

Вимірювання характеристик захисних екранів мікрохвильового випромінювання, які використовують тонкі провідні волокна

М.Г. Кокодій^{1,3}, А.О. Натарова², С.В. Погорелов³

¹ Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, 61022, Харків, Україна
kokodiy.n.g.@gmail.com

² Харківський національний університет Повітряних Сил імені І.Кожедува, вул. Сумська, 77/79, 61023, Харків, Україна
anastasija.natarova@gmail.com

³ Національний фармацевтичний університет, вул. Пушкінська, 53, 61002, Харків, Україна

Анотація

У тонких провідних волокнах, діаметр яких набагато менший від довжини хвилі, за деяких умов мікрохвильове випромінювання може поглинатися дуже сильно. Фактор ефективності поглинання може досягати значення декількох тисяч. Цей ефект запропоновано використати для створення захисних екранів. Поглинання випромінювання відбувається у відрізках графітових волокон діаметром 12...15 мкм, які хаотично розташовані на основі з паперу або поліетиленової плівки. При такому розташуванні волокон характеристики екрана не залежать від поляризації випромінювання. Перевагою екранів є також рівномірність частотних характеристик пропускання, поглинання і відбиття випромінювання. В роботі описані експерименти з вимірювання коефіцієнтів пропускання, відбиття і поглинання випромінювання екранами в сантиметровому діапазоні довжин хвиль. Екрани розташовувались у вільному просторі під різними кутами до напрямку падаючого випромінювання. Результати вимірювань порівнювалися з результатами, одержаними при вимірюваннях у хвилеводах. Виявилось, що результати, отримані обома методами, узгоджені. Це дає можливість рекомендувати хвилеводні методи на основі рефлектометрів. Вони більш зручні, швидкі й точні, ніж методи вимірювань у вільному просторі.

Наведено формули для оцінки пропускання, поглинання і відбиття екранів.

Ключові слова: мікрохвильове випромінювання; тонке волокно; захисний екран; пропускання; відбиття; поглинання; методи вимірювання.

Отримано: 05.05.2020

Відредаговано: 20.07.2020

Схвалено до друку: 30.07.2020

Вступ

Наявність засобів радіозв'язку, телебачення, радіолокації, дистанційних систем обробки інформації привела до появи інтенсивного електромагнітного фону в навколишньому середовищі. У деяких випадках він може бути причиною порушення правильного функціонування біологічних об'єктів, завадою при роботі радіоелектронних пристроїв. Тому існує необхідність захисту об'єктів від електромагнітного випромінювання.

У статтях [1, 2] запропоновано методи створення екранів на основі в'язаних полотен, які містять структури з мікродроту. Трикотажні полотна з мікродротом послаблюють дію електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону на об'єкти, в основному, за рахунок відбиття. Авторами досліджено зразки полотен, що містять мікродроти з нержавіючої сталі діаметром 55 і 80 мкм. Вимірювання ефективності екранування проводилися в частотних діапазонах 30...4100 МГц і 37,5...142 ГГц. У смузі частот від 100 до 400 МГц

ефективність екранування досягала 4 дБ. На низьких частотах ефективність екранів можна підвищити, використовуючи матеріали з високою електропровідністю. Більш ефективними на низьких частотах є екрани з мікродротоми великого діаметру, але при збільшенні частоти ефективність екранів із різним діаметром мікродротів стає однаковою. Максимальне значення ефективності екранування в радіочастотному діапазоні не перевищує 30 дБ, незалежно від матеріалу мікродроту. Застосування таких матеріалів обмежене вузькою смугою частот, у якій характеристики екранів стабільні.

У роботі [3] описано можливість створення радіопоглинальних екранів у вигляді плоских листів гуми товщиною до 2 мм, заповнених відрізками мікродроту довжиною 1...3 мм і діаметром від 1 до 3 мкм. Для мікродроту використовувався сплав $FeBSiMnC$ з магнітною проникністю $\mu_{ef} \sim 100$. Досліджено радіопоглинальні властивості екрана в діапазоні частот від 8 до 10 ГГц. На деяких частотах затухання досягало 30 дБ. Але час-

тотна характеристика дуже нерівномірна. Недолік матеріалу мікродроту – висока електропровідність. Це не дозволяє суттєво підвищити концентрацію відрізків мікродроту. Досліджувані зразки містили 5...8 г мікродроту на 100 г гуми.

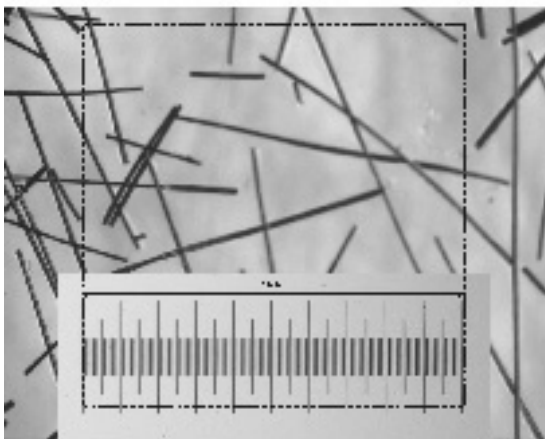
У дослідженнях, проведених у Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна, було виявлено ефект аномально великого поглинання мікрохвильового випромінювання дуже тонкими провідними волокнами [4, 5]. Він спостерігається, коли на волокно падає електромагнітна хвиля, електричний вектор якої паралельний осі волокна (*E*-хвиля). Фактор ефективності поглинання (відношення ефективного діаметра волокна до геометричного діаметра) (ФЕП) може досягати значень у кілька сотень. Він залежить від співвідношення між діаметром волокна *D* і довжиною хвилі випромінювання λ , а також у графітовому волокні – від довжини хвилі випромінювання, що падає на нього (у великому діапазоні довжин хвиль поглинання постійне).

У роботах [6, 7] описані вимірювання характеристик поглинальних екранів на основі тонких графітових волокон у діапазоні частот від 2,8 до 18 ГГц. Використовувалися хвилеводні рефлектометри, які дозволяли вимірювати пропускання і відбиття в широкому діапазоні частот.

У роботі проведено вимірювання пропускання і відбиття випромінювання такими ж екранами у вільному просторі й порівняння отриманих результатів із результатами робіт [6, 7]. Це дало можливість з'ясувати, чи можна використовувати результати, отримані у хвилеводних вимірюваннях, для екранів, які працюють у вільному просторі.

1. Поглинання випромінювання захисним екраном – розрахунок

У збільшеному вигляді частину захисного екрана, який використовує тонкі волокна з графіту, показано на рис. 1. На поверхні основи із паперу хаотично розташовані відрізки графітового волокна



а

діаметром 11...15 мкм і довжиною 0,2...1 мм. Зверху вони накріті поліетиленовою плівкою. За відсутності волокон основа екрана практично не впливає на випромінювання, яке через неї проходить.

Показано також масштабну лінійку і ділянку екрана площею 1 мм². Площа, вкрита волокнами на екрані СS-2, становить 2% від загальної площі екрана, так що середня кількість волокон *N* на 1 м² становить 1,4×10⁶. В екрані С6-2 вона більша – тут $N = 6,4 \times 10^6 \text{ м}^{-2}$.

1.1. Нормальне падіння випромінювання

Нехай на плоский екран перпендикулярно його поверхні падає пучок випромінювання потужністю P_0 . Він покриває ділянку площею S_0 . Інтенсивність випромінювання:

$$I_0 = \frac{P_0}{S_0}.$$

Щільність волокон на поверхні екрана – *N* волокон/од. площі. Таким чином, пучок падає на $N S_0$ волокон.

На одне волокно потрапляє випромінювання потужністю

$$P_1 = I_0 D L,$$

де *D* – діаметр волокна, *L* – його довжина.

На всі волокна потрапляє потужність

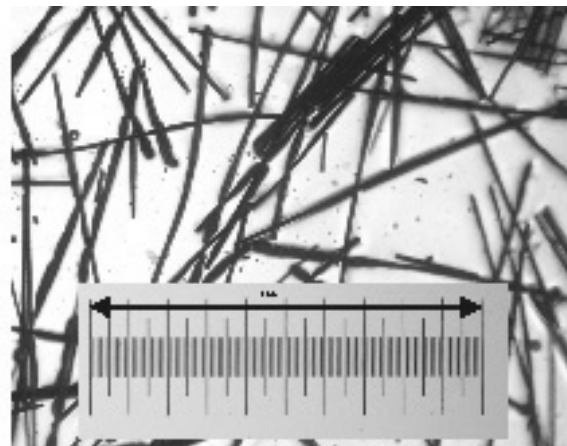
$$P = P_1 N S_0 = I_0 D L N S_0 = P_0 D L N.$$

1.2. Похиле падіння випромінювання

Коли пучок випромінювання потужністю P_0 падає на екран під кутом θ до нормалі, він охоплює поверхню екрана площею

$$S = \frac{S_0}{\cos \theta},$$

так що інтенсивність випромінювання на поверхні екрана $I = I_0 \cos \theta$.



б

Рис. 1. Ділянка екрана з масштабною лінійкою: а – екран СS-2, б – екран С6-2

Число волокон, освітлених пучком, –

$$NS = \frac{NS_0}{\cos\theta}.$$

На одне волокно потрапляє випромінювання потужністю

$$P_1 = IDL = I_0 DL \cos\theta,$$

а на всі волокна потрапляє потужність

$$P = P_1 NS = I_0 DL \cos\theta N \frac{S_0}{\cos\theta} = P_0 DLN,$$

така сама, як і при нормальному падінні, оскільки інтенсивність випромінювання зменшилася, а число освітлених волокон збільшилося.

1.3. Фактори ефективності поглинання, розсіяння, послаблення

Потужність, яка поглинається в екрані й розсіюється ним, можна оцінити, використовуючи поняття факторів ефективності поглинання, розсіяння і послаблення випромінювання [8, 9]:

$Q_{\text{abs}} = \frac{P_{\text{abs}}}{P}$ – фактор ефективності поглинання

(ФЕП), $Q_{\text{sca}} = \frac{P_{\text{sca}}}{P}$ – фактор ефективності розсіяння

(ФЕР), $Q = Q_{\text{sca}} + Q_{\text{abs}}$ – фактор ефективності ослаблення (ФЕО).

Тут P – потужність випромінювання, яке потрапило на геометричний розмір волокна, P_{abs} – потужність випромінювання, яке було поглинуте, P_{sca} – потужність розсіяного випромінювання.

Для E -хвилі згідно з роботами [8, 9]:

$$\begin{aligned} Q^E &= \frac{2}{\rho \cos\theta} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \text{Re}(b_l), \\ Q_{\text{sca}}^E &= \frac{2}{\rho \cos\theta} \sum_{l=-\infty}^{\infty} (|a_l|^2 + |b_l|^2), \\ Q_{\text{abs}}^E &= Q^E - Q_{\text{sca}}^E. \end{aligned} \quad (1.1)$$

Для H -хвилі:

$$\begin{aligned} Q^H &= \frac{2}{\rho \cos\theta} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \text{Re}(a_2), \\ Q_{\text{sca}}^H &= \frac{2}{\rho \cos\theta} \sum_{l=-\infty}^{\infty} (|a_2|^2 + |b_2|^2), \\ Q_{\text{abs}}^H &= Q^H - Q_{\text{sca}}^H. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Коефіцієнти a_1 , b_1 , a_2 , b_2 залежать від діаметра волокна, довжини хвилі випромінювання, показника заломлення волокна і кута падіння хвилі. Вони визначаються формулами, наведеними в [8, 9].

При довільному напрямку поляризації хвилі

$$\begin{aligned} Q_{\text{abs}} &= Q_{\text{abs}}^E \cos^2 \varphi + Q_{\text{abs}}^H \cos^2 \varphi, \\ Q_{\text{sca}} &= Q_{\text{sca}}^E \cos^2 \varphi + Q_{\text{sca}}^H \cos^2 \varphi, \end{aligned}$$

де φ – кут між електричним вектором і віссю волокна.

Для неполяризованого випромінювання

$$Q_{\text{abs}} = \frac{Q_{\text{abs}}^E + Q_{\text{abs}}^H}{2}, \quad Q_{\text{sca}} = \frac{Q_{\text{sca}}^E + Q_{\text{sca}}^H}{2}.$$

Через те, що $Q_{\text{abs}}^H \ll Q_{\text{abs}}^E$ і $Q_{\text{sca}}^H \ll Q_{\text{sca}}^E$, можна записати:

$$Q_{\text{abs}} \approx \frac{Q_{\text{abs}}^E}{2}, \quad Q_{\text{sca}} \approx \frac{Q_{\text{sca}}^E}{2}.$$

На рис. 2 показані розраховані за формулами (1.1) і (1.2) залежності ФЕП і ФЕР графітового волокна діаметром 15 мкм при $\lambda = 10$ мм від кута падіння хвилі на волокно. Видно, що ФЕП при нормальному падінні випромінювання на екран – близько 10, при більших кутах падіння – 40...50. Розсіяння від кута падіння хвилі залежить менше і не досягає таких великих значень. Це добре для захисних екранів. У них поглинання завжди повинно бути більше, ніж розсіювання.

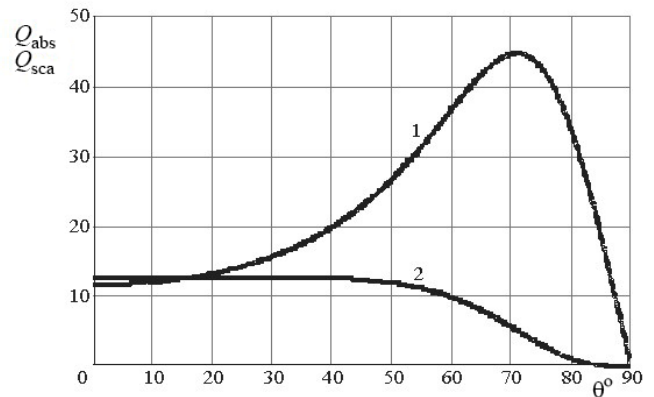


Рис. 2. Залежність факторів ефективності поглинання (1) і розсіяння (2) від кута падіння хвилі на волокно

Із наведених вище формул видно, що при падінні на екран випромінювання з потужністю P_0 потужність поглиненого і розсіяного випромінювання дорівнює відповідно:

$$P_{\text{abs}} = P_0 Q_{\text{abs}} DLN, \quad P_{\text{sca}} = P_0 Q_{\text{sca}} DLN.$$

Коефіцієнти поглинання K , розсіяння R і пропускання T екрана визначаються таким чином:

$$K = Q_{\text{abs}} DLN, \quad R = Q_{\text{sca}} DLN, \quad T = (1 - R) \cdot (1 - K). \quad (1.3)$$

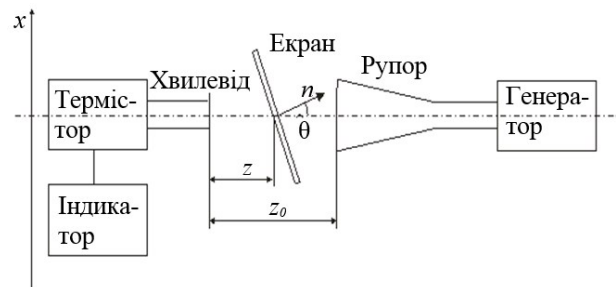
Із рис. 2 видно, що $Q_{\text{abs}} = 12$, $Q_{\text{sca}} = 13$ при нормальному падінні випромінювання на екран ($\theta = 0$). Для $D = 15$ мкм, $L = 1$ мм, $N = 1,4 \times 10^6$ розрахунок за формулами (1.3) дає: $K = 0,25$, $R = 0,27$, $T = 0,55$.

2. Експеримент

Джерело випромінювання в експерименті – генератор на лампі зворотної хвилі. Довжина хвилі випромінювання могла змінюватися від 25 до 38 ГГц. Розміри поперечного перерізу вихідного хвилеводу – $7,2 \times 3,4$ мм. Тип хвилі – H_{10} . Потужність випромінювання в різних точках діапазону змінювалася від 10 до 40 мВт. Хвилевід закінчувався рупором з розкритом 20×13 мм і довжиною 65 мм. Приймачем випромінювання служив термісторний ватметр, в якому вхідним вікном був торець хвилеводу з перерізом $7,2 \times 3,4$ мм.

2.1. Вимірювання коефіцієнта пропускання

На рис. 3 показано блок-схему установки для вимірювання коефіцієнта пропускання екрана. Кут падіння θ хвилі на екран міг змінюватися від 0° до 80° . Приймач випромінювання міг пересуватися уздовж осі x .



Вимірювалася форма діаграми спрямованості випромінювання, яке вийшло з рупора і пройшло через екран. Це дозволило оцінити величину послаблення і вплив екрана на форму діаграми спрямованості.

На рис. 4 показані діаграми спрямованості при нормальному падінні хвилі на екран. Відстань z_0 між рупором і приймачем – 155 мм, відстань z від екрана до приймача – 100 мм. Лінією 1 показано діаграму спрямованості випромінювання, що падає на екран, лінією 2 – діаграму спрямованості випромінювання, яке пройшло через екран. Друга з них більш вузька, ніж перша. Таким чином, наявність екрана впливає на форму діаграми спрямованості. Коефіцієнт пропускання – близько 50%.

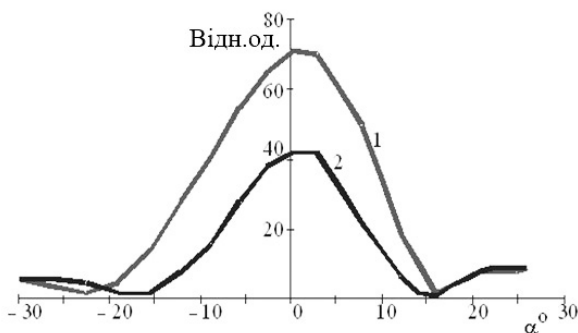


Рис. 4. Діаграми спрямованості падаючого випромінювання (1) і випромінювання, яке пройшло через екран (2) (нормальне падіння хвилі)

На рис. 5 показано, як пропускання екрана залежить від кута падіння випромінювання на нього. Зменшення пропускання пояснюється тим, що при збільшенні кута падіння хвилі зростають значення ФЕП і ФЕР графітових волокон [10, 11].

Крива 1 показує результати експерименту з екраном CS-2, крива 2 – результати розрахунку за формулами (1.3) при таких даних: $\lambda = 10$ мм, $D = 15$ мкм, $L = 1$ мм, $N = 1,4 \times 10^6$ м⁻².

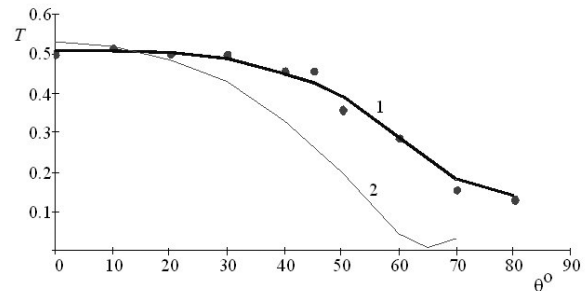


Рис. 5. Залежність пропускання екрана від кута падіння випромінювання: 1 – експеримент, 2 – теорія

Теоретична крива задовільно відображає реальну картину, хоча відмінності від експерименту великі.

2.2. Вимірювання коефіцієнта відбиття

Схему експерименту з вимірювання коефіцієнта відбиття екрана показано на рис. 6. Кут падіння хвилі на екран $\theta = 45^\circ$. Приймач міг переміщуватися паралельно осі падаючого пучка. Таким чином вимірювалася діаграма розподілу інтенсивності пучка, відбитого від екрана.

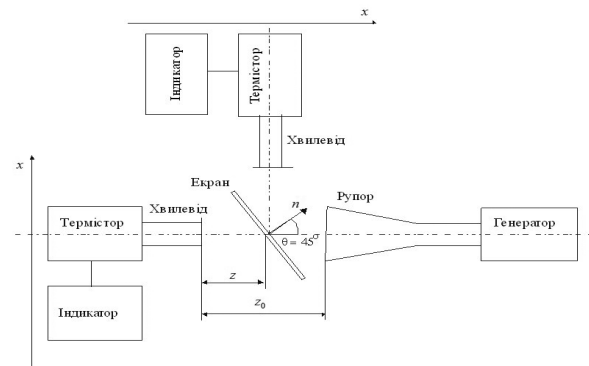


Рис. 6. Вимірювання відбиття від екрана

Результати вимірювань показані на рис. 7.

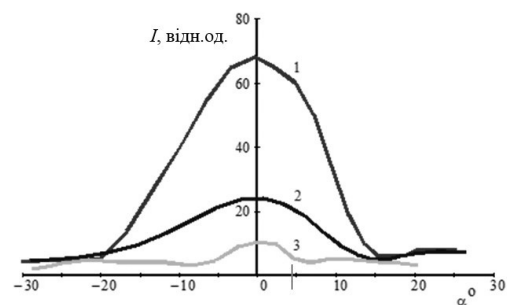


Рис. 7. Діаграми розподілу інтенсивності в пучку випромінювання при падінні хвилі на екран під кутом 45° : 1 – падаючий пучок; 2 – пучок, що пройшов; 3 – відбитий пучок

Коефіцієнти пропускання T , відбиття R і поглинання K були такими: $T=0,37$, $R=0,17$, $K=0,46$. Ці результати задовільно співпадають із теоретичними оцінками параметрів екрана, зробленими в розділі 1.

Отримані дані дозволили провести порівняння результатів, отриманих при вимірюваннях у вільному просторі, й результатів, отриманих при вимірюваннях у хвилеводі. Для екрана CS-2:

у вільному просторі: $T=0,48$, $R=0,27$, $K=0,25$;

у хвилеводі: $T=0,48$, $R=0,18$, $K=0,34$.

Збіг результатів хороший.

Висновки

1. Запропоновано алгоритми вимірювання параметрів захисних екранів на основі тон-

ких провідних волокон у мікрохвильовому діапазоні.

2. Запропоновано схеми експериментів для вимірювання у вільному просторі коефіцієнтів пропускання, відбиття і поглинання електромагнітного випромінювання екранами на основі графітових волокон.

3. Порівняння результатів вимірювань характеристик екранів у вільному просторі й у хвилеводах показали можливість застосування результатів вимірювань у хвилеводах для екранів, які застосовуються у вільному просторі. Переваги полягають у простоті процесу вимірювань і отриманні інформації про пропускання, відбиття та послаблення випромінювання екранами в широкому діапазоні довжин хвиль.

Измерение характеристик защитных экранов микроволнового излучения из тонких проводящих волокон

Н.Г. Кокодий^{1,3}, А.О. Натарова², С.В. Погорелов³

¹ Харьковський національний університет імені В.Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, 61022, Харків, Україна
kokodiy.n.g.@gmail.com

² Харьковський національний університет Воздушних Сил імені І.Кожедуба, ул. Сумська, 77/79, 61023, Харків, Україна
anastasija.natarova@gmail.com

³ Національний фармацевтичний університет, ул. Пушкінська, 53, 61002, Харків, Україна

Аннотация

В тонких проводящих волокнах, диаметр которых гораздо меньше длины волны, микроволновое излучение может поглощаться очень сильно. Фактор эффективности поглощения может достигать значения нескольких тысяч. Этот эффект предложено использовать для создания защитных экранов. Поглощение излучения происходит в отрезках графитовых волокон диаметром 12...15 мкм, которые хаотично расположены на основе из бумаги или полиэтиленовой пленки. При таком расположении волокон характеристики экрана не зависят от поляризации излучения. Преимуществом экранов также является равномерность частотных характеристик пропускания, поглощения и отражения излучения. В статье описаны эксперименты по измерению коэффициентов пропускания, отражения и поглощения излучения экранами в сантиметровом диапазоне длин волн. Экраны располагались в свободном пространстве под разными углами к направлению падающего излучения. Результаты измерений сравнивались с результатами, полученными при измерениях в волноводах.

Ключевые слова: микроволновое излучение; тонкое волокно; защитный экран; пропускание; отражение; поглощение; методы измерения.

Measurement of the characteristics of protective screens for microwave radiation made of thin conductive fibers

N. Kokodiy^{1,3}, A. Natarova², S. Pogorelov³

¹ V.N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Sq., 61022, Kharkiv, Ukraine
kokodiy.n.g.@gmail.com

² I. Kozhedub National Air Force University, 77/79, Sumska Str., 61023, Kharkiv, Ukraine
anastasija.natarova@gmail.com

³ National University of Pharmacy, 53, Pushkinska Str., 61002, Kharkiv, Ukraine

Abstract

In thin conductive fibers, which diameter is much smaller than the wavelength, under certain conditions, a very strong absorption of the microwave radiation can occur. The absorption efficiency factor can reach several thousand. It is suggested to use this effect for creation of protective screens. The absorption of radiation occurs in segments of graphite fibers with a diameter of tens micrometers (12...15 μm), which are randomly arranged on the paper or polyethylene film substrate. With such arrangement of fibers, characteristics of the screen do not depend on the radiation polarization. An advantage of the screens is also the uniformity of the frequency characteristics of transmission, absorption and reflection of radiation. The paper describes experiments on measurement of the transmission, reflection and absorption of radiation by screens in the centimeter wave range. The screens were placed in free space under different angles of the incident radiation. The measurement results were compared with the results obtained during measurements in waveguides. As it turned out, the results obtained by both methods are consistent. This makes it possible to recommend waveguide methods based on reflectometers. They are more convenient, fast and accurate than free space measurement methods.

Formulas for estimating the transmission, absorption and reflection of screens are given.

Keywords: microwave radiation; thin fiber; protective screen; transmission; reflection; absorption; measurement methods.

Список літератури

1. Линьков Л.М., Борботько Т.В., Богуш В.А., Колбун Н.В. Конструкции гибких поглотителей электромагнитной энергии СВЧ диапазона. *Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. 2003. Т. 1. № 1. С. 92–101.
2. Линьков Л.М., Богуш В.А., Борботько Т.В., Украинец Е.А., Колбун Н.В. Новые материалы для экранов электромагнитного излучения. *Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. 2004. Т. 2. № 3. С. 152–167.
3. Баранов С.А. Использование микропровода с естественным ферромагнитным резонансом для радиопоглощающих материалов. *Письма в ЖТФ*. 1998. Т. 24. № 14. С. 21–23.
4. Кузьмичев В.М., Кокодий Н.Г., Сафронов Б.В., Балкашин В.П. Фактор эффективности поглощения тонкого металлического цилиндра в микроволновом диапазоне. *Радиотехника и электроника*. 2003. Т. 48. № 11. С. 1349–1351.
5. Кокодий Н.Г. Поглощение микроволнового излучения очень тонким двухслойным цилиндром. *Радиотехника и электроника*. 2006. Т. 51. № 2. С. 1–4.
6. Кокодий Н.Г., Натарова А.О., Тиманюк В.А., Приз И.А. Гибкие защитные экраны для СВЧ-диапазона на основе тонких проводящих волокон. *Радиофізика та електроніка*. 2017. Т. 22. № 2. С. 79–83. <https://doi.org/10.15407/rej2017.02.079>
7. Kokodiy N.G., Natarova A.O., Timanyuk V.A., Priz I.A. Flexible protective microwave screens on the basis of thin conducting fibers. *Telecom-*

- munications and Radio Engineering*, 2017, vol. 71, no. 18, pp. 1671–1680. doi: 10.1615/Telecom-RadEng.v76.i18.80
8. Kerker M. The scattering of light and other electromagnetic radiation. New York, Academic Press, 1969. 666 p.
9. Bohren C.F., Huffman D.R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. New York, John Wiley&Sons, 1983. 530 p.
10. Кокодий Н.Г., Кайдаш М.В., Тиманюк В.А., Приз И.А. Взаимодействие электромагнитного излучения с тонкой металлической проволокой при скользящем падении волны. *Радиотехника и электроника*. 2017. Т. 62. № 3. С. 210–216. <https://doi.org/10.7868/S0033849417030123>
11. Kokodiy N.G., Kaidash M.V., Timaniuk V.A., Priz I.A. Interaction of electromagnetic radiation with a thin metal wire in the case of a glancing incident wave. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2017, vol. 62, no. 3, pp. 205–211. <https://doi.org/10.1134/S1064226917030123>

References

1. Lynkov L.M., Borbotko T.V., Bogush V.A., Kolbun N.V. Konstrukcii gibkikh poglotitelei elektromagnitnoi energii SVCH diapazona [The designs of flexible absorbers of electromagnetic energy of microwave range]. *Lectures of Belarusian state university of informatics and radioelectronics*, 2003, vol. 1, no. 1, pp. 92–101 (in Russian).
2. Lynkov L.M., Bogush V.A., Borbotko T.V., Ukrainets E.A., Kolbun N.V. Noveye materialy dlia ekranov elektromagnitnogo izlucheniia [New materials for electromagnetic radiation screens]. *Lectures of Belarusian state university of informatics and radioelectronics*, 2004, vol. 2, no. 3, pp. 152–167 (in Russian).

3. Baranov S.A. Ispolzovanie mikroprovoda s estestvennyim ferromagnitnym rezonansom dlya radiopogloschayuschih materialov [Use of a microconductor with natural ferromagnetic resonance for radio-absorbing materials]. *Pisma v ZhTF*, 1998, vol. 24, no. 14, pp. 21–23 (in Russian).
4. Kuzmichev V.M., Kokodiy N.G., Safronov B.V., Balkashin V.P. Faktor effektivnosti pogloscheniya tonkogo metallicheskogo tsilindra v mikrovolnovom diapazone [Absorption efficiency factor of a thin metal cylinder in the microwave range]. *Radiotekhnika i elektronika*, 2003, vol. 48, no. 11, pp. 1349–1351 (in Russian).
5. Kokodiy N.G. Pogloschenie mikrovolnovogo izlucheniya ochen tonkim dvuhsloynnyim tsilindrom [Absorption of microwave radiation by a very thin two-layer cylinder]. *Radiotekhnika i elektronika*, 2006, vol. 51, no. 2, pp. 1–4 (in Russian).
6. Kokodiy N.G., Natarova A.O., Timanyuk V.A., Priz I.A. Gibkie zaschitnyie ekranyi dlya SVCh diapazona na osnove tonkih provodyaschih volokon [Flexible protective shields for the microwave range based on thin conductive fibers]. *Radiofizika ta elektronika – Radio Physics and Electronics*, 2017, vol. 22, no. 2, pp. 79–83 (in Russian). <https://doi.org/10.15407/rej2017.02.079>
7. Kokodiy N.G., Natarova A.O., Timanyuk V.A., Priz I.A. Flexible protective microwave screens on the basis of thin conducting fibers. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2017, vol. 76, no. 18, pp. 1671–1680. doi: 10.1615/Telecom-RadEng.v76.i18.80
8. Kerker M. The scattering of light and other electromagnetic radiation. New York, Academic Press, 1969. 666 p.
9. Bohren C.F., Huffman D.R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. New York, John Wiley&Sons, 1983. 530 p.
10. Kokodiy N.G., Kaydash M.V., Timanyuk V.A., Priz I.A. Vzaimodeystvie elektromagnitnogo izlucheniya s tonkoy metallicheskoy provolokoy pri skolzyaschem padenii volnyi [Interaction of electromagnetic radiation with a thin metal wire during a sliding wave incidence]. *Radiotekhnika i elektronika*, 2017, vol. 62, no. 3, pp. 210–216 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S0033849417030123>
11. Kokodiy N.G., Kaydash M.V., Timanyuk V.A., Priz I.A. Interaction of electromagnetic radiation with a thin metal wire in the case of a glancing incident wave. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2017, vol. 62, no. 3, pp. 205–211. <https://doi.org/10.1134/S1064226917030123>