЕННЫХ РЕЗОНАНСНЫХ ВЧ-СИСТЕМ

Г.С. Кошкарев, В.А. Кутовой, А.А. Николаенко

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

E-mail: kutowoy@kipt.kharkov.ua

Представлены исследования зависимости поверхностного сопротивления бериллия при температурах: от комнатной до температуры жидкого азота, от степени деформации и отжига. Проведен анализ влияния структуры, плотности дислокаций и отжига на величину поверхностного сопротивления при температуре 77,2 К. Показано, что минимальное значение поверхностного сопротивления достигается при азотной температуре после отжига. Подтверждается возможность использования бериллия как конструкционного материала для создания высокодобротных криогенных резонансных систем.

В настоящее время в улучшении параметров резонансных высокочастотных систем, работающих при комнатной температуре, практически достигнут предел. Прежде всего, это относится к таким существенным характеристикам как КПД, абсолютные значения энергетических потерь, которые всегда возникают в резонансных системах. В связи с этим ведутся разработки высокодобротных резонансных ВЧ-систем, у которых необходимо уменьшить потери высокочастотной мощности в стенках резонансной системы в 10 и более раз, что приводит к увеличению КПД устройства и уменьшению потерь высокочастотной энергии. Это можно осуществить путем создания криогенных резонансных систем.

При разработке и создании криогенных резонансных систем существенное место занимает проблема достижения высокой добротности без применения сверхпроводимости с использованием несверхпроводящих металлов. Используя в качестве конструкционного материала несверхпроводящие материалы, можно значительно понизить финансовые затраты на изготовление криогенной резонансной высокочастотной системы. 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.

При разработке резонансных высокочастотных систем особое место занимают вопросы, связанные с потерями высокочастотной мощности в стенках резонансной системы. 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, то высокочастотная мощность, которая диссипируется в его стенках, определяется из уравнения:

$$P = \frac{1}{2} \int_S R |H|^2 dS, \quad (1)$$

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

Из уравнения (1) следует, что ответственным за потери высокочастотной мощности является поверхностное сопротивление R , а состояние токопроводящего слоя является решающим фактором при получении минимальных потерь высокочастотной мощности в стенках криогенной высокочастотной системы. Для обеспечения максимальной добротности и минимальных потерь высокочастотной мощности в резонансных высокочастотных системах при криогенных температурах необходимо, чтобы конструкционный металл был как можно чище, имел минимальное число дислокаций и был подвержен вакуумному отжигу, который позволит получить оптимальный размер зерна с минимумом напряжений внутри его.

Поэтому, для создания высокодобротных резонансных высокочастотных систем, которые работают при криогенных температурах, необходимы данные о взаимосвязи поверхностного сопротивления с чистотой материала и состоянием токопроводящего слоя. Поверхностное сопротивление является одной из наиболее важных физических величин, характеризующих взаимодействие электромагнитных полей с металлическими поверхностями, и зависит не только от физических и химических свойств исходного металла, но и технологии его обработки [1]. С понижением температуры образца уменьшается влияние электрон-фононных столкновений и доминирующим становится рассеяние электронов проводимости на примесях и вакансиях, а в случае поверхностных токов – на дефектах поверхности: шероховатостях, раковинах, включениях. Таким образом, любые технологические операции, которые уменьшают дефекты в поверхностном слое, понижают поверхностное сопротивление.

Так для уменьшения поверхностного сопротивления необходимо выбрать такие режимы механической обработки, чтобы в токопроводящем слое материала формировалась структура, которая имеет низкую плотность дислокаций. Именно это, по нашему мнению, приводит к понижению поверхностного сопротивления при криогенных температурах и снижению потерь высокочастотной мощности.

сти в стенках резонансной системы. Поэтому для создания высокочастотных резонансных высокочастотных систем, которые работают при криогенных температурах, необходимы данные о взаимосвязи поверхностного сопротивления с технологией обработки токопроводящего слоя, структурой и чистотой материала. Для исследований использовали бериллий чистотой 99,98 %, который подвергали механико-термической обработке для измельчения зерна и получения изотропного металла с размером зерна 20...30 мкм. Бериллий, по сравнению с другими металлами, имеет самую высокую дебаевскую температуру и обладает большим сечением рассеяния электронов проводимости на дислокациях [2].

Проводимость чистого бериллия на постоянном токе при комнатной и криогенной температурах хорошо изучена [3-6]. Из результатов исследования установлено, что на электросопротивление бериллия влияют точечные дефекты, дислокации и примеси. Точечные дефекты в бериллии исчезают при температурах ниже комнатных, а плотность дислокаций меняется при отжиге, начиная с температур 673...873 К [7]. Изучение зависимости поверхностного сопротивления чистого бериллия от температуры охлаждения отсутствует. В работе [8] были проведены высокочастотные исследования бериллия технической чистоты на частоте 5 ГГц в диапазоне температур 293...4,2 К. Результаты исследования подтверждают, что бериллий и сплавы на его основе являются перспективными для изготовления криогенных резонансных высокочастотных систем.

Определение поверхностного сопротивления Ве чистотой 99,98 % проводили методом, описанным в работе [9], путем измерения добротности цилиндрического резонатора при разной температуре охлаждения. В цилиндрическом резонаторе высота которого равнялась его диаметру, возбуждалась волна H_{111} -типа с частотой электромагнитного поля 5 ГГц.

Для изготовления резонатора использовали литую заготовку исследуемого материала, подвергшуюся 90 % деформации. Плотность дислокаций исходного материала внутри субзерен составляет $1,2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при размере субзерна $(3...5) \cdot 10^{-3} \text{ нм}$ (Рис.1).

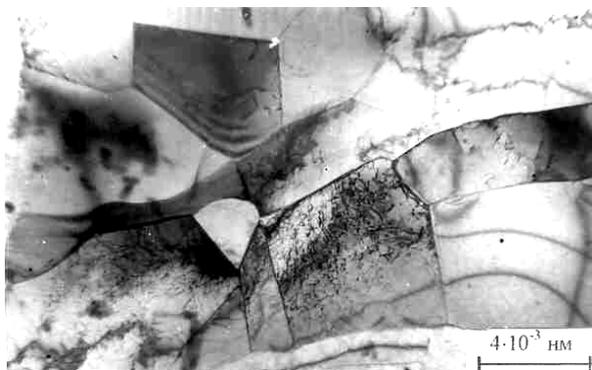


Рис.1

Из слитка вытачивали резонатор на токарном станке. После чего рабочую поверхность резонатора полировали до 10 класса и отжигали при температуре 893 К в течение 50 часов в вакуумной камере при давлении $2,6 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$. При отжиге происходит увеличение размера субзерен до $8 \cdot 10^{-3} \text{ нм}$ с заметным

уменьшением плотности дислокаций до $(1...2) \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$, при этом разориентация между субзернами составляет $4...5^\circ$ (Рис.2).

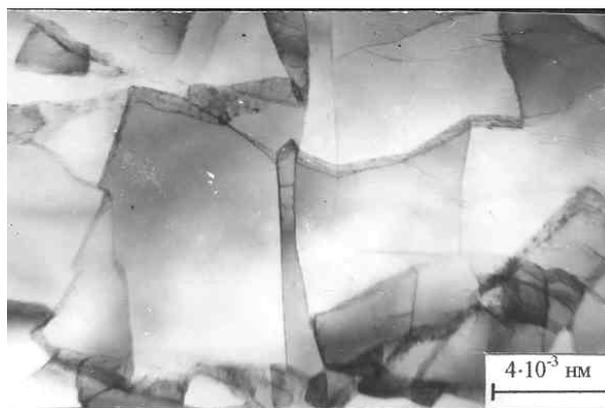


Рис.2

Изменяя температуру корпуса цилиндрического резонатора в диапазоне температур 293...77,2 К, измеряли добротность резонатора. Поверхностное сопротивление материала, из которого был изготовлен резонатор, определяли из выражения:

$$R = \frac{G}{Q}, \quad (2)$$

где G – геометрический фактор резонатора; Q – собственная добротность резонатора.

Результаты измерения приведены на Рис.3

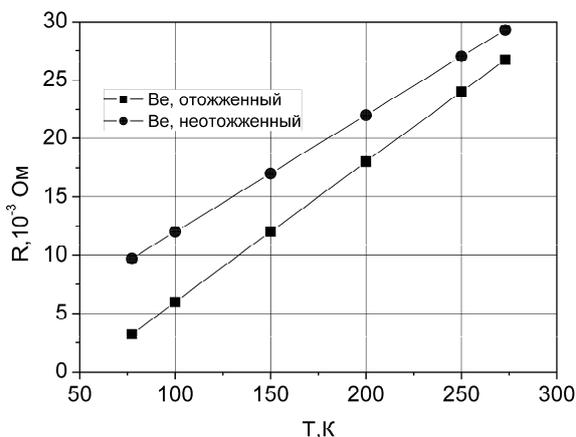


Рис.3

Из результатов проведенных исследований следует, что поверхностное сопротивление материала после деформации и отжига на частоте 5,0 ГГц понизилось при температуре жидкого азота в 8,4 раза по сравнению с поверхностным сопротивлением этого же материала при комнатной температуре, а неотожженного – в три раза.

Определим, во сколько раз уменьшатся потери высокочастотной мощности в криогенной резонансной системе, изготовленной из отожженного бериллия чистотой 99,98 % на частоте 150 МГц. Для этого используем выражение, приведенное в работе [10]:

$$\eta_2 = \eta \cdot \sqrt[6]{f/f_2}, \quad (3)$$

где η – отношение поверхностных сопротивлений исследуемого материала при комнатной и азотной температурах на частоте $f = 5 \text{ ГГц}$; η_2 – отношение поверхностных сопротивлений исследуемого мате-

риала при комнатной и азотной температурах на частоте $f_2 = 150$ МГц.

Из результата расчета следует, что на частоте 150 МГц потери высокочастотной мощности при температуре жидкого азота в резонансной криогенной системе, изготовленной из отожженного бериллия чистотой 99,98 %, можно уменьшить в 15 раз.

Поверхностное сопротивление неотоженного бериллия чистотой 99,98 % при комнатной температуре отличается от сопротивления бериллия такой же чистоты после отжига в 1,1 раза, при азотной температуре – в три раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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, в.2(8), с.30-33.
2. R.A. Brown. Electrical resistivity of dislocation in metals // *J. Phys. F*. 1977, v.7(7), p.1283-1295.
3. И.И. Папилов, П.И. Стоев, И.А. Тараненко. Электросопротивление гидрокструированного и отожженного бериллия // *Физика металлов и металловедение*. 1972, т.34, в.5, с.1022-1026.
4. И.И. Папилов, П.И. Стоев, И.А. Тараненко. Кинетика изменения электросопротивления деформированного бериллия при отжиге // *Физика металлов и металловедение*. 1983, т.35, в.6, с.1241-1247.
5. И.И. Папилов, Г.И. Волокита, А.С. Капчерин, П.И. Стоев. Возврат механических свойств, электросопротивления и микродеформации деформированного бериллия // *Известия вузов. «Цветная металлургия»*. 1974, №9, с.100-105.
6. Г.С. Кошкарев, Г.Е. Плетенецкий, А.И. Пикалов, Г.Ф. Тихинский. Свойства проволоки из высокочистого бериллия // *МиТОМ*. 1980, №6, с.57-59.
7. С.С. Авотин, П.И. Стоев, В.И. Терешин. Изменение электросопротивления бериллия при облучении ОКГ // *ЖЭТФ*. 1972, т.62, с.288.
8. В.А. Кутовой, А.А. Николаенко, П.И. Стоев. Резонансная высокочастотная система из Al-Be сплава при криогенных температурах // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования» (54)*. 2010, №3, с.9-12.
9. В.А. Кутовой, А.А. Николаенко, П.И. Стоев, Д.В. Виноградов. Изучение зависимости поверхностного импеданса меди от чистоты материала, деформации, температуры отжига при комнатной и азотной температурах // *XVII Международная конференция по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению, 4-9 сентября 2006. Алушта, Крым*, с.202.
10. В.А. Кутовой, А.М. Егоров. Концепция создания криогенных ускоряющих структур ускорителя из меди // *ЖТФ*. 2008, т.53, в.3, с.371-375.

Статья поступила в редакцию 15.10.2011 г.

BERYLLIUM – STRUCTURAL MATERIAL FOR HIGH-FREQUENCY CRYOGENIC RESONANCE SYSTEMS

G.S. Koshkarev, V.A. Kutovoy, A.A. Nikolayenko

This paper presents an investigation of the surface resistance of beryllium at the temperatures ranging from the room temperature up to the liquid nitrogen temperature, depending on the degrees of deformation and annealing. An analysis of the effect of structure, dislocation density, and annealing on the value of surface resistance at the temperature of 77.2 K has been conducted. It has been demonstrated that the minimum surface resistance value is reached at the nitrogen temperature after annealing. The possibility of using beryllium as a structural material for creation of high-quality cryogenic resonance systems has been confirmed.

БЕРИЛІЙ – КОНСТРУКЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ ДЛЯ КРІОГЕННИХ РЕЗОНАНСНИХ ВЧ-СИСТЕМ

Г.С. Кошкарьов, В.О. Кутовий, А.О. Ніколаєнко

Представлені дослідження поверхневого опору берилію від кімнатної температури до температури рідкого азоту в залежності від ступеня деформації та відпалу. Проведено аналіз впливу структури, щільності дислокацій і відпалу на величину поверхневого опору при температурі 77,2 К. Показано, що мінімальне значення поверхневого опору досягається при азотній температурі після відпалу. Підтверджується можливість використання берилію, як конструкційного матеріалу для створення високочастотних криогенних резонансних систем.