

Исследование коэффициентов отражения и прохождения электромагнитных импульсов через низкоплотное медное покрытие.

Казаков А.Г., Потапов А.В., Пхайко Н.А., Писарев Е.М., Кондратьев А.А., Сорокин И.А., Лыжина Ю.Л.

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забахина», Снежинск, Россия

В работе представлены исследования электродинамических характеристик низкоплотного ($\rho \sim 0,2$ г/см³) медного покрытия. Показано, что энергия СШП импульса (средняя эффективная частота ~ 3 ГГц), отражённого от покрытия толщиной 50 мкм почти в два раза ниже по отношению к сигналу отраженному от алюминиевого образца. Коэффициент пропускания СШП ЭМИ через покрытие с толщиной 28 мкм близок к алюминию, толщиной 1 мм, т.е. покрытие не является радиопрозрачным.

Ключевые слова: низкоплотная металлическая пена, электромагнитные импульсы, коэффициент отражения, коэффициент прохождения.

Введение

Для проведения лазерно-плазменных экспериментов требовалось изготовление мелкоячеистой металлической пены с наноразмерным диаметром частиц (до 200 нм). При этом характерные размеры пор и полостей материала мишени должны были быть много меньше диаметра фокального пятна. В 2020м году была разработана технология её изготовления резистивным распылением металлической (Cu) навески в среде инертного газа с давлением 440 Па. Плотность готового образца пены составляла 0,2 г/см³. На рисунке 1 приведен снимок структуры поверхности металлической пены.

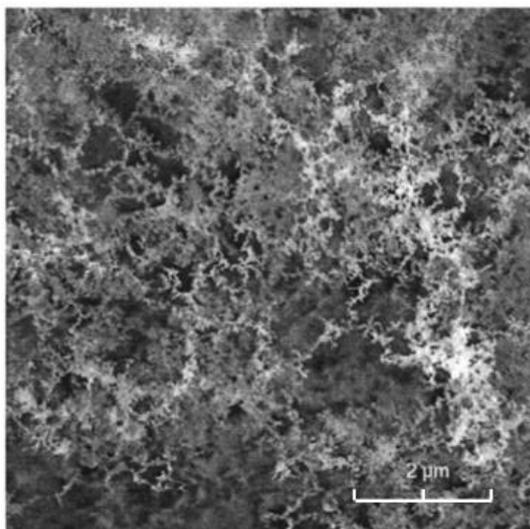


Рисунок 1 – Низкоплотная металлическая (медная) пена.

Так как данное покрытие обладало проводимостью и большой развитой поверхностью, было сделано предположение, что данный материал может обладать радиопоглощающими свойствами.

Цель работы: Исследования взаимодействия материала низкоплотного медного покрытия с электромагнитными импульсами, выполнение оценок коэффициентов отражения и прохождения ЭМИ через материал покрытия.

Характеристики исследуемых образцов

Для проведения исследований было изготовлено четыре образца, их характеристики представлены в таблице 1. На одну сторону образцов №1 и №2, методом резистивного распыления медной навески в аргоновой среде ($P_{Ar} = 440$ Па), наносилось покрытие на основе низкоплотной мелкоячеистой пены. Технология нанесения такого покрытия, а также его характеристики

представлены в работе [1]. Контроль толщины покрытия на образце №1 проводился с помощью двухкоординатного измерительного прибора ДИП-1. Погрешность измерений толщины составляет не более ± 10 мкм. Контроль толщины покрытия на образце №2 проводился с помощью оптического профилометра FRTMicroSpy. Погрешность измерений толщины покрытия определялась как среднеквадратичное отклонение по пяти измерениям.

Таблица 1

Номер образца	Материал	Габаритные размеры, см ³	Наличие покрытия	Толщина Покрытия, мкм
1	Алюминий	26×27×0,1	есть	50 ± 10
2	Стекло	6×9×0,2	есть	28 ± 1
3	Стекло	6×9×0,2	нет	–
4	Алюминий	6×9×0,1	нет	–

Используемые технические средства

Исследования характеристик покрытия на основе низкоплотной пористой меди проводились в безэховой камере, представляющей собой металлический бокс размером 6,3 × 3,6 × 3 м³ (длина × ширина × высота), внутренняя поверхность которого покрыта радиопоглощающим материалом (РПМ).

Для закрепления образца внутри безэховой камеры, разработан и изготовлен держатель, на основе ПВХ труб диаметром 40 мм и толщиной стенки 3 мм. Его конструкция представлена на рисунке 2.

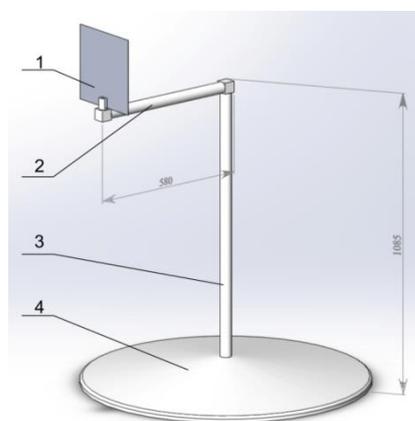


Рисунок 2 – Держатель образцов

1 – Исследуемый образец; 2 – Держатель; 3 – Стойка; 4 – Основание

Измерение напряженности электрического поля электромагнитного излучения проводилось штыревой антенной [2], представляющей собой отрезок коаксиального кабеля SM141 производства НПО «СПЕЦКАБЕЛЬ» с волновым сопротивлением 50 Ом (диаметр жилы 1 мм, оплетки – 3 мм) длиной 3 м. Чувствительным элементом датчика являлась оголенная от оплетки центральная жила кабеля длиной 5 мм. Жила датчика была направлена параллельно вектору электрической составляющей поля ЭМИ. Для защиты антенны от фонового излучения, она была помещена в экранирующий бокс из РПМ. Его конструкция представлена на рисунке 3.

Регистрация сигналов со штыревой антенны производилась осциллографом TektronixDPO 71604 (аналоговая полоса пропускания – 16 ГГц; время нарастания переходной характеристики по уровню 0,1...0,9 – 27,5 пс, частота дискретизации АЦП – 50 ГГц).

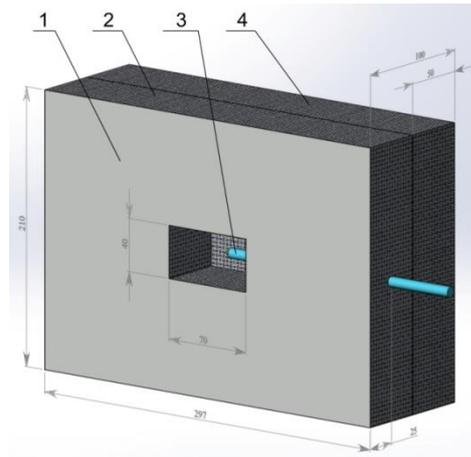


Рисунок 3 – Экранирующий бокс

1 – Алюминиевая фольга толщиной 50 мкм; 2 – РПМ толщиной 50 мм с вырезом под антенну; 3 – штыревая антенна; 4 – Задняя стенка бокса из РПМ толщиной 50 мм

Генерация ЭМИ осуществлялась широкополосной рупорной антенной П6-123, на которую подавался импульс напряжения от генератора ГИН-1-100-МС3 производства «ФИД-Техника». На рисунке 4 приведена спектральная плотность энергии ЭМИ, полученная дискретным преобразованием Фурье осциллограммы напряжённости поля.

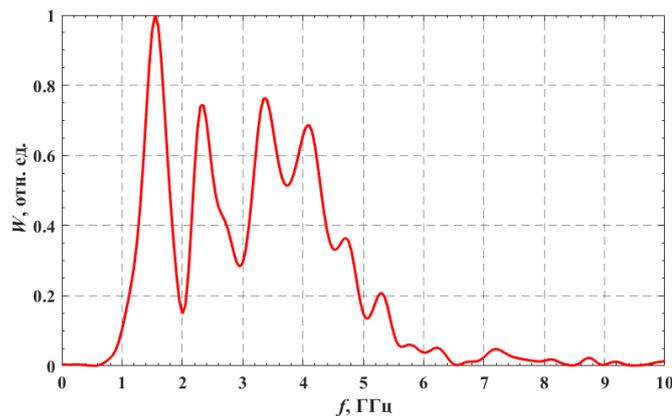


Рисунок 4 – Спектр сигнала ЭМИ

Опыт №1. Исследование отражения ЭМИ от низкоплотного медного покрытия

На рисунке 5 представлена схема размещения оборудования внутри безэховой камеры. Для определения коэффициента отражения ЭМИ от пористого покрытия было проведено три серии экспериментов. В первой серии исследовалась амплитуда ЭМИ, отраженного от образца №1. Для этого он устанавливался в держатель так, что бы облучалась сторона без покрытия. Во второй серии экспериментов образец разворачивался на 180° вокруг вертикальной оси. В третьей серии экспериментов проводилось измерение фонового (рассеянного от стенок камеры) излучения. В данной серии образец был снят с держателя. Всего было проведено 9 экспериментов, по три в каждой серии. Характерные для каждой серии экспериментов осциллограммы приведены на рисунке 6.

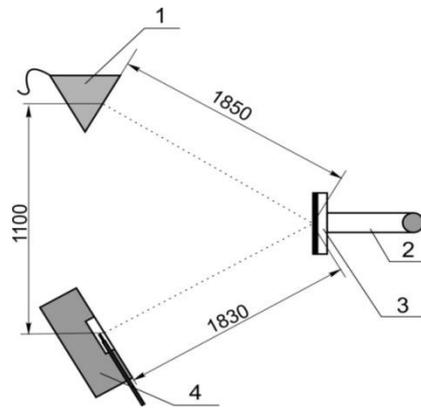


Рисунок 5 – Схема опыта №1

1 – Рупорный антенный излучатель Пб-123; 2 – Держатель образцов; 3 – Образец; 4 – Экранирующий бокс со штыревой антенной

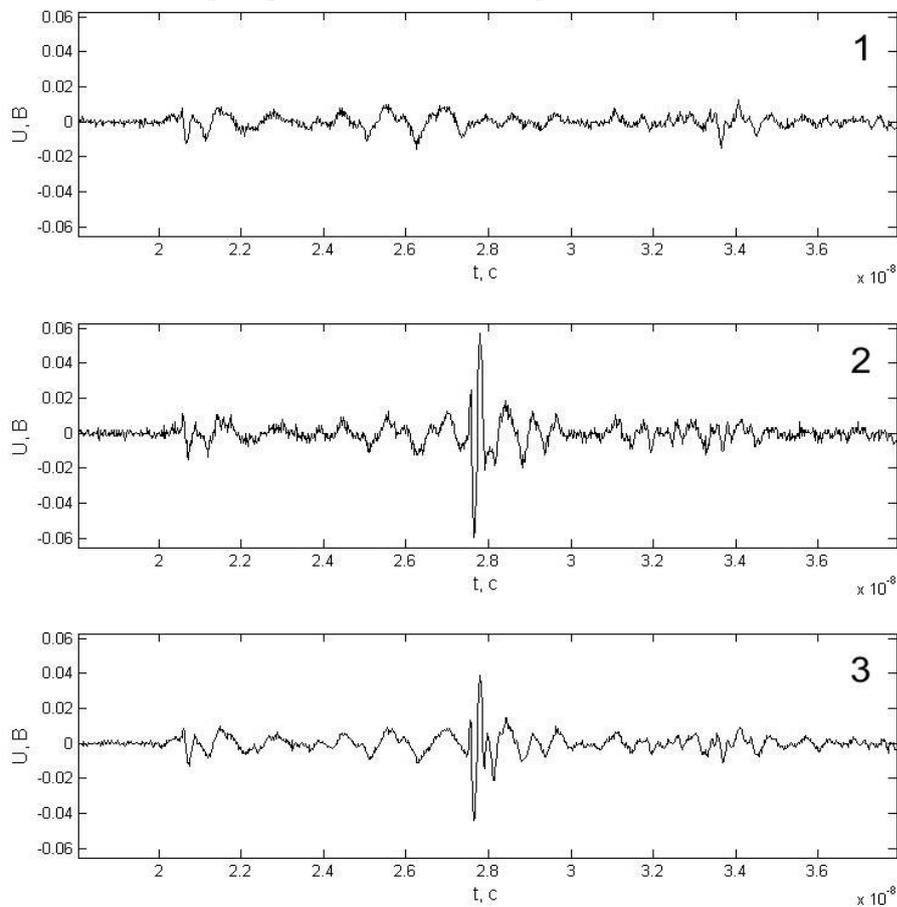


Рисунок 6 – Типичные осциллограммы сигналов зарегистрированных в опыте №1

1 – Стойка без образцов (наводка); 2 – Образец № 1, сторона без покрытия;
3 – Образец №1, сторона с покрытием

Из рисунка видно, что на всех представленных осциллограммах присутствует наводка от срабатывания высоковольтных ключей ГИН. Форма сигнала и время его возникновения сохраняются от эксперимента к эксперименту. Поэтому, для восстановления истинных значений сигналов, выполнялось математическое вычитание из них наводки. На рисунке 7 представлены результаты вычитания.

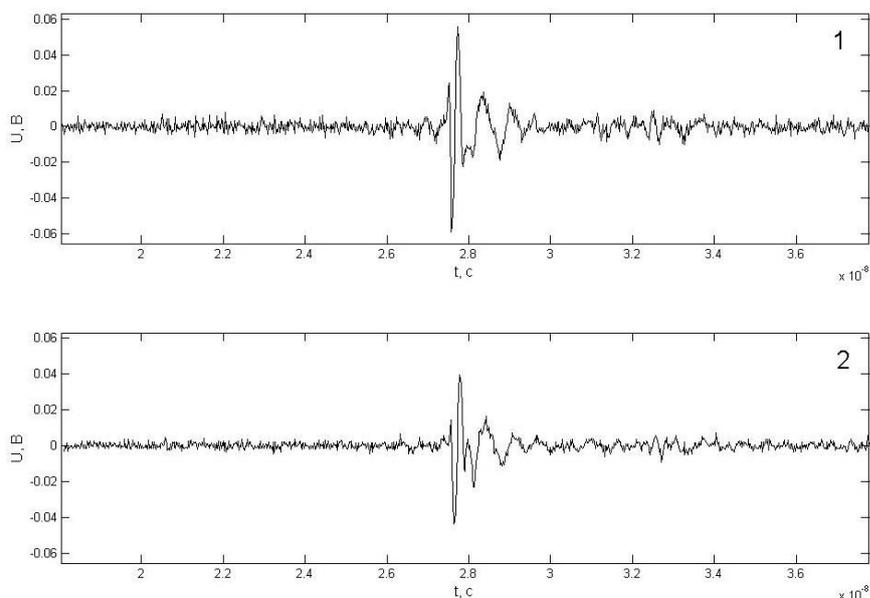


Рисунок 7 – Осциллограммы после обработки
 1 – Образец № 1, сторона без покрытия; 2 – Образец № 1, сторона с покрытием.

Напряжение сигнала кабельного датчика U пропорционально напряженности поля ЭМИ, соответственно плотность потока энергии ЭМИ пропорциональна U^2 , а энергия ЭМИ, проходящая через единицу поверхности, пропорциональна величине:

$$P = \int U^2 dt \quad (1)$$

В таблице 2 представлены значения величины P для каждой из серий экспериментов. Погрешность определялась как среднеквадратичное отклонение значений полученных в трех измерениях. Интегрирование проводилось от $t_1 = 2,6$ нс до $t_2 = 3$ нс.

Таблица 2

Наименование образца	Образец №1 без покрытия (P_{cp1})	Образец №1 с покрытием (P_{cp2})
Среднее значение P , В ² ·с	$(7,63 \pm 0,79) \cdot 10^{-13}$	$(4,11 \pm 0,14) \cdot 10^{-13}$

На основании данных, представленных в таблице 2, определено отношение коэффициента отражения ЭМИ от образца с низкоплотным медным покрытием к коэффициенту отражения от алюминиевого образца:

$$\eta = P_{cp2} / P_{cp1} = 0,54 \pm 0,05 \quad (2)$$

При этом остаётся неясным – отражение ЭМИ происходит от поверхности покрытия, либо от алюминия, после прохождения электромагнитной волны сквозь слой низкоплотной меди. Для определения коэффициента пропускания материала покрытия была проведена ещё одна серия экспериментов.

Опыт №2. Исследование прохождения ЭМИ через низкоплотное медное покрытие

На рисунке 8 представлена схема размещения оборудования внутри безэховой камеры. Для определения коэффициента прохождения ЭМИ через пористое медное покрытие было проведено четыре серии экспериментов. В первой серии исследовалась амплитуда ЭМИ рупорного излучателя, напрямую (без образцов). Во второй серии экспериментов окно экранирующего бокса перекрывалось образцом №3 (стекло без покрытия). В третьей серии экспериментов проводилось измерение излучения, прошедшего через образец №2 (стекло с покрытием), который устанавливался на место образца №3. В четвёртой серии окно экранирующего бокса закрывалось образцом №4 (лист алюминия). Всего было проведено 12 экспериментов, по три в каждой серии. Характерные для каждой серии экспериментов осциллограммы приведены на рисунке 9.

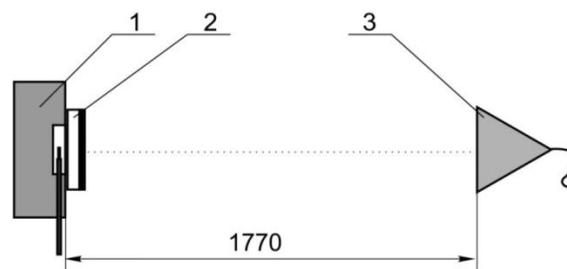


Рисунок 8 – Схема опыта № 2

1 – Экранирующий бокс со штыверной антенной; 2 – Образец; 3 – Рупорный антенный излучатель Пб-123

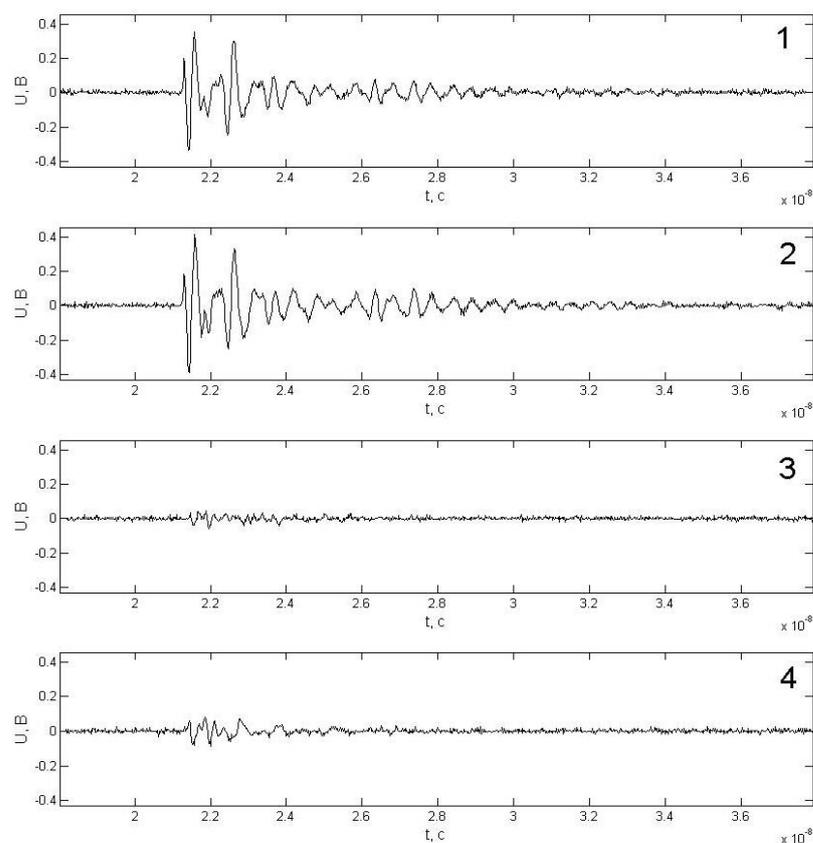


Рисунок 9 – Осциллограммы сигналов зарегистрированных в опыте № 2

1 – Без образца; 2 – Образец №3 (стекло); 3 – Образец №4 (Al);
4 – Образец №2 (стекло с напылением)

В таблице 3 представлены усредненные значения величины P для каждой из серий экспериментов, полученные по формуле (1) с интегрированием в диапазоне от $t_1 = 2$ нс до $t_2 = 3$ нс. Погрешность определялась как среднеквадратичное отклонение значений, полученных в трех измерениях.

Таблица 3

Наименование образца	Среднее значение P , В ² ·с
Без образца (P_{cp1}) напрямую	$(5 \pm 0,1) \cdot 10^{-11}$
Образец №3 (P_{cp3}) стекло	$(6,74 \pm 0,3) \cdot 10^{-11}$
Образец №2 (P_{cp2}) стекло с медью	$(4,32 \pm 0,27) \cdot 10^{-12}$
Образец №4 (P_{cp4}) алюминий	$(2,26 \pm 0,24) \cdot 10^{-12}$

Обращает на себя внимание факт, что при прохождении через стекло уровень регистрируемой энергии выше, чем при регистрации напрямую. Одним из возможных объяснений является то, что чувствительность антенной системы стекло-штырь выше, чем чувствительность одиночного штыря в свободном пространстве.

На основании данных, представленных в таблице 3, определялся коэффициент прохождения ЭМИ через стеклянный образец с низкоплотным медным покрытием. Для сравнения использовалось отношение сигнала, зарегистрированного за алюминиевым экраном, к сигналу, снятому напрямую

$$\eta_1 = P_{cp4} / P_{cp1} = 0,045 \pm 0,004 \quad (3)$$

Коэффициент пропускания ЭМИ низкоплотным медным покрытием вычислялся как отношение:

$$\eta_2 = P_{cp2} / P_{cp3} = 0,064 \pm 0,004 \quad (4)$$

Учитывая, что толщина низкоплотного медного покрытия в опыте №1 почти вдвое больше и, кроме того, в опыте на отражение излучение проходит через покрытие дважды, коэффициент ослабления можно оценить величиной:

$$\eta_{att} = \eta_2^{(50/28) \cdot 2} = 5 \cdot 10^{-5} \quad (5)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что полученный в опыте №1 коэффициент характеризует отражающую способность именно низкоплотного медного покрытия.

Расчёт коэффициентов

На рисунке 10 приведены две схемы постановки опытов.

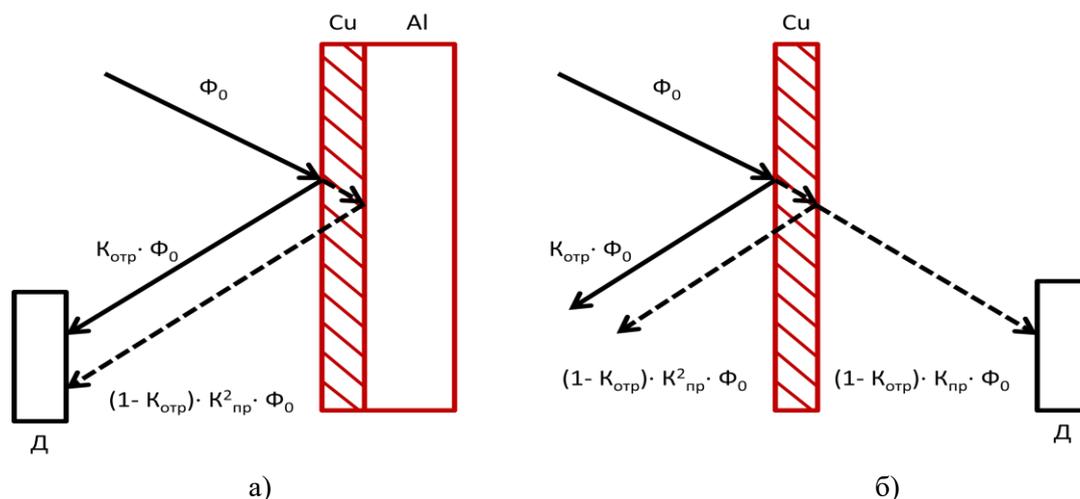


Рисунок 10

а) Схема опыта на отражение ЭМИ; б) Схема опыта на пропускание ЭМИ; где Φ_0 – падающий поток энергии; $K_{отр}$ – коэффициент отражения материала; $K_{пр}$ – коэффициент пропускания материала; Д – датчик.

Все оценки проведены в предположениях, что:

- 1) коэффициенты отражения при падении сигнала по нормали и под углом близки;
- 2) угловые зависимости распределения отражённого (рассеянного) излучения от металлической поверхности и медной пены также близки;
- 3) не учитывается отражение от границы покрытие-стекло;
- 4) коэффициент отражения от алюминиевого листа без покрытия равен 100%.

Пользуясь приведёнными схемами, и учитывая, что толщина низкоплотного медного покрытия в опыте №1 почти вдвое больше, коэффициенты отражения и пропускания определялись из уравнений:

$$K_{отр} + (1 - K_{отр}) \cdot K_{пр}^{(50/28)^2} = 0,54$$

$$(1 - K_{отр}) \cdot K_{пр} = 0,064$$

Отсюда $K_{отр} = 0,54$, $K_{пр} = 0,14$.

Заключение

В работе исследовались электродинамические характеристики низкоплотной медной пены, при её взаимодействии с СШП ЭМИ. Спектр генерируемого сверхширокополосного электромагнитного импульса содержит частоты в диапазоне от 1 до 5 ГГц.

Проведены оценочные расчёты коэффициентов пропускания и отражения ЭМИ низкоплотной медной пены. Полученные значения ($K_{пр} = 0,14$, $K_{отр} = 0,54$), позволяют сделать вывод, что исследуемый материал не является радиопрозрачным, и может использоваться в качестве радиопоглощающего материала.

Для уточнения характеристик (в том числе получения абсолютных значений $K_{пр}$ и $K_{отр}$) подобных материалов (например, низкоплотного алюминия), и принятия решения о возможности их практического применения необходимо проведение дополнительных исследований.

Литература

1. Изготовление и исследование низкоплотных металлических материалов / А.Г. Казаков, Н.А. Пхайко, К.В. Сафронов и др. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. – 2022. – Т. 5, №3. – С. 342-352 DOI:10.29039/2587-9936.2022.05.3.25.
2. Расчетные и экспериментальные исследования потенциалов, наведенные импульсом СШП ЭМИ на отрезок провода: №ПС.14.13157/2/ А.А. Кондратьев, Е.В. Заволоков и др. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2014.