

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОГЛОЩАЮЩИХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ П-ОБРАЗНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

С.А. Хахомов¹, А.Л. Самофалов¹, Ю.В. Никитюк¹, И.В. Семченко^{1,2}, И.Ю. Аушев³

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²Государственное научно-производственное объединение

«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск

³Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Минск

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF ABSORBING METAMATERIALS BASED ON П-SHAPED ELEMENTS

S.A. Khakhomov¹, A.L. Samofalov¹, Y.V. Nikitjuk¹, I.V. Semchenko^{1,2}, I.Y. Aushev³

¹Francisk Skorina Gomel State University

²State Research and Production Association "Optics, Optoelectronics and Laser Technology", Minsk

³University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk

Аннотация. На основании численного моделирования определены значения параметров поглощающей структуры, состоящей из проводящих П-образных элементов, обеспечивающих формирование слабо отражающих структур с одновременно сильным поглощением волн в СВЧ-диапазоне. Многокритериальная оптимизация параметров метаматериала была выполнена с использованием генетического алгоритма MOGA, встроенного в модуль DesignXplorer программы ANSYS Workbench. В качестве варьируемых факторов использовались период структуры, ширина и толщина проводящего слоя П-образных элементов. В качестве откликов использовались резонансная частота и соответствующие значения коэффициентов отражения и коэффициентов поглощения метаматериала. Для создания проекта поглощающей структуры и определения значений откликов была использована программа ANSYS HFSS. Численный эксперимент проводился с использованием выборки, полученной методом латинских гиперкубов в модуле DesignXplorer программы ANSYS Workbench. Проведено сравнение параметров метаматериала, полученных в результате оптимизации, и параметров, полученных в результате конечно-элементного моделирования в программе ANSYS HFSS. Максимальная относительная погрешность результатов, полученных при использовании алгоритма MOGA, не превысила 1% при определении резонансных частот падающего излучения, 6% при определении коэффициентов поглощения метаматериала и 13% при определении коэффициентов отражения метаматериала.

Ключевые слова: метаматериал, поглощение, отражение, многокритериальная оптимизация, MOGA, ANSYS.

Для цитирования: Оптимизация параметров поглощающих метаматериалов на основе П-образных элементов / С.А. Хахомов, А.Л. Самофалов, Ю.В. Никитюк, И.В. Семченко, И.Ю. Аушев // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 3 (52). – С. 56–60. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_56. – EDN: DVNAMK

Abstract. On the basis of numerical simulation, the values of the parameters of an absorbing structure consisting of conductive П-shaped elements which ensure the formation of weakly reflecting structures with simultaneous strong absorption of waves in the microwave range have been determined. Multicriteria optimization of the metamaterial parameters was performed using the MOGA genetic algorithm built into the DesignXplorer module of the ANSYS Workbench program. The period of the structure, the width and thickness of the conductive layer of П-shaped elements were used as variable factors. The resonant frequency and the corresponding values of the reflection and absorption coefficients of the metamaterial were used as responses. The ANSYS HFSS program was used to design the absorbing structure and determine the response values. The numerical experiment was carried out using a sample obtained by the Latin hypercube method in the DesignXplorer module of the ANSYS Workbench program. The parameters of the metamaterial obtained as a result of optimization and the parameters obtained as a result of finite element modeling in the ANSYS HFSS program were compared. The maximum relative error of the results obtained using the MOGA algorithm did not exceed 1% when determining the resonant frequencies of the incident radiation, 6% when determining the absorption coefficients of the metamaterial, and 13% when determining the reflection coefficients of the metamaterial.

Keywords: metamaterial, absorption, reflection, multi-criteria optimization MOGA, ANSYS.

For citation: Optimization of parameters of absorbing metamaterials based on П-shaped elements / S.A. Khakhomov, A.L. Samofalov, Y.V. Nikitjuk, I.V. Semchenko, I.Y. Aushev // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2022. – № 3 (52). – P. 56–60. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_56 (in Russian). – EDN: DVNAMK

Введение

Исследования метаматериалов обеспечивают возможность создания объектов, скрытых в заданном диапазоне частот, при этом применение в качестве элементов метаматериалов

и метаповерхностей частиц прямоугольной формы позволяет расширить технологические возможности за счет применения высокоэффективных методов фотолитографии [1]–[4].

Важным направлением повышения эффективности применения метаматериалов является нахождение оптимальных значений параметров, обеспечивающих формирования слабо отражающих структур с одновременно сильным поглощением волн в заданном диапазоне частот.

Генетические алгоритмы являются частным случаем эволюционных методов, которые применяют имитацию естественного отбора и обеспечивают поиск лучших решений при помощи наследования и усиления полезных свойств множества объектов в процессе имитации их эволюции [5], [6]. Одним из эффективных генетических алгоритмов является алгоритм MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) [6], [7]. Многокритериальная оптимизация – это одновременная оптимизация двух и более целевых функций, а одним из методов решения данных задач является определение совокупности оптимальных по Парето решений, не доминирующих друг относительно друга [8], [9].

В работах [6], [8], [10]–[13] приведены результаты многокритериальной оптимизации параметров технологических процессов и параметров конструкций с использованием генетического алгоритма MOGA.

В данной работе при помощи генетического алгоритма MOGA, реализованного в модуле DesignXplorer программы ANSYS Workbench [14], установлены значения параметров метаматериала на основе массива П-образных элементов, обеспечивающие формирования слабо отражающих структур с одновременно сильным поглощением волн в СВЧ-диапазоне.

1 Конечно-элементный анализ

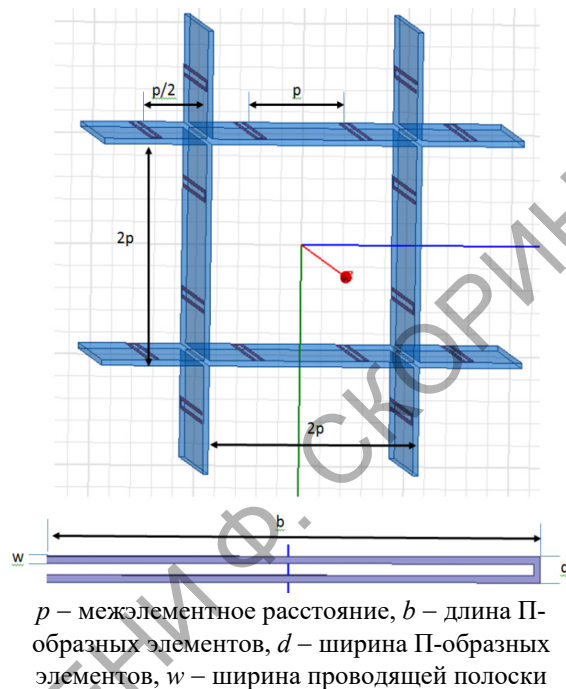
Для определения значений резонансной частоты падающего излучения ω_0 , коэффициента отражения R и коэффициента поглощения метаматериала A была использована программа конечно-элементного анализа ANSYS HFSS [14]–[15].

В программе был построен проект поглощающего метаматериала, состоящего из проводящих П-образных элементов, расположенных на диэлектрическом слое (рисунок 1.1). Структурные параметры П-образных элементов указаны на рисунке 1.1.

Параметры П-образных элементов b и d (рисунок 1.1) были найдены заранее с использованием аналитического подхода для определения поляризуемостей любой электрически малой частицы произвольной формы, описанного в работе [16]. В результате использования данного подхода и компьютерного моделирования, на основе метода конечных элементов были определены все поляризуемости П-образного элемента и найдены его оптимальные параметры (b и d) для резонансной частоты, равной 1,95 ГГц.

В данной конструкции используются П-образные резонаторы из медной фольги толщиной

t (мкм), расположенные на диэлектрике (стекло-теколит FR4). Такую структуру легко изготовить, используя планарные технологии.



p – межэлементное расстояние, b – длина П-образных элементов, d – ширина П-образных элементов, w – ширина проводящей полосы

Рисунок 1.1 – Проект поглощающего метаматериала, состоящего из проводящих П-образных элементов, расположенных на диэлектрическом слое

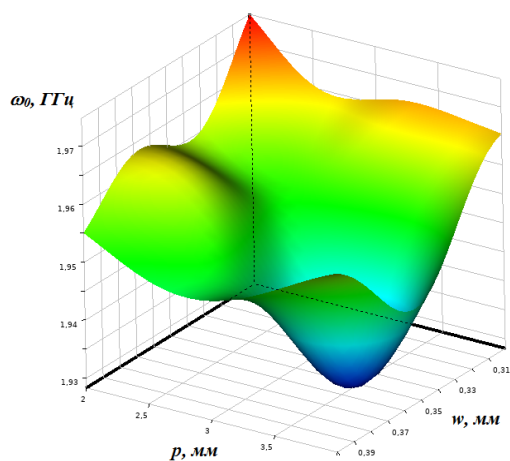
2 Численный эксперимент

При реализации численного эксперимента была применена выборка, сформированная с использованием метода латинских гиперкубов в модуле DesignXplorer [17].

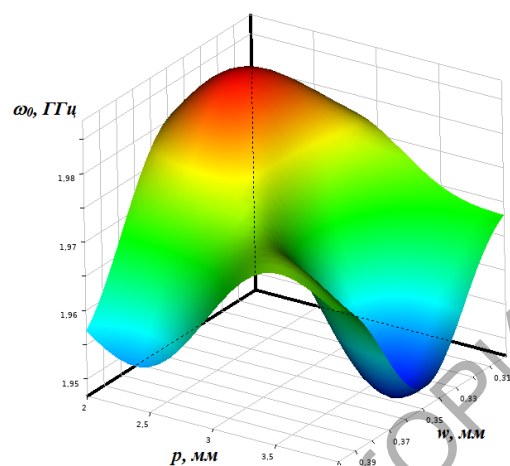
В соответствии с планом эксперимента выполнялись расчёты для 20 комбинаций трех входных параметров (таблица 2.1): P1 – период структуры p , P2 – ширина полосы проводящего слоя w , P3 – толщина проводящего слоя t . При этом определялись следующие выходные параметры: резонансная частота падающего излучения ω_0 , коэффициент отражения R и коэффициент поглощения метаматериала A . Таким образом, моделью объекта исследования являлись функции отклика, связывающие выходные параметры (ω_0 , R , A) с факторами (p , w , t). При создании поверхности отклика использовался метод непараметрической регрессии [17].

Таблица 2.1 – Параметры П-образного метаматериала

Входные параметры	Значения входных параметров
P1 (p , мм)	2,1; 2,3; 2,5; 2,7; 2,9; 3,1; 3,3; 3,5; 3,7; 3,9
P2 (w , мм)	0,305; 0,315; 0,325; 0,335; 0,345; 0,355; 0,365; 0,375; 0,385; 0,395
P3 (t , мкм)	18; 35

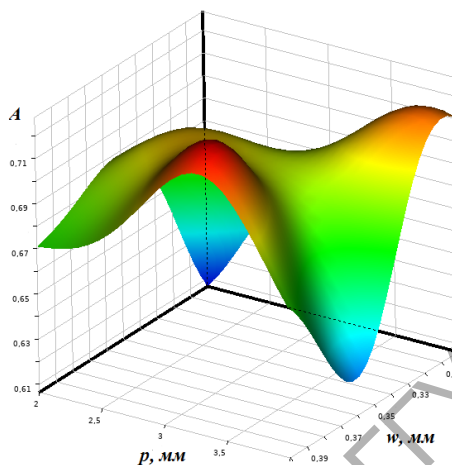


а)

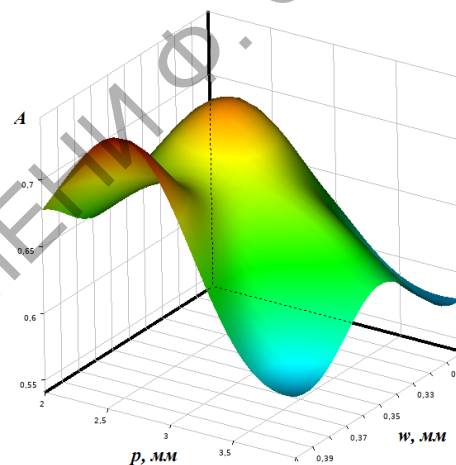


б)

Рисунок 2.1 – Зависимость резонансной частоты падающего излучения от параметров метаматериала p и w : а) $t = 0,18$ мкм; б) $t = 0,35$ мкм

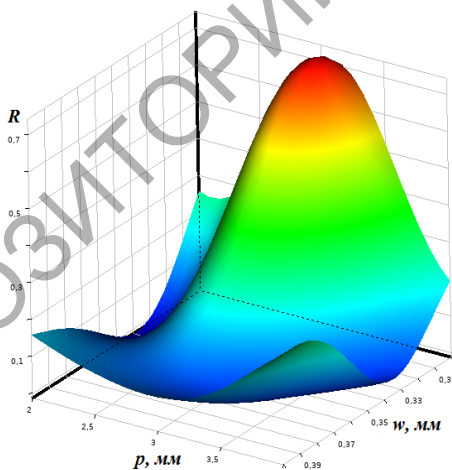


а)

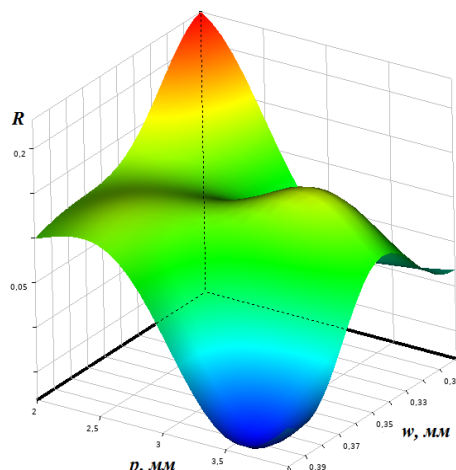


б)

Рисунок 2.2 – Зависимость коэффициента поглощения от параметров метаматериала p и w : а) $t = 0,18$ мкм; б) $t = 0,35$ мкм



а)



б)

Рисунок 2.3 – Зависимость коэффициента отражения от параметров метаматериала p и w : а) $t = 0,18$ мкм; б) $t = 0,35$ мкм

На рисунках 2.1–2.3 представлены зависимости резонансной частоты падающего излучения ω_0 , коэффициента поглощения метаматериала A и

коэффициента отражения метаматериала R от периода структуры p и от ширины полосы проводящего слоя w для толщин проводящего слоя t , равных 18 мкм и 35 мкм.

3 Определение оптимальных параметров поглощающего метаматериала на основе П-образных элементов

При проведении оптимизации применялся многокритериальный генетический алгоритм MOGA модуля DesignXplorer программы ANSYS Workbench с числом индивидов за итерацию, равным 100, и с числом индивидов начальной популяции, равным 100.

Оптимизация осуществлялась по критериям максимума значений коэффициента поглощения $A \rightarrow \max$ и минимума значений коэффициента отражения $R \rightarrow \min$ на резонансной частоте при толщине проводящего слоя t , равной 18 мкм и 35 мкм. Результаты оптимизации приведены в таблице 3.1. В скобках приведены значения параметров, полученные в результате конечно-элементного расчета с использованием программы ANSYS HFSS. Максимальная относительная погрешность результатов, полученных при использовании алгоритма MOGA, не превысила 1% при определении резонансных частот падающего излучения, 6% при определении коэффициентов поглощения метаматериала и 13% при определении коэффициентов отражения метаматериала.

Таблица 3.1 – Результаты многокритериальной оптимизации

P1 p , мм	3,6	2,6
P2 w , мм	0,376	0,397
P3 t , мкм	18	35
w_0 , ГГц	1,94 (1,92)	1,96 (1,97)
A	0,69 (0,70)	0,74 (0,70)
R	0,07 (0,08)	0,10 (0,11)

Заключение

В работе с применением генетического алгоритма MOGA выполнена многокритериальная оптимизация структурных параметров метаматериала на основе массива П-образных элементов. Проведено сравнение параметров метаматериала, полученных в результате оптимизации, и параметров, полученных в результате конечно-элементного моделирования в программе ANSYS HFSS. В результате оптимизации определены наборы параметров, использование которых на практике обеспечит формирование слабо отражающих структур на основе массива П-образных элементов с одновременно сильным поглощением волн в СВЧ-диапазоне. Используемый метод оптимизации продемонстрировал высокую точность нахождения наилучших требуемых параметров метаматериала. Следовательно, этот метод может применяться и в дальнейших исследованиях, параллельно и независимо от других методов, и особенно в тех случаях, когда использование других подходов затруднено в силу различных причин.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Метаматериалы и метаповерхности* / И.В. Семченко [и др.] // Наука и инновации. – 2020. – № 8. – С. 23–27.
2. *The effective optimal parameters of metamaterial on the base of omega-elements* / I.V. Semchenko [et al.] // Recent Global Research and Education: Technological Challenges. INTER-ACADEMIA 2016; Ed. by Ryszard Jablonski and Roman Szewczyk Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer. – 2017. – Vol. 519. – P. 3–9.
3. *Polarization properties of a rectangular balanced omega-element in the THz range* / I.V. Semchenko [et al.] // Engineering for Sustainable Future. INTER-ACADEMIA 2019; Ed. by Várkonyi-Kóczy A., Lecture Notes in Networks and Systems, Springer. – 2020. – Vol. 101. – P. 84–93.
4. *Radiation of circularly polarized microwaves by a plane periodic structure of Ω elements* / I.V. Semchenko [et al.] // J. Commun. Technol. Electron. – 2007. – № 52 (9). – P. 1002.
5. *Емельянов, В.В.* Теория и практика эволюционного моделирования / В.В. Емельянов, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 432 с.
6. *Красновская, С.В.* Обзор возможностей оптимизационных алгоритмов при моделировании конструкций компрессорно-конденсаторных агрегатов методом конечных элементов / С.В. Красновская, В.В. Напрасников // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2016. – № 2. – С. 92–98.
7. *Fonseca, C.* Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation discussion and generalization / C. Fonseca, P. Fleming // In Proceedings of The 5th International Conference on Genetic Algorithms. CA, USA. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc. – 1993. – P. 416–423.
8. *Бессмельцев, В.П.* Оптимизация режимов лазерной микрообработки / В.П. Бессмельцев, Е.Д. Булушев // Автометрия. – 2014. – Т. 50, № 6. – С. 3–21.
9. *Odu, G.O.* Review of multi-criteria optimization methods theory and applications / G.O. Odu, O.E. Charles-Owaba // IOSR Journal of Engineering. – 2013. – Vol. 3 (10). – P. 1–14.
10. *Multi-Objective Optimization of Microstructure of Gravure Cell Based on Response Surface Method* / S. Wu [at al.] // Processes. – 2021. – Vol. 9, № 2. – P. 1–15.
11. *Nikityuk, Y.V.* Optimization of two-beam laser cleavage of silicate glass / Y.V. Nikityuk, A.N. Serdyukov, I.Y. Aushev // J. Opt. Technol. – 2022. – Vol. 89. – P. 121–125.
12. *Никитюк, Ю.В.* Оптимизация параметров лазерного раскалывания кварцевого стекла / Ю.В. Никитюк, А.Н. Сердюков, И.Ю. Аушев // Проблемы физики, математики и техники. – 2021. – № 4 (49). – С. 21–28.

13. Оптимизация параметров обработки стали 12Х18Н9Т круглыми лазерными пучками / Ю.В. Никитюк [и др.] // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2022. – № 2. – С. 17–24.

14. ANSYS – официальный сайт компании ANSYS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ansys.com/>. – Дата доступа: 15.05.2022.

15. Банков, С.Е. Решение оптических и СВЧ задач с помощью HFSS / С.Е. Банков, Э.М. Гутцайт, А.А. Курушин. – Москва: ООО «Оркада», 2012. – 250 с.

16. Determining polarizability tensors for an arbitrary small electromagnetic scatterer / V.S. Asadchy [et al.] // Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications. – 2014. – Vol. 12, № 4. – P. 298–304.

17. Santner, T.J. The Design and Analysis of Computer Experiments / T.J. Santner, B.J. Williams, W.I. Notz – Springer Series in Statistics, 2003. – 285 p.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», подпрограмма «Опто- и СВЧ-электроника», а также проекта БРФФИ Ф22КИ-016.

Поступила в редакцию 12.07.2022.

Информация об авторах

Хахомов Сергей Анатольевич – д.ф.-м.н., доцент
Самофалов Андрей Леонидович – к.ф.-м.н., доцент
Никитюк Юрий Валерьевич к.ф.-м.н., доцент
Семченко Игорь Валентинович – д.ф.-м.н., профессор,
чл.-корр. АН Беларуси
Аушев Игорь Юрьевич – к.т.н., доцент