

THz 频段单面左手材料的设计及仿真研究*

李俊成[†] 郭立新 刘松华

(西安电子科技大学理学院, 西安 710071)

(2011 年 8 月 23 日收到; 2011 年 10 月 3 日收到修改稿)

本文运用等效参数提取方法验证了双线螺旋结构在不同频率处不仅能够实现负的磁导率, 而且可以实现负的介电常数. 在电磁波平行和垂直入射到双线螺旋结构表面两种情况下, 发现其负介电常数的形成机理相同. 以往的单面左手材料的研究仅仅局限于微波波段, 通过改进双线螺旋结构, 在 THz 频段设计出一种新型单面左手材料, 同时利用 LC 等效电路解释了其设计原理. 一般的左手材料是由刻蚀在基板两侧的电谐振器和磁谐振器组合而成的复合结构, 与这些复合结构相比, 这种新型单面左手材料具有低损耗, 结构简单, 易于加工等优点.

关键词: 螺旋结构, 左手材料, 负磁导率, 负介电常数

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

1 引言

超材料是一些具有天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合结构或复合材料. Pendry 等人很早就设计出周期排列的平行金属线和开口谐振环, 分别实现了负的介电常数和负的磁导率^[1,2]. 随后谐振环和金属线的复合结构实现了左手材料^[3]. THz 频段超材料^[4-6] 及其应用^[7,8] 也已经被广泛研究. 超材料是亚波长周期性结构, 结构单元的晶格长度要小于入射波长, 左手材料是介电常数和磁导率同时为负的超材料. 左手材料结构的设计思路主要分为电磁波垂直于介质基板入射和电磁波平行介质基板入射两种情况, 均可实现双负特性. 在太赫兹频段设计左手材料, 要求结构单元的晶格长度要小于 THz 波波长, 加工精度要求较高, 所以 THz 左手材料的结构设计主要是在垂直入射情况下实现双负特性, 如金属短线对^[9]、渔网结构^[10] 和闭合谐振环^[11] 等双面结构. 在电磁波水平入射的情况下, 左手材料是多层堆叠结构, 每一层的厚度要小于入射波长, 有学者在水平入射情况下仅设计出具有负磁导率的 THz 超材料^[12], 这种

材料并不能实现双负特性. 以往单面左手材料的研究局限于微波波段^[13-15], 所以在电磁波水平入射情况下设计出结构简单的单面 THz 左手材料有助于 THz 左手材料的实际加工和实验验证, 对 THz 超材料的发展和应用具有重要意义.

典型的左手材料是开口谐振环和平行金属线的复合结构, 开口谐振环的磁响应实现了负磁导率, 平行金属线的等离子体效应实现了负介电常数, 这种结构奠定了左手材料结构设计的基本思想. 2006 年有学者打破常规去掉了谐振环, 利用铁磁性金属线阵在理论上实现了负的折射率^[16]. 本文从另一个方向提出了一种新的设计思路, 去掉金属线, 通过改变开口谐振环的几何尺寸和形状实现了负介电常数和负磁导率的重合, 在 THz 频段设计出一种单面左手材料, 并用 LC 等效电路原理解释了其电谐振和磁谐振原理. 在研究双线螺旋结构过程中, 发现了双线螺旋结构具有新的特性, 它不同频率处不仅能够实现负的磁导率, 而且可以实现负的介电常数. 在电磁波平行入射和垂直入射两种情况, 负介电常数的形成机理相同. 通过改进双线螺旋结构, 设计出的单面左手材料具有结构简单, 易于加工, 低损耗等优点, 而且它是用同一个结构单元实

* 中央高校基本科研业务费专项资金资助的课题.

[†] E-mail: juncheng6868@163.com

现了负介电常数和负磁导率, 容易扩展为二维或三维左手材料.

2 双线螺旋结构

2.1 方形螺旋结构

方形双线螺旋结构单元如图 1(a), 该单元外围长度为 $50\ \mu\text{m}$, 外环的边长为 $40\ \mu\text{m}$, 其中内外环缝隙的宽度为 $2\ \mu\text{m}$, 金属线宽度为 $4\ \mu\text{m}$, 厚度为 $200\ \text{nm}$, 刻蚀在衬底 Polyimide 上. 利用三维电磁仿真软件 CST Microwave Studio 对该结构进行模拟仿真, 平面电磁波沿 x 轴方向平行入射, 电场沿 y 轴方向, 与电场方向垂直的两个边界设置为理想电边界 (PEB), 与磁场方向垂直的两个边界设置为理想磁边界 (PMB), 沿着入射方向 x 轴分别设

置为入射端口和出射端口. 电磁仿真得到的散射参数包括反射系数 S_{11} 和透射系数 S_{21} , 如图 1(b) 所示, 在 $0.8\ \text{THz}$ 和 $1.18\ \text{THz}$ 附近出现了传输禁带, 观察结构单元表面在 $0.8\ \text{THz}$ 附近的磁场分布, 强烈的磁谐振在金属环内产生了强烈的反向磁场 (如图 1(a) 所示), 对磁场有阻碍作用. 双线螺旋结构不是双各向异性介质^[17], 根据有效介质理论^[18,19], 可以把这种结构看作是均匀介质, 提取等效介电常数和等效磁导率^[20] (如图 1(c), (d) 所示). 在 $1.18\ \text{THz}$ 附近等效介电常数实部为负, 而磁导率曲线表现出了反谐振现象, 磁导率的负虚部意味着电场能量向磁场能量的转化, 这是由结构的有限尺寸决定的^[21,22]. 在 $0.8\ \text{THz}$ 附近实现了负的磁导率, 而介电常数曲线在 $0.8\ \text{THz}$ 表现出了反谐振, 介电常数的负虚部意味着磁场能量向电场能量的转化, 这是单负超材料特有的性质.

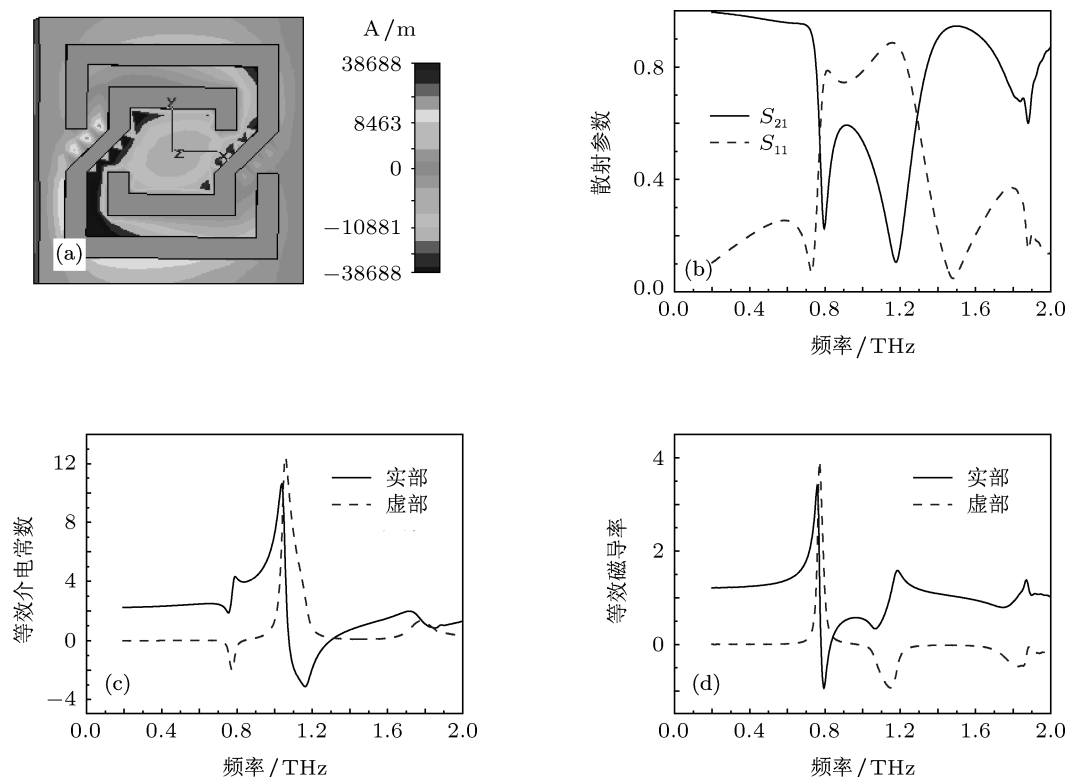


图1 (a) $0.8\ \text{THz}$ 表面磁场分布; (b) 散射参数; (c) 等效介电常数; (d) 等效磁导率

对于电磁波沿 z 轴垂直入射到方形螺旋结构表面情况, 仿真得到的透射系数 S_{21} 如图 2 所示. 值得注意的是: 当电磁波沿 z 垂直入射时, 电场方

向沿 y 轴不变, 在 $1.18\ \text{THz}$ 附近出现了一个传输禁带, 而在 $0.8\ \text{THz}$ 附近并没有出现禁带, 这是由于在 $1.18\ \text{THz}$ 附近介电常数为负. 无论是垂直入射还

是平行入射, 电场极化方向均为 y 方向, 并且在同一谐振频率点出现了传输禁带, 谐振强度也是相同的, 这说明在这两种情况下负介电常数的形成机理完全相同, 都可以等效为 LC 谐振. 另外, 由于电磁波传播方向不同, 负介电常数频段的带宽稍有差异.

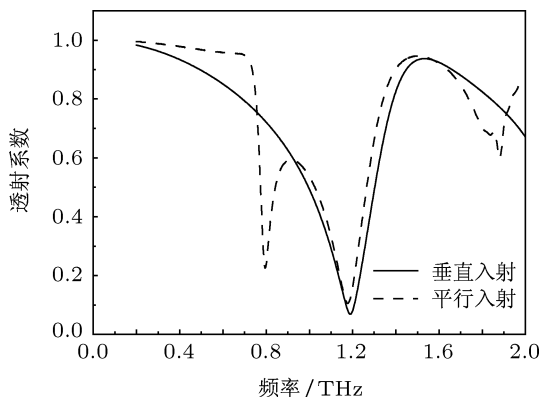


图2 垂直入射和平行入射时方形螺旋结构的透射系数

2.2 圆形螺旋结构

圆形双线螺旋结构单元如图 3(a) 所示, 外环的半径为 $20\ \mu\text{m}$, 其他结构参数保持不变. 如图 3(b) 所示, 等效磁导率在 $0.93\ \text{THz}$ 附近为负, 在金属环内产生了反向感应磁场, 对入射磁场有强烈的阻碍作用, 而等效介电常数在 $1.48\ \text{THz}$ 附近为负. 对比图 1(a) 和图 3(a) 可以看出, 相同尺寸的结构单元, 圆形螺旋结构对应的中心谐振频率比方形结构要高, 方形螺旋结构可以实现结构小型化, 在相同谐振频率时, 可以把结构做的更小. 同样, 如图 4 所示, 在电磁波垂直入射和平行入射的两种情况下, 圆形螺旋结构都在 $1.48\ \text{THz}$ 附近出现了电谐振, 可以实现负介电常数.

3 新型单面左手材料

3.1 新型单面左手材料设计原理

双线螺旋结构的负介电常数和负磁导率并不重合, 如果使这两个谐振频点重合, 就可以实现单面左手材料. 如图 3(a), 将内环不断缩小, 最后把内环用一个金属导线代替, 由此可以设计一种新型结构——双开口谐振环 (如图 5(a) 所示). 图 5(b), (c), (d) 分别给出了这种新型结构的散射系数以及由散射系数提取的等效介电常数和等效磁导率. 从图中

可以看出, 双开口谐振环在 $0.65\ \text{THz}$ 和 $1.16\ \text{THz}$ 附近出现了两个传输禁带, 等效介电常数在 $0.65\ \text{THz}$ 附近为负, 等效磁导率在 $1.16\ \text{THz}$ 附近为负. 与双线螺旋结构的等效参数相比, 两者在传输特性上具有相似性.

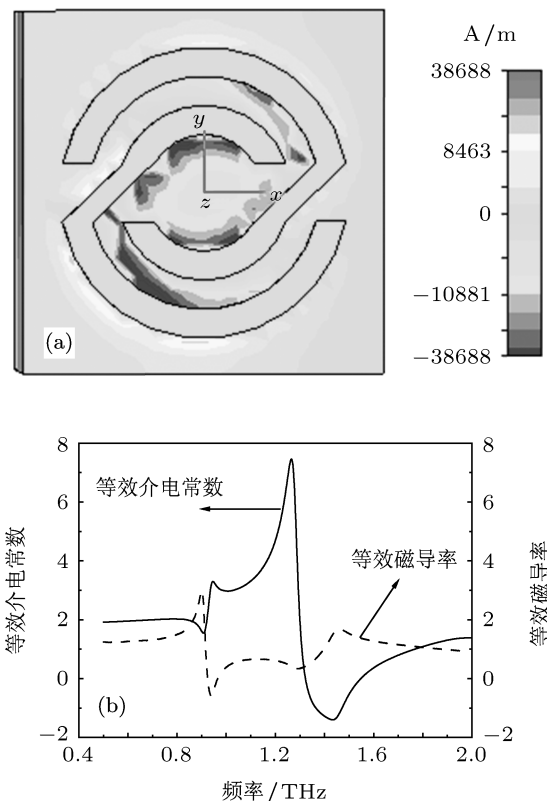


图3 (a) 圆形双线螺旋结构表面磁场分布; (b) 实线表示等效介电常数的实部, 虚线表示等效磁导率的实部

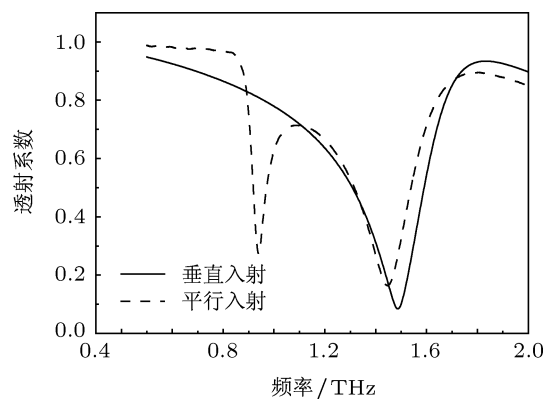


图4 垂直入射和平行入射时圆形螺旋结构的透射系数

以下研究负介电常数和负磁导率的形成机理, 在两个谐振点处, 分别观察结构单元表面的磁场分布和电流分布, 用 LC 等效电路来解释双开口谐振环产生双频点谐振的原因.

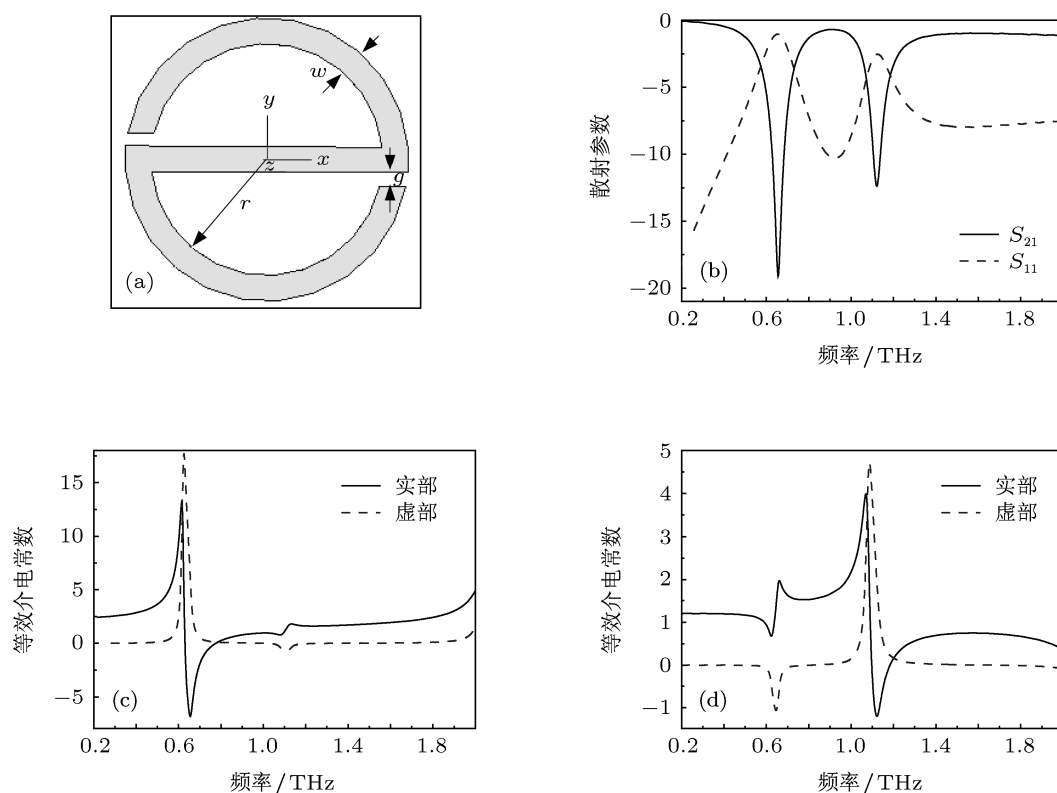


图5 (a) 双开口谐振环线宽 $w = 4 \mu\text{m}$, 环半径 $r = 18 \mu\text{m}$, 缝宽 $g = 2 \mu\text{m}$, 金属的厚度 $t_1 = 200 \text{ nm}$, 衬底为 polyimide; (b) 双开口谐振环的散射参数; (c) 等效介电常数; (d) 等效磁导率

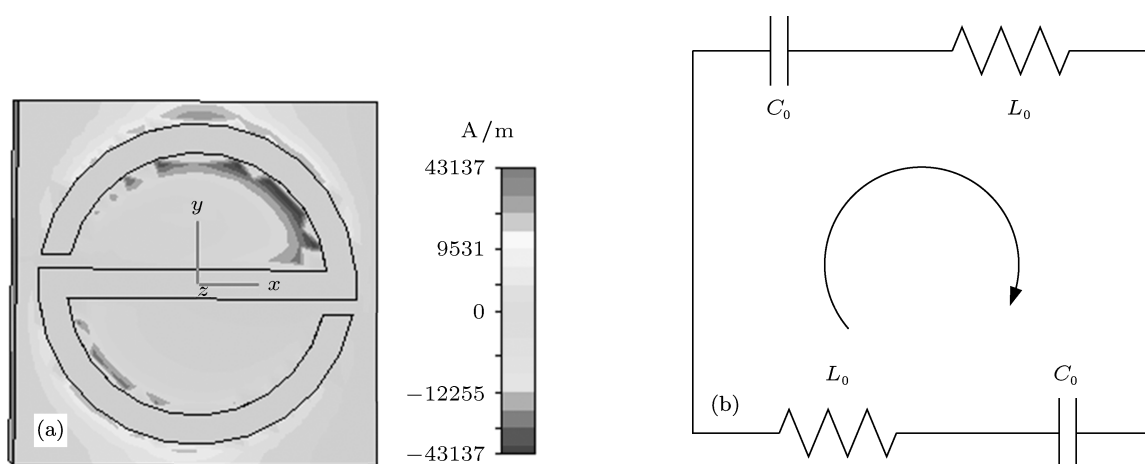


图6 (a) 双开口谐振环在频率 1.16 THz 时表面磁场分布图; (b) 双开口谐振环磁谐振等效电路

在 1.16 THz 附近, 双开口谐振环形成环形电流回路, 可以等效成螺线圈, 环内产生强烈的反向磁场如图 6(a) 所示, 由于反向感应磁场大于入射电磁波磁场, 所以结构单元的总磁通量为负, 等效磁导率为负. 结构表面的电流主要分布在谐振环的周围,

而中间横臂影响可以忽略. 图 6(b) 给出了磁谐振等效电路, L_0 和 C_0 分别为半环的等效电感和开口电容, 磁谐振频率为

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}. \quad (1)$$

在 0.65 THz 附近, 电场引起金属层产生回路电流如图 7(a) 所示, 由于双开口谐振环既具有电容性部分又具有电感部分, 电路发生了 LC 谐振, 谐振区域的等效介电常数为负. 电谐振等效电路如图 7(b) 所示, 形成上下镜像对称的两个电流回路, 由于镜像对称的两个回路的电流流向相反, 谐振环的总磁通量为零. 中间横臂相当于电感 L_1 , 将谐振环一分为二, 形成上、下两个回路, 因此中间横臂不能太窄, 如果太窄, 就不能使中间横臂金属层表面电流分流形成上、下两个回路. 电谐振等效电路的总电感 L_e 和总电容 C_e 分别为

$$L_e = 0.5L_0 + L_1, \quad (2)$$

$$C_e = 2C_0. \quad (3)$$

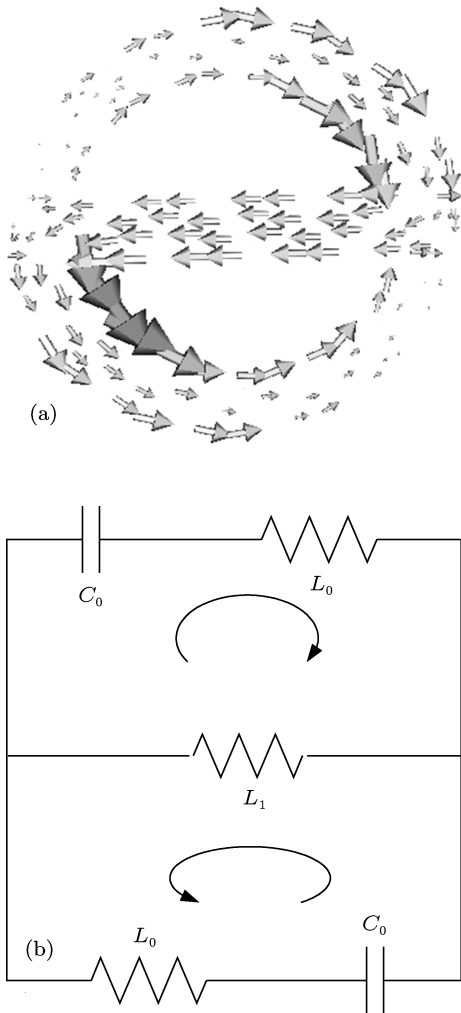


图 7 (a) 双开口谐振环在频率 0.65 THz 时表面电流分布图; (b) 双开口谐振环电谐振等效电路

故电谐振频率为

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_e C_e}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(0.5L_0 + L_1)(2C_0)}}, \quad (4)$$

其中 L_1 表示中间横臂引起的电感. 比较 (1) 式和 (4) 式, 显然有 $f_e < f_m$, 这种结构是由双线螺旋结构改进而来的, 在传输特性上具有相似性, 由此可知只是简单的改变双线螺旋结构的尺寸, 如内外环半径、缝宽、金属线宽度或衬底厚度, 不能使两个谐振点重合. 为了使双开口谐振环的两个谐振点重合, 需要保持 f_m 不变, 同时增大 f_e , 即减小电谐振的总电容. 由于中间横臂对磁谐振的影响可以忽略, 在中间横臂上开一个缝隙 (如图 8 所示), 这样增加的新电容 C_1 不会改变磁谐振, 只会改变电谐振. 改进后双开口谐振环的总电感 L_e 不变, 总电容为

$$C_s = \frac{1}{1/(2C_0) + 1/C_1}. \quad (5)$$

此时电谐振频率为

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_e C_s}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(0.5L_0 + L_1)C_s}}. \quad (6)$$

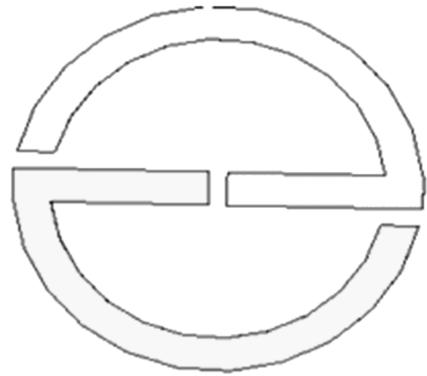


图 8 在双开口谐振环中间横臂上开一个细缝, 形成一个新电容 C_1

由于 (5) 和 (6) 式可知, 改变中间横臂电容 C_1 , 即是在调节电谐振频率, 就可以实现负介电常数和负磁导率的重合, 得到左手特性. 通过仿真优化, 令中间横臂缝隙的宽度 $g_1 = 0.3 \mu\text{m}$, 其它参数保持不变, 电磁仿真结果如图 9(a) 所示. 与图 5(b) 相比, 在频率 1.16 THz 附近, 透射系数 S_{21} 明显增大, 反射系数 S_{11} 降低. 由图 9(b) 可知折射率、介电常数和磁导率的实部在 1.07—1.18 THz 同时为负, 实现了左手特性, 带宽为 0.11 THz, 但由于左手通带的损耗比右手通带的损耗大, 所以传输曲线 S_{21} 在左

手通带区域表现为凹陷, 并非传输禁带.

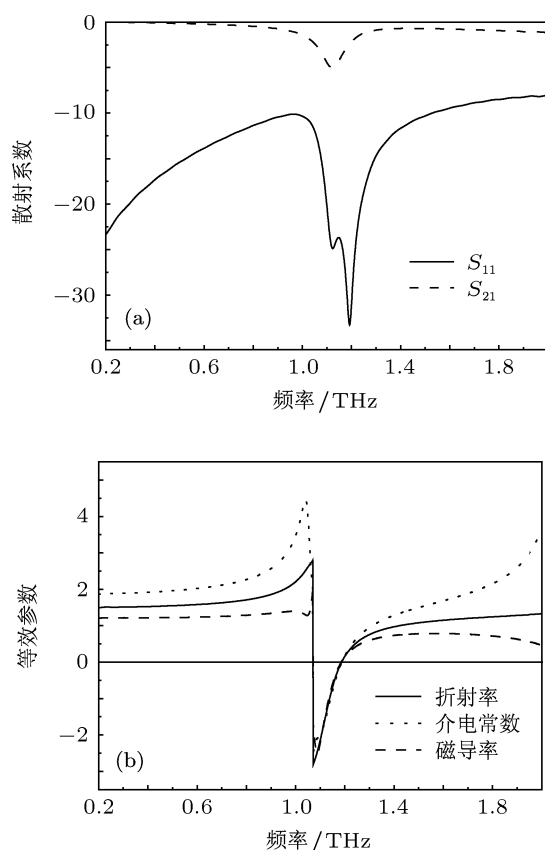


图9 (a) 单面左手材料的散射系数; (b) 单面左手材料的折射率、等效介电常数和磁导率的实部

3.2 品质因数

左手材料的损耗一般比较高, 这是制约其发展的重要因素. 以下考虑这种新型单面左手材料的品质因数 $F = |n'/n''|$, 它是衡量电磁损耗的重要标准. 图 10 给出了在左手频段内晶格长度 a 和线宽 w 对品质因数的影响. 在左手频段晶格长 a 从 $50\ \mu\text{m}$ 增加到 $56\ \mu\text{m}$, 降低了相邻结构单元的耦合作用, 左手材料的透射率增加, 电磁波的传输损耗降低, 品质因数增加. 金属线宽 w 从 $4\ \mu\text{m}$ 增加到 $6\ \mu\text{m}$, 品质因素也明显升高, 在 $1.01\ \text{THz}$ 品质因数达到最高 11.5, 这在 THz 频段的左手材料中是最

高的^[11,23]. 一般的左手材料是由刻蚀在不同基板上的电谐振器和磁谐振器组合而成的复合结构, 当电磁波在复合结构中传播时, 位于基板两侧的电谐振器和磁谐振器会发生耦合, 增大了电磁损耗, 而我们设计的单面左手材料结构简单, 损耗低, 能够同时实现负介电常数和负磁导率. 如图 10 所示, 随着金属线宽和晶格长度的增加, 左手频段向低频方向移动, 对结构参数进行调整, 可以得到所需单面左手材料.

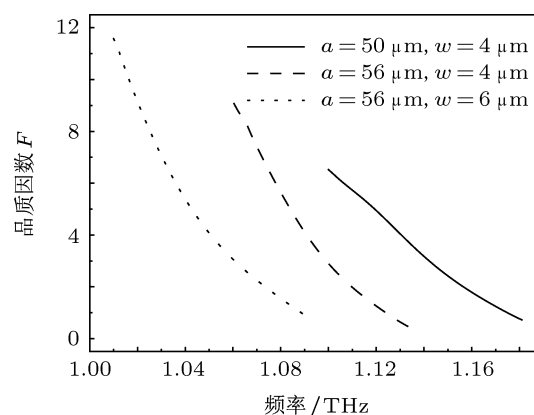


图10 在左手频段内晶格长度 a 和线宽 w 对品质因数的影响

4 结论

本文根据等效介质理论, 将双线螺旋结构等效成均匀介质, 对方形和圆形螺旋结构进行电磁仿真, 发现双线螺旋结构在不同谐振点分别实现了负磁导率和负介电常数, 通过改进双线螺旋结构, 在 THz 频段设计出一种双开口谐振环, 这种新型结构与双线螺旋结构具有相似性, 能够在不同谐振点实现负介电常数和负磁导率, 同时利用 LC 等效电路解释了电谐振和磁谐振的原因, 通过对双开口谐振的仿真优化, 实现了负磁导率和负介电常数双频点的重合, 设计出一种新型单面左手材料. 与普通复合结构相比, 这种新型单面左手材料具有低损耗, 结构简单, 易于加工等优点, 更具有实用性.

- [1] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
 [2] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *Microwave Theory Tech.* **47** 2075

- [3] Smith D R, Padilla Willie J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
 [4] Yen T J, Padilla W J, Fang N, Vier D C, Smith D R, Pendry J B, Basov D N, Zhang X 2004 *Science* **303** 1494

- [5] Linden S, Enkrich C, Wegener M, Zhou J F, Koschny T, Soukoulis C M 2004 *Science* **306** 1351
- [6] Miyamaru F, Saito Y, Takeda M W, Hou B, Liu L, Wen W, Sheng P 2008 *Phys. Rev. B* **77** 045124
- [7] Driscoll T, Andreev G O, Basov D N, Palit S, Cho S Y, Jokerst N M, Smith D R 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 062511
- [8] O'Hara J F, Singh R, Brener I, Smirnova E, Han J G, Taylor A J, Zhang W L 2008 *Opt. Express* **16** 1786
- [9] Gundogdu T F, Katsarakis N, Kafesaki M, Penciu R S, Konstantinidis G, Kostopoulos A, Economou E N, Soukoulis C M 2008 *Opt. Express* **16** 9173
- [10] Kafesaki M, Tsiapa I, Katsarakis N, Koschny T, Soukoulis C.M, Economou E N 2007 *Phys. Rev. B* **75** 235114
- [11] Gu J Q, Han J G, Lu X C, Singh R, Tian Z, Xing Q R, Zhang W L 2009 *Opt. Express* **17** 20307
- [12] Miyamaru F, Kuboda S, Taima K, Takano K, Hangyo M, Takeda M W 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 081105
- [13] Yang Y M, Qu S B, Wang J F, Xu Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1030 (in Chinese) [杨一鸣, 屈绍波, 王甲富, 徐卓 2009 物理学报 **58** 1030]
- [14] Liu Y H, Luo C R, Zhao X P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5883 (in Chinese) [刘亚红, 罗春荣, 赵晓鹏 2007 物理学报 **56** 5883]
- [15] Chen C H, Qu S B, Xu Z, Wang J F, Ma H, Zhou H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 024101 (in Chinese) [陈春晖, 屈绍波, 徐卓, 王甲富, 马华, 周航 2011 物理学报 **60** 024101]
- [16] Zhou Y S, Gu B Y, Wang F H 2006 *Europhys. Lett.* **75** 737
- [17] Isik Oz, Esselle K P 2009 *Metamaterials* **3** 33
- [18] Koschny T, Kafesaki M, Economou E N, Soukoulis C M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 107402
- [19] Wiltshire M C K, Pendry J B, Williams W, Hajnal J V 2007 *J. Phys.: Condens. Matter* **19** 456216
- [20] Smith D R, Schultz S, Markos P, Soukoulis C M 2002 *Phys. Rev. B* **65** 195104
- [21] Koschny T, Markos P, Economou E N, Smith D R, Vier D C, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. B* **71** 245105
- [22] Koschny T, Markos P, Smith D R, Soukoulis C M 2003 *Phys. Rev. E* **68** 065602
- [23] Paul O, Imhof C, Reinhard B, Zengerle R, Beigang R 2008 *Opt. Express* **16** 6736

Design and simulation of a single-sided left-handed material in THz regime*

Li Jun-Cheng[†] Guo Li-Xin Liu Song-Hua

(School of Science, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 23 August 2011; revised manuscript received 3 October 2011)

Abstract

By retrieving the constitutive effective parameters of bifilar spiral structure, it is proved that its permittivity and permeability are negative at different frequencies. With the electromagnetic waves incidence in the direction either perpendicular or parallel to the surface of bifilar spiral structure, it is found that the causes of negative permittivity are the same. Previously the investigation of single-sided left-handed materials was limited to microwave band. Through modifying bifilar spiral metamaterials, we design a new single-sided left-handed material in the terahertz regime and the design principle is explained with an LC equivalent circuit. The left-handed material generally consists of electric and magnetic resonators etched on each side of the dielectric substrate respectively. Compared with these composite structures, the new single-sided left-handed material has the advantages of low loss, simple structure and easy operating.

Keywords: spiral structure, left-handed material, negative permeability, negative permittivity

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

* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities.

[†] E-mail: juncheng6868@163.com