

Потери излучения терагерцового диапазона в сплавах и композитах, перспективных для устройств электроники и электродинамики высокого уровня мощности.

В.В. Паршин¹, С.К. Гордеев², В.Е. Запечалов¹, А.Г. Лучинин¹, Ю.В. Родин¹, Е.А. Серов¹

¹ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

²АО Центральный научно-исследовательский институт материалов им. Д.И. Менделеева»

Аннотация: Представляются результаты поисковых и прикладных исследований потерь, связанных с поглощением и отражением микроволнового излучения для металлических сплавов и композитов, а также графитов, предполагаемых для использования в качестве поглощающих и теплоотводящих конструкционных материалов для электроники больших мощностей терагерцового диапазона частот. Также приводятся измерения зависимости потерь на отражения для высокочистой меди (0,99998) как референсного металла.

Ключевые слова: Терагерцы, сплавы и композиты, поглощение и отражение, мощная электроника

1. Введение

Для электроники больших мощностей терагерцового диапазона частот важную роль играют свойства материалов предполагаемых для использования в качестве поглощающих и теплоотводящих элементов конструкций. Одной из острых проблем, является необходимость работы в условиях высоких тепловых нагрузок, и, соответственно, отвод тепла от устройств и конструкций, непосредственно взаимодействующих с генерируемым или транспортируемым электромагнитным излучением. Аналогичной проблемой является также поглощение разного рода "ненужного" излучения, так или иначе "мешающего" работе изделия в целом (гиротронные комплексы, системы УТС и др. [1]). Для разрешения проблемы требуются материалы зачастую с взаимоисключающими свойствами. Как правило, хорошо поглощающие и мало отражающие материалы имеют ничтожную теплопроводность и мало пригодны для вакуумной техники. С другой стороны, популярнейший конструкционный вакуумный материал – бескислородная медь наряду с максимальной теплопроводностью имеет и минимальные потери на отражение [2] (лучше только у серебра). Поэтому выбор материала с требуемым набором тепло-электрофизических свойств весьма непростая задача. Наша работа посвящена исследованиям потерь на отражение (или коэффициента отражения) металлических сплавов и композитов, а также графитов, предполагаемых для использования как в качестве поглощающих, так и теплоотводящих конструкционных материалов для электроники больших мощностей терагерцового диапазона частот.

2. Метод измерений.

Измерения проводились резонаторным методом с использованием высокочастотного резонатора Фабри-Перо. В качестве источников излучения использовались лампы обратной волны (ЛОВ) соответствующего диапазона. Частоты ЛОВ стабилизированы перестраиваемой системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [3,4].

Для исследований материалов с относительно малыми потерями на отражение

($1-R \sim (10^{-3} \div 10^{-2})$) использовался симметричный резонатор Фабри-Перо. (Методика измерений подробно изложена [5]. Для измерения образцов с большими потерями разработана менее сложная методика с использованием полусферического резонатора. Схема измерений приведена на рисунке 1. Непосредственно измеряемыми величинами являются ширины резонансной кривой (которые пропорциональны потерям энергии в резонаторе) резонатора с плоским медным зеркалом и резонатора, в котором плоское зеркало заменяется исследуемым образцом. Потерями в медном зеркале по сравнению с потерями в образце можно пренебречь, считать, что для него ($1-R=0$). Тогда коэффициент отражения R или потери на отражение ($1-R$) рассчитывается по простой формуле: $P_{\text{sample}} = 1-R_{\text{sample}} = 2(\Sigma P_2 - \Sigma P_1) = 2\pi q (\Delta f_2 - \Delta f_1) / f \approx 4\pi L \cdot (\Delta f_2 - \Delta f_1) / c$, где: R_{sample} – коэффициент отражения от образца по мощности, ΣP_1 и ΣP_2 – потери энергии за один проход в резонаторах, соответственно, f – частота, q – количество полуволн в резонаторе, L – длина резонаторов, Δf_1 и Δf_2 – ширины резонансных кривых резонаторов, c – скорость света

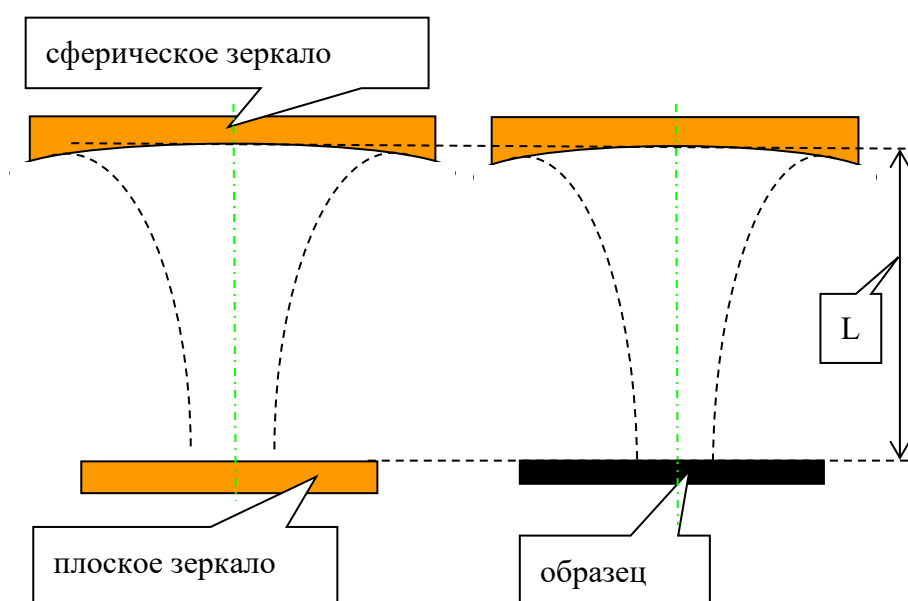


Рисунок 1. Схема измерений коэффициентов отражения от исследуемых образцов с большими потерями на отражение.

3. Описание образцов и экспериментальные результаты.

Исследовавшиеся образцы представляли собой плоские пластины с чистотой обработки отражающей плоскости $R_a \sim 0.2$. Референсное медное зеркало обработано алмазным резцом $R_a = (0.01 - 0.02)$. Частотная зависимость потерь на отражение, как по форме, так и по величине полностью совпадает с расчётными значениями.

Исследовался ряд классических металлических сплавов и композитов, с большим удельным сопротивлением: формованный терморасширенный графит, сплавы Х20Н80 (Нихром), Х12Н9Т (Нержавейка), МНМц 43-05 (Копель), медно молибденовый композит МД-50. В качестве референсного металла использовалась высокочистая (0.99998) медь [2]. Зависимости потерь на отражение от частоты для этих материалов приведены на рисунке 2. Как и положено для металлов возрастание потерь пропорционально корню из частоты.

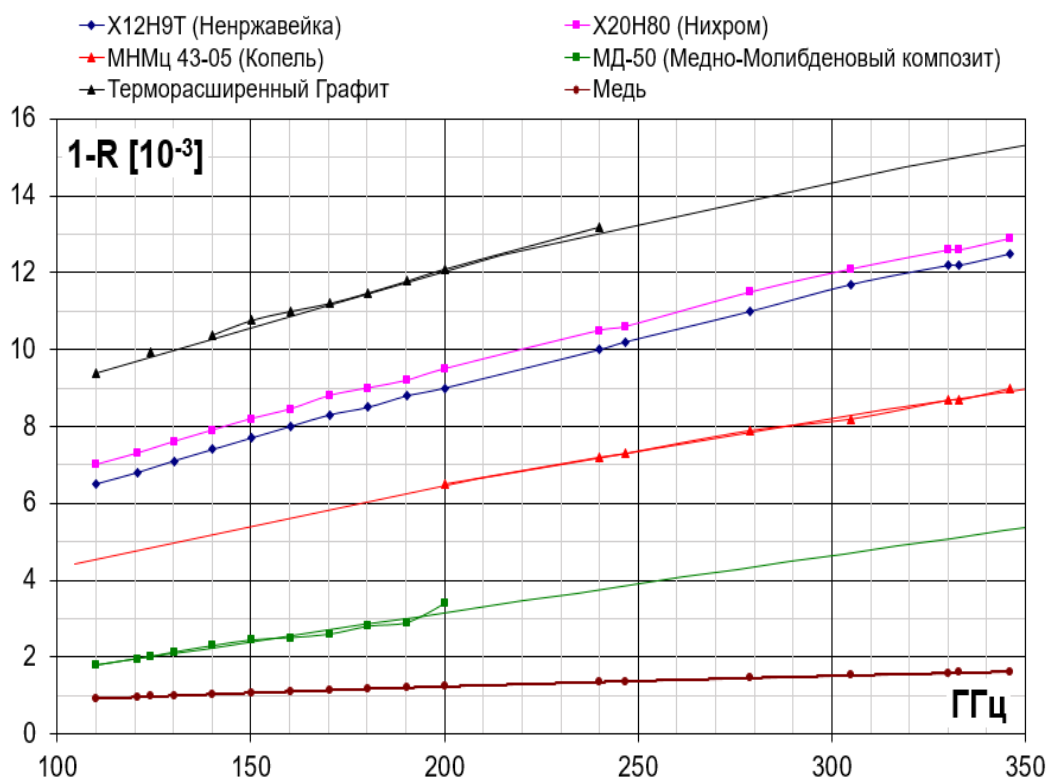


Рисунок 2 Частотные зависимости потерь на отражение графита, металлических сплавов, медно молибденового композита и сверхчистой меди.

На рисунке 3 (в логарифмическом масштабе) представлены также материалы с большими потерями на отражение. Это конструкционные графиты Г33МИ и Г33И, а также Алмаз-Карбидо-Кремниевые (АКК) композиты «Скелетон» КЭФ-10 п и КДБ-12 р. (АКК представляют собой группу материалов, структура которых включает алмазные частицы, связанные в единый композит карбидокремниевой матрицей. Варьирование содержания компонентов позволяет изменять его тепло-электрофизические свойства в широких пределах [6].)

Самый не отражающий из исследованных композитов это сплав аустенитной стали X15Н14 и окиси алюминия Al_2O_3 .

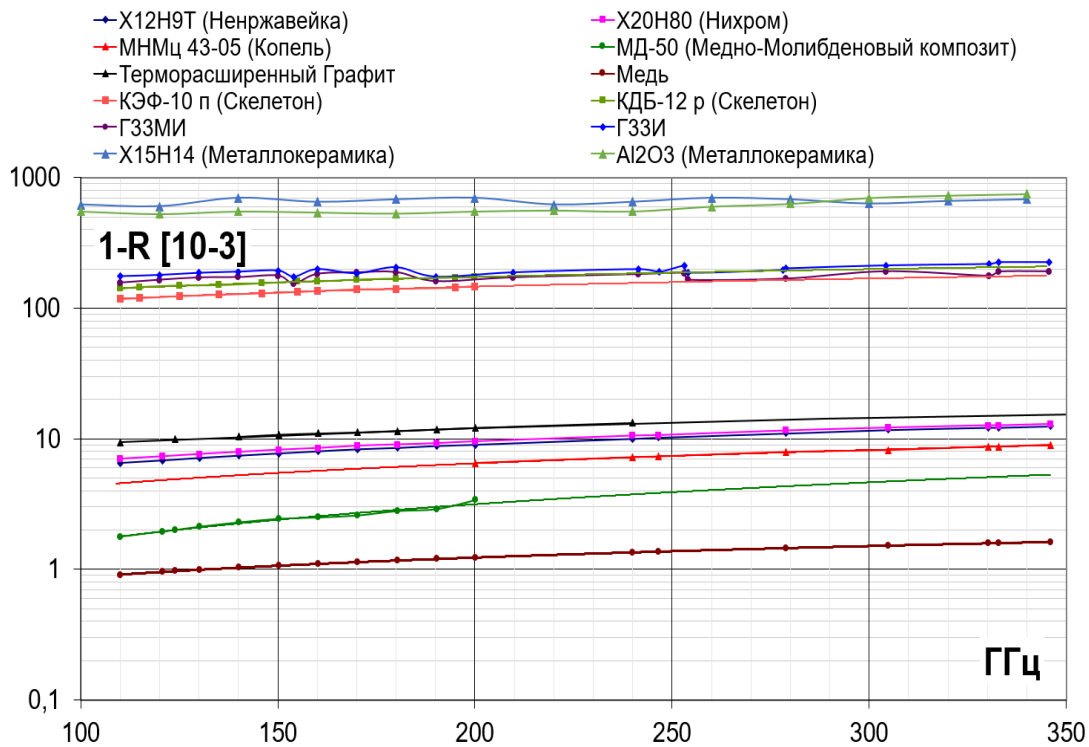


Рисунок 3. Частотные зависимости потерь на отражение всех исследовавшихся материалов.

Некоторые теплофизические параметры исследовавшихся материалов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры образцов

Образец 23 °С	Теплопроводность Вт/(м·К).	КТЛР 106/К
Высокочистая медь (0.99998)	400	16
X20H80 (Нихром)	12	12
X12H9T (нержавеющая сталь)	15	12
MNMC 43-05 (Копель)	21	14
МД-50 (медномолибденовый композит)		
формованный терморасширенный графит		10-12 25-30
графит Г33МИ графит Г33И,	120	3,7/4,1
АКК «Скелетон»	от 250 до 650	1,9 – 2,3
сплав аустенитной стали X15H14 и Al2O3.		

3. Заключение

В диапазоне частот 100-350 ГГц представляются результаты исследований потерь, связанных с поглощением и отражением излучения для широкого класса металлических сплавов и композитов, а также графитов, которые предполагаются для использования в качестве поглощающих и теплоотводящих конструкционных материалов для электроники больших мощностей терагерцового диапазона частот. Из всех исследованных материалов сплав аустенитной стали X15H14 и Al_2O_3 обладает наименьшей отражательной способностью. Все исследованные материалы вакуумно плотные и откачиваются до глубокого вакуума.

В работе использовалось оборудование УНУ 3589084 "ЦКП-7".

Работа выполнена в рамках госзадания ИПФ РАН, проекты № FFUF-2024-0027, № FFUF-2024-0034.

Список литературы

1. Запечалов В. Е. проблемы больших гиротронных комплексов. Международная конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". — 2025. — С. 196-197.
2. Serov E. A. et al. Reflectivity of Metals in the Millimeter Wavelength Range at Cryogenic Temperatures. // IEEE Tr. on MTT. — 2016. — V.64. — N11. — С. 3828-3838.
3. Krupnov A.F. et al. Modern Millimeter-Wave Resonator Spectroscopy of Broad Lines. // Journal of Molecular Spectroscopy. — 2000. — V. 202. — 107–115.
4. Parshin V. V. et al. Modern resonator spectroscopy at submillimeter wavelengths. // IEEE Sensors J. — 2013. — V.13. — №1. — С.18-23.
5. Parshin V. V. Serov E. A. Precise resonator methods investigation of dielectrics and metals at 40 GHz–500 GHz frequency range and in 4 K–900 K temperature interval. // An International Joint Conference of the 9th Global Symposium on Millimeter-Waves (GSMM 2016). The 7th ESA Workshop on Millimetre-Wave Technology and Applications. — 2016. — Aalto University, Espoo, Finland.
6. Гордеев С. К. и др. Алмазо-карбидо-кремниевый композит – перспективный материал для микроэлектроники и электроники больших мощностей. // Изв. Вузов, Радиофизика. — 2022. — Том LXV. — № 5–6, — С. 475-483.