

**Е.А. Серов<sup>1</sup>, В.В. Паршин<sup>1</sup>, Г.М. Бубнов<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН

<sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет

им. Р.Е. Алексеева

## **Отражательная способность металлов в ММ диапазоне длин волн при криогенных температурах**

*Представлены результаты экспериментального исследования коэффициента зеркального отражения металлов при температурах от 4 до 300 К в диапазоне частот 150-250 ГГц. Исследованы зеркала из серебра, меди, золота, алюминия и бериллия, с различной структурой. Показано, что потери на отражение при криогенных температурах существенным образом (в разы) изменяются в зависимости от структуры поверхности образца и наличия примесей. Полученные данные позволяют рассчитывать тепловые шумы, создаваемые охлаждаемыми рефлекторами антенных систем телескопов, работающих в ММ и СубММ диапазонах длин волн.*

**Ключевые слова:** миллиметровые волны, поверхностное сопротивление, криогенные измерения, нормальные металлы, коэффициент отражения, квазиоптический резонатор

### **Введение**

Несмотря на активное развитие техники миллиметровых и субмиллиметровых волн, многие характеристики материалов остаются мало исследованными в этих диапазонах. В частности, речь идет о величине коэффициента зеркального отражения (КЗО) металлов, охлаждаемых до криогенных температур. Отражательная способность материалов в миллиметровом и, особенно, в терагерцовом диапазонах недостаточно исследована, поскольку отсутствуют общепринятые прецизионные методы измерения, а теоретический расчет затруднен влиянием большого количества неизвестных факторов (химическая чистота материалов, однородность, наличие выделенных направлений и, особенно, качество поверхности). Актуальность исследования КЗО металлов при криогенных температурах обусловлена развитием космических телескопов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с высокочувствительными, охлаждаемыми до 0.1 К, приёмниками («Planck», «Миллиметрон»). Важной информацией для расчёта чувствительности приемника, является величина потерь на отражение, т.е. коэффициент излучения отражателей охлаждаемого антенного тракта для заданных значений частоты и температуры.

Для измерения КЗО материалов применялся метод исследования основанный на использовании высокодобротных (с добротностью порядка миллиона и выше) резонаторов Фабри-Перо. В отличие от других существующих методов, для расчёта коэффициента отражения не требуется привлечения каких-либо «эталонных» образцов. Коэффициент отражения рассчитывается только из резонансных частот и ширин резонансной кривой резонатора. С учетом высокой добротности резонаторов это позволило получить достоверную и прецизионную информацию о материалах.

### **Теоретический расчет коэффициента зеркального отражения металлов**

В квазистатическом приближении металл может рассматриваться как среда с комплексной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 1 - 4\pi\sigma/\omega \cdot i$ , где  $\sigma$  – проводимость,  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота. В случае нормального падения плоской электромагнитной волны (ЭМВ)

на границу вакуум-металл (рис. 1) электрическое поле в металле будет затухать по экспоненциальному закону:  $\mathbf{E}, \mathbf{H} \sim \exp(iz/\delta - z/\delta)$ , где  $\delta$  – глубина скин-слоя:

$$\delta = c / \sqrt{2\pi\sigma\omega}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме. При этом КЗО металла может быть вычислен по формуле Хагена-Рубенса:

$$D = 1 - R = 2\sqrt{f/\sigma}, \quad (2)$$

где  $R$  – КЗО по мощности,  $D$  – доля энергии ЭМВ, теряемая при отражении за счет диссипации (омические потери в металле). Для наиболее отражающих металлов (серебро, медь, золото, алюминий, бериллий) расчет по формуле (2) дает величину потерь порядка  $10^{-3}$  при комнатной температуре на частоте 100 ГГц. Явление затухания электрического поля в металле, описываемое приведенными выше формулами называется нормальным скин-эффектом. При температурах выше комнатной для металлов с невысокой температурой Дебая можно приближенно считать, что  $\sigma \sim 1/T$ , где  $T$  – температура металла в Кельвинах. Тогда согласно формуле (2):  $D \sim \sqrt{f \cdot T}$ .

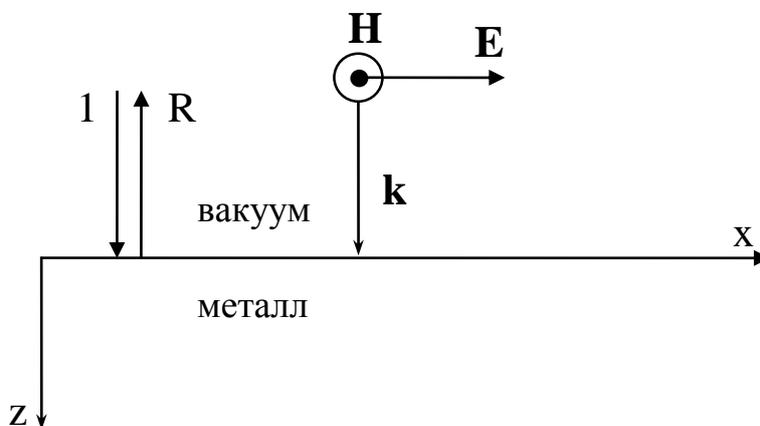


Рисунок 1.

Формула (2) применима, только если глубина скин-слоя  $\delta$  много больше, чем длина свободного пробега электронов в металле  $l$ . Очевидно, что данное условие будет нарушено при охлаждении образца, которое приведет к увеличению  $l$ . Вместо нормального скин-эффекта будет наблюдаться аномальный. Расчет КЗО в общем случае должен выполняться с использованием функции распределения электронов по импульсам и координатам, т.к. связь электрического поля  $\mathbf{E}$  и плотности тока  $\mathbf{j}$  не является локальной. При достижении условия  $l \gg \delta$  имеет место предельно аномальный скин-эффект, описанный в работах [1,2]. Его важной особенностью является отсутствие зависимости поверхностного импеданса металлов от

длины свободного пробега, а значит, и от проводимости металла. На рис. 2 приведен расчет температурной зависимости потерь энергии при нормальном отражении плоской ЭМВ от металла на частоте 230 ГГц. При расчете мы использовали приближение сферической ферми-поверхности металлов, пренебрегали током смещения и температурным размытием функции распределения электронов в металле.

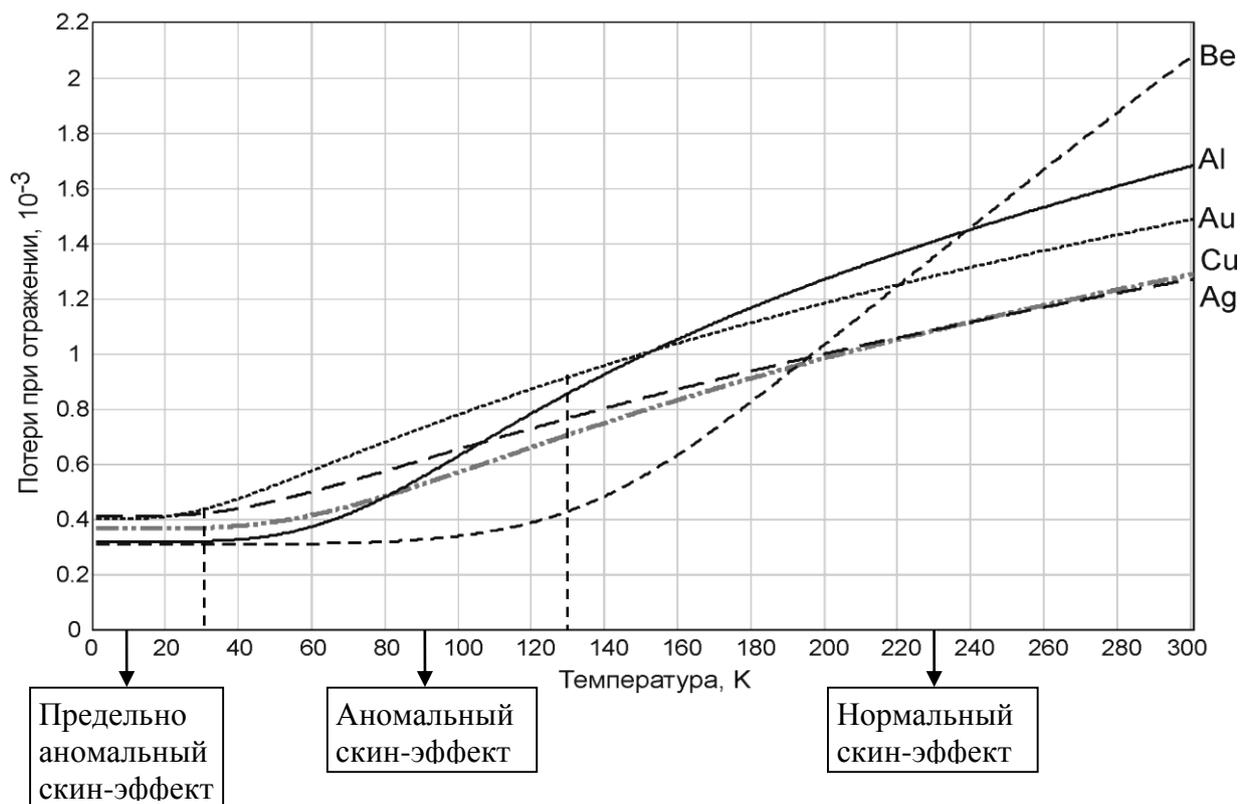


Рисунок 2.

На рис. 2 область температур 0-300 К условно разделена на 3 подобласти: область предельно аномального скин-эффекта (где  $l \gg \delta$ ), область аномального скин-эффекта ( $l \sim \delta$ ) и область нормального скин-эффекта ( $l \ll \delta$ ). В первой области потери практически не зависят от температуры. Более резкая по сравнению с другими металлами температурная зависимость КЗО бериллия объясняется высокой температурой Дебая:  $T_D$  (Be) = 1481 К.

Потери при отражении ЭМВ от реальных металлов и металлических покрытий при низких температурах могут существенно (в разы) отличаться от рассчитанных значений, приведенных на рис.2. Такое отличие обусловлено несколькими факторами: 1) влияние примесей; 2) отличие формы ферми-поверхности металлов от сферической; 3) дефектов поверхности (шероховатости); 4) наличие структуры поверхности; 5) малая толщина слоя металла (для металлизированных пленок). Учесть влияние всех вышеперечисленных факторов при расчете весьма затруднительно, некоторые характеристики для реальных образцов не известны (отличие структуры поверхности от «идеальной»). Поэтому КЗО реальных металлических образцов при криогенных температурах априори не известен и должен определяться экспериментально.

## Экспериментальные результаты

Измерения КЗО образцов выполнялось с применением высокочастотных резонаторов Фабри-Перо, помещенных в вакуумную камеру, снабженную системой контроля давления и температуры. В камеру помещается два резонатора, длина которых различается в 2 раза. Длинный резонатор, состоящий из двух сферических зеркал и тонкой диэлектрической пленки связи, используется как эталонный. Короткий резонатор состоит из одного сферического зеркала, полностью аналогичного двум сферическим зеркалам длинного резонатора, такой же пленки связи и плоского зеркала, в качестве которого выступает исследуемый образец. Образец соединен с охладителем с помощью медного хладопровода и максимально теплоизолирован от остальных частей резонатора. Он может охлаждаться до температуры 4 К. Потери при отражении от образца рассчитываются по формуле:

$$D_s = 4\pi L(\Delta f_1 - \Delta f_2) / c - P_{\text{coupl}}, \quad (3)$$

где  $L$  – длина короткого резонатора,  $\Delta f_1$  – ширина резонансного контура короткого резонатора,  $\Delta f_2$  – ширина резонансного контура длинного резонатора,  $P_{\text{coupl}}$  – потери на связь, которые измеряются независимо. Более подробное описание экспериментальной установки и методики измерения приведено в работе [3].

На рис. 3 приведены экспериментально полученные зависимости потерь при отражении пяти образцов, приведенные к частоте 230 ГГц (измерения проводились на различных частотах в диапазоне 150-250 ГГц, получаемые зависимости пересчитывались к одной частоте и усреднялись). Для данного диапазона частот подобные измерения впервые были выполнены в нашей лаборатории. Экспериментальная ошибка приведенных данных составляет около 5% вблизи комнатной температуры и около 10% вблизи 4 К. Линиями показана эмпирически подобранная аппроксимация экспериментальных зависимостей. Из сравнения рис. 2 и рис. 3 следует, что потери всех образцов при криогенных температурах превышают расчетные. Наибольшее различие наблюдается для технически чистого бериллия, что объясняется большим содержанием примесей. Фактически для этого образца вместо аномального скин-эффекта наблюдается выход потерь на постоянное значение, определяемое остаточным удельным сопротивлением по постоянному току. Наименьшие потери наблюдаются у высокочистой монокристаллической меди после отжига в атмосфере водорода при  $T = 800^\circ\text{C}$  (около  $4.4 \times 10^{-4}$  при 4 К, что на 20% выше расчетного значения). Также достаточно низкие потери наблюдаются у гальванического золотого покрытия и высокочистого алюминия. Полученные результаты позволяют определить реальные границы температур для охлаждения рефлекторов антенн радиотелескопов наземного и спутникового базирования, в том числе для российского космического проекта «Миллиметр».

Еще одно применение полученных результатов – оценка возможности повышения чувствительности резонаторного спектрометра, применяемого для исследования спектров атмосферных молекул [4] за счет охлаждения зеркал резонатора. На основе полученных данных можно рассчитать, что при использовании зеркал из высокочистой меди, охлаждаемых до температуры 20 К можно повысить добротность резонатора в 2.4 раза (при использовании пленки связи из тефлона толщиной 4 мкм), во столько же раз вырастет и чувствительность

спектрометра. Недостатком подобного решения является необходимость изолировать охлаждаемые зеркала от исследуемой газовой среды, что технически сложно и неизбежно приведет к возникновению дополнительных потерь в резонаторе.

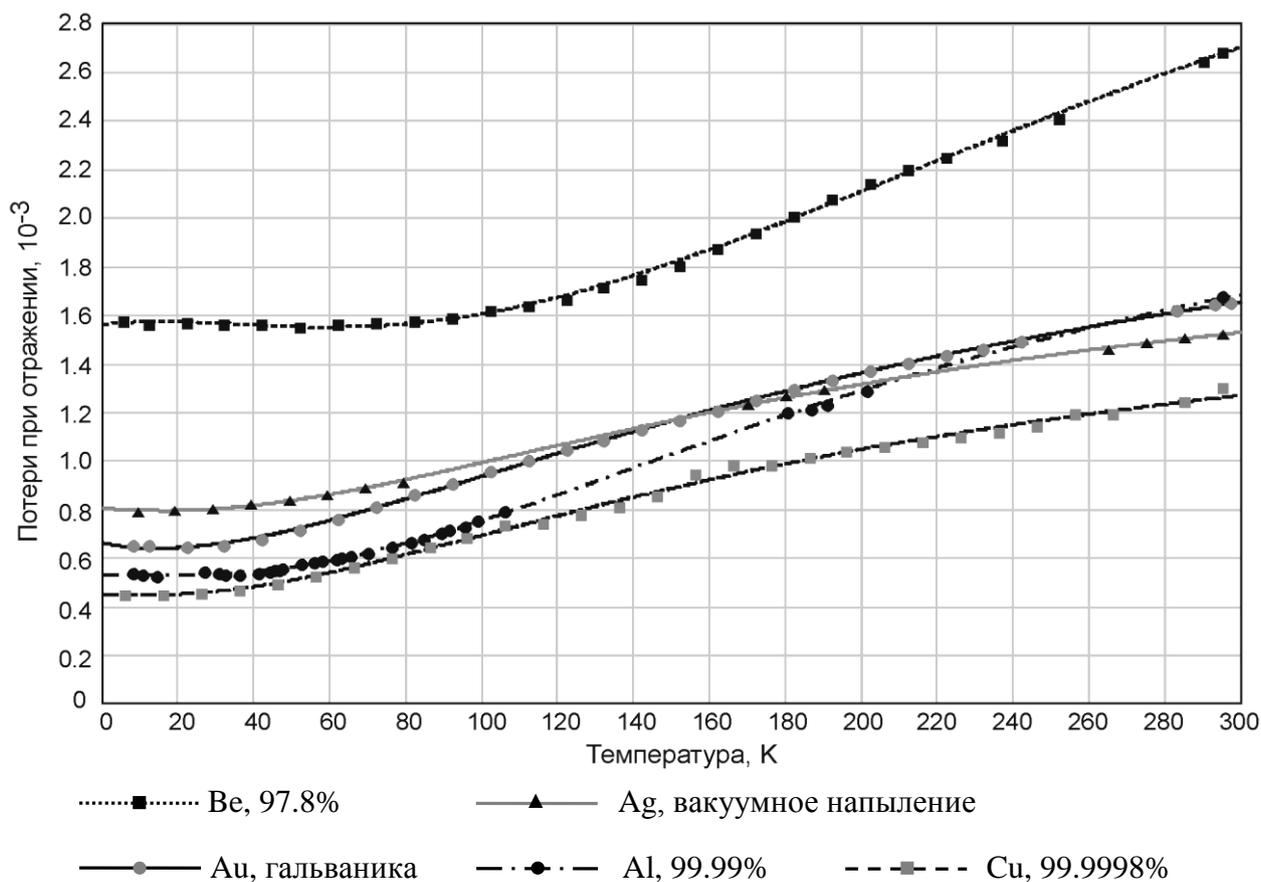


Рисунок 3.

Данная работа поддержана грантом Президента РФ для государственной поддержки молодых ученых № МК-6696.2015.2.

#### Библиографический список

1. Лифшиц Е.М. Физическая кинетика (серия «Теоретическая физика», т.10) / Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский // – Москва: Наука. – 1979. – С.436-446.
2. Абрикосов А.А. Основы теории металлов / А.А. Абрикосов // – Москва: Наука. – 1987. – С.109-117.
3. Паршин В.В. Криовакуумный Резонаторный Комплекс / В.В. Паршин, Е.А. Серов, Г.М. Бубнов, В.Ф. Вдовин, М.А. Кошелев, М.Ю. Третьяков // – Известия ВУЗов, «Радиофизика». – 2013. – Т.56. – № 8-9. – С. 614-621.
4. Tretyakov M.Yu. Resonator spectrometer for precise broadband investigations of atmospheric absorption in discrete lines and water vapor related continuum in millimeter wave range / M.Yu. Tretyakov, A.F. Krupnov, M.A. Koshelev, D.S. Makarov, E.A. Serov, V.V. Parshin // – Review of Scientific Instruments. – 2009. – Vol.80. – pp. 093106.