

基于变换光学的椭圆形透明聚集器的设计研究^{*}

汪会波 罗孝阳 董建峰[†]

(宁波大学信息科学与工程学院, 宁波 315211)

(2014 年 12 月 13 日收到; 2015 年 2 月 2 日收到修改稿)

基于麦克斯韦方程组在不同坐标系下具有形式不变性以及变换光学理论, 通过设计材料的本构参数(介电常数和磁导率)来引导电磁波的传播, 提出了具有电磁透明和电磁聚集两种功能的新型电磁器件——椭圆形透明聚集器的设计方法. 电磁波透明体不会阻挡电磁波的传播并且能够与斗篷内部进行交互; 电磁波聚集器是当电磁波入射到该装置上时, 电磁波能够被设计的装置按照要求集中到一个区域或者一个点, 实现电磁波能量的集中. 本文利用压缩变换和扩展变换推导出了这种电磁器件中各层的相对介电常数和相对磁导率的张量表达式, 并利用基于有限元算法的电磁仿真软件对该电磁器件进行了全波仿真验证, 得到了入射波从各个不同方向入射时磁场 z 分量的分布图, 仿真结果证实了该设计方法和电磁参数的正确性. 最后还讨论了电磁器件存在损耗时的情况, 当损耗逐渐增大时, 器件的功能在一定程度上受到了削弱. 本文的设计方法为其他新型电磁器件的设计提供了一种新的思路.

关键词: 变换光学, 电磁透明, 电磁聚集

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 78.20.Bh

DOI: 10.7498/aps.64.154102

1 引言

基于麦克斯韦方程组在不同坐标系下具有形式不变性, Pendry 等^[1]和 Leonhardt^[2]提出了变换光学理论来控制电磁波的传播, 进而达到对物体进行隐身的目的. 变换光学理论不仅能够应用于电磁隐身斗篷, 也可以应用于电磁波旋转器^[3]、电磁波聚集器^[4]、电磁波透明体^[5]等一系列新奇的电磁功能器件. 这些电磁功能器件的设计与隐身斗篷的设计理念是一样的, 都是通过变换光学设计本构参数来引导电磁波的传播. 电磁波旋转器可以使电磁波方向发生改变而导致高效率的接收; 电磁波透明体顾名思义其对电磁波是透明的, 不会阻挡电磁波的传播并且能够与斗篷内部进行交互; 聚集器是当电磁波入射到该装置上时, 电磁波能够被设计的装置按照要求集中到一个区域或者一个点, 实现电磁波能量的集中. 这些电磁功能器件在应用方面具

有一定的价值, 所以研究人员对它们进行了广泛深入的研究^[6–21]. 一般的研究都是对这些功能进行单独的讨论, 把两种功能结合到一起的报道很少. 最近, 有学者基于变换光学理论设计了一种新型的多功能电磁器件——旋转集中器^[22]. 本文则基于变换光学理论, 利用电磁透明体和聚集器的设计理念, 把聚集器和透明体相结合, 设计了一种新的电磁器件——椭圆形透明聚集器, 对这种电磁器件的各个部分的功能进行了分工, 在一个器件中实现对电磁波的透明和电磁波的聚集, 透明体自己本身就是隐身的, 所以它也能够实现隐身的功能. 利用变换光学理论, 推导出了该器件所对应功能的本构参数表达式, 并利用基于有限元仿真软件对整个装置进行了全波仿真, 从仿真结果可以看出本文所设计的这个电磁器件能够实现所预设的功能, 并且能够证明所得到的本构参数的正确性. 该器件的设计为其他新型电磁器件的设计提供了一种新的思路.

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 61475079)、宁波市新型光电功能材料及器件创新团队(批准号: 2009B21007)和宁波大学王宽诚幸福基金资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: dongjianfeng@nbu.edu.cn

2 设计原理及本构参数的推导

变换光学的理论基础是麦克斯韦方程组在坐标变换前与变换后的空间中具有形式不变性, 通过设计材料的本构参数(介电常数和磁导率), 从而来控制电磁波的传播. 基于变换光学的电磁器件的设计, 就是通过一系列的坐标变换, 最终得到介电常数和磁导率的关于坐标的函数表达式.

在笛卡尔坐标系下的物理空间中的本构参数可由下面的公式给出^[23]: 设原始空间一个点的坐标为 (x, y, z) , 变换空间对应的坐标为 (x', y', z') , 由麦克斯韦方程组在变换后具有形式不变性得到

$$\mathbf{E}' = (\mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{E}, \quad \mathbf{H}' = (\mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{H}, \quad (1)$$

其中 $\mathbf{E}'$, $\mathbf{H}'$ 分别为变换后物理空间中的电场强度和磁场强度, $\mathbf{A}$ 为雅可比变换矩阵, 表达式为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x'}{\partial x} & \frac{\partial x'}{\partial y} & \frac{\partial x'}{\partial z} \\ \frac{\partial y'}{\partial x} & \frac{\partial y'}{\partial y} & \frac{\partial y'}{\partial z} \\ \frac{\partial z'}{\partial x} & \frac{\partial z'}{\partial y} & \frac{\partial z'}{\partial z} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

物理空间中材料的本构参数(介电常数和磁导率)可由下式计算得到:

$$\varepsilon' = \frac{A\varepsilon A^T}{\det(A)}, \quad \mu' = \frac{A\mu A^T}{\det(A)}. \quad (3)$$

透明聚集器能够把对电磁波的透明和聚集两种功能结合起来从而实现结构的简化. 本文中设计的椭圆透明聚集器的结构形状如图1所示, 图中的蓝色区域(里面的三个椭圆)为电磁波聚集区域, 实现对电磁波能量的集中, 并且该区域能够对外界隐身. 图中灰色区域(外面的四个椭圆)为对电磁波透明的区域, 电磁波能够无阻挡地通过这一区域而到达内部的聚集区域. 这一个器件的功能是电磁波可以无阻碍透过图中的灰色区域, 并且能够用图中的蓝色区域实现对电磁波的能量聚集.

首先, 对图中的蓝色区域实现的能量聚集功能进行讨论. 蓝色区域由三个椭圆组成, 从里到外椭圆的边界分别设为 R_7 , R_6 , R_5 , 椭圆短半轴长度分别为 a_1 , a_2 , a_3 ; 与之对应的长半轴的长度分别为 ka_1 , ka_2 , ka_3 , 这里 k 为轴比系数.

要利用图中的蓝色区域实现对电磁波的聚集功能, 装置的设计要通过两个步骤来完成: 第一

步, 通过压缩变换把区域 $(0 < r < R_6)$ 压缩到区域 $(0 < r' < R_7)$ 当中; 第二步, 把区域 $(R_6 < r < R_5)$ 通过扩张变换扩张到区域 $(R_7 < r' < R_5)$. 这里的 r 和 r' 分别表示的是变换前的原始虚拟空间和变换后的变换空间也就是物理空间.

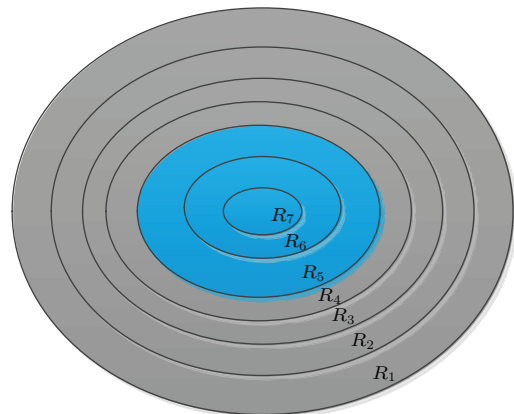


图1 (网刊彩色) 椭圆形透明聚集器示意图

Fig. 1. (color online) Diagram of the elliptically cylindrical transparent concentrator.

按照以上所述的区域变换关系, 首先选取合适的变换函数把虚拟空间区域变换到物理空间区域, 坐标变换可一般性地表示为

$$\xi' = f(\xi), \quad \eta' = \eta, \quad z' = z, \quad (4)$$

其中 f 为连续函数.

在这里, 对于第一步的变换, 原坐标空间和变换后的物理空间之间的变换关系选择为

$$r' = \frac{a_1}{a_2} r, \quad \theta' = \theta, \quad z' = z. \quad (5)$$

通过一定的变换, 换算到笛卡尔坐标系下的结果为

$$x' = \frac{a_1}{a_2} x, \quad y' = \frac{a_1}{a_2} y, \quad z' = z. \quad (6)$$

由雅可比变换矩阵的定义(2)式可以得到雅可比变换矩阵的表达式为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_1/a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_1/a_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

由此得到雅可比行列式的值为

$$\det \mathbf{A} = \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2. \quad (8)$$

由(3)式可以得到变换后的相对介电常数和相对磁导率的表达式为

$$\varepsilon'_{xx} = \mu'_{xx} = 1, \quad (9a)$$

$$\varepsilon'_{xy} = \mu'_{xy} = 1, \quad (9b)$$

$$\varepsilon'_{yy} = \mu'_{yy} = 1, \quad (9c)$$

$$\varepsilon'_{zz} = \mu'_{zz} = \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2. \quad (9d)$$

在第二步设计当中, 椭圆柱与直角坐标系之间的关系为

$$\begin{aligned} x &= p \cosh \xi \cos \eta, \\ y &= p \sinh \xi \sin \eta, \quad z = z. \end{aligned} \quad (10)$$

把原始空间 ($R_6 < r < R_5$) 扩张变换为变换后的物理空间 ($R_7 < r' < R_5$) 的变换函数选择为

$$\begin{aligned} r' &= Mr - kNr / \sqrt{x^2 + k^2y^2}, \\ \theta' &= \theta, \quad z' = z. \end{aligned} \quad (11)$$

其中 r 和 r' 分别代表原坐标空间和物理空间, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, $r' = \sqrt{x'^2 + y'^2}$, $M = (a_3 - a_1) / (a_3 - a_2)$, $N = a_3(a_2 - a_1) / (a_3 - a_2)$.

由上文相关的设计理论可以得到扩展变换中的雅可比变换矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} C & D & 0 \\ E & F & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

其中,

$$\begin{aligned} C &= M - k^3Ny^2 / (x^2 + k^2y^2), \\ D &= k^3Nxy / (x^2 + k^2y^2)^{3/2}, \\ E &= kNxy / (x^2 + k^2y^2)^{3/2}, \\ F &= M - kNx^2 / (x^2 + k^2y^2)^{3/2}. \end{aligned}$$

由此, 可以得到雅可比行列式的值为

$$\det \mathbf{A} = CF - DE, \quad (13)$$

由 (3) 式得到变换后的物理空间中的相对介电常数和相对磁导率表达式为

$$\varepsilon'_{xx} = \mu'_{xx} = \frac{C^2 + D^2}{CF - DE}, \quad (14a)$$

$$\varepsilon'_{xy} = \mu'_{xy} = \frac{CE + DF}{CF - DE}, \quad (14b)$$

$$\varepsilon'_{yy} = \mu'_{yy} = \frac{E^2 + F^2}{CF - DE}, \quad (14c)$$

$$\varepsilon'_{zz} = \mu'_{zz} = \frac{1}{CF - DE}. \quad (14d)$$

以上推导的 (9a)–(9d) 式和 (14a)–(14d) 式就是为实现电磁波聚集而得到的各个区间 (物理空间) 中的本构参数表达式。

其次, 对图 1 中的灰色区域进行讨论. 灰色区域设计的功能是实现器件对电磁波的透过而不产生阻碍. 灰色区域由四个椭圆环组成, 假设从里到外的边界分别设为 R_4, R_3, R_2, R_1 , 椭圆短半轴长度分别为 b_1, b_2, b_3, b_4 ; 与之对应的长半轴的长度分别为 kb_1, kb_2, kb_3, kb_4 , k 为轴比系数. 设计的初衷就是得到一种变换媒质, 使该媒质填充到装置的灰色区域, 要达到的效果是: 通过该媒质的填充, 使该装置能够实现在空间上与自由空间等价, 电磁波能够透进到装置的灰色区域, 并且在透进前电磁波不会产生失真. 要实现电磁波透明的目的, 装置的设计同样要经过两个步骤来完成: 第一步, 与聚集器的设计一样, 通过压缩变换把原始空间区域 ($R_3 < r < R_1$) 压缩到变换后的物理空间区域 ($R_2 < r' < R_1$) 当中; 第二步, 把原始虚拟空间区域 ($R_4 < r < R_3$) 通过扩张变换扩张到变换后的物理空间中的区域 ($R_4 < r' < R_2$). 这里的 r 和 r' 同样分别表示的是变换前的原始虚拟空间和变换后的变换空间也就是物理空间。

按照以上电磁透明体的设计构想, 分别对设计过程中的两个过程进行单独的描述. 在第一步构造过程中, 选取一个适合的变换函数, 把原始空间变换到物理空间, 选择的变换函数如下:

$$r' = t_1r + t_2r / \sqrt{x^2 + ky^2}, \quad \theta' = \theta, \quad z' = z, \quad (15)$$

其中 $t_1 = (b_4 - R_2) / (b_4 - R_3)$, $t_2 = b_4k(1 - t_1)$.

由上文的有关理论分析和雅可比变换矩阵的定义式可以得到, 透明体的压缩变换过程中的雅可比变换矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} t_1 + t_3k^2y^2 & -t_3k^2xy & 0 \\ -t_3xy & t_1 + t_3x^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (16)$$

其中, $t_3 = t_2 / \sqrt{(x^2 + k^2y^2)^3}$, 由 (3) 式可以得到透明体压缩区域变换后的介电常数和磁导率表达式为

$$\varepsilon'_{xx} = \mu'_{xx} = \frac{(t_1 + t_3k^3y^2)^2 + (t_3k^2xy)^2}{(t_1 + t_3k^2y^2)(t_1 + t_3x^2)}, \quad (17a)$$

$$\varepsilon'_{xy} = \mu'_{xy} = \frac{-t_1t_3xy(1 + k^2) - t_3^2k^2xyr}{(t_1 + t_3k^2y^2)(t_1 + t_3x^2)}, \quad (17b)$$

$$\varepsilon'_{yy} = \mu'_{yy} = \frac{(t_3xy)^2 + (t_1 + t_3x^2)^2}{(t_1 + t_3k^2y^2)(t_1 + t_3x^2)}, \quad (17c)$$

$$\varepsilon'_{zz} = \mu'_{zz} = \frac{1}{(t_1 + t_3k^2y^2)(t_1 + t_3x^2)}. \quad (17d)$$

这就是实现透明体过程中的第一步压缩变换中得到的材料参数.

在第二步的扩展变换过程中, 把原始空间变换到物理空间的变换函数选择为

$$r' = t_1 r + t_2 r / \sqrt{x^2 + ky^2}, \quad \theta' = \theta, \quad z' = z, \quad (18)$$

其中, $t_1 = (b_1 - R_2) / (b_1 - R_3)$, $t_2 = b_1 k (1 - t_1)$.

同样由相关的变换理论得到的雅可比变换矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} t_1 + t_3 k^2 y^2 & -t_3 k^2 xy & 0 \\ -t_3 xy & t_1 + t_3 x^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (19)$$

其中, $t_3 = t_2 / \sqrt{(x^2 + k^2 y^2)^3}$, 由(3)式得到透明体扩展过程后的变换区域的本构参数表达式为

$$\varepsilon'_{xx} = \mu'_{xx} = \frac{(t_1 + t_3 k^2 y^2)^2 + (t_3 k^2 xy)^2}{(t_1 + t_3 k^2 y^2)(t_1 + t_3 x^2)}, \quad (20a)$$

$$\varepsilon'_{xy} = \mu'_{xy} = \frac{-t_1 t_3 xy (1 + k^2) - t_3^2 k^2 xy r}{(t_1 + t_3 k^2 y^2)(t_1 + t_3 x^2)}, \quad (20b)$$

$$\varepsilon'_{yy} = \mu'_{yy} = \frac{(t_3 xy)^2 + (t_1 + t_3 x^2)^2}{(t_1 + t_3 k^2 y^2)(t_1 + t_3 x^2)}, \quad (20c)$$

$$\varepsilon'_{zz} = \mu'_{zz} = \frac{1}{(t_1 + t_3 k^2 y^2)(t_1 + t_3 x^2)}. \quad (20d)$$

通过以上对透明体的设计过程, 由第一步和第二步共同完成, 实现对电磁波的透明.

电磁透明聚集器件的设计就是把以上设计聚集器和透明体的过程相结合, 组装到一个电磁器件当中, 并对相应的各层实现功能的本构参数进行设计, 最后得到能够同时实现对电磁波的透明和聚集的功能器件.

3 仿真结果及分析

上一节中介绍了透明聚集器的设计方法, 并推导了各个不同层的相对介电常数和相对磁导率的表达式, 在这一节中, 为了验证以上设计方法和得到的本构参数表达式的正确性, 设计了一个椭圆形透明聚集器, 并且对整个装置进行了全波仿真. 从电磁波的分布情况来看, 本文得到的本构参数张量是正确的. 在仿真中取椭圆的短半轴长度分别为 $a_1 = 0.1$ m, $a_2 = 0.2$ m, $a_3 = 0.3$ m, $b_1 = 0.4$ m, $b_2 = 0.5$ m, $b_3 = 0.6$ m, $b_4 = 0.7$ m. 半焦距长度 p 取值为 0.06 m. 入射波选择为 TM 波, 入射波为频

率为 6 GHz, 入射方向为从左到右的水平方向, 仿真结果如图 2 所示.

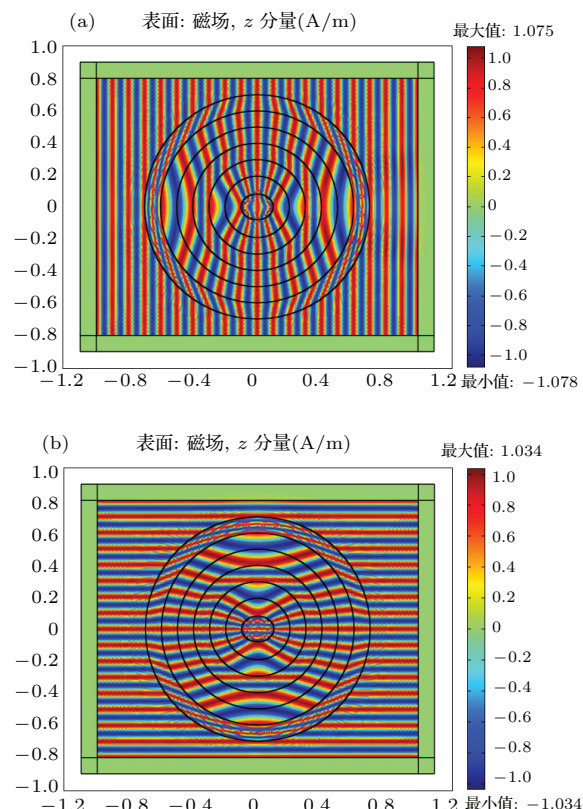


图 2 (网刊彩色) 透明聚集器的表面磁场 z 分量分布图 (a) 电磁波从 x 方向入射时的仿真结果; (b) 电磁波从 y 方向入射时的仿真结果

Fig. 2. (color online) The distributions of z component of the surface magnetic field in the transparent concentrator: (a) The incident wave is along the x direction; (b) The incident wave is along the y direction.

图 2 为透明聚集器仿真得到的表面磁场 z 分量分布图, 其中图 2(a) 是在入射波沿着 x 方向照射到装置上得到的仿真结果, 从装置的表面磁场分布图可以看出, 电磁波在接触到透明聚集器的外层 (R_1) 时, 并没有发生扰动, 而是在所设计的透明体区域 ($R_4 < r' < R_1$) 的作用下透进了装置的内部到达了内部聚集器的区边沿; 在到达内部聚集器的区域 ($0 < r < R_3$) 后, 电磁波在聚集器的作用下被聚集到内部区域 ($0 < r < R_1$), 达到了能量聚集的作用; 电磁波穿过电磁器件——透明聚集器后, 在装置的后向, 电磁波又恢复了其传播的方向而没有发生改变, 而且没有发生散射或者是扰动. 图 2(b) 的入射波是从 y 方向照射到装置上时的表面磁场分布图, 同样从图中可以看到, 改变入射波的方向后电磁波在装置中的传输过程与在 x 方向入射时是相似的,

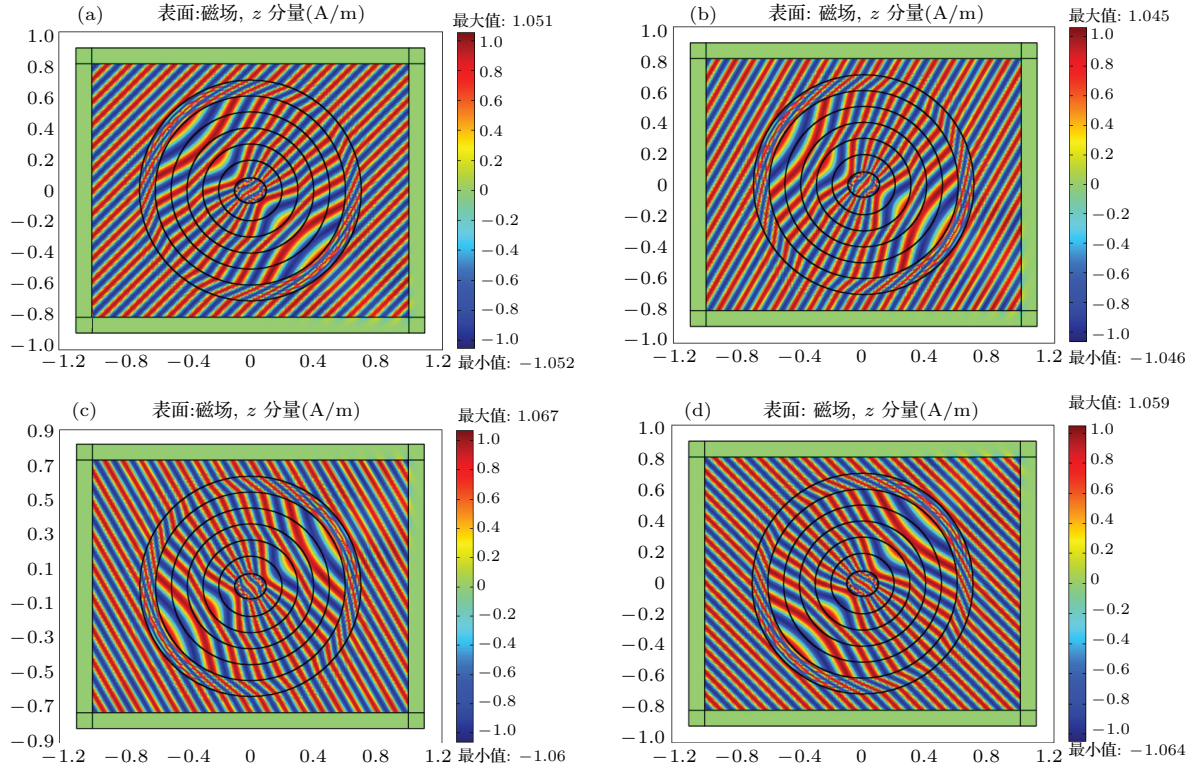


图3 (网刊彩色) 入射电磁波斜入射到装置时得到的表面磁场 z 分量分布图 (a) 入射角为 45° 时的分布图; (b) 入射角为 135° 时的分布图; (c) 入射角为 120° 时的分布图; (d) 入射角为 60° 时的分布图

Fig. 3. (color online) The distributions of z component of the surface magnetic field in the transparent concentrator when the plane waves incident obliquely: (a) the incident wave is 45° along x direction; (b) the incident wave is 135° along x direction; (c) the incident wave is 120° along x direction; (d) the incident wave is 60° along x direction.

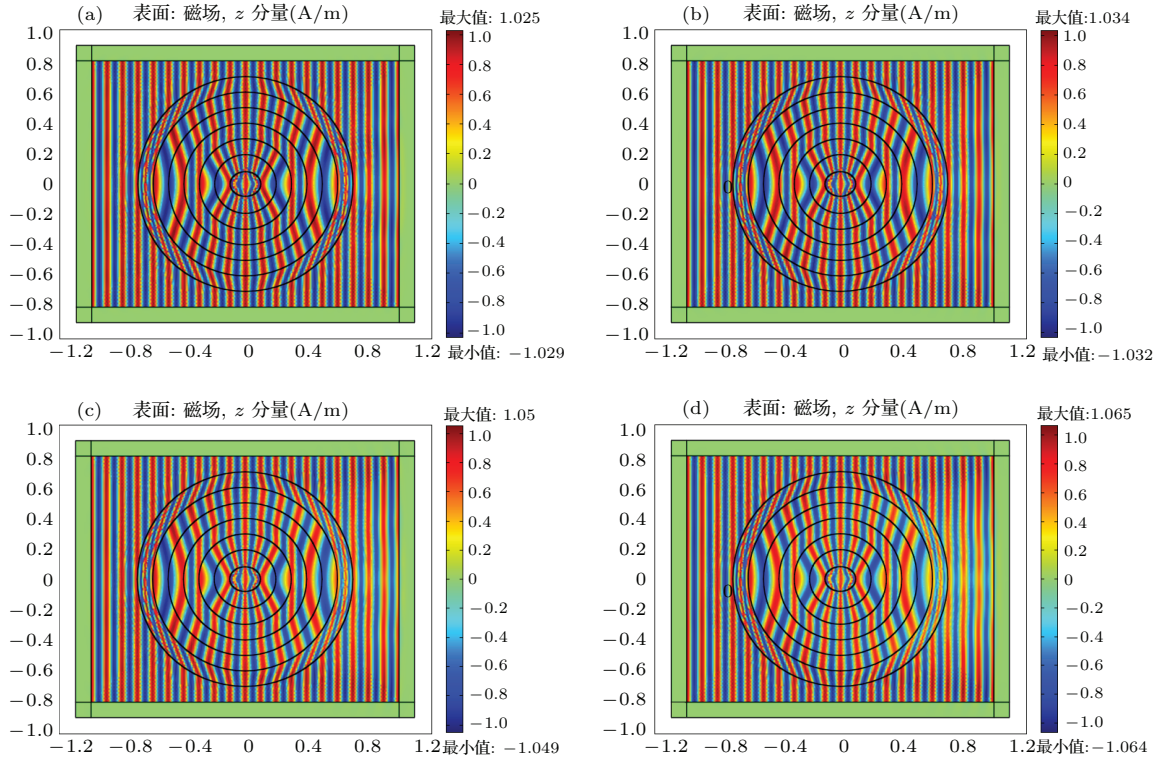


图4 (网刊彩色) 装置存在损耗的情况下的磁场分布图 (a) 损耗为 0.001; (b) 损耗为 0.002; (c) 损耗为 0.004; (d) 损耗为 0.006

Fig. 4. (color online) The distributions of z component of the surface magnetic field in the transparent concentrator with electromagnetic loss: (a) loss of 0.001; (b) loss of 0.002; (c) loss of 0.004; (d) loss of 0.006.

电磁波在装置的外部没有发生扰动,并且在内部区域($0 < r < R_3$)完成了对电磁波的聚集,在电磁器件的后部波形又恢复了传播前的分布形式.从图2(a), (b)中的电磁波的分布形式可以得到,该装置很好地完成了所设计的两个功能——电磁波透明和聚集.

为了进一步测试整个透明聚集器装置的效果和设计方法及得到的本构参数张量的正确性,在图3中展示了从不同角度(45° , 135° , 120° 和 60°)入射下得到的表面磁场 z 分量的分布图,从得到的磁场分布图可以看出,装置同样能够完成所设计的预想的效果——在外层灰色区域实现电磁波的透明和在内部蓝色区域实现对电磁波聚集作用.

以上得到的仿真结果是在理想状态下获得的,也即没有考虑装置的损耗.但在实际制造过程中损耗是始终存在的,我们也对装置出现损耗时的情况进行了仿真,结果如图4所示.图4(a)—(d)是在损耗为0.001, 0.002, 0.004, 0.006的情况下得到的表面磁场 z 分量分布图,可以看到当损耗逐渐增大时,在装置的后向的电磁波会出现明显的散射.

4 结 论

基于变换光学理论,利用压缩变换和扩展变换设计了具有电磁波透明和电磁波聚集两种功能的电磁器件——椭圆形透明聚集器,该装置把电磁波透明器和电磁波聚集器相结合,用一个电磁器件实现两种功能.文中分别推导得到了这个电磁器件各个层中的相对介电常数和相对磁导率张量表达式,通过电磁仿真软件对整个装置进行了仿真,得到了入射波从各个不同方向入射时磁场 z 分量的分布图,从这些仿真的结果图证明了所设计的电磁器件的合理性,并证明了推导得到的本构参数张量表达式的正确性.最后还讨论了电磁器件存在损耗时的情况,当损耗逐渐增大时,器件的功能在一定程度上受到了削弱.椭圆形透明聚集器把分散的功能器件用变换光学的方法把他们组合到一起,能够把能量集中到固定的区域并且内部区域对外界是隐身

的.本文的设计方法为其他新型电磁器件的设计提供了一种新的思路.

参考文献

- [1] Pendry J B, Schuring D, Smith D R 2006 *Science* **312** 1780
- [2] Leonhardt U 2006 *Science* **312** 1777
- [3] Chen H Y, Chan C T 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 241105
- [4] Rahm M, Schurig D, Roberts D A, Cummer S A, Smith D R, Pendry J B 2008 *Photon. Nanostruct.* **6** 87
- [5] Yu G X, Cui T J, Jiang W 2009 *J. Infrared Millim. TE.* **30** 633
- [6] Luo Y, Chen H S, Zhang J J, Ran L X, Kong J A 2008 *Phys. Rev. B* **77** 125127
- [7] Chen H Y, Hou B, Chen S Y, Ao X Y, Wen W J, Chan C T 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 183903
- [8] Kadic M, Guenneau S, Enoch S 2010 *Opt. Express* **18** 12027
- [9] Yang C F, Yang J J, Huang M, Shi J H, Peng J H 2010 *Radioengineering* **19** 136
- [10] Mei Z L, Niu T M, Bai J, Cui T J 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 124908
- [11] Mei Z L, Xu Y L, Bai J, Cui T J 2012 *Opt. Express* **20** 16955
- [12] Li T H, Huang M, Yang J J, Xie R S, Yu J 2012 *Int. J. RF. Microw. C. E.* **22** 522
- [13] Wang W, Lin L, Ma J X, Wang C T, Cui J H, Du C L, Luo X G 2008 *Opt. Express* **16** 11431
- [14] Jiang W X, Cui T J, Cheng Q, Chin J Y, Yang X M, Liu R, Smith D R 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 264101
- [15] Yaghjian A D, Maci S 2008 *New J. Phys.* **10** 115022
- [16] Yang J J, Huang M, Yang C F, Xiao Z, Peng J H 2009 *Opt. Express* **17** 19656
- [17] Yang C F, Yang J J, Huang M, Peng J H, Niu W W 2010 *J. Opt. Soc. Am. A* **27** 1994
- [18] Zhang K, Wu Q, Fu J H, Li L W 2011 *J. Opt. Soc. Am. B* **28** 1573
- [19] Wang S Y, Yu B, Liu S B, Bian B R 2013 *J. Opt. Soc. Am. A* **30** 1563
- [20] Liu G C, Li C, Zhang C C, Sun Z Y, Fang G Y 2013 *Phys. Rev. B* **87** 155125
- [21] Chen Y, Zhu C, Huo F F, Li K, Li L, Kong L H, Liang C H 2014 *Microw. Opt. Techn. Lett.* **56** 1776
- [22] Liu G C, Li C, Shao J J, Fang G Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 154102 (in Chinese) [刘国昌, 李超, 邵金进, 方广有 2014 物理学报 **63** 154102]
- [23] Milton G, Briane M, Willis J 2006 *New J. Phys.* **8** 248.

Design and study of the elliptically cylindrical transparent concentrator based on transformation optics^{*}

Wang Hui-Bo Luo Xiao-Yang Dong Jian-Feng[†]

(The Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

(Received 13 December 2014; revised manuscript received 2 February 2015)

Abstract

The design of a novel elliptically cylindrical transparent concentrator with functions of both electromagnetic transparency and electromagnetic concentration is put forward based on the form invariance of Maxwell's equations in different coordinate transformation and transformation optics theory, and through the design of material constitutive parameters (permittivity and permeability) to guide the electromagnetic wave propagation. The electromagnetic wave transparent body does not prevent the transmission of electromagnetic waves that can interact in the cloak. An electromagnetic wave concentrator is an electromagnetic device that controls the electromagnetic waves to focus on an area or at a point to realize the electromagnetic wave energy concentration according to the requirement when the electromagnetic waves are incident on the device. In this paper, the expressions of the relative permittivity and permeability tensors in every layer of the electromagnetic device are derived by compression transformation and extension transformation. Then full-wave simulations for the electromagnetic device are performed by using finite-element software. The distributions of z -component of the magnetic field for the electromagnetic waves incident from different directions are obtained. Simulation results confirm the validity of the design method and the constitutive parameter tensors. Finally, effect of electromagnetic loss on the performance of the device is also discussed. To a certain extent, the function of the device will be weakened when the electromagnetic loss increases gradually. The design method proposed in this paper provides a new approach that can be used to design other novel electromagnetic devices.

Keywords: transformation optics, electromagnetic transparency, electromagnetic concentration

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 78.20.Bh

DOI: 10.7498/aps.64.154102

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61475079), the Innovative Research Team Program of Ningbo, China (Grant No. 2009B21007), and the K. C. Wong Magna Fund in Ningbo University, China.

[†] Corresponding author. E-mail: dongjianfeng@nbu.edu.cn