

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

**ВЫСШИЙ КОЛЛЕДЖ СВЯЗИ**

**ГИПРОСВЯЗЬ**

# **СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА СВЯЗИ**

**МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВЧ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЯ И МЕДИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Вопросы изучения глубокого охлаждения резонансных систем актуальны сегодня для решения прикладных задач и получения новых данных фундаментального характера о переносе заряда в высокочастотном поле. В частности, охлаждение приводит к повышению добротности и стабильности частоты, что связано со снижением поверхностного сопротивления материала, малым значением температурного коэффициента расширения, термостатирующими свойствами и малостью флуктуаций в области криогенных температур. Это обстоятельство имеет большое значение для систем космической связи. С другой стороны, перенос заряда в высокочастотном поле существенно неадекватен стационарному и сверхпроводящие резонаторные системы имеют конечную добротность, превышающую лишь на 5-6 порядков добротность обычных [1,2].

В данной работе выполнено исследование СВЧ свойств алюминия и меди различной физической частоты и совершенства в области криогенных температур в дециметровом диапазоне длин волн. Рассмотрено также воздействие сильного внешнего магнитного поля на резонансные характеристики системы. Малость диаметра рабочего отверстия сверхпроводящего соленоида гелиевого криостата и несообразность его с длиной волны в исследуемой области исключают возможность применения объемного резонатора, имеющего наибольшую добротность. Поэтому в эксперименте использовался коаксиальный короткозамкнутый резонатор, работающий на основном тоне. Система имеет внешний  $D$  и внутренний  $d$  диаметры 3.5 и 1.4 см соответственно; зазор  $a \approx 0.02$  см, формирующий сосредоточенную емкость; длину  $l \approx 9.2$  см. Таким образом соотношение  $\beta l \approx 2\pi/\lambda$  ( $\lambda$  - длина волны в вакууме) соответствовало величине  $\approx 45^\circ$ , что превышает оптимальное значение по величине фактора формы почти в два раза. Тем не менее, величина добротности при температуре  $T = 300$  К была на уровне 1750. Исследование активных потерь в условиях внешнего воздействия было проведено на установке, созданной на базе УИС-1, позволяющей производить температурные измерения в условиях автоматической стабилизации температуры [3].

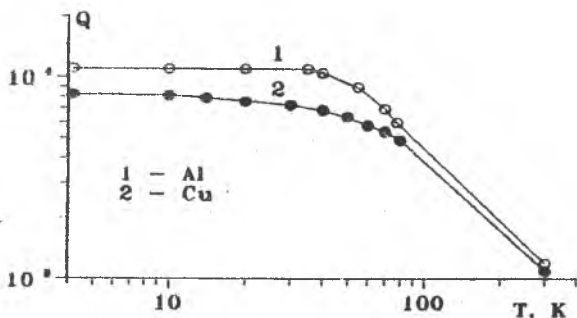


Рис.1. Зависимость добротности коаксиального резонатора от температуры.

Температура, как известно, является важнейшим параметром, определяющим длину свободного пробега и характер скинирования высокочастотного тока. Так если в области комнатных температур имеет место локальная связь между током и полем, то ниже 80 К глубина скин-эффекта сравнивается по порядку величины с длиной свободного пробега. В этом случае эффективно отбирают энергию поля только электроны, движущиеся параллельно поверхности металла и под малым углом к ней. Интересен процесс перехода от одного режима скинирования к другому для материалов с различным уровнем статических дефектов. Роль электрон-примесного рассеяния и его влияние на характер потерь высокочастотной мощности при заволакивании системы была исследована методом регистрации добротности резонаторов из чистого алюминия (величина остаточного сопротивления  $\rho \approx 4 \cdot 10^{-10}$  Ом·см) и технической меди ( $\rho \approx 10^{-7}$  Ом·см). Величина добротности резонатора из Al и Cu как функция температуры представлена на рис.1. Здесь имеет место характерная зависимость активных потерь алюминия с аномальным типом скин-эффекта, который в соответствии с концепцией неэффективности Пизшарда обеспечивает насыщенные характеристики с температурой. В то же время качественно иной характер зависимости для меди определяется большей величиной  $\rho$ , которой соответствует длина свободного пробега  $l \approx 10^{-5}$  см, что и определяет локальность связи в данном случае почти во всем диапазоне температур.

Величина циклотронной частоты электронов в поле  $\approx 70$  кЭ составляет  $\sim 10^{11} + 10^{12}$  сек<sup>-1</sup> и гораздо больше частоты СВЧ поля, составляющей  $\sim 10^9 + 10^{10}$  сек<sup>-1</sup> (частота столкновений электронов с дефектами при этом составляет  $10^9 + 10^{10}$  сек<sup>-1</sup>).

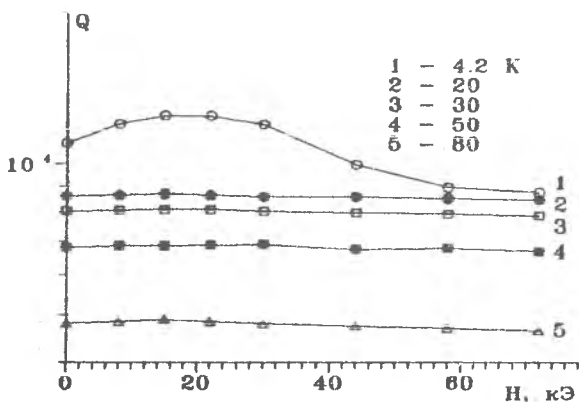


Рис.2. Добротность резонатора как функция магнитного поля для чистого Al.

Проводимость для электронов, находящихся в поперечном магнитном поле, должна таким образом зависеть от величины угла Холла. На рис.2 представлены зависимости добротности  $Q$  алюминиевого резонатора от магнитного поля при различных температурах. Интересно в этом отношении поведение  $Q$  при  $T = 4.2$  К с немонотонностью поверхностного сопротивления как функции магнитного поля. В этой связи удобно сравнить особенности высокочастотных потерь в поперечном магнитном поле в условиях различного соотношения между упругим рассеянием электронов на примесях и фононным, разрушающим фазовую когерентность электронных волн. Для этого была рассмотрена добротность резонаторов, изготовленных из алюминия, содержащего различный уровень примесей (Al1:  $\rho \approx 3 \cdot 10^{-9}$  Ом-см; Al2:  $1.6 \cdot 10^{-7}$  Ом-см; Al3:  $10^{-4}$  Ом-см). На рис.3 зависимость добротности от магнитного поля отражает весьма слабую чувствительность высокочастотной проводимости. При этом для образцов Al-2 и Al-3 поведение добротности системы качественно соответствует явлениям квантовой интерференции на самопересекающихся орбитах. В чистом образце не исключено существование геликондальных волн, которые возникают для более легких электронов третьей зоны гораздо раньше по магнитному полю. Если предположить, что геликоны на электронах третьей зоны интенсифицированы, а для второй зоны они подавлены, то этим можно частично объяснить немонотонность добротности резонатора из чистого алюминия при 4.2 К.

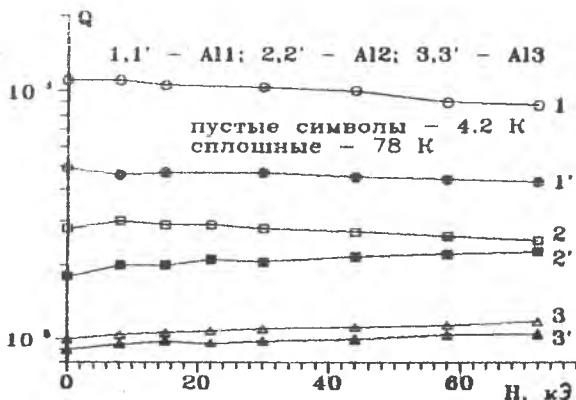


Рис.3. Полевые зависимости СВЧ-потерь в алюминии различной чистоты.

В целом следует отметить весьма слабую зависимость частотных резонансных свойств различных материалов, т.е. их поверхностного сопротивления, от физической и химической чистоты. Так в случае, когда статическое остаточное сопротивление изменяется на несколько порядков, добротность претерпевает изменение только на сотни процентов. Это дает возможность широкой взаимозаменяемости материалов, в том числе и в условиях сильного магнитного поля, и указывает на меньшую критичность омических потерь в резонирующих системах относительно чистоты материала и его закона дисперсии. Такое же явление, как положительность высокочастотной магнетопроводимости в сравнительно чистом материале требует дальнейшего анализа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Менде Ф.Ф., Бондаренко И.Н., Трубицын А.В. Сверхпроводящие и охлаждаемые резонансные системы. Киев: Наукова думка, 1976. 270 с.
2. Пренципау Н.Н., Бескорный А.П., Хвирченко И.Ф. Выбор материала для изготовления охлаждаемых резонансных систем. - Радиотехника, 1986, N79, с.101-108.
3. Demyanov S.E., Drozd A.A., Sobol V.R. et al. Decimeter wave impedance measurements of Y- and Ti based superconductors with and without an external magnetic field. - Bull.Mater.Sci., 1991, v.14, N3, p.807-810.