

УДК 537.876.4

**МАСКИРУЮЩЕЕ ПОКРЫТИЕ НА ОСНОВЕ СПИРАЛЬНЫХ РЕЗОНАТОРОВ****А.В. Возианова, М.К. Ходзицкий**

Проведено исследование маскирующего покрытия на основе спиральных структур для скрытия объекта в сверхвысокочастотном диапазоне. Данное покрытие позволяет маскировать объект для ТЕ и ТМ поляризаций электромагнитного поля. Показаны результаты эксперимента и численного моделирования маскирующего покрытия с горизонтальным расположением спиралей относительно плоскости покрытия.

**Ключевые слова:** маскирующее покрытие, спиральные резонаторы, электромагнитное поле, метаматериалы, трансформационная оптика, невидимость.

**Введение**

В последние 5 лет в связи с активизацией исследования метаматериалов [1] произошел концептуальный и методологический прорыв в разработке реальных конструкций покрытий для маскировки объектов («шапок-невидимок»). Прорыв в области маскировки, в первую очередь, произошел благодаря работам Д. Пендри [2] и У. Леонхардта [3, 4], которые, используя трансформационную оптику, впервые открыли метод волнового обтекания для маскировки (невидимости) материальных тел – «клокинг». Разработанные на данный момент маскирующие покрытия можно классифицировать как устройства, отличающиеся по форме (2D и 3D) и по принципу работы: с использованием трансформационной оптики [2], плазмонные маскирующие устройства [5], устройства, использующие цилиндрический гофрированный рассеиватель [6], покрытия, работающие на аномальном резонансе [7] и т.д.

Наибольший интерес представляют устройства, разработанные на основе трансформационной оптики, так как они позволяют скрыть объект с любыми материальными параметрами и произвольной формы. Принцип работы маскирующих покрытий, разработанных с помощью трансформационной оптики, основан на сжатии объекта в точку в виртуальном пространстве [2] («сферическое маскирующее покрытие»), сжатии объекта в тонкую нить [8] («цилиндрическое маскирующее покрытие»), сжатии объекта в плоскость [9, 10] («ковровое маскирующее покрытие»), а также огибании объекта электромагнитной волной в реальном пространстве. К сожалению, разработанные на данный момент конструкции маскирующих покрытий позволяют частично скрыть объект для одной поляризации электромагнитной волны. Кроме того, в конструкции покрытия присутствуют экстремальные материальные параметры, которые реализуются наличием различных резонансных элементов.

В настоящей работе исследована модель электромагнитного цилиндрического маскирующего покрытия с горизонтальным расположением спиралей относительно плоскости покрытия. В отличие от работы [11], данная конструкция была оптимизирована по согласованию со свободным пространством и потерям в покрытии. Исследуемая структура облучалась электромагнитной волной с ТЕ-поляризацией для возбуждения магнитного диполя в одиночной спирали. Главными преимуществами данного устройства являются использование структурных единиц с одинаковыми геометрическими параметрами, маскировка объекта для ТЕ- (transverse electric) и ТМ- (transverse magnetic) поляризаций электромагнитных волн, идеальное согласование маскирующего покрытия с окружающим пространством. Предложенное маскирующее покрытие разработано с использованием принципа трансформационной оптики, которое позволяет скрыть объект в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне.

### Расчет параметров спирали

В качестве структурной единицы маскирующего покрытия использовалась левосторонняя и правосторонняя канонические спирали (рис. 1). Каноническая спираль представляет собой разорванное кольцо с двумя отрезками проволоки на краях зазора, которые перпендикулярны плоскости кольца. При облучении электромагнитной волной спиралей (габаритные размеры которых во много раз меньше длины волны) в них индуцируются токи, которые генерируют электрический диполь (проволочки) и магнитный диполь (кольцо).



Рис. 1. Фотография элементарных структурных элементов (левосторонних и правосторонних спиральных резонаторов) маскирующего покрытия

Путем подбора параметров спирали (радиус кольца, радиус проволоки, длина электрического диполя) можно добиться одинаковых по амплитуде электрического и магнитного откликов от спиральных частиц на одной частоте.

Для реализации в эксперименте конструкции цилиндрического маскирующего покрытия, работающего для ТЕ- и ТМ-поляризации, используются упрощенные эффективные материальные параметры, полученные с помощью трансформационной оптики [3]:

$$\epsilon_r = \mu_r = \frac{b}{b-a} \left( \frac{\rho-a}{\rho} \right)^2, \quad \epsilon_\phi = \mu_\phi = \epsilon_z = \mu_z = \frac{b}{b-a}, \quad (1)$$

где  $\epsilon_r, \mu_r, \epsilon_\phi, \mu_\phi, \epsilon_z, \mu_z$  – радиальные, угловые и азимутальные компоненты материальных параметров соответственно;  $a$  и  $b$  – внутренний и внешний радиусы маскирующего покрытия соответственно;  $r$  – радиальная координата. Как видно из равенства соответствующих компонент диэлектрической и магнитной проницаемости (1), конструкция маскирующего покрытия может работать одновременно для двух поляризаций. Для идеального согласования импеданса покрытия с импедансом свободного пространства требуется, чтобы угловые и азимутальные компоненты материальных параметров стремились к единице при увеличении внешнего радиуса маскирующего покрытия. Согласование импедансов маскировочного покрытия и окружающей среды по радиальным компонентам материальных параметров выполняется при условии равенства  $\epsilon_r = \mu_r$ . Так как в конструкции маскирующего покрытия используется набор спиральных частиц, необходимо получить эффективные относительные диэлектрическую и магнитную проницаемости маскирующего покрытия, которые рассчитываются по формуле Клаусиуса–Моссотти (2) для разреженной смеси [12]:

$$\epsilon_r = 1 + \frac{n}{\epsilon_0 \operatorname{Re} \left( \frac{1}{\alpha_{ee}} \right) - \frac{n}{3}}, \quad \mu_r = 1 + \frac{n}{\mu_0 \operatorname{Re} \left( \frac{1}{\alpha_{mm}} \right) - \frac{n}{3}}, \quad (2)$$

где  $\alpha_{ee}$  и  $\alpha_{mm}$  – электрическая и магнитная поляризуемости одиночных частиц соответственно;  $n$  – плотность на единицу объема. Для удовлетворения условия равенства материальных параметров маскирующего покрытия необходимо, чтобы выполнялось соотношение

$$\operatorname{Re} \frac{\alpha_{ee}}{\varepsilon_0} = \operatorname{Re} \frac{\alpha_{mm}}{\mu_0} \quad (3)$$

Выражения (4) для осевых электрических и магнитных поляризуемостей спиралей были рассмотрены в работах [13, 14] и имеют вид

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_{ee} &= \left[ \frac{\sin(kl)/k - l \cos(kl)}{1 - \cos(kl)} - \frac{1 - \cos(kl)}{k \sin(kl)} \frac{Z_L}{Z_W + Z_L} \right] \frac{4 \tan(kl/2)}{j\omega Z_W k}, \\ \alpha_{mm} &= -2\mu_0 R^3 \frac{J_1(kR)}{A_0} \left[ 1 + \frac{j}{Y_L + Y_W} \frac{1}{\pi \eta A_0} \right] \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где  $Z_W, Z_L$  – импедансы,  $Y_W, Y_L$  – проводимости проволоки и кольца соответственно. Выражения для импедансов и проводимостей показаны в [13, 14].

Параметры спиралей могут быть получены из условия (3). Данное условие выполняется для параметров спиралей  $R = 1,85$  мм,  $l = 2,69$  мм,  $r_0 = 0,1$  мм в частотном диапазоне 7,5–9,5 ГГц (рис. 2).

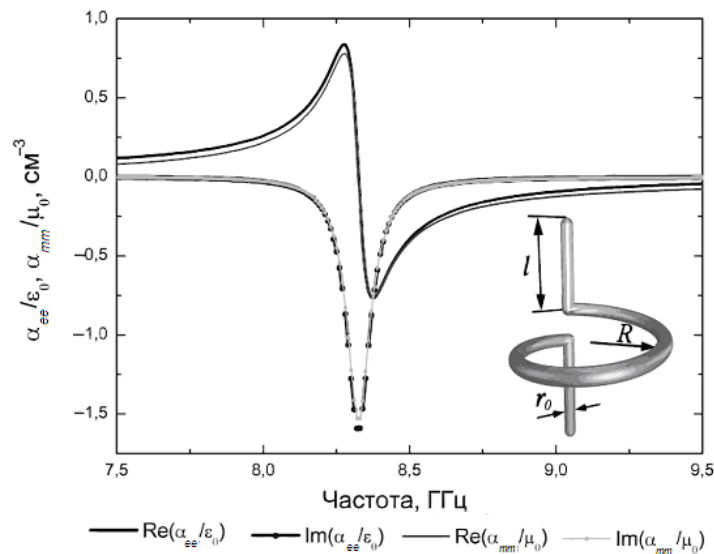


Рис. 2. Зависимость соотношений  $\frac{\alpha_{ee}}{\varepsilon_0}$  и  $\frac{\alpha_{mm}}{\mu_0}$  от частоты для оптимальных параметров спиралей  $R = 1,85$  мм,  $l = 2,69$  мм,  $r_0 = 0,1$  мм

Следует отметить, что при выборе рабочей частоты маскирующего покрытия необходимо, чтобы величина  $\operatorname{Re} \alpha_{ee}$  была большой по значению (достаточной для возбуждения спиралей), а  $\operatorname{Im} \alpha_{ee}$  была минимальной (для уменьшения резонансных потерь).

### Параметры маскирующего покрытия

В предложенном маскирующем покрытии радиальный градиент диэлектрической проницаемости осуществляется путем изменения плотности частиц в радиальном направлении. Так как эффективная относительная диэлектрическая проницаемость набора спиральных частиц равна радиальной компоненте диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_r = \varepsilon_r$ , плотность частиц определяется по формуле

$$n = 3 \frac{\varepsilon_0}{\alpha_{ee}} \left( \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \right). \quad (5)$$

Так как на границе внутреннего цилиндра маскирующего покрытия  $\rho = a$  диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_r$  стремится к нулю, то  $\alpha_{ee}$  становится отрицательной и большой по значению. Следовательно, плотность спиральных частиц может быть получена путем выбора значения  $\operatorname{Re} \frac{\alpha_{ee}}{\varepsilon_0}$ , достаточно-

го для возбуждения спиралей ( $\text{Re} \frac{\alpha_{ee}}{\epsilon_0} = -0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ ), и рассчитана как функция от радиальной компоненты диэлектрической проницаемости. Конструкция маскирующего покрытия представляет собой круговую пластину с набором concentрических колец толщиной  $d = 1$  см. На каждом из колец расположены в произвольном порядке спиральные резонаторы, в середине пластины помещается объект, который при воздействии электромагнитного поля дипольной антенны на определенной частоте становится невидимым. Количество спиральных частиц в каждом из колец рассчитывается с учетом размеров элементарной ячейки и плотности спиральных частиц в каждом кольце. Для компенсации киральности каждый слой собирался из одинакового количества левосторонних и правосторонних спиралей. В данной конфигурации покрытия использовалось 8 слоев со следующим количеством спиралей в каждом слое: 30, 32, 30, 30, 28, 26, 24, 22, (рис. 3).

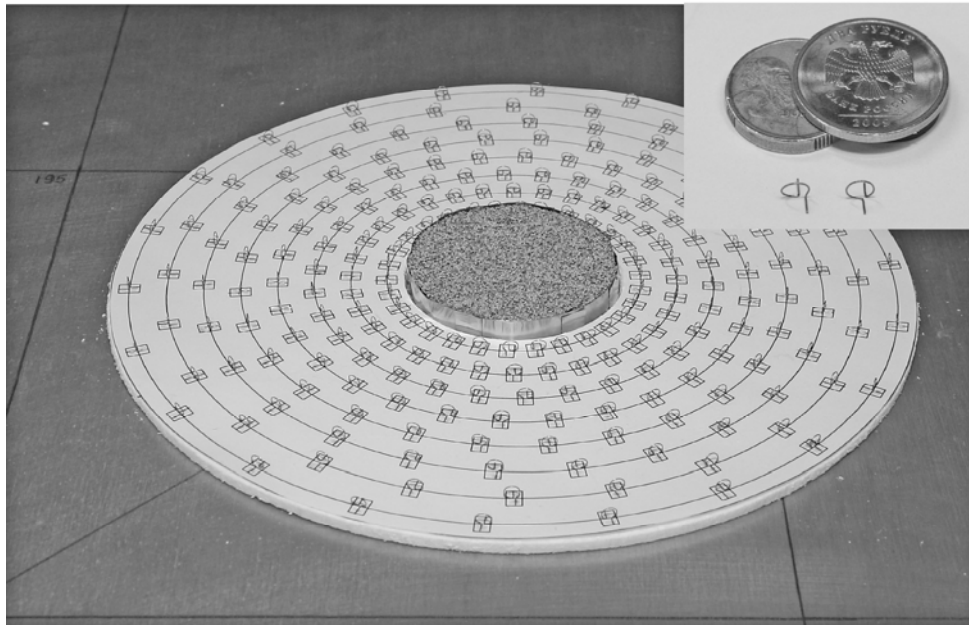


Рис. 3. Фотография конструкции маскирующего покрытия для горизонтальной конфигурации маскирующего покрытия, состоящего из спиральных структур

### Экспериментальные данные и моделирование

Скрываемый объект представляет собой медный цилиндр диаметром 6 см и высотой 1 см. Цилиндр с маскирующим покрытием помещался в волноведущую структуру (две плоские металлические пластины) и возбуждался гауссовым пучком с плоским волновым фронтом. Нижняя пластина, на которой размещался объект и находился источник возбуждения, оставалась неподвижной, в то время как верхняя пластина с коаксиальной приемной антенной перемещалась, осуществляя, таким образом, процесс двумерного (2D) сканирования амплитуды и фазы электромагнитного поля. Края плоских пластин изолировались СВЧ поглощающим покрытием для предотвращения любых возможных отражений. Измерение 2D-распределения электрического поля для двух случаев (объект без маскирующего покрытия, объект с маскирующим покрытием) проводилось в частотном диапазоне 7–10 ГГц. Как видно из экспериментальных данных распределения амплитуды и фазы электрического поля, присутствие маскирующего покрытия позволяет восстановить (скорректировать) фазовый фронт и уменьшить тень за объектом (рис. 4).

Незначительное рассеивание цилиндром электромагнитных волн остается из-за небольших разбросов по параметрам спиралей при изготовлении. Наличие потерь в маскирующем покрытии из-за резонанса в спиралах ведет к некоторому снижению амплитуды электромагнитного поля за объектом.

Две исследуемые структуры (цилиндр с покрытием и цилиндр без покрытия) также были численно смоделированы с помощью коммерческого пакета 3D-моделирования электромагнитного поля CST Microwave Studio 2011. Расчетное распределение амплитуды электрического поля в сечении  $y = 120$  мм (на расстоянии 10 мм от внешнего края покрытия) вдоль оси  $X$  вблизи рабочей частоты маскирующего покрытия показано на рис. 5. Как видно из рис. 5, уменьшается ширина теневой области за объектом и увеличивается амплитуда электрического поля

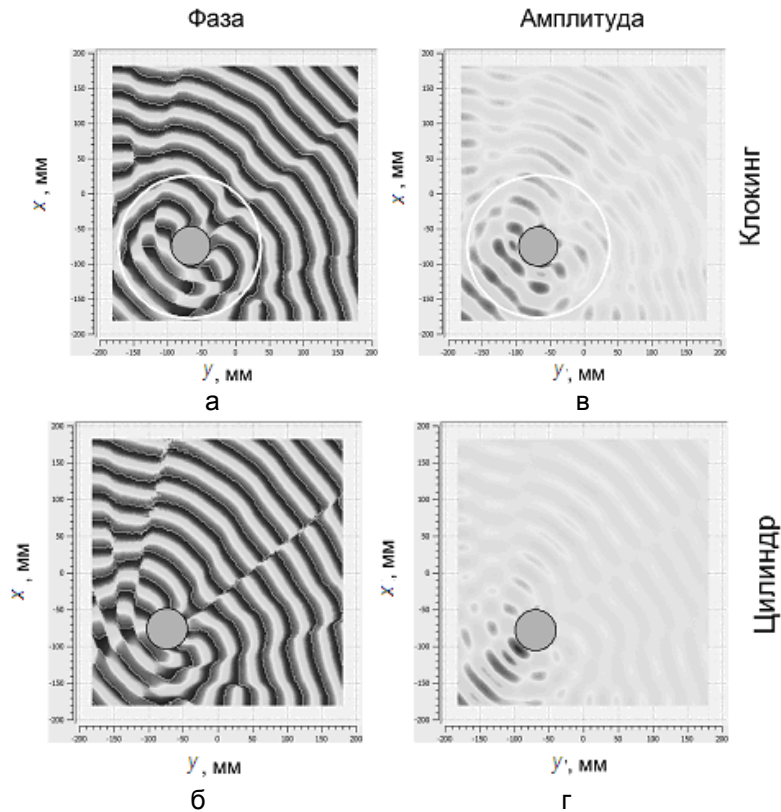


Рис. 4. Экспериментальное распределение амплитуды и фазы поля для горизонтального расположения спиралей (магнитный диполь) на частоте 8,49 ГГц: экспериментальные измерения для замаскированного цилиндра (а), (в); экспериментальные измерения для цилиндра без покрытия (б), (г)

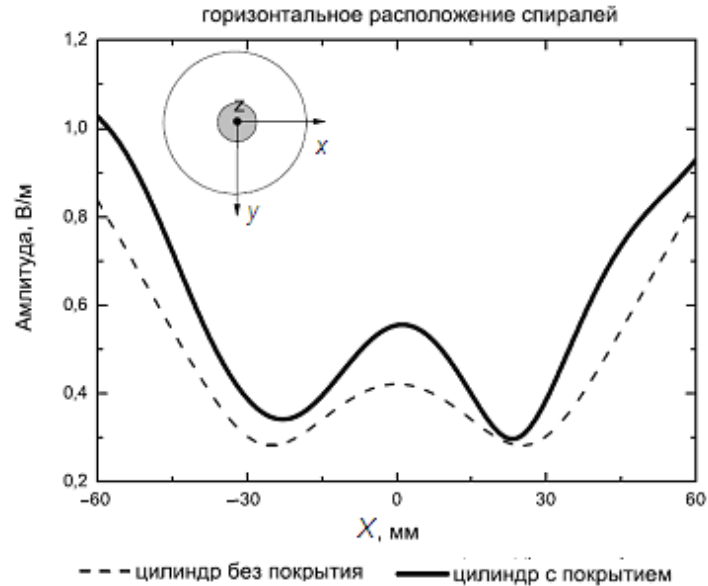


Рис. 5. Расчетное распределение амплитуды электрического поля вдоль оси X на расстоянии 10 мм от внешнего края покрытия (в сечении  $y = 120$  мм) для горизонтального расположения спиралей: для замаскированного цилиндра (сплошная линия); для цилиндра без покрытия (пунктирная линия)

### Заключение

В работе проведено исследование маскирующего покрытия на основе спиральных структур для скрытия объекта в СВЧ диапазоне. Была рассмотрена конфигурация покрытия, работающая для ТЕ- и ТМ-поляризации. Экспериментальные и численные результаты показывают уменьшение тени за объектом и восстановление (коррекцию) волнового фронта в присутствии маскирующего покрытия. Результаты данного исследования будут стимулировать разработку универсальных перестраиваемых маскирующих покрытий, работающих для двух поляризаций электромагнитных волн.

Авторы выражают благодарность за возможность проведения исследований Австралийскому центру нелинейной физики, в лице руководителя центра, проф. Ю.С. Кившаря. Работа выполнена в рамках образовательной программы повышения квалификации и научных стажировок научно-педагогических работников, аспирантов и докторантов по направлению «Фотоника и оптоинформатика» на 2009–2013 годы.

#### **Литература**

1. Кившарь Ю.С., Орлов А.А. Перестраиваемые и нелинейные метаматериалы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 3 (79). – С. 1–10.
2. Pendry J.B., Schurig D. and D.R. Smith. Controlling electromagnetic fields // Science. – 2006. – V. 312. – P. 178–182.
3. Leonhardt U. Optical conformal mapping // Science. – 2006. – V. 312. – P. 1777–1780.
4. Leonhardt U. Notes on conformal invisibility devices // New Journal of Physics. – 2006. – V. 8. – P. 118 (16).
5. Silverinha Mario, Edwards Brian, Alu Andrea. Experimental verification of plasmonic cloaking at microwave frequencies with metamaterials // Phys. Rev. Lett. – 2009. – V. 103. – P. 153901 (4).
6. Luukkonen Olli, Tretyakov Sergei, Alitalo Pekka and Constantin Simovski. Broadband electromagnetic cloaking of long cylindrical objects // Phys. Rev. Lett. – 2009. – V. 103. – P. 109905.
7. McPhedran R.C., Nicorovici N.A. and G.W. Milton. Optical dielectric properties of partially resonant composites // Phys. Rev. B. – 2009. – V. 49. – P. 8479–8482.
8. Schurig D., Mock J.J., Justice B.J. et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies // Science. – 2006. – V. 314. – P. 977–980.
9. Mock J.J., Liu R., Ji C. Broadband ground-plane cloak // Science. – 2009. – V. 323. – P. 366–369.
10. Li J., Pendry J.B. Hiding under the carpet: A New Strategy for Cloaking // Phys. Rev. Lett. – 2008. – V. 101. – P. 203901(5).
11. Gonzalo R., Guven K., Saenz E. Electromagnetic cloaking with canonical spiral inclusions // New Journal of Physics. – 2010. – V. 10. – P. 115037+12.
12. Tretyakov S.A. Analytical Modeling in Applied Electromagnetics. – NY.: Artech House. – 272 p.
13. Simovski Constantin R., Tretyakov Sergei A., Mariotte Frederic. Analytical antenna model for chiral scatterers: Comparison with numerical and experimental data // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1996. – V. 44. – P. 1006–1014.
14. Maslovski Stanislav I., Tretyakov Sergei A. and P. Belov. An analytical model of metamaterials based on loaded wire dipoles // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2003. – V. 51. – № 10. – P. 2652–2658.

**Возианова Анна Викторовна**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, [vozianova@gmail.com](mailto:vozianova@gmail.com)

**Ходзицкий Михаил Константинович**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, ассистент, [khodzitskiy@yandex.ru](mailto:khodzitskiy@yandex.ru)