功能驱动的超材料结构数字化设计与 3D 打印

田小永*, 殷鸣, 李涤尘

西安交通大学制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049

* 通信作者. E-mail: leoxyt@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2014-08-27; 接受日期: 2014-10-28; 网络出版日期: 2015-01-21

国家自然科学基金 (批准号: 51105300)、教育部博士点基金 (批准号: 20110201120075)、教育部留学回国人员启动经费 (批准号: 2013 回国基金 11) 和中央高校基本科研业务费的资助项目

摘要 本文提出了一种以功能驱动的超材料结构数字化设计新方法, 以实现电磁波传播方向 90° 偏折的伊顿 (Eaton) 透镜为典型应用目标, 研究了其介电常数理论分布模型的数字化离散方法, 获得了三维 90° 伊顿透镜介电常数离散化分布工程模型; 通过理论计算建立起超材料单胞结构几何参数 (木堆单胞结构柱宽 ω 与单胞尺寸 a) 与其等效介电常数之间的映射关系, 从而实现三维 90° 伊顿透镜的工程模型向结构模型的转化; 以光固化树脂 (介电常数为 3)、混合液体介质 (介电常数从 2.2 到 40) 为原材料, 采用光固化 3D 打印工艺, 实现了液固耦合的三维 90° 伊顿透镜宏/微结构一体化制造; 通过仿真和实验测试表明, 所实现的三维伊顿透镜能够调控入射电磁波的传播方向, 实现入射电磁波的 90° 偏折, 且在 12~18 GHz 频段范围内具有宽频特性. 本文所提出的数字化设计方法与 3D 打印工艺相结合, 为实现面向电磁波传播调控的新型电磁波器件提供了一种途径.

关键词 超材料 3D 打印 伊顿透镜 数字化设计 液固耦合

1 引言

传统制造工艺过程的加工目标主要是针对基于力学性能进行结构设计的零件, 随着复合材料、功能材料等新兴材料的出现, 结构与材料选择逐渐融为一体, 出现了以功能驱动人工材料结构数字化设计的概念, 设计目标也从传统的力学性能逐步扩展到了物理化学、生物学、电磁学等多样化的性能要求. 为了实现这些新的设计目标, 即新的功能需求, 人们开始寻求一种功能驱动的数字化设计新方法, 以期将材料、微结构、宏观结构等设计要素与功能需求目标结合, 实现复杂组织结构控形、控性的宏/微结构一体化制造. 然而传统工艺却无法实现这种以功能需求为目标的材料、结构一体化零件的制造. 在此背景下, 3D 打印, 又称增材制造, 是采用材料逐层累加方法制造实体零件的工艺方法, 相对于传统的材料去除 (切削) 加工技术, 是一种“自下而上”的制造方法, 其特点是由点到面到体进行成型, 从而可以解决传统制造技术无法实现的宏/微结构一体化制造问题^[1].

超材料 (metamaterials) 是一种人工设计、制造的, 由不同介电常数介质材料在空间周期性排列形成的点阵结构体^[2,3]. 当单胞尺寸远小于 (约 $1/10$) 与其相作用的波长时, 可视为一种等效电磁介质, 通过改变单胞结构参数, 可调控其等效电磁性能, 实现了人工电磁介质的可控设计, 从而调控电磁波在空间的传播, 在国防、通信、医疗、能源等领域有着重大和广泛的应用前景. 2010 年 4 月, 德国卡

引用格式: 田小永, 殷鸣, 李涤尘. 功能驱动的超材料结构数字化设计与 3D 打印. 中国科学: 信息科学, 2015, 45: 224-234, doi: 10.1360/N112014-00240

尔斯鲁厄工业大学 Wegener 教授研究团队采用激光直写的方法^[4]制造出了具有堆积木微观结构的超材料, 实现了在波长 1.4~2.7 μm 范围内对非偏振光的隐形. 2010 年, 我国东南大学的马慧峰教授和崔铁军教授^[5]采用在介质板上打孔的方法, 通过控制孔径大小, 得到连续变化的折射率分布, 然后手动层叠组合介质板, 首次实现了光学变换后的三维底面扁平龙勃 (Luneberg) 透镜, 类似的研究工作主要解决了二维超材料结构的设计与制造问题, 但如何实现三维超材料结构的数字化设计与一体化集成制造仍是制约其实际应用的瓶颈问题. 由于上述人工超材料结构具有微观单元结构、空间拓扑结构、材料、外形等方面的多样性与复杂性, 需要一种以功能驱动的宏/微结构数字化设计与制造手段去实现, 这就对制造领域的工程技术人员提出了新的挑战.

本文提出以功能驱动的超材料结构数字化集成设计新方法, 采用以电磁波传输性能驱动的宏/微结构一体化设计方法, 实现了三维 90° 偏折伊顿 (Eaton) 透镜结构的数字化设计; 以光敏树脂、混合液体介质为原材料, 采用光固化 3D 打印工艺, 进行基于超材料结构的三维伊顿透镜的快速制造; 通过仿真与实验验证了采用 3D 打印技术进行复杂三维超材料结构快速制造的可行性, 为实现面向电磁波传播调控的新型电磁波器件提供了一种途径.

2 可控电磁场理论与超材料

2006 年, Pendry 等^[6]在 *Science* 上提出了“可控电磁场”理论以期实现对电磁波在空间传播路径的自由控制, 为了让光在一个假想的预设空间内按照研究者所设计的路线进行传播, 可以通过“光学变换”^[6]或几何光学原理, 获得具有空间非均匀分布的介质电磁参数分布 (磁导率和介电常数), 从而通过设计具有空间特定分布规律的材料电磁性质来实现电磁波的可控传播. 因此, 电磁波在空间可控传播的核心体现在对空间分布的材料电磁参数的调控. 基于可控电磁场理论所设计出的新型电磁波器件, 通常需要苛刻的电磁参数要求, 比如材料介电常数大范围调控、介电常数渐变等等, 这些材料电磁特征往往是自然界天然材料所无法满足的, 超材料技术的发展大大拓宽了电磁材料的介电常数和磁导率的取值空间, 并且实现了对电磁参数的可控调节, 可以满足这些由可控电磁场理论所带来的天然材料所不具有的超常电磁材料特性.

“可控电磁场”理论实际上是将科学理论问题转化为工程问题的一种强大设计工具, 建立了一座电磁波器件功能与材料电磁参数分布之间的桥梁, 能够将对器件电磁性能的功能需求, 转化为对组成材料的电磁参数的要求. 但所设计新型电磁波器件具有的电磁参数特征往往是自然材料难以满足的, 而超材料由于其微观单元结构几何参数与电磁参数 (如等效介电常数) 一一对应, 因此, 可以将电磁波器件对材料电磁参数的需求转化为对超材料单胞微结构参数的数字化可控设计以及单胞之间的拓扑结构设计.

3 功能驱动的超材料结构数字化设计

新型电磁波器件其功能理论模型表现为电磁参数的空间连续分布, 即在空间的不同位置上具有不同的电磁参数. 为了实现这种理论模型表达的电磁器件, 往往需要将连续分布的电磁参数进行离散化处理获得工程模型, 再根据超材料单胞结构与局部等效电磁参数的映射关系, 获得与电磁参数相对应的超材料单胞结构尺寸参数, 对超材料单胞进行拓扑结构设计, 最终获得宏/微结构一体化的三维结构模型, 其流程如图 1 所示. 这样的设计流程体现了超材料从理论研究向实际应用的发展过程, 重点体现在理论模型到工程模型的离散化、超材料单胞微结构单元设计以及三维模型拓扑结构设计等环节,

图 1 功能驱动的超材料结构数字化设计流程

Figure 1 Digital design for metamaterial structure driven by the microwave propagation performance

是一种以功能驱动的零件结构数字化设计过程. 本节以具有复杂结构及大介电常数变化范围的三维 90° 伊顿透镜为研究对象, 系统阐述本文所提出的功能驱动的超材料结构数字化设计方法, 通过光固化 3D 打印技术实现了液固耦合的三维伊顿透镜一体化制造.

3.1 功能理论模型的离散化

基于三维球型渐变折射率系统, 可以对全向入射的微波在空间的传播路径进行特定的控制, 例如著名的麦克斯韦鱼眼透镜 (Maxwell fisheye)^[7]、龙勃透镜 (Luneburg lens)^[8]、伊顿透镜 (Eaton lens)^[9] 等, 都是典型的渐变折射率介质功能器件. 伊顿透镜是一类具有代表意义的基于三维球型系统的渐变折射率透镜, 可以控制微波传播路径按照特定角度进行偏折, 具有代表性, 三维 90° 偏折伊顿透镜的折射率分布, 如式 (1) 所描述^[10]:

$$\begin{cases} n^2 = \frac{a}{nr} + \sqrt{\left(\frac{a}{nr}\right)^2 - 1}, & r \leq a, \\ n = 1, & r > a, \end{cases} \quad (1)$$

式中:

n — 距离伊顿透镜中心位置 r 处的折射率值;

a — 伊顿透镜的半径大小;

r — 当前位置到伊顿透镜中心的距离.

伊顿透镜的折射率分布公式描述了一个折射率从外向内径向渐变的球型系统. 在伊顿透镜与空气接触的边界处 ($r = a$), 折射率 n 为 1, 随着 r 的减小 n 逐渐增大, 且当 r 趋近于零时, 即伊顿透镜球心位置的折射率趋近于无穷大. 由于本文采用非磁性介质, 故磁导率为常数 1, 折射率 $n = \sqrt{\epsilon}$ (ϵ 为介电常数), 因此, 式 (1) 实际上也表述了伊顿透镜沿径向的渐变介电常数分布规律. 连续变化的介电常数很难进行工程实现, 因此必须对伊顿透镜的理论模型进行工程离散化.

伊顿透镜半径决定了系统的尺寸大小, 考虑到透镜天线的大小应与标准微波器件的尺寸匹配, 且在后续的工程处理中, 需要将伊顿透镜球形系统所具有连续变化的介电常数分布离散化处理, 过小的系统尺寸相应导致每离散层的尺寸变小, 超材料单胞结构特征尺寸将超出光固化 3D 打印工艺能力范围. 综合考虑如上几点, 选取伊顿透镜半径 a 为 87 mm. 根据式 (1) 中所描述的 90° 偏折伊顿透镜的折射率 (介电常数) 空间分布, 可以将其划分为 3 个区域, 分别由空气层 (介电常数 1)、木堆结构超材料单胞层 (介电常数 1~3) 和混合液体介质体系 (介电常数 3~40) 来实现, 伊顿透镜理论模型中介电常数大于 40 的部分介电常数均设置为 40, 此部分占整个透镜体积的极少一部分, 故进行了工程简化, 具体介电常数离散方案如图 2 所示.

图 2 伊顿透镜径向介电常数离散化分布示意图

Figure 2 Radial distribution of the discretized permittivity in the Eaton lens

图 3 超材料单胞及其等效介电常数与结构参数 ω/a 之间的关系Figure 3 The relationship of effective permittivity and structural parameters ω/a of the metamaterial unit cell

3.2 等效介电常数的大范围调控

3.2.1 超材料单胞等效介电常数可控设计

单胞结构是超材料等效电磁性能可控设计的基础, 如木堆结构超材料 (如图 3 右), 此类单胞具有高度结构对称性, 当晶格常数 a 远小于波长时, 其等频面近似球形, 三维各向同性, 且具有宽频特性, 可作为人工电磁介质的基本单元形式. 单胞结构的等效介电常数可利用等效介质理论计算^[11]:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = f\varepsilon_m + (1 - f)\varepsilon_{\text{air}}. \quad (2)$$

由式 2 可得, 通过对单胞结构中的材料占空比 f 进行调控, 即可实现等效介电常数 ε_{eff} 的在范围 $1 \sim \varepsilon_m$ 内可控调节, ε_m 为构筑单胞所使用材料的本征介电常数. 分析如图 3 右中所示的木堆结构超

材料单胞的微结构参数特征, 可以发现其占空比 f 由其柱宽 ω 和晶格常数 (即柱间距) a 的比值决定:

$$f = \omega/a. \quad (3)$$

当 $\omega = a$ 时, f 取得最大值 1, 等效介电常数 ε_{eff} 取得最大值为 ε_m , 采用 3D 打印光敏树脂为原材料时, $\varepsilon_m=3.0$, 将式 (3) 代入式 (4) 中, 可计算出木堆结构超材料单胞结构参数 ω 与其等效介电常数间的关系, 如图 3 左图所示, 通过对单胞结构的设计, 可以实现等效介电常数 1.0~3.0 调控, 实现图 2 所示的伊顿透镜第二层结构.

3.2.2 混合液体介质介电常数大范围调控

在伊顿透镜离散化设计方案中, 如图 2 所示, 介质介电常数取值范围远远大于 3D 打印用光敏树脂 (约为 3), 要实现介质介电常数的大范围可调, 固态材料很难实现设计要求, 因此, 本文采用混合液体材料与光固化 3D 打印树脂框架层相结合的方法, 实现介电常数大范围调控, 进行液固耦合三维伊顿透镜的制造.

通过对大量液体介质介电常数测试发现, 在常温下苯的介电常数为 2.2, 乙腈为 40, 而且两者可以实现完美互溶, 此外, 苯和乙腈均具有较小的介电损耗, 且在 Ku 频段内介电性能呈稳定特性. 通过按照特定的摩尔浓度进行混合, 可以获得介电常数在 2.2~40 之间可控调节的宽频、低损耗混合液体介质, 满足前文所设计的伊顿透镜对介质介电常数的要求. 以苯和乙腈为基本液体介质, 对 11 种不同配比浓度的混合液体介质在 12.4~18 GHz 频带范围内测试其介电常数特性, 结果如图 4 所示. 随着混合液体介质中乙腈的摩尔分数的增加, 混合介质体系的介电常数从 2.2 提升到了 40, 且在 12.4~18 GHz 范围内表现出宽频特性^[13]. 通过拟合获得了乙腈摩尔分数对介电常数的影响曲线 (图 4), 根据此影响曲线可获得满足图 3 中介电常数在 3~40 之间变化的混合液体介质体系, 满足伊顿透镜离散化模型的制作需求.

3.3 液固耦合伊顿透镜宏/微结构一体化设计

由图 2 所示, 在 $27.5 \text{ mm} < r < 82.5 \text{ mm}$ 范围内, 介电常数的变化范围为 1.0~3.0. 该部分的体积约为整个系统的 95.9%, 即对于 90° 伊顿透镜, 其介电常数小于 3.0 的部分为系统的主体. 对于该区域, 根据 3.2.1 小节中所述的方法, 由木堆型超材料单胞的分层渐变微结构来实现相应的介电常数变化, 木堆单胞结构的晶格常数 a 取为 5 mm. 根据 3.2.1 小节中图 3 所示的超材料单胞结构参数与其等效介电常数之间的映射关系, 通过改变每一离散层球壳区域内的木堆单胞结构的柱宽, 保持其晶格常数不变, 以实现所需的介电常数分布. 而具有不同柱宽的柱与柱仍保持连接, 从而形成了微/宏一体化的空间结构, 所设计出的 CAD 模型整体如图 5(a) 所示. 图 5(b) 为所设计球状伊顿透镜过球心的截面视图, 可见伊顿透镜从外到内是一个具有渐变微结构的复杂三维模型, 具有逐层渐变的等效介电常数 (从 1 到 3), 获得了与内部介质及空气界面处的阻抗匹配特性, 保证了三维伊顿透镜的 90° 偏折特性.

在 $r < 27.5 \text{ mm}$ 的范围内, 即伊顿透镜的内核部分, 所需要介质介电常数大于 3, 该部分体积约占整个伊顿透镜系统的 4.1%. 在该区域内所需的介电常数可采用 3.2.2 小节中所提出的混合液体介质方法, 由不同配比的苯和乙腈的混合液体介质实现. 为了封装液体混合介质, 需要在该系统中引入一个多层的薄壁框架层结构, 如图 6(a) 和 (b) 所示. 为了方便后续的液体的注入过程、制造和组装, 所设计出的伊顿透镜模型被分为两个半球系统, 且在薄壁框架层结构每层的底部均开一小孔. 对于 $r < 0.6873 \text{ mm}$ 伊顿透镜的中心区域, 其介电常数超过苯和乙腈混合液体所能提供的最大介电常数值 40.0,

图 4 (网络版彩图) 12 ~ 18 GHz 不同频率下, 苯和乙腈混合液体的介电性能随乙腈摩尔分数的变化规律, 修改自文献 [12]

Figure 4 (Color online) Dielectric properties of the binary benzene and acetonitrile compound liquid in the Ku band, and the dielectric loss tangent of mixtures between 12 GHz and 18 GHz (inset), reproduced from [12]

图 5 超材料区域内木堆单胞拓扑结构 CAD 模型

Figure 5 CAD model for the topological structure with woodpile unit cell in the metamaterials layer (a) Whole spherical structure; (b) cross-section of the spherical structure

图 6 伊顿透镜内核区域薄壁框架层结构 CAD 模型

Figure 6 CAD model for the thin framework structure of the inner core region in the Eaton lens. (a) Hemisphere framework; (b) inner structure of the spherical structure

由于该部分的体积相对于整个系统实际上可以忽略不计, 故采用填充介电常数为 40 的乙腈的方法进行工程简化, 去除了中心点处的介电常数极值。

4 三维伊顿透镜制造与性能研究

采用功能驱动的超材料结构数字化设计过程, 获得了三维 90° 偏折伊顿透镜的结构模型, 如图 5 和 6 所示。所设计出的结构模型, 由成千上万个具有不同单胞结构参数的超材料单元构成, 具有复杂的内部微观结构和宏观外部形状, 难以采用传统工艺进行制造。本研究以光固化树脂为原材料, 采用光固化 3D 打印技术实现了具有复杂三维宏/微结构一体化的液固耦合伊顿透镜的制造。

图 7 具有宽频、稳定的介电常数的光固化 3D 打印材料

Figure 7 Broadband and stable permittivity of the raw material used in stereolithography

图 8 光固化 3D 打印的三维伊顿透镜

Figure 8 Three-dimensional Eaton lens fabricated by stereolithography. (a) Outside structure; (b) cross-section of the Eaton lens

4.1 光固化 3D 打印快速制造

光固化 3D 打印工艺是一种较为成熟的 3D 打印技术, 以液态光敏树脂为原材料, 逐层固化, 实现三维模型的快速制造. 本研究采用 SPS600B 型光固化成形机 (陕西恒通智能设备有限公司, 西安) 为实验平台, 采用 Somos 14120 光敏树脂 (DSM 公司, 美国) 为材料进行制造. 为保证超材料结构具有宽频、低损耗的电磁波传输性能, 同样对结构材料本身的宽频稳定性、低电磁损耗特性有很高的要求. 经过实际测试, 实验中所采用的光敏树脂在 8~18 GHz 范围内介电常数稳定在 3.0 左右 (如图 7 所示), 且几乎没有电磁损耗, 是一种较为理想的电磁材料, 可作为本研究中制作超材料结构的基体材料.

实验用 SPS600B 型光固化 3D 打印机具有较高的成型精度, 所能制造的最小特征尺寸为 0.1 mm, 保证了相邻单元间的微结构参数和等效介电常数得以相对均匀变化, 以实现空间介电常数分布从 1.0(空气) 到 3.0(光敏树脂) 的近似连续变化, 对于减少实际应用中阻抗不匹配带来的电磁波散射具有重要意义. 采用 3D 打印工艺制造出的三维伊顿透镜整体结构如图 8(a) 所示. 伊顿透镜半球断面结构如图 8(b) 所示, 半径小于 27.5 mm 的内核部分采用树脂框架层填充不同配比苯和乙腈混合液体介质的方法实现, 填充完成后进行密封处理, 最后将两个半球系统组装起来即构成了液固耦合的

图 9 (网络版彩图)15 GHz 入射电磁波的偏折路径仿真结果^[14]

Figure 9 (Color online) Full-wave simulation results at 15 GHz when an off-centre beam is incident on the 3D. (a) The power flow distribution; (b) the calculated far-field scattering pattern Eaton lens^[14]@Copyright 2014 AIP Publishing LLC

图 10 三维伊顿透镜的远场散射实验示意图^[14]

Figure 10 Scheme for the measurement of the radiation behavior of the 3D Eaton lens in Ku-band^[14]@Copyright 2014 AIP Publishing LLC

三维 90° 伊顿透镜整体结构.

4.2 3D 打印液固耦合伊顿透镜电磁波传输性能

为验证所设计的伊顿透镜对全向入射波的偏转效应, 首先在 CST MICROWAVE STUDIO 里对其进行了全波仿真, 仿真环境及模型的设置如图 9 所示. 在 15 GHz 时 (Ku 波段的中心频点), 将一束电磁波沿 x 轴方向从偏离 y 轴的位置投射到三维伊顿透镜上, 可以观察到能量流在经过伊顿透镜的原点时发生了近似直角的偏转 (图 9(a)), 所对应的远场散射如图 9(b) 所示, 主峰位于 90° 方向, 验证了所设计伊顿透镜对于入射波的 90° 偏转功能. 同时, 仿真结果表明对中心区域所作的简化处理, 对透镜的偏转角度没有影响, 仅产生少量的散射.

同时, 针对光固化 3D 打印工艺制作的液固耦合三维伊顿透镜的电磁波传输特性进行了实验测试, 在微波暗室中建立了如图 10 所示的自由空间远场散射测试平台, 采用一个与矢量网络分析仪 (Agilent, E8363B) 连接的 Ku 波段标准波导被用作馈源, 在近场产生入射的窄电磁波. 并利用一个喇叭天线作为接收端, 接受远场散射信号, 由于三维伊顿透镜所固有的球对称性保证了其全向的波偏转效应, 即对于从任何方向入射的电磁波均产生相应的 90° 的偏转效应.

图 11 (网络版彩图) 三维伊顿透镜的实验结果^[14]

Figure 11 (Color online) Measured results for the Eaton lens of the scattering field as a function of azimuth and frequency^[14]@Copyright 2014 AIP Publishing LLC

实验测得的宽频远场散射结果如图 11 所示, 在 Ku 波段内, 实验结果与仿真结果吻合, 所设计制造的三维伊顿透镜具有准确的 90° 的入射波偏转效应. 由图 11 中同样可以观察到不规则的副瓣, 与图 10(b) 的仿真结果类似, 主要是由于对电常数大于 40 的中心区域的工程简化所带来的影响, 同时 3D 打印制造出的树脂框架层厚度为 0.3 mm, 尽管相对于工作频段波长很小, 也会引起轻微的阻抗不匹配, 导致副瓣的产生.

采用 3D 打印技术能够实现复杂超材料结构的快速制造, 与介电常数可调液体介质相结合, 实现了 90° 伊顿透镜的设计与制造. 同时, 该设计制造方法也存在着一些局限性, 比如光固化 3D 打印所制备零件的力学性能还不能够完全满足实际应用要求, 所用液体介质具有挥发性与腐蚀性, 导致所制造设备性能不稳定等. 这些问题都将限制该设计与制造方法的实际工程应用, 有待于进一步解决.

5 结论

本文提出了以功能驱动的超材料结构宏/微一体化设计与制造方法. 以三维 90° 偏折伊顿透镜为研究对象, 对其理论模型进行了工程离散化处理, 建立了木堆超材料单胞结构参数与等效介电常数之间映射关系, 通过拓扑结构设计获得了伊顿透镜的三维结构模型——一种具有空间渐变特性的微/宏集成数字化结构模型, 以光固化 3D 打印为制造工艺, 采用光敏树脂、混合液体介质为原材料, 实现了液固耦合的三维伊顿透镜的快速制造. 仿真和实验结果表明, 所设计制造三维伊顿透镜在 Ku 波段对于全向入射电磁波的 90° 偏转效应. 本文所提出的功能驱动超材料结构数字化设计与 3D 打印制造方法为实现基于超材料结构的新型电磁波器件提供了一种重要手段.

参考文献

- 1 Li D C, He J K, Tian X Y, et al. Additive manufacturing: realizing the integrated fabrication of micro and macro structure. J Mech Eng, 2013, 49: 129–135 [李涤尘, 贺健康, 田小永, 等. 增材制造: 实现宏微结构一体化制造. 机械工程学报, 2013, 49: 129–135]
- 2 Cui W Z. Electromagnetic Metamaterials and Applications. Beijing: National Defence Industry Press, 2008 [崔万照. 电磁超介质及其应用. 北京: 国防工业出版社, 2008]
- 3 Cui T J, Smith D R, Liu R. Metamaterials Theory, Design, and Applications. Springer: New York, 2010
- 4 Ergin T, Stenger N, Brenner P, et al. Three-dimensional invisibility cloak at optical wavelengths. Science, 2010, 328: 337–339

- 5 Ma H F, Cui T J. Three-dimensional broadband and broad-angle transformation-optics lens. *Nat Commun*, 2010, 1: 124
- 6 Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields. *Science*, 2006, 312 : 1780–1782
- 7 Maxwell J C. Solution of problems. *Cambridge Dublin Math J*, 1854, 8: 76
- 8 Luneburg R K. *Mathematical Theory of Optics*. Berkeley: University of California Press, 1964
- 9 Eaton J. On spherically symmetric lenses. *Antenn Propag Trans IRE Prof Group*, 1952, 4: 66–71
- 10 Danner A J, Leonhardt U. Lossless design of an Eaton lens and invisible sphere by transformation optics with no bandwidth limitation. In: *Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics Optical Society of America*, Baltimore, 2009. JThC4
- 11 Valentine J, Li J, Zentgraf T, et al. An optical cloak made of dielectrics. *Nat Mater*, 2009, 8: 568–571
- 12 Han H, Wu L, Tian X, et al. Broadband gradient refractive index planar lens based on a compound liquid medium. *J Appl Phys*, 2012, 112: 114913
- 13 Wu L, Tian X, Ma H, et al. Broadband flattened Luneburg lens with ultra-wide angle based on a liquid medium. *Appl Phys Lett*, 2013, 102: 074103
- 14 Yin M, Tian X Y, Wu L L. All-dielectric three-dimensional broadband Eaton lens with large refractive index range. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 094101

Digital design and fabrication of metamaterials structure driven by microwave transmittance performance and 3D printing

TIAN XiaoYong*, YIN Ming & LI DiChen

State Key laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

*E-mail: leoxyt@mail.xjtu.edu.cn

Abstract A new design method is proposed in the present paper to realize the digital design of metamaterial structures driven by microwave transmittance performance. An Eaton lens, which can transmit the incident microwave beam in the 90° direction, is designed as a demonstration of the proposed design method. The digital discretization method for the theoretical model of the Eaton lens is investigated in order to obtain an engineering model with permittivity distribution. The relationship between effective permittivity and geometric parameters of the unit cell, such as width of the pillar- w and the lattice constant- a in the woodpile structure, is investigated. Therefore, an engineering model of the permittivity distribution can be transformed into a structure model using the woodpile structure as the unit cell. The 3D 90° Eaton lens with integrated micro and macro-structures is realized using a photo-curable resin with permittivity of three, a liquid mixture with permittivity that ranges from 2.2 to 40 as the raw material, and stereolithography as the 3D printing process. The controllable propagation with 90° reflection of the incident microwave on the fabricated Eaton lens is validated through experiment results and simulation. Moreover, broadband transmittance performance is achieved on the frequency range from 12 GHz to 18 GHz. The method proposed in the present research provides a new strategy for realizing a new microwave device with novel transmittance performance by combining the digital design method and 3D printing process.

Keywords metamaterials, 3D printing, Eaton lens, digital design, liquid-solid coupling

TIAN XiaoYong was born in 1981. He received the Ph.D. in engineering from Clausthal University of Technology, Germany, in 2010. Now he is an Associate Professor in State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China. His current research is additive manufacturing technologies, photonic crystals and meta-materials etc.

YIN Ming was born in 1987. He received the Ph.D. degree in mechanical engineering from Xi'an Jiaotong University, Xi'an in 2014. Currently, he is a lecturer in school of mechanical engineering, Sichuan University. His current research is 3D printing and novel artificial electromagnetic medium.

LI DiChen was born in 1964. He received the Ph.D. degree in materials engineering from the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, in 1993. Currently, He is a Changjiang Professor and director of the state key lab for manufacturing system engineering at Xi'an Jiaotong University, Chairman of Additive Manufacturing and 3D Printing Technology Commission and Vice-chairman of Biotribology and Artificial Impants Commission for Chinese Mechanical Engineering Society (CMES). Prof. Li is engaged in research and teaching work of additive manufacturing and bio-fabrication.