

01

Модель распространения терагерцового импульса через керамику на основе гидроксиапатита

© А.Е. Резванова,¹ Б.С. Кудряшов,¹ Д.Д. Скоробогатов,^{1,2} А.Н. Пономарев^{1,2}

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634055 Томск, Россия

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050 Томск, Россия

e-mail: ranast@ispms.ru, bsk3@ispms.ru, alex@ispms.ru, danilskor1@gmail.com

Поступило в редакцию 29 января 2024 г.

В окончательном виде 29 января 2024 г.

Принято к публикации 29 января 2024 г.

Методом конечных элементов построены компьютерные модели пропускания терагерцового излучения сквозь образцы пористой композитной керамики на основе гидроксиапатита с добавками углеродных нанотрубок. Данные модели позволили оценить влияние добавок нанотрубок в содержании 0.1 и 0.5 mass% на структуру и оптические свойства образцов. Используя результаты моделирования интенсивности и скорости пропускания ТГц-излучения, были определены оптические свойства модельных образцов, такие, как показатель преломления и коэффициент поглощения. Обнаружено, что с ростом пористости материала наблюдается увеличение коэффициента поглощения и снижение показателя преломления, что обусловлено более плотной структурой материала при добавлении нанотрубок. Полученные в результате компьютерного моделирования оптические параметры моделей образцов гидроксиапатита и гидроксиапатита с добавками нанотрубок имеют качественное согласие с экспериментальными данными, а также с литературными параметрами костных тканей.

Ключевые слова: моделирование, метод конечных элементов, оптические свойства, пористость.

DOI: 10.61011/JTF.2024.03.57372.18-24

Введение

Создание материалов для замещения дефектов костной ткани, обладающих механическими свойствами, близкими к свойствам кости [1–3], является актуальным направлением материаловедения.

При создании имплантатов для реконструкции костных тканей широко используется керамика на основе гидроксиапатита (ГА) благодаря структурному сходству с минеральным компонентом, высокой биологической активности и биосовместимости с костной тканью человека [4,5]. В то же время свойства ГА керамики, такие, как прочность, вязкость разрушения, а также пористость, значительно отличаются от таковых костной ткани человека [6,7], что ограничивает использование в местах имплантации с высокими механическими нагрузками.

Одним из важных структурных параметров материалов, в том числе керамических, является пористость [8], которая напрямую оказывает влияние на механические [3] и оптические [9–11] свойства, что необходимо учитывать при разработке имплантатов на их основе.

Пористость керамики на основе ГА может изменяться при введении в керамическую матрицу различных армирующих добавок, таких, как многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ). Добавки МУНТ заполняют поровое пространство матрицы ГА [12,13] и повышают плотность композитов за счет активации процесса спекания в керамике [1,14]. Это приводит к укреплению

границ зерен керамики ГА и сохранению микроструктуры матрицы, и, как следствие, к предотвращению или замедлению возникновения и распространения трещин в керамическом композите [15], что позволяет получить материал с более низкой пористостью по сравнению с ГА без добавок.

Так, в работе [16] поверхностная пористость композита на основе ГА при введении добавок 4 mass% МУНТ снизилась с 10 ± 1.5 до $5 \pm 2.5\%$. При этом наблюдается более высокая пористость в центре образца (10%), чем на периферии (5%), что является результатом градиента уплотнения. В работе [17] изучалось влияние функционализации керамики ГА без добавок и с добавками МУНТ на механические и биологические свойства композитов. В нефункционализированных образцах керамики ГА при добавлении 1 mass% МУНТ происходит незначительное уменьшение пористости с 2 до 1.5%. В работе [18] исследовалось влияние МУНТ на структуру и механические свойства керамики ZrO₂. Добавление 0.5 mass% МУНТ вместе с Ni в матрицу ZrO₂ привело к уменьшению пористости материала с 93.8 до 88%. В работе [19] 1.5 mass% МУНТ вводятся в керамику Al₂O₃, что привело к уменьшению пористости с 8 до 4%. Следовательно, использование МУНТ в качестве армирующих добавок в различные матрицы способствует получению композитного материала с заданной структурой.

Одним из методов исследования пористой структуры материалов является терагерцовая (THz) спектроскопия во временной области [20–22]. Изучение поведения THz-импульса позволяет исследовать внутреннюю структуру материалов и определять их оптические свойства, такие, как коэффициент поглощения, показатель преломления и временная задержка распространения THz-импульса, используемые для качественного анализа пористости материалов [23].

Оптические свойства керамических материалов зависят от эффектов, связанных с пространственным распределением локальных электрических полей, и обуславливается рассеянием THz-излучения как отдельными структурными элементами, так и их группами [24]. Таким образом, определение оптических свойств позволяет получить важную информацию о внутренней структуре, что необходимо учитывать при анализе пористости материалов.

Исследования оптических свойств материала обусловлены необходимостью получения множества экспериментальных образцов с различным содержанием добавок МУНТ, а также обработки большого количества экспериментальных данных.

Для оптимизации исследовательской задачи имеет смысл применять методы компьютерного моделирования, среди которых наиболее предпочтительным является метод конечных элементов (МКЭ). Данный метод зарекомендовал себя в области инженерно-математического моделирования в задачах структурного анализа, теплопередачи, потока жидкости, массопереноса и электромагнитного потенциала [25].

Так, в работе [26] МКЭ применялся для моделирования электрической проводимости двумерной и трехмерной сред при наличии идеально проводящих или изолирующих включений. Другим примером использования МКЭ является моделирование наночастиц типа ядро-оболочка, которые сочетают в себе деформационно-связанную магнитоэлектрическую и пьезоэлектрическую фазы, и анализируется их магнитоэлектрическое поведение [27]. Настоящая работа направлена на разработку имитационных моделей пропускания THz-излучения через пористую структуру материалов на основе ГА с добавлением 0.1 и 0.5 mass% МУНТ.

1. Методы исследования

1.1. Моделирование структуры

Для проведения вычислительного эксперимента применяются компьютерные программы, позволяющие моделировать исследуемые объекты и происходящие с ними процессы, а также позволяющие получить массивы выходных рассчитанных значений [28–30]. Для решения поставленной в настоящей работе задачи используется среда моделирования COMSOL Multiphysics [30], основанная на методе конечных элементов.

В данной среде создана программа для автоматического построения структурных моделей композитного материала по заданным параметрам, таким, как размеры образца, количество пор, максимальный и минимальный радиусы пор, минимальное и максимальное количество углеродных нанотрубок (УНТ) в порах.

Алгоритм создания моделей пористой структуры материалов с включениями в виде нанотрубок:

1) создание основы модели в виде цилиндра радиусом $20\ \mu\text{m}$ и высотой $40\ \mu\text{m}$;

2) формирование шаров радиусом от 0.1 до $1\ \mu\text{m}$ и вырезание их из основного цилиндра с помощью инструмента Difference для образования пор;

3) создание цилиндра с радиусом $9\ \text{nm}$ и высотой $15\ \mu\text{m}$ в случайном направлении в каждой сформированной поре для моделирования УНТ;

4) добавление к каждому цилиндру, созданному в поре, аналогичных по размеру цилиндров с различными углами наклона для образования агломератов УНТ;

5) образование вокруг УНТ внешнего слоя из ГА с радиусом $45\ \mu\text{m}$ и высотой, равной высоте УНТ;

6) создание дополнительных цилиндров, равных основному по размерам для обрезки каждой УНТ с поверхности модели при помощи инструмента Intersection.

В данном исследовании предлагаются модели композитного материала, основанные на упрощенном представлении МУНТ в форме сплошного цилиндра. Ключевым параметром данных моделей является диаметр цилиндра, который составляет $18\ \text{nm}$, что соответствует экспериментально-определенному диаметру МУНТ.

Этапы создания модели структуры композитного материала на основе ГА с добавлением УНТ графически показаны на рис. 1.

1.2. Моделирование процесса пропускания THz-излучения

Для расчета оптических свойств моделей, таких, как показатель преломления и коэффициент поглощения, был использован метод конечных элементов (МКЭ), встроенный в среду COMSOL Multiphysics [31]. Модуль Release from Grid был использован для построения компьютерной модели пропускания THz-излучения посредством задания сети точек для источников излучения. С помощью этого модуля была построена сеть цилиндрического типа, в которой начальные точки для лучей находятся на окружности, а сами лучи направлены перпендикулярно заданной плоскости. Были построены две сети для анализа влияния площади распространения излучения на оптические свойства модели (рис. 2).

При расчете траектории движения, когда луч достигает границы раздела между двумя средами с разными показателями преломления, происходит разделение луча на отраженный и преломленный (рис. 3), направление движения которых вычисляется по закону Снеллиуса (1):

$$n_1 \theta_1 = n_2 \theta_2, \quad (1)$$

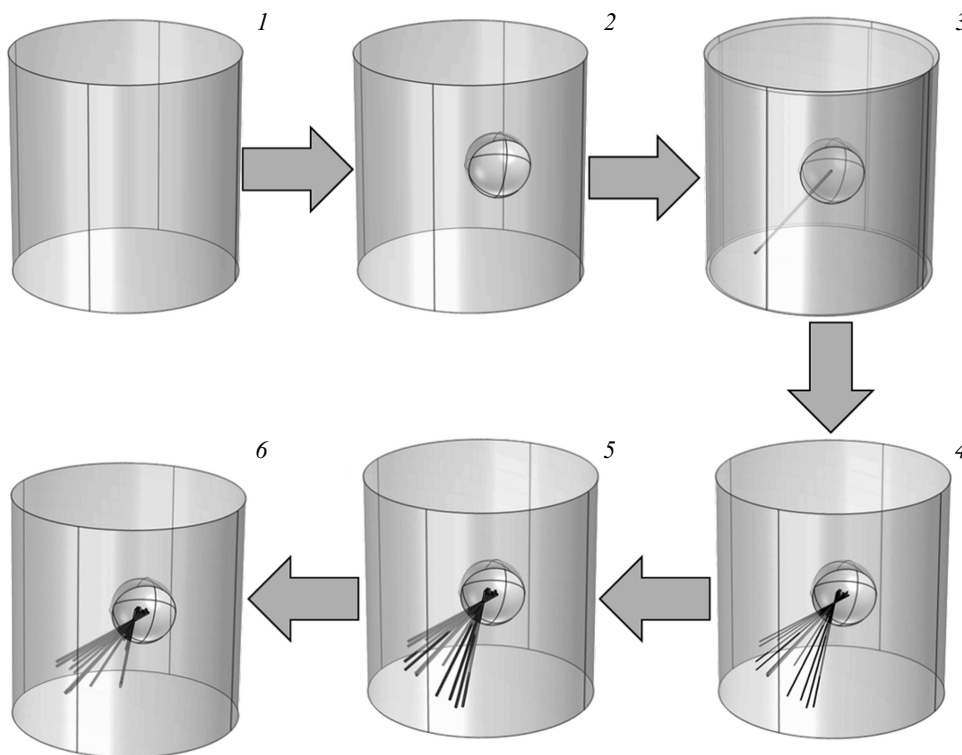


Рис. 1. Этапы создания модели пористой структуры цилиндрического образца: 1 — создание цилиндрической основы, 2 — формирование пор, 3 — создание осевой УНТ, 4 — добавление остальных УНТ, 5 — добавление внешнего слоя ГА вокруг нанотрубок, 6 — обрезка нанотрубок на границе с поверхностью.

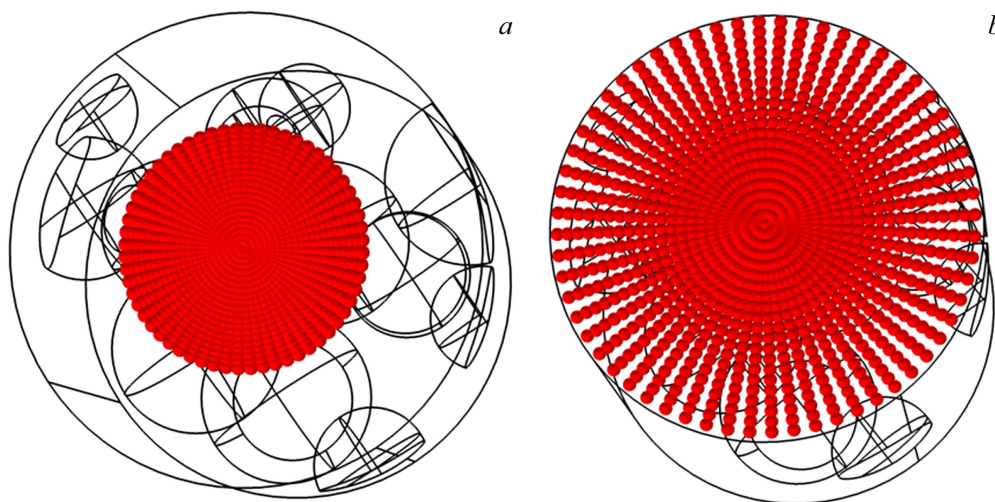


Рис. 2. Источники излучения в цилиндрическом образце: прохождение излучения через центр радиального сечения (a), через всю поверхность радиального сечения (b).

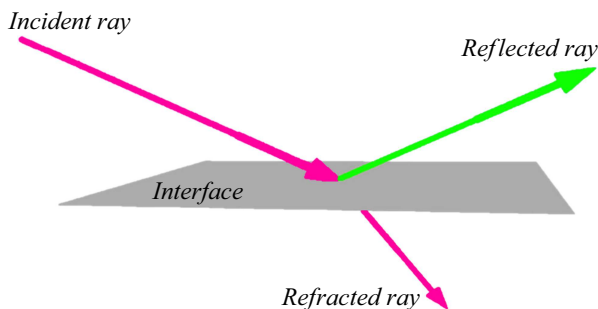


Рис. 3. Разделение луча на отраженный и преломленный на границе сред [31].

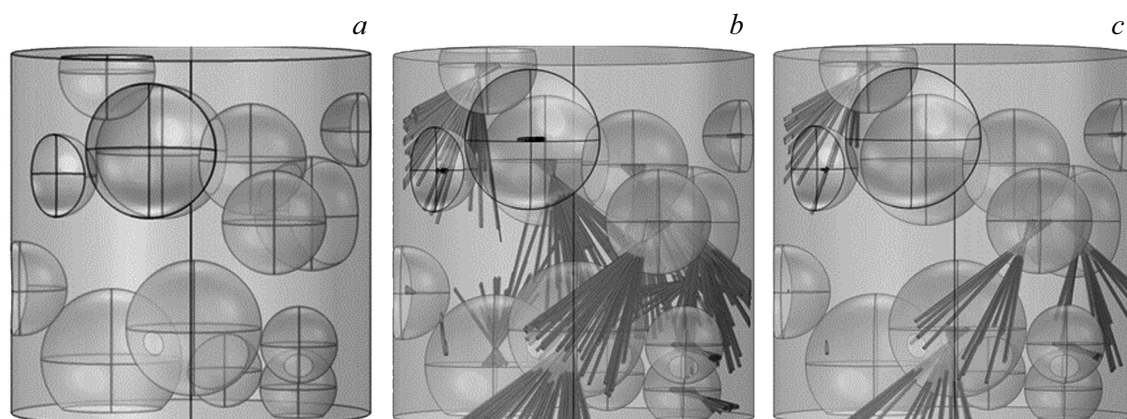


Рис. 4. Модели структур керамических образцов на основе ГА трех типов: *a* — ГА, *b* — ГА-0.1 mass% УНТ, *c* — ГА-0.5 mass% УНТ.

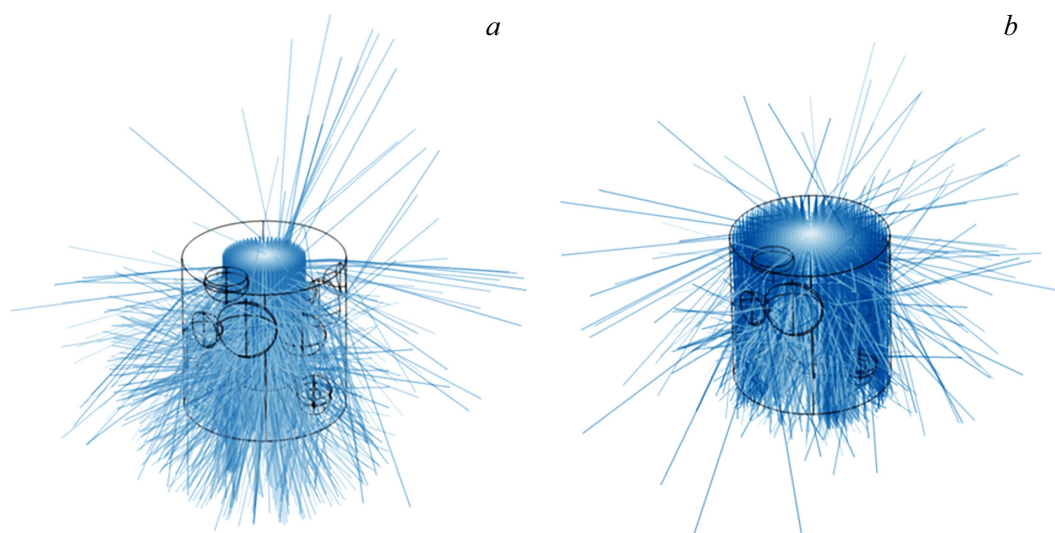


Рис. 5. Модели пропускания ТГц-излучения для образца ГА без добавок: *a* — через центр радиального сечения, *b* — через всю поверхность радиального сечения.

где n_1 — показатель преломления среды, из которой свет падает на границу раздела, θ_1 — угол между падающим на поверхность лучом и нормалью к поверхности, n_2 — показатель преломления среды, в которую свет падает, пройдя границу раздела, θ_2 — угол между прошедшим через поверхность лучом и нормалью к поверхности.

Для моделирования прохождения лучей была выбрана плоская волна с заданной частотой 1 THz. Изначальная интенсивность излучения составляла 1000 W/m^2 . Частота излучения была определена на основе эксперимента, проводимого в частотном диапазоне от 0.25 до 1.3 THz [32]. В связи с тем что погрешность измерений увеличивалась при приближении к граничным значениям, было принято решение использовать среднее значение частоты. Кроме того, выбор частоты излучения при моделировании обусловлен наличием максимального пика поглощения при частоте $\sim 1 \text{ THz}$, объяснение которого представлено в [32].

2. Моделирование оптических свойств керамических образцов на основе гидроксипатита

На рис. 4 представлены модели пористых структур керамических образцов на основе ГА трех типов: без добавок УНТ, с добавлением 0.1 и 0.5 mass% УНТ.

Пропускание ТГц-излучения сквозь данные структуры было смоделировано двумя способами: через центр и всю поверхность радиального сечения модели. Результат прохождения излучения для ГА без добавок представлен на рис. 5, для ГА с добавками 0.1 и 0.5 mass% УНТ — на рис. 6.

Интенсивность излучения для каждой модели была рассчитана с использованием модуля The Ray Optics Module [31]. На основе полученных данных были вычислены коэффициенты поглощения по закону Бугера-

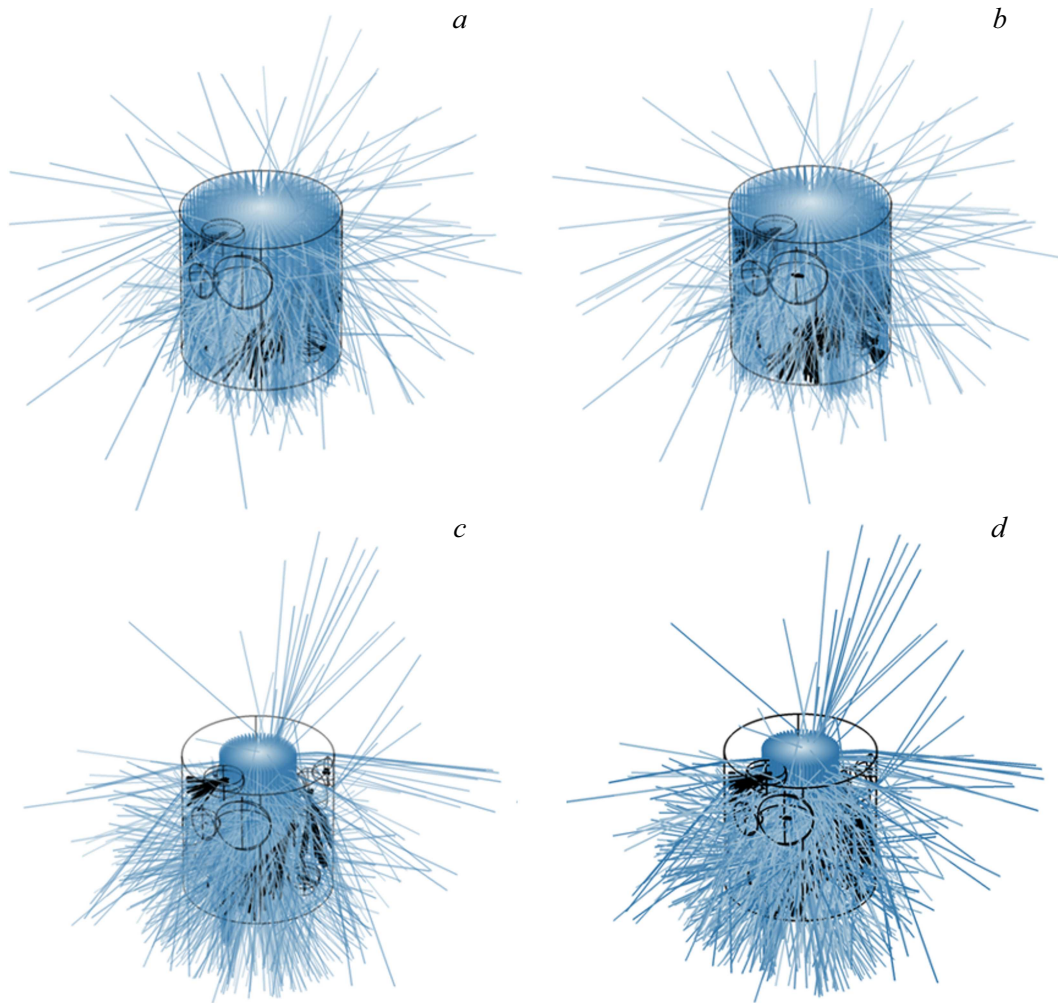


Рис. 6. Пропускание THz-излучения для моделей ГА-0.1 mass% УНТ: *a* — через центр радиального сечения, *c* — через всю поверхность радиального сечения; ГА-0.5 mass% УНТ: *b* — через центр радиального сечения, *d* — через всю поверхность радиального сечения.

Ламберта-Бера (2):

$$I(l) = I_0 e^{-k_\lambda l}, \quad (2)$$

где $I(l)$ — выходная интенсивность, $[W/m^2]$, I_0 — интенсивность входного сигнала, $[W/m^2]$, k_λ — коэффициент поглощения, $[cm^{-1}]$, l — толщина материала, $[mm]$.

На рис. 7 представлены зависимости интенсивностей и коэффициентов поглощения от пористости моделей образцов с различным содержанием УНТ в матрице ГА (1 — ГА без добавок, 2 — ГА-0.1 mass% УНТ, 3 — ГА-0.5 mass% УНТ). Пористость P определялась как отношение объема сформированных пор к общему объему материала [8] по формуле (3):

$$P = \left(\frac{V_p}{V_0} \right) \cdot 100\%, \quad (3)$$

где V_p — объем пор в материале, V_0 — объем основного цилиндра.

Показано, что с увеличением пористости материала наблюдаются снижение интенсивности прохождения THz-луча и рост коэффициента поглощения.

Далее был рассчитан абсолютный показатель преломления по формуле

$$n = \frac{c}{v_{\text{sample}}}, \quad (4)$$

где n — показатель преломления, c — скорость света в вакууме, v_{sample} — скорость распространения излучения в веществе [33].

На рис. 8 показаны зависимости показателя преломления от пористости моделей (1 — ГА, 2 — ГА-0.1 mass% УНТ, 3 — ГА-0.5 mass% УНТ). Видно, что с ростом пористости показатель преломления уменьшается. Обобщенные результаты оптических свойств моделей сведены в табл. 1.

Полученные данные моделирования пористости и оптических свойств сравнивались с результатами экспериментального исследования композитной керамики

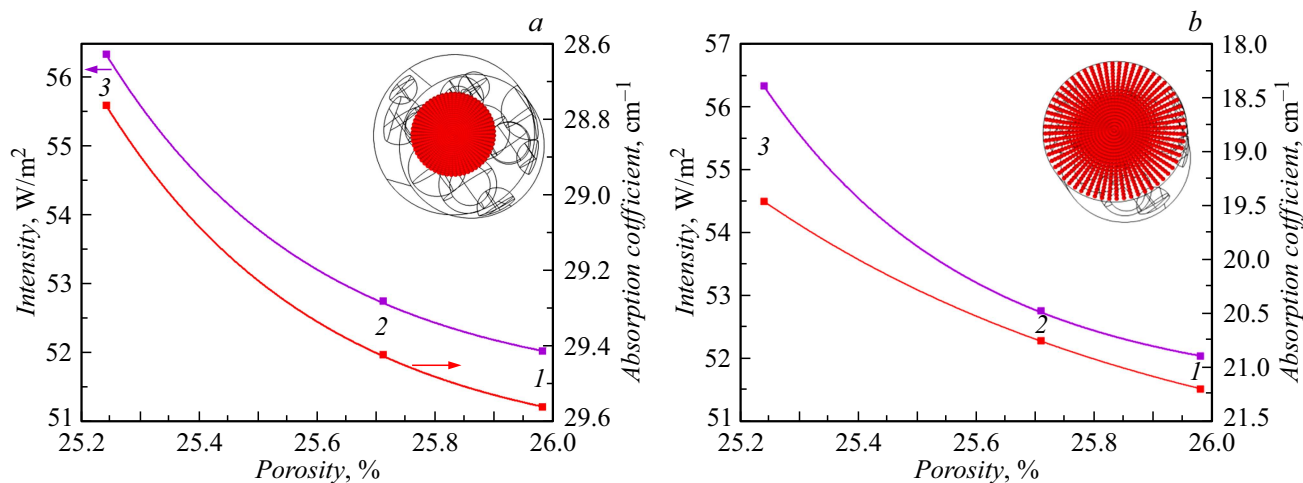


Рис. 7. Зависимости интенсивностей и коэффициентов поглощения от пористости моделей: *a* — через центр радиального сечения, *b* — через всю поверхность радиального сечения.

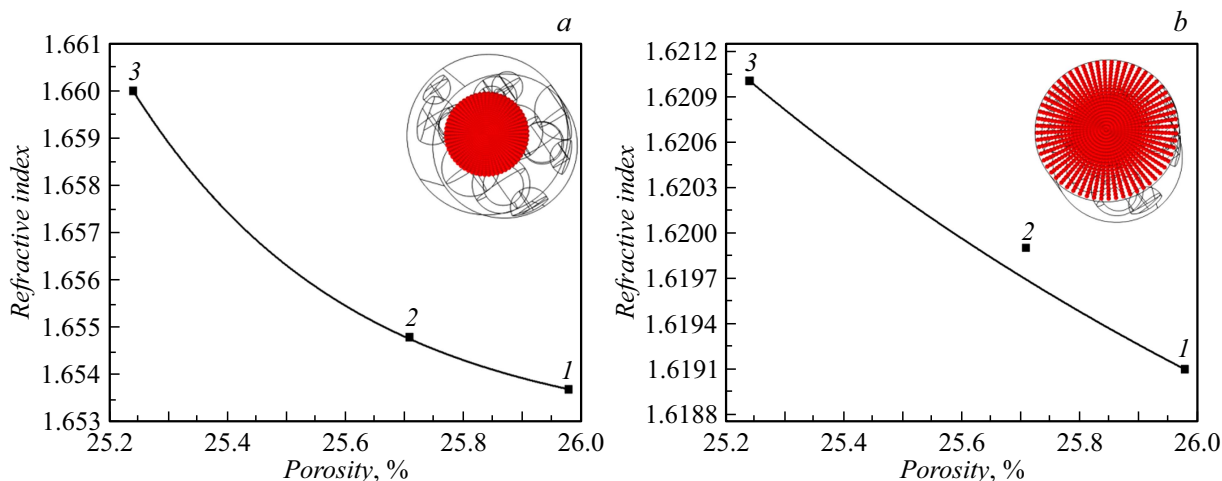


Рис. 8. Зависимости показателей преломления от пористости моделей: *a* — через центр радиального сечения, *b* — через всю поверхность радиального сечения.

Таблица 1. Результаты моделирования оптических свойств

| Пропускание пучка ТГц-излучения через центр радиального сечения модели | | | | |
|--|---------------|---------------------------------|------------------------|--|
| УНТ, mass% | Пористость, % | Интенсивность, W/m ² | Показатель преломления | Коэффициент поглощения, cm ⁻¹ |
| 0.0 | 25.98 | 52.05 | 1.654 | 29.56 |
| 0.1 | 25.71 | 52.77 | 1.655 | 29.42 |
| 0.5 | 25.24 | 56.34 | 1.660 | 28.76 |
| Пропускание пучка ТГц-излучения через всю поверхность радиального сечения модели | | | | |
| 0.0 | 25.98 | 52.05 | 1.6191 | 21.19 |
| 0.1 | 25.71 | 52.77 | 1.6199 | 20.75 |
| 0.5 | 25.24 | 56.34 | 1.6210 | 19.45 |

Таблица 2. Экспериментальные данные оптических свойств ГА керамики [32]

| Экспериментальные данные ТНз-спектроскопии | | | |
|--|---------------|------------------------|--|
| МУНТ, mass% | Пористость, % | Показатель преломления | Коэффициент поглощения, cm^{-1} |
| 0.0 | 27.5 | 2.54 | 34.69 |
| 0.1 | 23 | 2.70 | 28.5 |
| 0.5 | 8 | 2.83 | 27.6 |

Таблица 3. Литературные данные оптических свойств материалов

| Материал | Показатель преломления | Коэффициент поглощения, cm^{-1} |
|---------------------|------------------------|--|
| ГА | 1.64 [34] | 37.08 [35] |
| Кортикальная кость | 1.94 [36] | 43.42 [36] |
| | 2.34 [37] | 56.54 [37] |
| Трабекулярная кость | 0.97 [38] | 19.6 [38] |
| Эмаль | 2.91 [39] | 43.33 [40] |
| Дентин | 2.41 [39] | 48.76 [40] |

ГА-МУНТ методом ТНз-спектроскопии во временной области в частотном диапазоне от 0.2 до 1.3 THz [32] (табл. 2). Пористость образцов экспериментально определялась методом Архимеда с использованием теоретической плотности 3.167 g/cm^3 для стехиометрического ГА и изменялась от 8 до 27.5% с увеличением содержания добавок МУНТ до 0.5 mass%. Детальное описание методики получения композитной керамики представлено в работе [1].

Сравнение результатов моделирования поглощения и преломления композитов ГА-УНТ показало количественное согласие с литературными данными оптических свойств ГА и костных тканей человека, в частности, с кортикальной и трабекулярной костями [36–38] (табл. 3).

Адекватность полученных моделей подтверждается качественным согласием с параметрами, полученными в ходе проведения эксперимента исследования пористой структуры керамики ГА-МУНТ методом ТНз-спектроскопии [32]. Наиболее приближенной к экспериментальной методике исследования оптических свойств является модель с пропусканием излучения через центр радиального сечения образца.

Заключение

Разработана программа по автоматизированному созданию пористой структуры образцов на основе ГА с добавлением различных концентраций УНТ. С помощью данной программы построены структурные моде-

ли трех типов: ГА керамика без добавок и композиты ГА-0.1 mass% УНТ, ГА-0.5 mass% УНТ, через который методом конечных элементов смоделирован процесс пропускания ТНз-излучения, позволяющий оценить влияние добавок УНТ на структуру и оптические свойства образцов. Смоделировано два вида прохождения ТНз-излучения через центр и всю поверхность радиального сечения моделей, из которых наибольшим сходством с экспериментом обладают модели с пропусканием излучения через центр сечения образца. Для каждой модели проводились расчеты коэффициентов поглощения в соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера с использованием значений интенсивностей пропускания ТНз-излучения, а также абсолютных показателей преломления. По результатам расчетов установлена корреляция между оптическими параметрами и пористостью моделей керамических образцов на основе ГА. Показано, что на структуру и оптические параметры керамики можно влиять путем изменения пористости, варьируя концентрации добавок УНТ. Как для экспериментальных образцов, так и для полученных моделей, пористость снижается при внедрении добавок УНТ, которые, располагаясь в поровом пространстве матрицы ГА, приводят к получению более плотного материала.

Разработанные компьютерные модели позволят сократить временные и производственные затраты, как на синтез реальных образцов, так и на проведение исследований за счет дополнения экспериментальных данных результатами моделирования.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема № FWRW-2022-0002.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.S. Barabashko, M.V. Tkachenko, A.A. Neiman, A.N. Ponomarev, A.E. Rezvanova. *Appl. Nanosci.*, **10**, 2601 (2020). DOI: 10.1007/s13204-019-01019-z
- [2] R.G. Ribas, V.M. Schatkoski, T.L. do Amaral Montanheiro, B.R.C. deMenezes, C. Stegemann, D.M.G. Leite,

- G.P. Thim. *Ceram. Intern.*, **45**(17), 21051 (2019). DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.07.096
- [3] Y. Han, Q. Wei, P. Chang, K. Hu, O.V. Okoro, A. Shavandi, L. Nie. *Crystals*, **11**(4), 353 (2021). DOI: 10.3390/cryst11040353
- [4] T. Zhang, W. Cai, F. Chu, F. Zhou, S. Liang, C. Ma, Y. Hu. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **128**, 105681 (2020). DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105681
- [5] E. Fiume, G. Magnaterra, A. Rahdar, E. Vern., F. Bairo. *Ceramics*, **4**(4), 542 (2021). DOI: 10.3390/ceramics4040039
- [6] X. Zhao, J. Zheng, W. Zhang, X. Chen, Z. Gui. *Ceram. Intern.*, **46**(6), 7903 (2020). DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.12.010
- [7] P. Khalid, V.B. Suman. *J. Bionanosci.*, **11**(3), 233 (2017). DOI: 10.1166/jbns.2017.1431
- [8] С. Грег, К. Синг. *Адсорбция, удельная поверхность, пористость* (Мир, М., 1984)
- [9] O.J. Akinribide, G.N. Mekgwe, S.O. Akinwamide, F. Gamaoun, C. Abeykoon, O.T. Johnstone, P.A. Olubambi. *J. Mater. Res. Tech.*, **21**, 712 (2022). DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.09.027
- [10] A. Wagner, B. Ratzker, S. Kalabukhov, M. Sokol, N. Frage. *J. Eur. Cer. Soc.*, **39**(4), 1436 (2019). DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.006
- [11] R. Shahmiri, O.C. Standard, J.N. Hart, C.C. Sorrell. *J. Prosthet. Dent.*, **119**(1), 36 (2018). DOI: 10.1016/j.prosdent.2017.07.009
- [12] F. Moussy. *J. Biomed. Mat. Res. A*, **94**(4), 1001 (2010). DOI: 10.1002/jbm.a.32866
- [13] A. Faingold, S.R. Cohen, R. Shahar, S. Weiner, L. Rapoport, H.D. Wagner. *J. Biomech.*, **47**(2), 367 (2014). DOI: 10.1016/j.jbiomech.2013.11.022
- [14] M.S. Barabashko, M.V. Tkachenko, A.E. Rezvanova, A.N. Ponomarev. *Russ. J. Phys. Chem.*, **95**(5), 1017 (2021). DOI: 10.1134/S0036024421050058
- [15] D. Veljović, G.D. Vuković, I. Steins, E. Palcevskis, P. Uskoković, R. Petrović, D. Janačković. *Sci. Sinter.*, **45**(2), 33 (2013). DOI: 10.2298/SOS1302233V
- [16] D. Lahiri, V. Singh, A.K. Keshri, S. Seal, A. Agarwal. *Carbon*, **48**(11), 3103 (2010). DOI: 10.1016/j.carbon.2010.04.047
- [17] S. Mukherjee, B. Kundu, A. Chanda, S. Sen. *Ceram. Int.*, **41**(3), 3766 (2015). DOI: 10.1016/j.ceramint.2014.11.052
- [18] B. Henriques, D. Fabris, E. Lopes, A.C. Moreira, I.F. Mantovani, C.P. Fernandes, M.C. Fredel. *Adv. Eng. Mater.*, **24**(1), 2100624 (2022). DOI: 10.1002/adem.202100624
- [19] L. Yu, P. Jia, Y. Song, B. Zhao, Y. Pan, J. Wang, H. Cui, R. Feng, H. Li, X. Cui, Z. Gao, X. Fang, L. Zhang. *J. Mater. Res. Tech.*, **18**, 3541 (2022). DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.04.035
- [20] A.S. Nikoghosyan, H. Ting, J. Shen, R.M. Martirosyan, M.Yu. Tunyan, A.V. Papikyan, A.A. Papikyan. *J. Contemp. Phys. Arme.*, **51**, 56 (2016). DOI: 10.3103/S1068337216030087
- [21] P. Bawuah, T. Ervasti, N. Tan, J.A. Zeitler, J. Ketolainen, K.-E. Peiponen. *Int. J. Pharm.*, **509**(1-2), 439 (2016). DOI: 10.1016/j.ijpharm.2016.06.023
- [22] Yu.V. Kistenev, V.V. Nikolaev, O.S. Kurochkina, A.V. Borisov, E.A. Sandykova, N.A. Krivova, D.K. Tuchina, P.A. Timoshina. *Opt. Spectr.*, **126**, 523 (2019). DOI: 10.1134/S0030400X19050138
- [23] P. Bawuah, D. Markl, D. Farrell, M. Evans, A. Portieri, A. Anderson, D. Goodwin, R. Lucas, J.A. Zeitler. *J. Inf. Millim. Te. W.*, **41**, 450 (2020). DOI: 10.1007/s10762-019-006590
- [24] Д.С. Безмельничин, Д.А. Лизункова, И.А. Шишкин. *Вестник молодых ученых и специалистов Самарского ун-та*, **1**(16), 261 (2020).
- [25] J. Fish, T. Belytschko. *A First Course in Finite Elements* (John Wiley & Sons, 313, 2007)
- [26] П.Е. Сизин. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, **5**, 43 (2023).
- [27] S. Flocchi, E. Chiamello, A. Marrella, G. Suarato, M. Bonato, M. Parazzini, P. Ravazzani. *PloS one*, **17**(9), E0274676 (2022). DOI: 10.1371/journal.pone.0274676
- [28] V.V. Dmitriev, T.V. Gandzha, I.M. Dolganov, N.V. AksenoVA. *Pet. Coal.*, **59**(4), 429 (2017).
- [29] T.V. Gandzha, K.A. Isakov, A.V. Shapovalov. *Russ. Phys. J.*, **65**(4), 663 (2022). DOI: 10.1007/s11182-022-02682-6
- [30] COMSOL [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.comsol.ru/>. Дата обращения: 28.11.2023
- [31] Ray Optics Module User's Guide [Электронный ресурс] <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.roptics/RayOpticsModuleUsersGuide.pdf>. Дата обращения: 28.11.2023
- [32] A.E. Rezvanova, B.S. Kudryashov, A.N. Ponomarev, A.I. Knyazkova, V.V. Nikolaev, Y.V. Kistenev. *Nanosystems: Phys. Chem. Math.*, **14**(5), 530 (2023). DOI: 10.17586/2220-8054-2023-14-5-530-538
- [33] С.И. Борисенко, О.Г. Ревинская, Н.С. Кравченко, А.В. Чернов. *Показатель преломления света и методы его экспериментального определения* (Изд-во Томского политех. ун-та, Томск, 2014)
- [34] P. Huang, B. Zhou, Q. Zheng, Y. Tian, M. Wang, L. Wang, J. Li, W. Jiang. *Adv. Mater.*, **32**(1), 905951 (2020). DOI: 10.1002/adma.201905951
- [35] M. Plazanet, J. Tasseva, P. Bartolini, A. Taschin, R. Torre, C. Combes, C. Rey, A. Di Michele, M. Verezhak, A. Gourrier. *PLoS One*, **13**(8), E0201745 (2018). DOI: 10.1371/journal.pone.0201745
- [36] M. Bessou, B. Chassagne, J.-P. Caumes, C. Pradere, P. Maire, M. Tondusson, E. Abraham. *Appl. Opt.*, **51**(28), 6738 (2012). DOI: 10.1364/AO.51.006738
- [37] M.R. Stringer, D.N. Lund, A.P. Foulds, A. Uddin, E. Berry, R.E. Miles, A.G. Davies. *Phys. Med. Biol.*, **50**(14), 3211 (2005). DOI: 10.1088/0031-9155/50/14/001
- [38] A.S. Nikoghosyan, J. Shen, H. Ting. *Physical Properties of Human Jawbone, Spongy Bone, Collagen and Cerabone Bone Transplantation Material in Range of 0.2 to 2.5 THz*, 44th Intern. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz, IEEE, **1–2**, (2019). DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2019.8873754
- [39] J. Cai, M. Guang, J. Zhou, Y. Qu, H. Xu, Y. Sun, H. Xiong, S. Liu, X. Chen, J. Jin, X. Wu. *Opt. Express*, **30**(8), 13134 (2022). DOI: 10.1364/OE.452769
- [40] Y.C. Sim, I. Maeng, J.-H. Son. *Curr. Appl. Phys.*, **9**(5), 946 (2009). DOI: 10.1016/j.cap.2008.09.008