

专题: 光学超构材料

完美吸收体、电磁“黑洞”以及内置完美匹配层的吸收特性*

陶思岑 陈焕阳†

(厦门大学电磁声学研究院, 电磁波科学与探测技术福建省高校重点实验室, 厦门 361005)

(2020年1月15日收到; 2020年3月10日收到修改稿)

完美匹配层在电磁学仿真中具有关键作用, 它可以用有限空间模拟无限空间, 使得电磁波传播至边界和传播至无限远处无异. 内置完美匹配层具有类似的概念, 一般以柱体或者球体的形式置于物理场内部, 能够匹配边界上的电磁场, 使得电磁波传播在其凸面上如同传播至无限远处一样, 没有任何散射. 平面的吸收体除了完美匹配层, 还可以通过多种方式实现, 如 Kramers-Kronig 关系、光子晶体、超构材料等. 而内置曲面的吸收体常用到的有传统的完美吸收体、电磁“黑洞”等. 变换光学一直以来不断激发着研究者浓厚的研究兴趣, 因其能够通过坐标变换任意操控电磁波走向, 且具有非常广泛的应用, 也时常被用作设计吸收体的理论工具. 而就本文作者所知, 目前还没有非常有效的方式能够实现内置曲面吸收体的完美吸收、无反射, 且不依赖于入射角度和频率. 本文运用变换光学理论设计了一个内置完美匹配层, 该匹配层的材料参数由一个复平面的径向坐标变换得到. 通过平面波的电场图及二维远场图直观地一一对比分析匹配或不匹配的完美吸收体、电磁“黑洞”和该内置完美匹配层的吸收特性, 发现匹配的完美吸收体吸收效果较好, 电磁“黑洞”具有较大散射, 而内置完美匹配层具有相对最好的吸收效果, 且无后向散射, 可作为吸收内核用于电磁仿真以及相关实验中.

关键词: 内置完美匹配层, 变换光学理论, 电磁“黑洞”, 吸收特性**PACS:** 42.25.Bs, 42.25.Fx, 92.60.Ta, 04.70.-s**DOI:** 10.7498/aps.69.20200110

1 引言

吸收体在电磁仿真计算中不可避免, 在计算区域的边界, 时常需要吸收边界条件来满足所需计算要求. 完美匹配层 (perfectly matched layer, PML) 是一种层状吸收边界条件, 是由 Berenger^[1] 在 1994 年首先提出的, 它可以实现对向外发出的电磁波的完全吸收而没有反射, 可以有效界定计算区域, 将无限空间等效为有限空间, 在电磁计算及仿真中具有重要意义. 同年, Chew 和 Weedon^[2] 提出

坐标拉伸方法将文献 [1] 中提出的完美匹配层概念推广至三维. 平面的吸收材料除了完美匹配层之外, 还有很多实现方法. 例如 Kramers-Kronig 关系^[3-5]、光子晶体^[6]、以及超构材料^[7,8] 等. 2015 年 Horsley 等^[3] 提出用空间的 Kramers-Kronig 关系来计算介电常数的实部与虚部, 由此得到的平面介质材料能够实现对任意角度入射的电磁波的无反射吸收. 2019 年 Luo 和 Lai^[6] 利用具有损耗的光子晶体实现几乎完美的吸收, 其中该光子晶体的设计具有与自由空间阻抗匹配的特性.

吸收体除了用于计算区域外部边界, 在一些设

* 国家自然科学基金 (批准号: 11874311) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: kenyon@xmu.edu.cn

计中还被用作内部区域. 此类内置的吸收体往往是以柱体或球体的形式呈现. 自 2006 年, Leonhardt 和 Philbin^[9] 提出将广义相对论的时空度规等效于电磁材料参数以后, 许多天文现象得以在电磁仿真以及实验中实现. 其中, 电磁“黑洞”^[10–14] 的实现, 往往需要在内核中添加吸收体, 来模拟光线进入黑洞后无法逃逸的现象. 2009 年, Narimanov 和 Kildishev^[10] 提出用折射率径向分布的全向吸收体来等效“黑洞”, 该“黑洞”材料是各向同性的, 具有一定的吸收效果, 但由于不考虑磁响应, 其在边界处不能实现阻抗匹配, 因而存在不可避免的散射. 另一方面, 近年来变换光学^[15–18] 得到广泛的应用, 因其通过坐标变换即可设计特定的材料分布来实现对光路的调控. 吸收体也可以基于变换光学设计得到^[19–22]. 2011 年, Odabasi 等^[19] 分析了平面几何与曲面几何 (包括凹面和凸面, 分别对应外向电磁波吸收体和内向电磁波吸收体) 的吸收体对电磁波的吸收效果, 并且设计了阻抗匹配的吸收体应用在光学“黑洞”中. 该设计即利用变换光学的思想, 从时域角度分析了其设计的凸面吸收体对电磁波的吸收效果. 之后, 2015 年, Sainath 和 Teixeira^[21] 在分析了凸面完美匹配层具有增益性的吸收特性后, 用类似的方法设计了一个伪完美匹配层 (“pseudo” perfectly matched layer, PPML), 并从时域角度展现了其吸收性能.

以上吸收体的设计虽然在吸收性能上有足够提升, 但提升效果不够直观. 本文通过二维远场对比, 直观地分析了传统完美吸收体、电磁“黑洞”的吸收特性, 并应用变换光学的方法设计了一个材料参数各向异性的内置完美匹配层 (inner perfectly matched layer, inner PML), 通过对比分析三者的吸收及散射特性, 展现了内置完美匹配层较好的吸收效果.

2 完美吸收体的吸收特性分析

对于传统的完美吸收体, 一般设定其介电常数和磁导率表达式如下:

$$\varepsilon = 1 + i, \quad \mu = 1, \quad (1)$$

此时的介质是阻抗不匹配的, 对于平面电磁波入射, 会有较大反射存在. 为了更清楚地体现其吸收

及散射特性, 设置同样不匹配的介电常数和磁导率表达式如下:

$$\varepsilon = 1 + 0.5i, \quad \mu = 1. \quad (2)$$

通过运用多物理场仿真软件 COMSOL Multi physics, 得到两组参数下的吸收体对从右侧入射的平面波的电磁响应, 如图 1(a) 和图 1(b) 所示. 在外围设置常用的柱状完美匹配层有效吸收各个方向的电磁波而无反射, 中间柱体设置完美吸收体的两组参数, 全文中吸收体的外边界均设置为 4 m. 可以看出, 平面波在接触到中间吸收体之后被吸收, 在左侧留下与该柱体截面相似大小的阴影区域. 与之分别对应的远场对比图由图 1(c) 给出, 远场图的中间放大部分可见图 1(d). 由此可清楚地发现, 两组参数的吸收体前向散射基本一致, 其吸收性能相差不大, 但对于后向散射, 由于第二组参数 ($\varepsilon = 1 + 0.5i, \mu = 1$) 相对于第一组参数 ($\varepsilon = 1 + i, \mu = 1$) 匹配性更好, 即 $\sqrt{\mu/\varepsilon}$ 比值更接近 1, 所以其反射更小, 后向散射更少.

若设置吸收体的介电常数和磁导率一致, 此时介质阻抗匹配, 同样设置两组匹配材料表达式如下:

$$\varepsilon = 1 + i, \quad \mu = 1 + i, \quad (3)$$

$$\varepsilon = 1 + 0.5i, \quad \mu = 1 + 0.5i. \quad (4)$$

其吸收及散射特性与阻抗不匹配的情况对比远场图如图 2 所示.

由图 2(a) 和图 2(b) 可明显看出对于阻抗匹配 ($\varepsilon = 1 + i, \mu = 1 + i$) 的吸收体, 其吸收效果与不匹配 ($\varepsilon = 1 + i, \mu = 1$) 的基本一致, 但反射明显较少. 同样的情况在图 2(c) 和图 2(d) 中也出现了, 匹配 ($\varepsilon = 1 + 0.5i, \mu = 1 + 0.5i$) 的吸收体的反射场明显小于不匹配 ($\varepsilon = 1 + 0.5i, \mu = 1$) 的吸收体, 同时相较于图 2(a) 和图 2(b) 的两组参数来说, 整体的后向散射也小得多. 此时, 可以认为阻抗匹配的吸收体吸收效果均比阻抗不匹配的吸收体吸收效果好.

若将两组匹配的吸收体互相比较, 如图 2(e) 和图 2(f) 所示, 吸收特性与散射特性差别不大, 但还是可以看出材料参数值为 ($\varepsilon = 1 + i, \mu = 1 + i$) 的吸收体的后向散射略大一些, 因而材料参数值为 ($\varepsilon = 1 + 0.5i, \mu = 1 + 0.5i$) 的吸收体的相对折射率更接近空气.

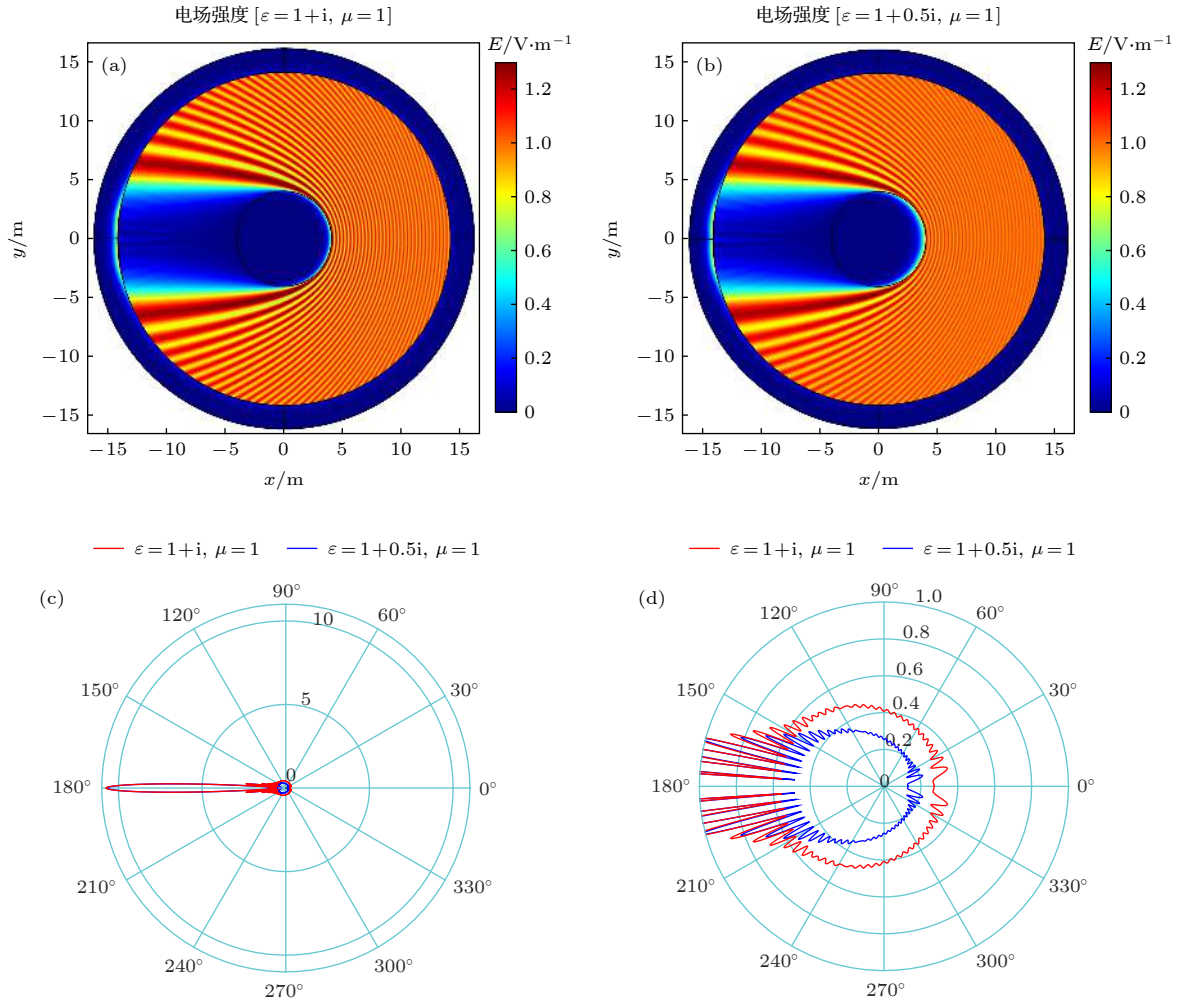


图 1 两个完美吸收体的吸收及散射特性对比图 (a) 吸收体 ($\epsilon = 1 + i, \mu = 1$) 的电场强度图; (b) 吸收体 ($\epsilon = 1 + 0.5i, \mu = 1$) 的电场强度图; (c) 两个吸收体的远场分布对比图; (d) 两个吸收体的远场分布对比放大图

Fig. 1. Comparison diagram of absorption and scattering characteristics of two perfect absorbers: (a) The electric field intensity diagram of absorber ($\epsilon = 1 + i, \mu = 1$); (b) the electric field intensity diagram of absorber ($\epsilon = 1 + 0.5i, \mu = 1$); (c) the comparison diagram of the far field distribution of the two absorbers; (d) the comparison diagram of the enlarged far field distribution of the two absorbers.

3 电磁“黑洞”的吸收特性分析

Narimanov 等^[10]提出的电磁“黑洞”的各向同性的介电常数表达式是只与径向坐标 r 有关的量, 且不同尺寸, 相应的参数值不同, 根据本文设置的尺寸, 给出其表达式为

$$\epsilon(r) = \begin{cases} 1, & r > 4, \\ (4/r)^2, & 2 < r < 4, \\ 4(1 + i), & r < 2, \end{cases} \quad \mu = 1. \quad (5)$$

由于材料是非磁性的, μ 均为 1, 此时材料参数阻抗不匹配, 由图 3(a) 的电场幅值图和图 3(c) 的电场 z 分量图可以看到此时的电磁“黑洞”对入射的平面波具有很明显的后向散射. 若改进此电磁“黑

洞”的吸收性能, 设定阻抗匹配的介电常数和磁导率表达式如下:

$$\epsilon(r) = \mu(r) = \begin{cases} 1, & r > 4, \\ 4/r, & 2 < r < 4, \\ 2(1 + i), & r < 2, \end{cases} \quad (6)$$

在图 3(b) 的电场幅值图和图 3(d) 的电场 z 分量图中, 仍然有后向散射, 但相对削弱了很多. 对于阻抗匹配的电磁“黑洞”, 通过将其远场图与阻抗不匹配的电磁“黑洞”的远场图放在一起比较, 可以更清晰直观地看出二者前向吸收效果相差不大, 而阻抗匹配的电磁“黑洞”后向散射整体明显小得多, 场分布较为紧凑 (如图 3(e) 和图 3(f) 所示), 但二者作为吸收体, 其吸收效果均不够好.

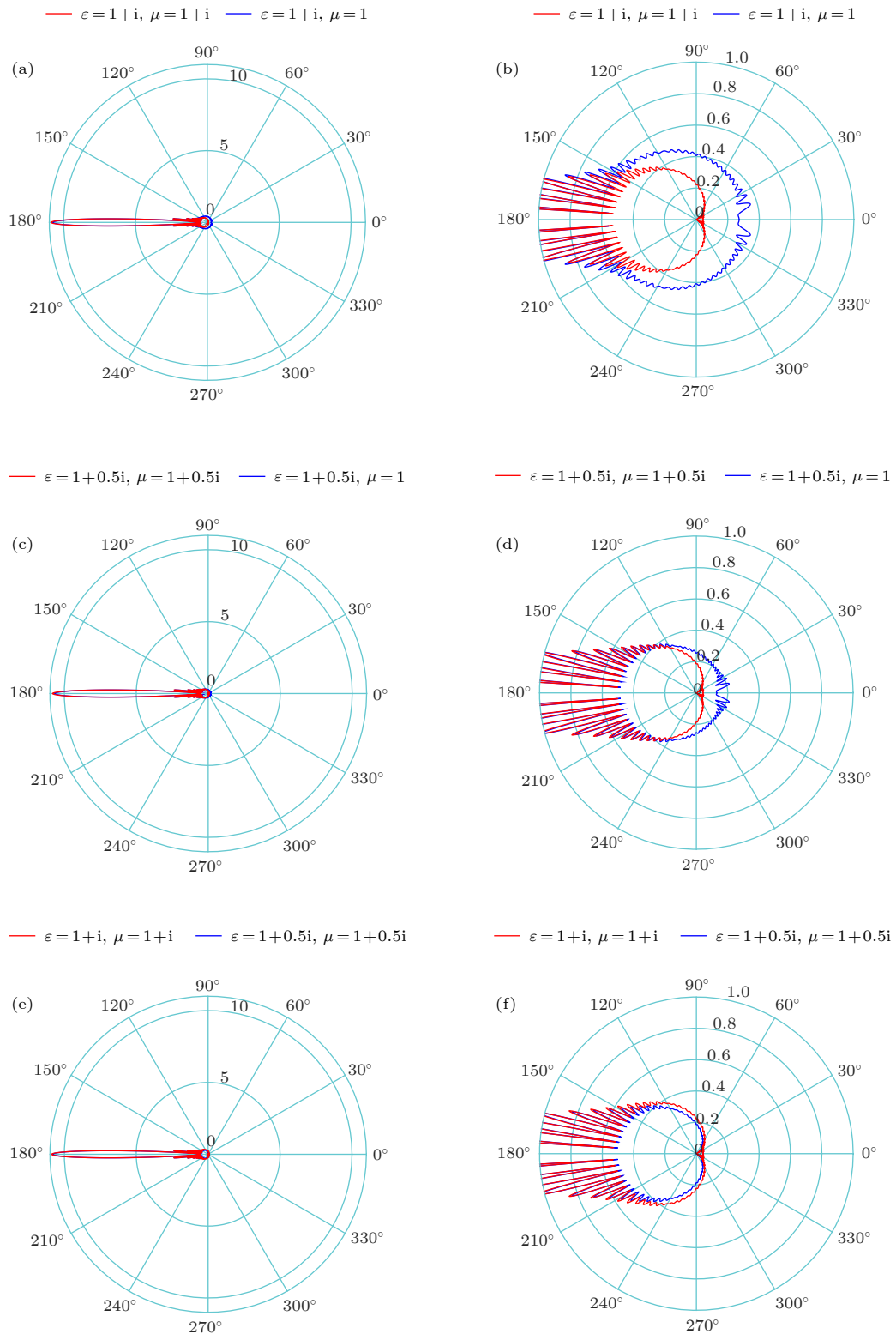


图 2 不同完美吸收体的吸收特性对比 (a), (b) 1 组吸收体阻抗匹配与不匹配的远场对比图和远场对比放大图; (c), (d) 2 组吸收体阻抗匹配与不匹配的远场对比图和远场对比放大图; (e), (f) 两组阻抗匹配的吸收体的远场对比图和远场对比放大图

Fig. 2. Absorption characteristics comparison of different perfect absorbers: (a) The far field comparison diagram and (b) far field comparison enlarged diagram of impedance-matched and impedance-mismatched absorbers of the first set; (c) the far field comparison diagram and (d) far field comparison enlarged diagram of impedance-matched and impedance-mismatched absorbers of the second set; (e) the far field comparison diagram and (f) far field comparison enlarged diagram of impedance-matched absorbers of the above two sets.

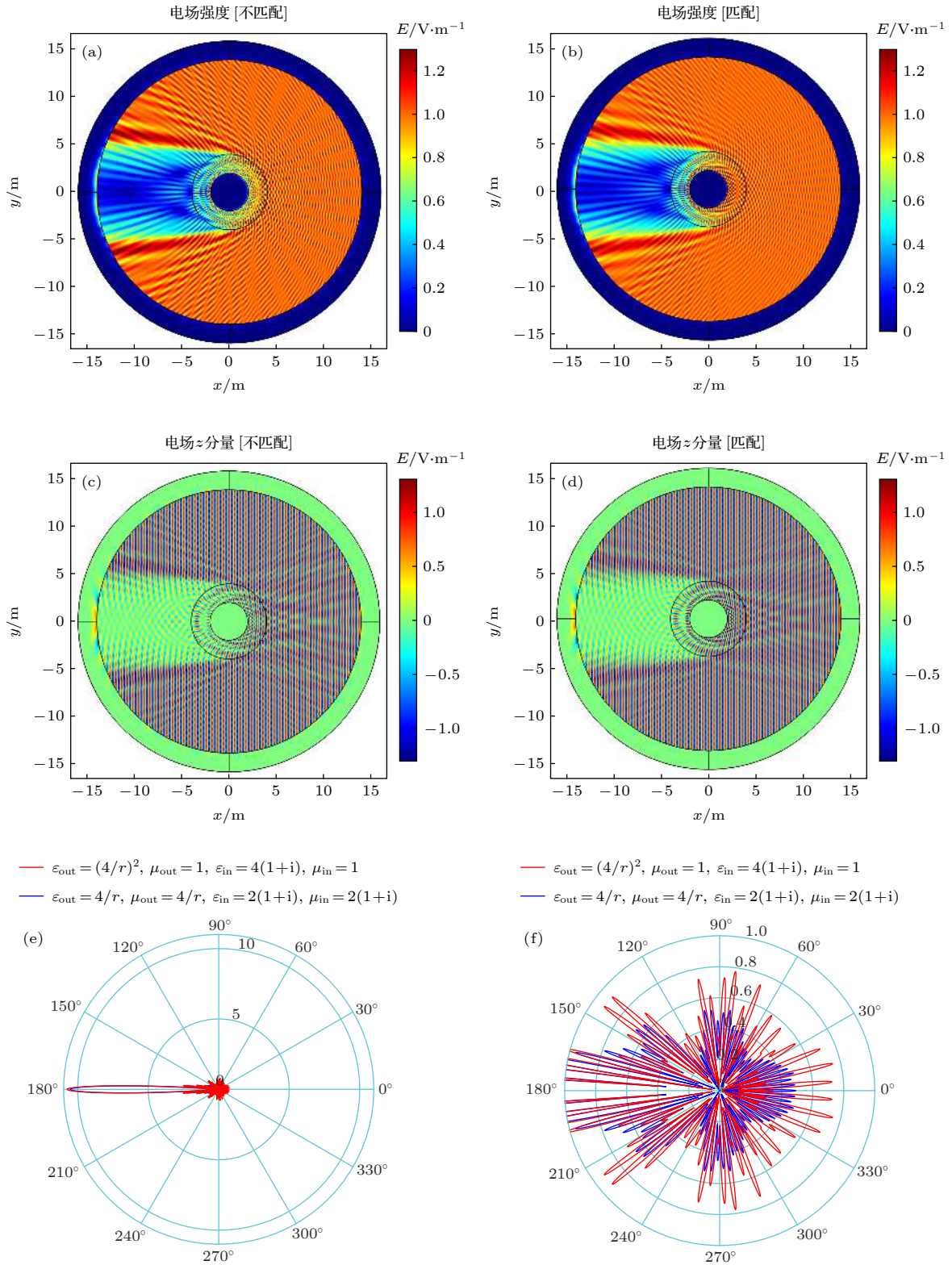


图 3 电磁“黑洞”吸收特性分析 (a) 阻抗不匹配和 (b) 阻抗匹配的电磁“黑洞”电场强度图; (c) 阻抗不匹配和 (d) 阻抗匹配的电磁“黑洞”电场 z 分量图; 阻抗不匹配和阻抗匹配的电磁“黑洞”的 (e) 远场对比图和 (f) 远场对比放大图

Fig. 3. Analysis of absorption characteristics of electromagnetic “black hole”: The electric field intensity diagram of (a) impedance-mismatched and (b) impedance-matched electromagnetic “black hole”; the electric field z component diagram of (c) impedance-mismatched and (d) impedance-matched electromagnetic “black hole”; (e) the far field comparison diagram and (f) far field comparison enlarged diagram of impedance-mismatched and impedance-matched electromagnetic “black hole”.

4 完美吸收体、电磁“黑洞”与内置完美匹配层的吸收特性对比

在分析了完美吸收体和电磁“黑洞”的吸收特性之后, 还不能确定二者性能谁优谁劣, 为此, 本文继续对比二者的电场远场图. 分别对阻抗不匹配和阻抗匹配的完美吸收体和电磁“黑洞”进行对比, 如图 4(a) 和图 4(b) 所示, 阻抗不匹配的二者, 后向散射均比较大, 完美吸收体比电磁“黑洞”的散射更均匀一些, 且总体散射更少些; 而对于阻抗匹配的二者, 整体散射场均比阻抗不匹配的二者小得多, 同样地, 完美吸收体比电磁“黑洞”的散射更均

匀一些, 总体散射也少得多, 场更集中紧密一些, 如图 4(c) 和图 4(d) 所示. 有趣的是, 仔细地观察图 4(c) 远场图的最左端会发现, 阻抗匹配的二者中, 完美吸收体的前向散射场幅值更大, 从另一个角度说明了其吸收更多, 方向性也更好, 这些特性可能是因为电磁“黑洞”不是由变换光学直接导出所致.

以上两种吸收体虽然都具有一定的吸收效果, 也时常用于各种设计中, 但其各向同性的介电常数和磁导率张量在吸收性能上还不足以达到令人满意的效果. 为了获得更好的吸收性能, 本文运用变换光学理论, 设计一个介电常数和磁导率张量为各向异性的内置完美匹配层 (inner PML).

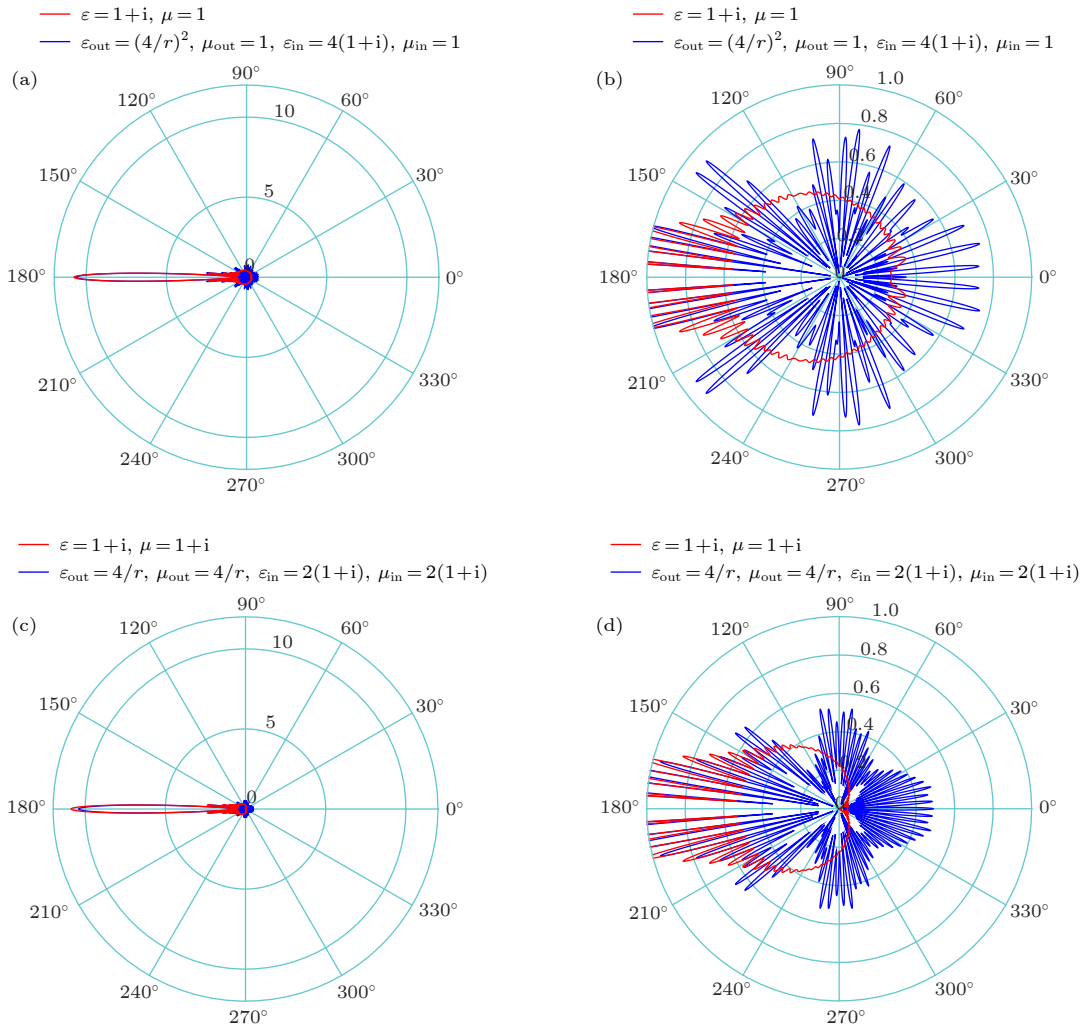


图 4 完美吸收体与电磁“黑洞”吸收特性对比 (a), (b) 阻抗不匹配的完美吸收体和电磁“黑洞”的远场对比图和远场对比放大图; (c), (d) 阻抗匹配的完美吸收体和电磁“黑洞”的远场对比图和远场对比放大图

Fig. 4. Absorption characteristics comparison of perfect absorber and electromagnetic “black hole”: (a) The far field comparison diagram and (b) far field comparison enlarged diagram of impedance-mismatched perfect absorber and electromagnetic “black hole”; (c) the far field comparison diagram and (d) far field comparison enlarged diagram of impedance-matched perfect absorber and electromagnetic “black hole”.

类似外层的传统完美匹配层外部具有完美电导体 (perfect electric conduct, PEC) 边界, 这里考虑一个环状完美匹配层, 其内部包含一个完美电导体柱, 整体作为一个内置吸收体. 由于外层完美匹配层使得电磁波传播至其边界如同传播至无限远处一样, 对内置完美匹配层做一个径向 r 至 R 的变换, 也使得电磁波传播至其边界如同传播至无限远一样:

$$R(r) = r_1 * \ln\left(\frac{(r_1 - r_0)e}{(r - r_0)}\right) - i(r - r_1)^2, \quad (7)$$

此变换实部关系如图 5 中蓝色曲线所示, 其中, $r_0 = 2$ 为内 PEC 柱的半径, $r_1 = 4$ 为内置完美匹配层的外边界半径, $e = 2.71828183$ 是自然常数. 可以看出当 $r \rightarrow 2$ 时, $R \rightarrow \infty$, 此时, 当电磁波传播在内置完美匹配层中时, 就像是很快就传播至无限远处一样. 这里虚部表达式是 R 关于 r 的二次函数 $-(r - r_1)^2$, 取负号是因为, 内置完美匹配层是凸柱面, 电磁波在沿着径向 r 减小的方向传播, 所以虚部取负号才能达到吸收的效果.

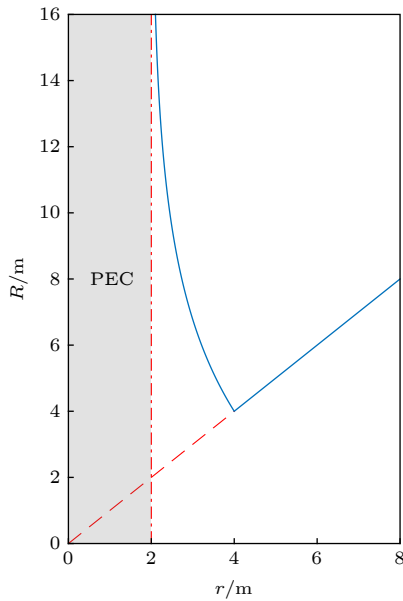


图 5 径向变换关系曲线

Fig. 5. Radial transformation relationship curve.

应用变换光学^[8]的方法, 可以得到经过此径向变换后的各向异性的材料张量表达式为

$$\epsilon_{rr} = \mu_{rr} = \frac{R}{r} \frac{dr}{dR}, \quad (8)$$

$$\epsilon_{\phi\phi} = \mu_{\phi\phi} = \frac{r}{R} \frac{dR}{dr}, \quad (9)$$

$$\epsilon_{zz} = \mu_{zz} = \frac{R}{r} \frac{dR}{dr}. \quad (10)$$

这即为本文采用的内置完美匹配层的介质材料表达式. 从表达式中可以看出, 这其实是一组带吸收的负折射材料, 具有非均匀且各向异性的特点, 相比于 Horsley 等^[3]提出的各向同性的 Kramers-Kronig 材料, 也是在实验中相对较难实现的材料. 但是, Kramers-Kronig 材料目前只能运用于平面的吸收材料, 而本文需要一个凸柱面的吸收材料, 就本文作者所知, 这种柱面的 Kramers-Kronig 材料还未得到真实有效的研究成果. 另一方面, 本文是利用变换光学得到的各向异性的材料, 这类材料与隐身衣材料类似, 因此利用开口谐振环实现的隐身衣的实验^[16]也可作为本文内置完美匹配层材料在实验中实现的参考.

同样地, 画出平面波入射至此内置完美匹配层的电场强度及其 z 分量分别如图 6(a) 和图 6(b) 所示, 可以明显地看出平面波被吸收, 虽然在吸收界面上有一点电场被增强的效果, 但整体看不出有明显的肉眼可见的反射. 为了更好地展现其吸收性能, 进一步将其与匹配的完美吸收体和电磁“黑洞”做远场对比, 结果如图 6(c)–(f) 所示, 可以发现内置完美匹配层的后向散射几乎没有, 仔细观察图 6(c) 和图 6(e) 最左边端点处会发现, 内置完美匹配层前向散射比另外二者幅值更大, 说明吸收效果更好. 综上所述, 内置完美匹配层的后向散射最小, 吸收幅度最大, 作为吸收体来讲, 其吸收性能是最好的, 这也充分体现了变换光学在吸收体设计中起到了非常重要的作用.

5 结论

本文分别分析了匹配和不匹配的完美吸收体、电磁“黑洞”和利用变换光学设计的内置完美匹配层的吸收特性, 并相互进行了远场对比, 对比结果发现, 匹配的完美吸收体吸收效果较好, 电磁“黑洞”具有较大散射且后向反射比较明显, 而内置完美匹配层能够有效吸收来自外部向内传播的电磁波且基本没有反射, 具有相对最好的吸收性能, 可以作为吸收内核运用在未来的电磁“黑洞”等理论设计中, 借助于超构材料也可能在实验中实现.

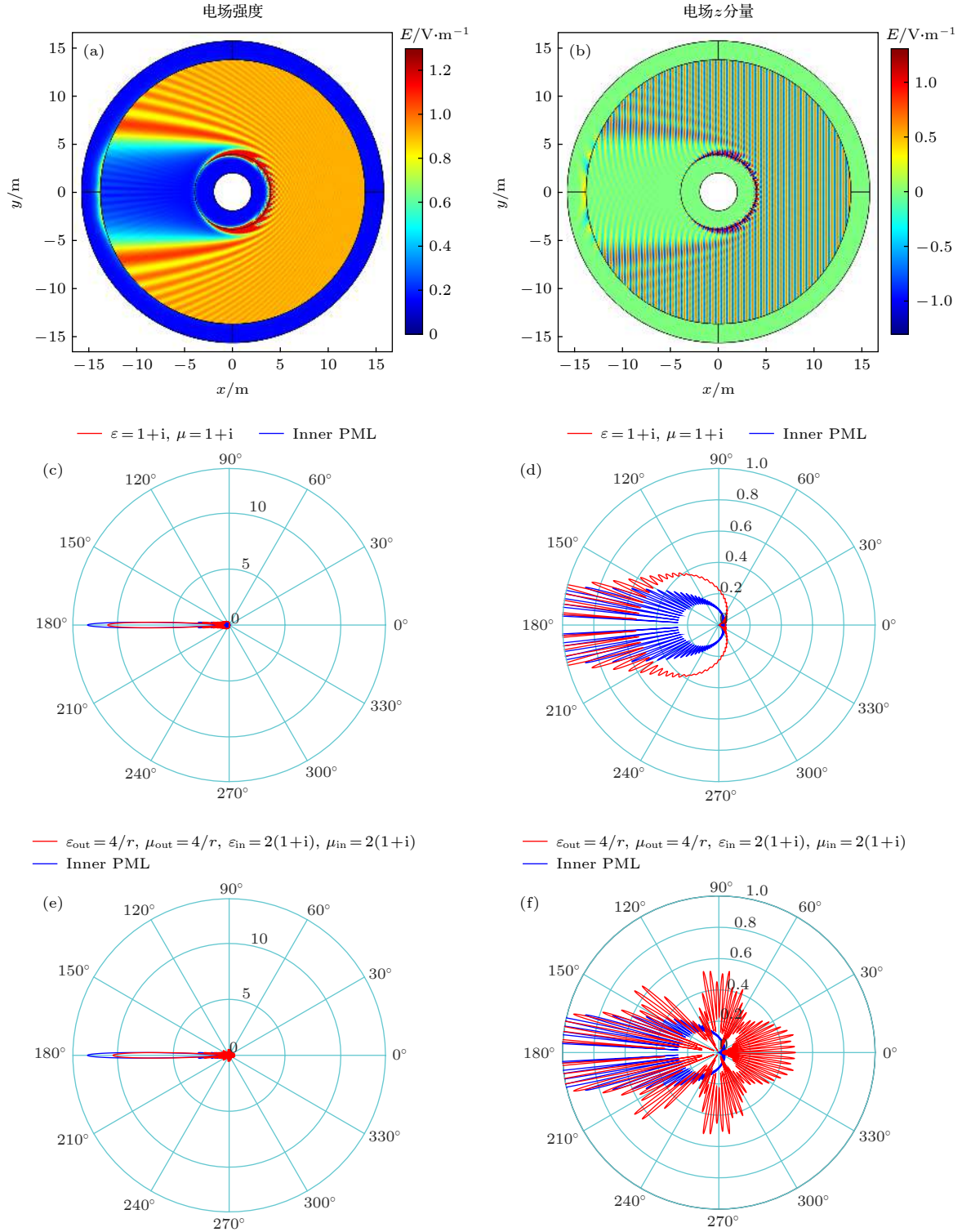


图 6 完美吸收体、电磁“黑洞”与内置完美匹配层 (inner PML) 的吸收特性对比 (a), (b) 内置完美匹配层的电场强度图和电场 z 分量图; (c), (d) 阻抗匹配的完美吸收体和内置完美匹配层的远场对比图和远场对比放大图; (e), (f) 阻抗匹配的电磁“黑洞”和内置完美匹配层的远场对比图和远场对比放大图

Fig. 6. Absorption characteristics comparison of perfect absorber, electromagnetic “black hole” and inner PML: (a) Electric field intensity diagram and (b) electric field z component diagram of inner PML; (c) far field comparison diagram and (d) far field comparison enlarged diagram of impedance-matched perfect absorber and inner PML; (e) far field comparison diagram and (f) far field comparison enlarged diagram of impedance-matched electromagnetic “black hole” and inner PML.

参考文献

- [1] Berenger J P 1994 *J. Comput. Phys.* **114** 185
- [2] Chew W C, Weedon W H 1994 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **7** 599
- [3] Horsley S A R, Artoni M, La Rocca G C 2015 *Nat. Photonics* **9** 436
- [4] Ye D X, Cao C, Zhou T Y, Huangfu J T, Zheng G A, Ran L X 2017 *Nat. Commun.* **8** 51
- [5] Jiang W, Ma Y G, Yuan J, Yin G, Wu W H, He S L 2016 *Laser Photonics Rev.* **11** 1600253
- [6] Luo J, Lai Y 2019 *Opt. Express* **27** 015800
- [7] Landy N L, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [8] Liu X L, Starr T, Starr A F, Padilla W J 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 207403
- [9] Leonhardt U, Philbin T G 2006 *New J. Phys.* **8** 247
- [10] Narimanov E E, Kildishev A V 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 041106
- [11] Cheng Q, Cui T J, Jiang W X, Cai B G 2010 *New J. Phys.* **12** 063006
- [12] Argyropoulos C, Kallos E, Hao Y 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 2020
- [13] Sheng C, Liu H, Wang Y, Zhu S N, Genov D A 2013 *Nat. Photonics* **7** 902
- [14] Chen H Y, Miao R X, Li M 2010 *Opt. Express* **18** 15183
- [15] Pendry J B, Schurig D, Smith D R 2006 *Science* **312** 1780
- [16] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer S A, Pendry J B, Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 977
- [17] Leonhardt U 2006 *Science* **312** 1777
- [18] Xu L, Chen H Y 2015 *Nat. Photonics* **9** 15
- [19] Odabasi H, Teixeira F L, Chew W C 2011 *J. Opt. Soc. Am. B* **28** 1317
- [20] Popa B I, Cummer S A 2011 *Phys. Rev. A* **84** 063837
- [21] Sainath K, Teixeira F L 2015 *J. Opt. Soc. Am. B* **32** 1645
- [22] Zhou M Y, Tao S C, Yang F B, Chen H Y 2019 *J. Xiamen Univ. (Nat. Sci.)* **58** 783 (in Chinese) [周梦颖, 陶思岑, 杨福宝, 陈焕阳 2019 厦门大学学报 (自然科学版) **58** 783]

SPECIAL TOPIC—Optical metamaterials

**Absorption characteristics of perfect absorber,
electromagnetic “black hole” and
inner perfectly matched layer***Tao Si-Cen Chen Huan-Yang[†]

(*Key Laboratory of Electromagnetic Wave Science and Detection Technology in Fujian Province,
Institute of Electromagnetics and Acoustics, Xiamen University, Xiamen 361005, China*)

(Received 15 January 2020; revised manuscript received 10 March 2020)

Abstract

The perfectly matched layer plays a key role in electromagnetic simulations, and it makes the infinite space look like a finite space, so that the electromagnetic waves propagating to the boundary seem like their propagations to the infinity. The inner perfectly matched layer has a similar concept, usually in the form of a cylinder or sphere placed inside the physical field. It makes the electromagnetic field matched at the boundary, so that the electromagnetic waves propagate on its convex surface as if they were propagating to an infinite distance, without any scattering. In addition to the perfectly matched layer, planar absorbers can be realized in a variety of ways, such as spatial Kramers-Kronig relations, photonic crystals, metamaterials, etc. On the other hand, the inner cylindrical or spherical absorbers are generally perfect absorbers, electromagnetic “black hole”, etc. Transformation optics always arouse great research interests. For its property of controlling propagation of electromagnetic waves arbitrarily under coordinate mappings, transformation optics has a wide range of applications and has also been used as a theoretical tool for designing absorbers. However, to the authors’ knowledge, there is no effective method to achieve perfect absorption of inner absorbers with no reflections and independence of incident angle or wave frequency. In this paper, transformation optics theory is used to design an inner perfectly matched layer whose material parameters are obtained by a radial coordinate transformation of the complex plane. Through investigating the electromagnetic wave patterns and the two-dimensional far-field diagrams, we intuitively compare and analyse one by one the absorption characteristics of the matched and mismatched perfect absorber, electromagnetic “black hole” and the inner perfectly matched layer. It is found that the matched perfect absorber has better absorption property than mismatched one and electromagnetic “black hole”. In the electromagnetic “black hole” there appear a lot of scatterings. While our inner perfectly matched layer demonstrates the best effectiveness of absorption with no back scattering. It can be used as an absorbing kernel in electromagnetic simulations and relevant experiments.

Keywords: inner perfectly matched layer, transformation optics theory, electromagnetic “black hole”, absorption characteristics

PACS: 42.25.Bs, 42.25.Fx, 92.60.Ta, 04.70.–s

DOI: 10.7498/aps.69.20200110

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11874311).

† Corresponding author. E-mail: kenyon@xmu.edu.cn