05

Перспектива применения градиентных ячеистых структур с управляемой диэлектрической проницаемостью для 3D-печати линзы Люнеберга

© М.Ф. Ахматнабиев,[1,2] М.В. Тимошенко,[2] М.М. Сычев,[1,2] А.А. Петров,[3] С.В. Дьяченко[1,2]

[1]Филиал Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова национального исследовательского центра „Курчатовский Институт“ — Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова,
199034, Санкт-Петербург, Россия
[2]Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
190013 Санкт-Петербург, Россия
[3]Научно-исследовательский институт „Вектор“,
197022 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: svdiachenko@technolog.edu.ru

Поступило в Редакцию 11 ноября 2024 г.
В окончательной редакции 24 февраля 2025 г.
Принято к публикации 27 февраля 2025 г.

В ходе исследования разработан материал для 3D-печати линзы Люнеберга, исследованы электрические и механические свойства ячеистых материалов, и возможность управления их диэлектрической проницаемостью для использования в изготовлении линзы. Показано, что с помощью структур на основе трижды периодических поверхностей минимальной энергии, возможно получить необходимые значения диэлектрической проницаемости путем изменения степени заполнения пространства веществом. Подобраны геометрии трижды периодических поверхностей минимальной энергии, получена формула зависимости диэлектрической проницаемости от степени заполнения пространства структуры, благодаря чему возможно создание промежуточных слоев линзы Люнеберга с заданным значением диэлектрической проницаемости.

Ключевые слова: линза Люнеберга, сферическая линза, антенная линза, диэлектрическая проницаемость, аддитивные технологии, 3D-печать, ячеистые материалы, градиентные материалы, трижды периодические поверхности минимальной энергии.

DOI: 10.61011/JTF.2025.07.60655.417-24

Введение

В радиокомплексах СВЧ диапазона (дециметровые и сантиметровые волны) используются разнообразные типы антенн. Среди них особый интерес представляют сферические линзы из диэлектрических материалов, позволяющие формировать требуемую диаграмму направленности (ДН), в любом направлении, и осуществлять с ее помощью сканирование пространства путем перемещения излучателя или коммутации нескольких излучателей, расположенных вблизи ее поверхности. Такие линзы пригодны для формирования многолучевых ДН, что важно для многих приложений.

С учетом сферической симметрии линзы возможно одновременное формирование нескольких диаграмм направленности антенны. При этом достигается независимость формирования отдельных лучей и высокое быстродействие сканирования при условии электрического переключения [1].

Согласно классификации, приведенной в [2], сферические линзы могут быть изготовлены из однородного и неоднородного диэлектрика. Однако в случае использования однородного диэлектрика не представляется возможным сформировать на раскрыве линзы плоский волновой фронт, который соответствует узкой ДН.

В технике СВЧ наиболее перспективными для применения считаются линзы Люнеберга (ЛЛ), названные в честь немецкого математика и физика Рудольфа Карла Люнеберга и описанные им в [3]. В своей работе он показал, что сферическая линза, преломляет входящие в нее лучи таким образом, что они выходят из линзы в направлении диаметра, проходящего через источник, если коэффициент преломления $n(r)$ удовлетворяет условию (1):

$$n(r) = \sqrt{\varepsilon'(r)} = \sqrt{2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2}, \qquad (1)$$

где n — показатель преломления в точке r; $\varepsilon'(r)$ — относительная диэлектрическая проницаемость материала линзы в точке r; r/R — отношение текущей радиальной координаты к радиусу сферы.

В классической ЛЛ это условие реализуется посредством изменения диэлектрической проницаемости сферической линзы от 2 в центре до 1 на поверхности. Схема прохождения лучей показана на рис. 1.

Довольно сложная технология производства многослойных структур со сферической симметрией — одна из основных технологических трудностей при изготовле-

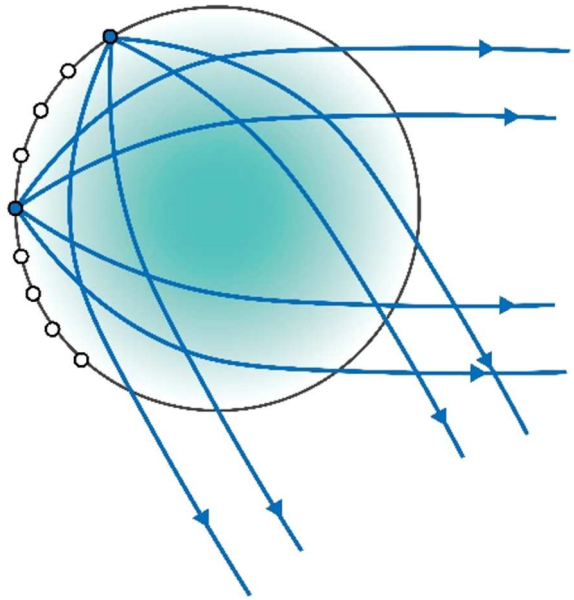

Рис. 1. Схема прохождения лучей в сферической ЛЛ.

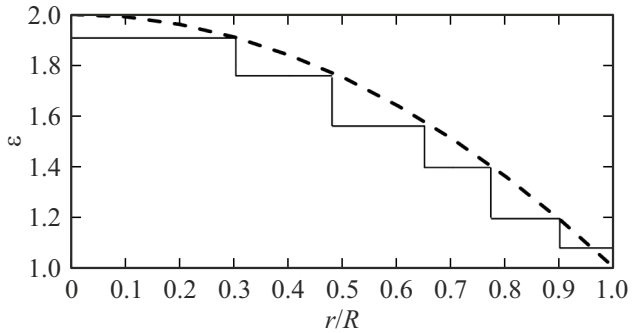

Рис. 2. Пример зависимости диэлектрической проницаемости ε в ЛЛ от величины r/R; прерывистая линия — согласно уравнению (1), сплошная — при изготовлении ЛЛ слоями с различной диэлектрической проницаемостью.

нии антенн на основе ЛЛ, которая долгое время сдерживала развитие данного направления антенной техники.

В последние годы благодаря развитию материаловедения и совершенствованию технологии производства возник очередной всплеск интереса к ЛЛ.

В реальных условиях точная реализация требуемого закона изменения коэффициента преломления $n(r)$ в ЛЛ представляется трудно осуществимой. Обычно непрерывная зависимость $\varepsilon(r)$ заменяется ступенчатой, как это показано на рис. 2. Число слоев может варьироваться, но редко бывает меньше 4 или заметно больше 10.

Традиционно ЛЛ собирались из сферических слоев, различающихся диэлектрической проницаемостью, при этом ее изготовление является трудоемким, а также при этом не достигается реализация плавного изменения диэлектрической проницаемости. Применение наполнителей с высокими значениями — при изготовлении материалов усложняет технологию и не приводит к кардинальному снижению средней плотности линзы. В настоящее время благодаря внедрению метаматериалов нашли широкое распространение ЛЛ, произведенные компанией „MatSing“ [4], по разработанной ими технологии. Однако такие конструкции имеют низкую прочность, а изменение диэлектрической проницаемости происходит дискретно.

Для регулирования значения диэлектрической проницаемости используют различные методы. Наиболее распространенный способ изготовления такой линзы — разбивка объема сферы на слои из однородного материала (шаровые слои), диэлектрическая проницаемость которых увеличивается от внешнего радиуса сферы к центру. Так как слои имеют сложную форму полусфер, наиболее перспективным методом изготовления на данный момент является 3D-печать.

Чтобы получить разные значения диэлектрической проницаемости в этих слоях, используют различные методы. В основном они сводятся к изменению плотности печати. Например, посредством изменения размера элементарной кубической ячейки [5,6] или изменения диаметра цилиндрической ячейки [7]. Кроме того, существуют и другие методы создания ЛЛ с использованием материалов с переменной диэлектрической проницаемостью: изменение толщины диэлектрической пластины в волноводе [8–10], сверление отверстий в диэлектрической пластине для управления эффективной проницаемостью за счет плотности отверстий [11–13], изменение диэлектрической проницаемости с помощью дополнительных метаматериалов [14].

В настоящей работе предлагается новый подход к разработке ЛЛ, который заключается в использовании градиентных ячеистых материалов на основе трижды периодических поверхностей минимальной энергии (ТППМЭ) с управляемой диэлектрической проницаемостью, изготовленных с помощью аддитивных технологий.

ТППМЭ представляют собой класс аналитически заданных поверхностей, которые имеют трехмерную периодичность, нулевую среднюю кривизну и состоят из повторяющихся элементов с минимально возможной площадью. Прикладной интерес к таким поверхностям появился совсем недавно, так как изготовление материалов с геометрией ТППМЭ возможно только с использованием аддитивных технологий. Благодаря своей гладкой седловидной форме структуры с геометрией ТППМЭ демонстрируют отсутствие концентрации напряжений, что положительно влияет на их механические характеристики и величину энергопоглощения [15–21]. Кроме того, с помощью ТППМЭ возможно создавать градиентные структуры [22] посредством изменения толщины стенки ячейки, что позволяет регулировать пористость материала и соответственно контролировать диэлектрическую проницаемость в требуемых направлениях.

Таким образом, конструкция сферической ЛЛ из градиентных структур на основе ТППМЭ позволит повы-

сить физико-механические и эксплуатационные показатели, а также плавно изменять диэлектрическую проницаемость внутри ЛЛ, приближаясь к закону изменения диэлектрической проницаемости в сфере, полученным Люнебергом.

Целью настоящей работы является применение ячеистых диэлектрических структур с геометрией ТППМЭ, полученных с использованием аддитивных технологий, в создании ЛЛ. С помощью 3D-печати и ТППМЭ возможно изготовление градиентных структур с изменением их пористости, что позволяет непрерывно менять диэлектрическую проницаемость вдоль радиуса сферы, максимально приближаясь к закону изменения коэффициента диэлектрической проницаемости в сферическом теле, выведенному Люнебергом.

1. Материалы и методы

Так как изготовление ТППМЭ возможно только с помощью аддитивных технологий, была разработана технология получения высоконаполненного композита для 3D-печати методом послойного наплавления (FDM), наполненного диэлектриком [23]. В качестве основного сырья был выбран АБС 2332 (ABS) — акрилонитрилбутадиенстирол, термопластичный аморфный тройной сополимер акрилонитрила, бутадиена и стирола от производителя ПАО „СИБУР Холдинг“ и диоксид титана (TiO_2) рутильной формы производства компании „Крымский Титан“ марки „Crimea TiOx220“ (ТУ 2321-001-17547702-2014), с размером частиц $15\,\mu$m. Выбор ABS как материала печати основывался на том, что это один из самых используемых материалов в среде аддитивных технологий, а также он имеет высокое значение диэлектрической проницаемости (при 10 GHz: $\varepsilon = 2.6$) и относительно высокие прочностные характеристики (прочность при изгибе $\sigma_i = 69$ MPa, прочность при растяжении $\sigma_s = 45$ MPa).

В качестве наполнителя использовался диоксид титана (TiO_2), который имеет высокие диэлектрические свойства при стандартных температурных условиях ($\varepsilon = 15 - 170$, $\mathrm{tg}\,\delta = 0/0016$ на частоте 1 MHz) [24,25], что крайне важно в процессе использования линзы. Известно, что наполнение полимера диоксидом титана позволяет значительно увеличить диэлектрическую проницаемость полимера [26], а значит, возможно, получить структуру с высокой пористостью и необходимой диэлектрической проницаемостью. В настоящей работе изготовлены образцы из материала ABS с различной степенью наполнения диоксидом титана χ, mass %: 0, 20, 40. Максимальный процент наполнения диоксидом титана составил 40 %, так как изготовленный из материала при большем содержании диоксида титана филамент самопроизвольно разрушался, вследствие чего печать им была невозможна.

Для разработанных композиционных материалов были подобраны технологические параметры 3D-печати. Печать проводилась методом послойного наплавления на 3D-принтере „Artillery Sidewinder X1“ с диаметром сопла 0.4 mm при температуре экструдера 240 °C и температуре стола 90 °C со скоростью печати 60 mm/s.

Для исследования диэлектрической проницаемости композита были напечатаны экспериментальные образцы из разработанного композита со 100 % заполнением при печати. Образцы для измерения диэлектрической проницаемости представляли собой прямоугольные параллелепипеды с размерами $23 \times 10 \times 10$ mm.

Измерения диэлектрической проницаемости проводились в волноводном тракте в АО „НИИ Вектор“ методом полного заполнения поперечного сечения короткозамкнутого волновода [27]. При измерениях использовалась измерительная линия Р1-28. В результате измерений диэлектрическая проницаемость печатных сплошных образцов (степень заполнения образцов $\varphi = 100\,\%$), полученного наполненного композита при 10 GHz составила $\varepsilon(\mathrm{ABS} + 40\,\%\mathrm{TiO_2}) = 3.95$, а ненаполненного ABS-пластика $\varepsilon(\mathrm{ABS}) = 2.6$.

Геометрия структур основывалась на трижды периодических поверхностях минимальной энергии, обладающих относительно высокими механическими свойствами среди ячеистых материалов [28]. Известно, что получение подобных структур возможно только 3D-печатью. При использовании аддитивных технологий возможно изготовление структур на основе ТППМЭ с анизотропией свойств, что позволяет реализовать непрерывное изменение диэлектрической проницаемости посредством градиентного изменения пористости (соответственно степени заполнения пространства). Поэтому для разработки градиентных структур в ходе экспериментов были отобраны наиболее воспроизводимые геометрии ТППМЭ, не имеющие нависающих элементов структуры, которые приводят к образованию дефектов.

Выбрано 5 геометрий ТППМЭ, которые были смоделированы в программном обеспечении „MS Lattice“ (рис. 3), а затем напечатаны на 3D-принтере. Образцы представляли собой параллелепипеды размером $23 \times 10 \times 10$ mm. Отобранные ТППМЭ были напечата-

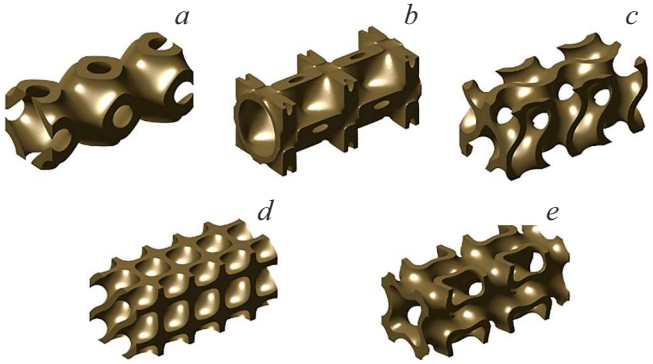

Рис. 3. Виды геометрий ТППМЭ, выбранные для печати: „Primitive“ (*a*), „IWP“ (*b*). „Gyroid“ (*c*), „Diamond“ (*d*), „Neovius“ (*e*).

ны из ABS-пластика с различным содержанием TiO_2. При этом варьировалась степень заполнения пространства для получения различных значений ε. Далее проводились измерения их диэлектрической проницаемости на серии из трех образцов, при этом погрешность измерения составила около 3 %. Анализ экспериментальных данных осуществлялся в программном обеспечении „Origin“; в частности, определялась величина k в уравнении (2), исходя из построенной кривой с наибольшим коэффициентом детерминации.

Для долгосрочной эксплуатации ЛЛ при ее изготовлении необходимы структуры с высокими прочностными показателями. Для определения геометрии ТППМЭ с наилучшими механическими свойствами проводились физико-механические испытания образцов из материала ABS с различной степенью наполнения диоксидом титана χ. Образцы для испытаний на сжатие представляли собой кубы с размером грани 30 mm с различной геометрией ТППМЭ. Испытания проводились в соответствии с [29]. Образцы для испытаний на изгиб изготавливались в виде балок (размер образца $80 \times 10 \times 4$ mm), на растяжение в виде лопаток (образец типа 1A) со 100 % заполнением. Размеры образцов выбирались в соответствии с нормативными документами [30,31]. Испытания проводились на настольной универсальной испытательной машине „Метротест РЭМ-50-А-1-1“ при скорости нагружения 5 mm/min.

Для получения удельных показателей прочности результат механических испытаний относился к плотности образца. Масса образцов измерялась на аналитических весах „Ohaus Pioneer PA−214C“. Объем балок определялся геометрически по габаритным размерам с помощью штангенциркуля „ШЦЦ-1-150-0,01“; объем лопаток вычислялся по 3D-модели в программном обеспечении „SolidWorks“.

2. Результаты

В ходе экспериментов отобраны наиболее воспроизводимые геометрии ТППМЭ. В результате печати выбранных образцов сделан вывод о том, что наименьшее количество видимых дефектов наблюдалось в следующих видах: „Gyroid“, „Diamond“, „Neovius“ (рис. 4).

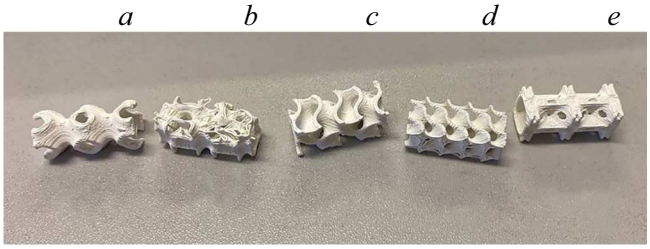

Рис. 4. Напечатанные образцы различных геометрий: „Primitive“ (*a*), „IWP“ (*b*), „Gyroid“ (*c*), „Diamond“ (*d*), „Neovius“ (*e*).

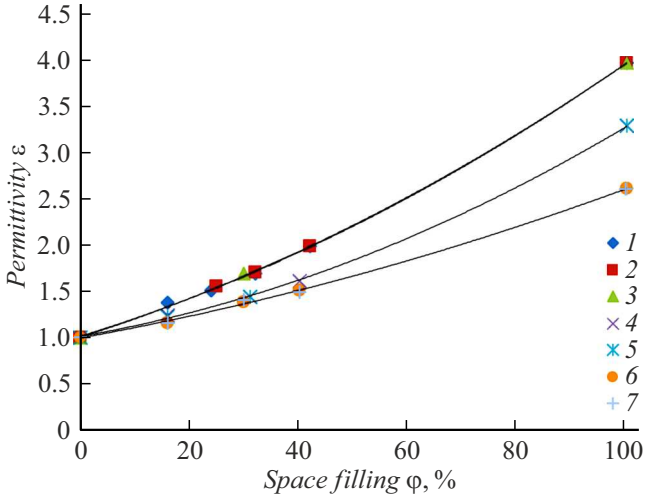

Рис. 5. Зависимость диэлектрической проницаемости ε от степени заполнения пространства φ. *1* — Gyroid ($\chi = 40\,\%$), *2* — Diamond ($\chi = 40\,\%$), *3* — Neovius ($\chi = 40\,\%$), *4* — Gyroid ($\chi = 20\,\%$), *5* — Diamond ($\chi = 20\,\%$), *6* — Gyroid ($\chi = 0\,\%$), *7* — Diamond ($\chi = 0\,\%$).

На рис. 5 отображена зависимость между процентом заполнения пространства и диэлектрической проницаемостью напечатанных образцов с различной геометрией ТППМЭ. Полученная зависимость описывается формулой Лихтенекера для композиционных материалов (2), в которой посредством варьирования осуществлялся подбор коэффициента k [32]. Благодаря полученной зависимости возможно прогнозирование свойств промежуточных слоев ЛЛ:

$$\varepsilon^k = \varphi \cdot \varepsilon_1^k + (1 - \varphi) \cdot \varepsilon_2^k, \tag{2}$$

где ε_1 — диэлектрическая проницаемость среды 1 (материал), ε_2 — диэлектрическая проницаемость среды 2 (воздух), φ — степень заполнения пространства полимером, $k = 0.45694$ — коэффициент, зависящий от изотропии системы.

Вид экспериментальных кривых $\varepsilon = f(\varphi)$ на рис. 5 можно описать квадратичной зависимостью ($a\varphi^2 + b\varphi + c = \varepsilon$), используя которую можно определить требуемые значения степени заполнения для необходимой величины диэлектрической проницаемости. В частности, для кривых *1–3* при $\varepsilon = 1.1$ (на краю линзы) степень заполнения принимает значение $\varphi_1 = 5.1\,\%$, при $\varepsilon = 2$ (в центре линзы) — $\varphi_2 = 43.3\,\%$. Полученные значения φ могут быть использованы для проектирования устройства из материала с долей диоксида титана $\chi = 40\,\%$.

На рис. 6 приведена зависимость значения диэлектрической проницаемости образцов ТППМЭ от количества диоксида титана в композите.

По результатам механических испытаний определены такие характеристики как прочность на сжатие ТППМЭ

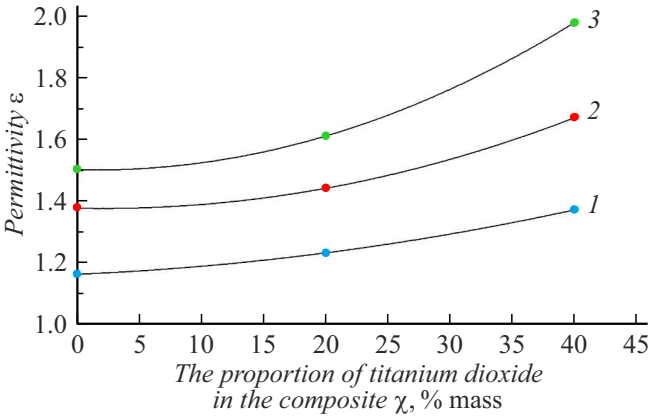

Рис. 6. Зависимость диэлектрической проницаемости ε от заполнения диоксидом титана χ: *1* — $\varphi = 15\,\%$; *2* — $\varphi = 30\,\%$; *3* — $\varphi = 40\,\%$.

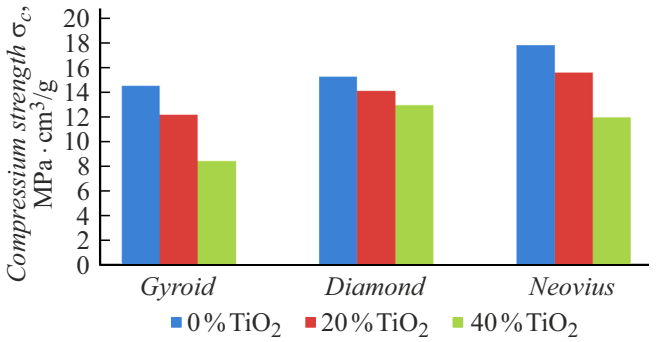

Рис. 7. Результаты механических испытаний на сжатие ТППМЭ.

Результаты механических испытаний 3D-напечатанных сплошных образцов-свидетелей с различным наполнением диоксида титана

Прочность σ	Степень наполнения χ		
	0 %	20 %	40 %
σ_t, MPa	29.8	27.1	26.5
$\sigma_{t.s}$, MPa·cm^3/g	32.8	25.2	19.5
σ_f, MPa	48.7	47.3	44.1
$\sigma_{f.s.}$, MPa·cm^3/g	53.3	44.0	34.0

Примечание. (σ_t) — прочность при растяжении; ($\sigma_{t.s}$) — прочность при растяжении удельная; (σ_f) – прочность при изгибе; ($\sigma_{f.s}$) — прочность при изгибе удельная.

(рис. 7), растяжение и изгиб (см. таблицу), а также их удельные значения.

3. Обсуждение результатов

Среди напечатанных образцов ТППМЭ наиболее удачными по качеству печати оказались образцы „Gyroid“, „Diamond“ и „Neovius“. В напечатанных образцах „Primitive“, „IWP“ наблюдались значительные дефекты. Вероятно, это связано с наличием нависающих элементов структуры, которые являются трудно воспроизводимыми при печати образцов малого размера, а также вследствие того, что используемый филамент имеет неравномерный диаметр по своей длине из-за наличия наполнителя. Таким образом, упомянутые геометрии были исключены из дальнейшего рассмотрения.

Из результатов измерения диэлектрической проницаемости (рис. 5) следует, что с уменьшением степени заполнения пространства φ, значение ε уменьшается, что связано с увеличением размера пор, занятых воздухом. Кроме того, исходя из полученных результатов, следует, что варьированием степени заполнения получен материал со значением ε равным 2 — образец с геометрией „Diamond“ и „Gyroid“ с содержанием TiO_2 $\chi = 40\,\%$ и со степенью заполнения $\varphi = 42\,\%$.

Минимально полученная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 1.16$ достаточно близка к необходимому значению и может использоваться в слоях, близких к поверхности ЛЛ. Данное значение диэлектрической проницаемости получено в образце с геометрией „Gyroid“ и „Diamond“ при $\varphi = 16\,\%$. Стоит отметить, что геометрия ТППМЭ незначительно влияет на значение диэлектрической проницаемости, так как при практически одинаковом заполнении, значение диэлектрической проницаемости всех структур оказалось одинаково (рис. 5, кривые *1–3*). При этом наблюдается степенная зависимость между процентом заполнения пространства φ и диэлектрической проницаемостью ε в соответствии с (2), что позволяет прогнозировать значения диэлектрической проницаемости слоев ЛЛ.

По результатам исследования наиболее перспективными в практическом применении оказались геометрии „Diamond“ и „Gyroid“. Печать этих ТППМЭ производится с наименьшими видимыми дефектами, а варьирование величины диэлектрической проницаемости возможно в широком диапазоне. В геометрии „Neovius“ не удалось достичь малых значений диэлектрической проницаемости, так как при малых заполнениях структура не воспроизводилась, поэтому было решено отказаться от дальнейшего использования этой ТППМЭ.

При увеличении количества диоксида титана в композите значение диэлектрической проницаемости ожидаемо растет (рис. 6). При этом наблюдается квадратичная зависимость ε от количества диоксида титана, которая наиболее выражена в образцах с большим заполнением пространства.

Исходя из полученных данных по механическим характеристикам (рис. 7), следует, что наибольшую прочность на сжатие показали образцы с геометрией „Neovius“, наименьшее значение у образцов с геометрией „Gyroid“. У образцов всех геометрий наблюдается одинаковая зависимость прочности от степени наполнения диоксидом титана: при увеличении содержания

диоксида титана удельное значение прочности уменьшается. При этом у структур с большим процентом наполнения TiO_2 в большей степени проявляется хрупкое разрушение (после испытания зафиксировано частичное разрушение образца), в то время как у образцов из ненаполненного пластика наблюдается лишь пластическая деформация без образования видимых трещин. Такое поведение материала может быть связано с тем, что при большом количестве наполнителя в структуре образуется больше границ раздела фаз, которые ведут к увеличению концентрации напряжений и образованию большого количества микротрещин. В ненаполненном ABS частицы диоксида титана отсутствуют, и материал ведет себя при сжимающей нагрузке типично для пластичных материалов. Так же из рис. 7 следует, что при наполнении пластика диоксидом титана $\chi = 40\,\%$ значение удельной прочности оказывается самой большой у геометрии „Diamond", из чего можно сделать вывод, что печать данной геометрии при большом количестве наполнителя оказывается с наименьшими дефектами.

Удельные показатели прочности на разрыв и изгиб с добавлением диоксида титана (см. таблицу) также уменьшаются. Это можно объяснить тем, что из-за увеличения содержания наполнителя наблюдается существенно меньшее, чем прочность полимера, адгезионное взаимодействие между полимером и наполнителем. [33]. При этом образующиеся при механической нагрузке трещины в композите, вероятно, проходят по границе полимер-наполнитель. При увеличении количества наполнителя в композите частицы диоксида титана образуют агломераты, что способствует уменьшению адгезии и облегчает возможность образования трещин на межфазных границах.

Заключение

В ходе исследования разработан композитный материал, представляющий собой полимерную матрицу на основе ABS-пластика, наполненную диоксидом титана. Показано, что при увеличении процента наполнителя диэлектрическая проницаемость увеличивается. Используя данный материал в 3D-печати, возможно варьировать диэлектрическую проницаемость в необходимом для создания ЛЛ диапазоне от 1.16 до 2.

На основе разработанного полимерного материала с помощью технологии FDM изготовлены различные виды ТППМЭ: „Primitive", „IWP", „Gyroid", „Diamond", „Neovius". В соответствии с критериями отбора: качество печати, воспроизводимость, механические свойства, обеспечение необходимого диапазона диэлектрической проницаемости, масса и др., были выбраны две наиболее подходящие геометрии ТППМЭ: „Gyroid" и „Diamond". Для образцов выбранных геометрий определена зависимость диэлектрической проницаемости от степени заполнения пространства, используя которую возможно получать промежуточные слои ЛЛ с определенными значениями ε. В результате для обоих образцов значения ε получены в необходимом диапазоне. Однако для геометрии „Diamond" получены большие значения прочности при сжатии у ТППМЭ $\sigma_c = 15.23$ (при $\chi = 0\,\%$), 14.09 (при $\chi = 20\,\%$), 12.92 MPa (при $\chi = 40\,\%$). Стоит отметить, что в дальнейшем не исключается перспектива использования структуры „Gyroid" в разработке ЛЛ в связи с его меньшей массой при прочих равных геометрических параметрах.

Основные выводы:

1) определена геометрия ячеистой структуры для изготовления сферической ЛЛ из разработанного композитного материала — „Diamond";

2) для разработанного материала выявлена степенная зависимость диэлектрической проницаемости ε от степени заполнения пространства φ ($\varepsilon \sim \varphi^2$) и доли диоксида титана χ ($\varepsilon \sim \chi^2$);

3) для разработанного материала значение диэлектрической проницаемости при одной и той же степени заполнения пространства у различных геометрий ТППМЭ остается постоянной;

4) доказана возможность применения градиентных ячеистых структур для разработки антенных устройств, имеющие необходимые значения диэлектрической проницаемости материала ($\varepsilon = 1.16 - 2$).

Практическая значимость. Применение градиентных ячеистых структур позволит получать непрерывное изменение диэлектрической проницаемости по радиусу в сферической ЛЛ.

Дальнейшие исследования будут посвящены разработке прототипа сферической ЛЛ на основе ТППМЭ с градиентным изменением свойств, что позволит повысить ее электрические характеристики при радиолокации с широким углом сканирования пространства, и механические характеристики для ее использования в суровых климатических условиях и при внешних воздействиях в авиации и морских судах.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-73-10171).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Б.А. Панченко. Антенны, **12** (2010).
[2] Е.Г. Зелкин, Р.А. Петрова. *Линзовые антенны* (Советское радио, М., 1974)
[3] R.K. Luneburg. *Providence*, RT (Brown Univ. Press, 1944)
[4] *Sphere Antennas*. Электронный ресурс. Режим доступа: www.matsing.com URL: https://www.matsing.com/product-category/antennas/product-families/sphere-antennas/ (дата обращения: 19.02.2025)

[5] M. Liang, W. Ng, K. Chang, K. Gbele, M.E. Gehm, H. Xin. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, **62** (4), (2014). DOI: 10.1109/TAP.2013.2297165
[6] R.A. Bahr, A.O. Adeyeye, S. Van Rijs, M.M. Tentzeris. *3D-Printed Omnidirectional Luneburg Lens Retroreflectors for Low-Cost mm-Wave Positioning, 2020 IEEE International Conference on RFID (RFID)* (Orlando, FL, USA, 2020), p. 1-7. DOI: 10.1109/RFID49298.2020.9244891
[7] K. Liu, C. Zhao, S. Qu, Y. Chen, J. Hu, S. Yang. IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett., **20** (3), (2021). DOI: 10.1109/LAWP.2021.3054042
[8] G. Peeler, D. Archer. IRE Trans. Antennas Propag., **1** (1), (1953).
[9] X. Wu, J. Laurin. IEEE Trans. Antennas Propag., **55** (8), (2007). DOI: 10.1109/TAP.2007.901843
[10] L. Xue, V. Fusco. IET Microw Antennas Propag., **2** (2), (2008). DOI: 10.1049/IET-MAP%3A20070146
[11] L. Xue, V.F. Fusco. IET Microw. Antennas Propag., **1** (3), (2007). DOI: 10.1049/iet-map:20050203
[12] K. Sato, H. Ujiie. Electro. Commun. Jpn., **85** (9), (2002). DOI: 10.1002/ecja.1120
[13] C.S. Lee, S.W. Lee, R. Davis, J. Tsui Microw. Opt. Technol. Lett., **5** (2), (1992).
[14] Q. Cheng, H.F. Ma, T.J. Cui. Appl. Phys. Lett., **95** (18), (2009). DOI: 10.1063/1.3257375
[15] J. Feng, J. Fu, X. Yao, He Yong. Intern. J. Extreme Manufactur., **4** (2), (2022). DOI: 10.1088/2631-7990/ac5be6
[16] V. Shevchenko, S. Balabanov, M. Sychov, L. Karimova. ACS Omega, **8** (30), (2023). DOI: 10.1021/acsomega.3c01631
[17] С.В. Балабанов, А.И. Макогон, М.М. Сычев, A.A. Evstratov, A. Regazzi, J.M.S.V. Lopez-Cuesta. ЖТФ, **90** (2), 223 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.02.48813.209-19 [S.V. Balabanov, A.I. Makogon, M.M. Sychev, A.A. Evstratov, A. Regazzi, J.M. Lopez-Cuesta. Tech. Phys., **65** (2), 211 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220020036
[18] M.M. Sychov, L.A. Lebedev, S.V. Dyachenko, L.A. Nefedova. Acta Astronautica, **150**, (2018). DOI: 10.1016/j.actaastro.2017.12.034
[19] С.В. Дьяченко, Л.А. Лебедев, М.М. Сычев, Л.А. Нефедова. ЖТФ, **88** (7), 1014 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.07.46169.2555 [S.V. Diachenko, L.A. Lebedev, M.M. Sychov, L.A. Nefedova. Tech. Phys., **63** (7), (2018). DOI: 10.1134/S1063784218070101]
[20] X. Fan, Q. Tang, Q. Feng. Intern. J. Mechan. Sci., **204**, (2021). DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106586
[21] X. Zhang, L. Jianga, X. Yanb. Virtual Phys. Prototyping., **18** (1), (2022). DOI: 10.1080/17452759.2022.2120406
[22] S. Yu, J. Sun, J. Ba. Mater. Design, **182**, (2019). DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108021
[23] M.V. Timoshenko, S.V. Balabanov, M.M. Sychov. Glass Phys. Chem., **49**, (2023). DOI: 10.31857/S0132665123600243
[24] P. Veselý, D. Froš, T. Hudec, J. Sedláček, P. Ctibor, K. Dušek. Virtual Phys. Prototyping., **18** (1), (2023). DOI: 10.1080/17452759.2023.2170253
[25] D.W. Richerson, W.E. Lee. *Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing and Use in Design* (CRC Press, 2018)
[26] M.A. Ramazanov, F.V. Hajiyeva, A.M. Maharramov. Integrated Ferroelectrics, **192** (1), (2018). DOI: 10.1080/10584587.2018.1521658
[27] А.А. Брандт. *Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах* (Физматгиз, М., 1963)
[28] M.P. Desole, A. Gisario. Intern. J. Adv. Manufacturing Technol., **132** (3–4), (2024). DOI: 10.1007/s00170-024-13430-0
[29] *Пластмассы. Метод испытания на сжатие* (ГОСТ 4651–2014, Стандартинформ, М., 2014), 26 с.
[30] *Пластмассы. Метод испытания на растяжение* (ГОСТ 11262–2017, Стандартинформ, М., 2017), 24 с.
[31] *Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб* (ГОСТ 4648–2014, Стандартинформ, М., 2014), 25 с.
[32] М.М. Сычев, Т.С. Минакова, Ю.Г. Слижов, О.А. Шилова. *Кислотно-основные характеристики поверхности твердых тел и управление свойствами материалов и композитов* (Химиздат, СПб., 2022)
[33] I. Ozsoy, A. Demirkol, A. Mimaroglu, H. Unal, Z. Demir. J. Mechan. Eng., **61** (10), (2015). DOI: 10.5545/sv-jme.2015.2632