

基于开口环的可调谐滤波器及其电磁带隙

李海洋¹ 张治文^{1,2} 郭继勇¹ 赫 丽¹

(¹ 同济大学波耳固体物理研究所, 上海 20009; ² 同济大学电子与信息工程学院, 上海 200092)

摘要 基于开口谐振环上加载变容二极管设计可调谐滤波器,很好地实现了电磁波带隙的可调。在单环开口谐振环缝隙处或者双环开口谐振环的两环之间加载变容二极管,改变加载变容管上得的电压,改变该结构的分布参量而达到滤波器可调性能。同时通过数值计算分析了该滤波器结构对电磁波的频率响应函数,指出其形成电磁波带隙的物理机制,为了消除开口谐振环的磁谐振效应而关闭开口谐振环的缝隙实验进行了验证。研究表明基于变容管开口环的可调谐滤波器所形成的电磁波带隙中,有的带隙是源于磁谐振机制,有的带隙是源于电谐振机制。对该滤波器形成带隙物理机制的研究,可以更好地理解开口谐振环,有助于其在光学和微波波段器件的设计。

关键词 光学器件; 电磁带隙; 可调谐滤波器; 开口谐振环; 磁谐振; 电谐振

中图分类号 O441 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20082809.1772

Tunable Filters Based on Split-Ring Resonator and Its Electromagnetic Band Gap

Li Haiyang¹ Zhang Yewen^{1,2} Guo Jiyong¹ He Li¹

(¹ Pohl Institute of Solid State Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China)
(² School of Electronics and Information, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract Tunable filters with varactor-loaded split-ring resonant structure have been fabricated and the electromagnetic bandgap tuning is achieved. The varactor is positioned in a gap of a single split-ring resonator or between two split-ring resonators, and the filtering is tuned through capacitances modulation of the structure by adjusting the bias voltage applied to the varactor. The frequency response function of the filter to electromagnetic wave is numerically analyzed, and the physical principle of electromagnetic bandgap formation is explained. In order to eliminate the magnetic resonant effect and close the gap of split-ring resonator, experiments are carried out. It is found that the some bandgaps are resulted from magnetic resonance and some are resulted from electric resonance.

Key words optical devices; band gap; tunable filter; split-ring resonators; magnetic resonance; electric resonance

1 引 言

光子晶体许多的应用都是基于其局域化的缺陷模^[1~4],如某一方向极窄带光学选频放大器、衰减器等器件都是利用缺陷模及其耦合性质设计的。近年来人们对电磁波响应的研究范畴拓宽到人工合成特异性材料(Metamaterials)^[5~8]。利用这种材料可以设计、制作出许多新的光学器件^[9,10]。随着研究的深入,组成特异性材料的其中一个基本单元——金属开口谐振环出现了很多开口谐振环(SRR)的衍生结构^[11]。SRR 等效为 L-C 振荡电路,会产生电磁

波谐振。其有效磁导率在低于/高于谐振频率 ω_m 的条件下会出现正/负的极值,因此在其谐振频率附近的一个很窄的频率范围内可以抑制信号传播。利用这一思想已经成功地设计出小型化带阻滤波器^[12,13]。然而,几乎所有关于 SRR 的研究都是建立其谐振频率不变的基础上,源于 SRR 的负有效磁导率的频率范围比较窄,如果可以调节 SRR 的谐振频率就会变得非常有意义^[14,15]。

本文通过开口谐振环上加载变容二极管(Varactor-loaded split ring resonator, VLSRR)这

收稿日期: 2007-12-20; **收到修改稿日期:** 2008-04-01

基金项目: 国家 973 计划(2006CB921701)和国家自然科学基金(50477048)资助课题。

作者简介: 李海洋(1980—),男,博士研究生,主要从事微波光子晶体与以微带传输线为基础的微波特异材料及器件等方面的研究。E-mail: haiyangli_163@163.com

导师简介: 张治文(1955—),男,博士生导师。主要从事电介质物理与工程电介质、微波光子晶体与微波特异材料等方面的研究。E-mail: yewenzhang@online.sh.cn

一结构与微带传输线之间的耦合,设计可调谐带阻滤波器。并通过数值计算整体结构对电磁波的频率响应函数,分析该滤波器所形成带隙的物理机制。尽管这种可调谐滤波器特性表现在微波波段,但随着研究人员将纳米技术和人工合成技术应用到这种介质的制备中,在可见光波段^[16]得到负折射率材料已为期不远。对基于 SRR 的滤波器的研究有助于其在光学和微波波段器件的设计。

2 两种可调谐滤波器的实验设计

2.1 VLSRR 电路设计

为了增强 SRR 与微带线的耦合强度,设计了方

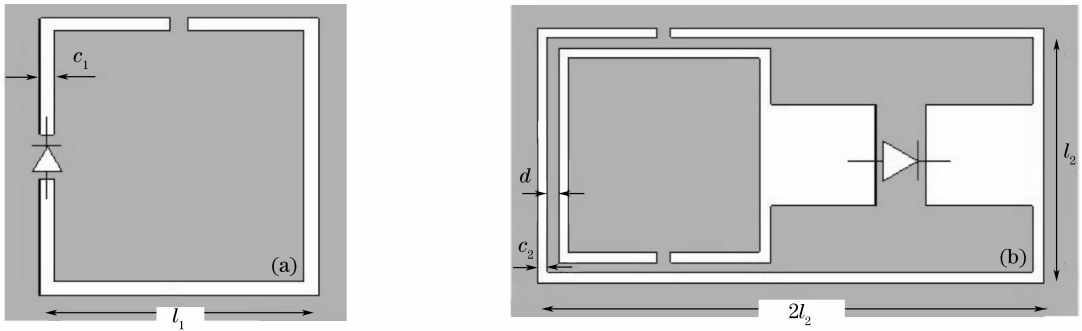


图 1 两种可调谐的 VLSRR 示意图。(a) $c_1=1\text{ mm}$, $l_1=12\text{ mm}$, (b) $c_2=0.2\text{ mm}$, $l_2=7.4\text{ mm}$

Fig. 1 Diagram of two kinds of the tunable varactor-loaded split-ring resonator (VLSRR). (a) $c_1=1\text{ mm}$, $l_1=12\text{ mm}$, (b) $c_2=0.2\text{ mm}$, $l_2=7.4\text{ mm}$, $d=0.2\text{ mm}$

2.2 可调谐滤波器的实验制作

可调谐带阻滤波器采用双面印刷电路板制作,基底介电常数 $\epsilon_r=2.65$,板厚 $h=1\text{ mm}$,印刷版下表面敷以铜箔,上表面是微带线,并在微带线两边放置 VLSRR,如图 2 所示。为了将微带线设计成 $50\ \Omega$

形的 SRR。根据文献^[15]指出的影响 SRR 有效电容值的因素,设计了两种加载变容二极管的结构如图 1 所示。图 1(a)把变容二极管与单环缝隙电容(分布电容)串联起来。当变容二极管的电容值变化时,影响整个结构的有效电容值 C_{eff} 大小;图 1(b)把变容二极管嫁接在内环和外环之间,当变容二极管的电容值变化时,会改变外环和内环间缝隙的电容值,进而影响整个结构的有效电容值 C_{eff} 大小。为了讨论问题的方便,把图 1(a)中的结构称为单环 VLSRR,把图 1(b)中的结构称为双环 VLSRR。单/双环 VLSRR 的尺寸大小如图 1 所示。本文采用的变容二极管为 Philips BB135。

匹配,微带线的宽度 $w=2.72\text{ mm}$ 。在真正实际测量中还需要由高频扼流圈(RFC)和限流电阻 R 组成的供电电路。其中高频扼流线圈阻止微波信号进入稳压电源,限流电阻 R 防止电路中电流过大,在电路中起保护变容二极管的作用。

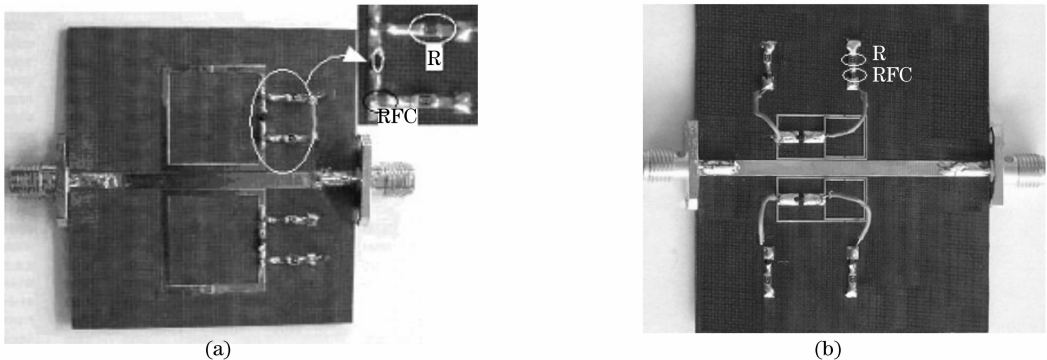


图 2 实验所用的实物照片。(a)对应单环 VLSRR 滤波器,(b)对应双环 VLSRR 滤波器

Fig. 2 Photograph of the fabricated tunable filters. (a) Single-VLSRR, (b) double-VLSRR

3 测量和讨论

滤波器的 S 参量测量结果采用 Agilent 8722ES

矢量网络分析仪。图 3 可以看出,单环 VLSRR 滤波器的电压从 $0\sim 27\text{ V}$ 变化时,其第一个带隙的中

心频率位置从 1.55~1.80 GHz;第二个带隙的中心频率位置从 3.15~3.55 GHz。双环 VLSRR 滤波器的电压从 0~18V 变化时,其第一个带隙的频率位置从 1.40~1.57 GHz,第二个带隙的频率位置从

2.95~3.15 GHz,第三个带隙的频率位置从 4.01~4.15 GHz。从实验结果可以看出,两种滤波器都实现了带隙的可调。

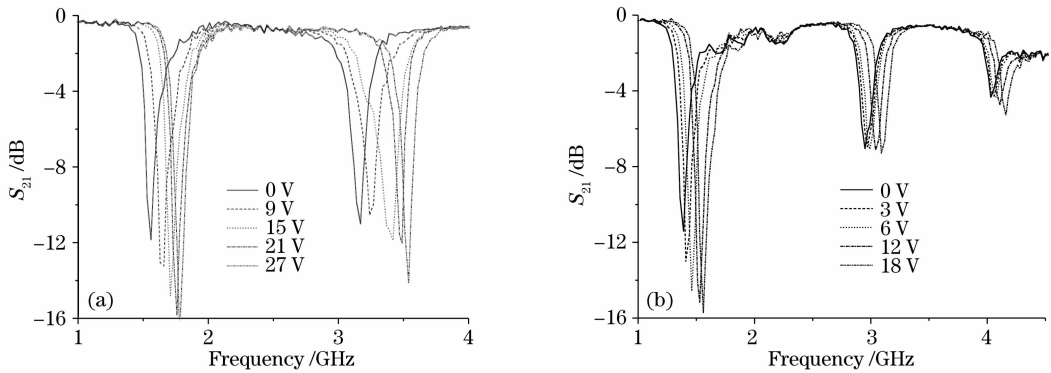


图 3 实验测量 S_{21} 传输曲线。(a)对应单环 VLSRR 滤波器,(b)对应双环 VLSRR 滤波器

Fig. 3 Measured transmission coefficients S_{21} of (a) single-VLSRR, (b) double-VLSRR under different bias conditions

基于单环 VLSRR 的滤波器测量得到了两个带隙,双环 VLSRR 的滤波器得到三个带隙,带隙的频率位置都随着外加电压的变化而移动。

在含有 SRR 的结构中带隙一般源于其 L-C 振荡电路的磁谐振机制^[17,18]。然而最近却发现 SRR 除了磁谐振效应以外还有电谐振效应,当外部电场与开口谐振环所在的平面平行时会发生电谐振。其电谐振性质等效于有限长的金属线的电谐振性质^[19]。本文利用 SRR 的谐振性质。当 SRR 与微带线的耦合时,在谐振频率一段很窄的范围内可以抑制信号传播,从而设计小型化带阻滤波器。相对文献[19]在真空中研究 SRR 谐振性质,本文滤波器的研究是基于 SRR 附着在环氧树脂复合玻璃纤维布覆铜板(FR-4)介质上。介质底层覆有铜箔作为底板,该滤波器中电磁场由于 SRR 与微带线之间的耦合而不再是准 TEM 模式。但是当磁场的分量垂直穿过 SRR 环面的时候仍会发生磁谐振;电场的分

量平行于 SRR 环面时也会发生电谐振。此外 SRR 与底板间的有效电容也会影响该滤波器的电谐振性质。为更好的理解图 3 中几个频率段的带隙形成的物理机制,把滤波器结构中的金属环缝隙关闭——构成闭环谐振环(Closed-ring resonator, CRR),破坏了其磁谐振机制而保留其电谐振机制^[15]。图 4 给出了基于 CRR 结构滤波器的示意图。其测量所得的 S_{21} 传输曲线如图 5 所示。

把图 3 中电压为 0 V 时的传输曲线与图 5 中的传输曲线作比较,发现图 3(a)中第一个带隙在图 5(a)中消失,第二个带隙频率点的位置基本保持不变,说明第一个带隙是磁谐振机制产生的,第二个带隙是电谐振机制产生的;同样图 3(b)中前两个带隙在图 5(b)中消失,第三个带隙频率点的位置也基本保持不变,说明前两个带隙是磁谐振机制产生的,第三个带隙是电谐振机制产生的。从实验研究表明对基于 VLSRR 结构的滤波器,有的带隙是源于磁谐振机

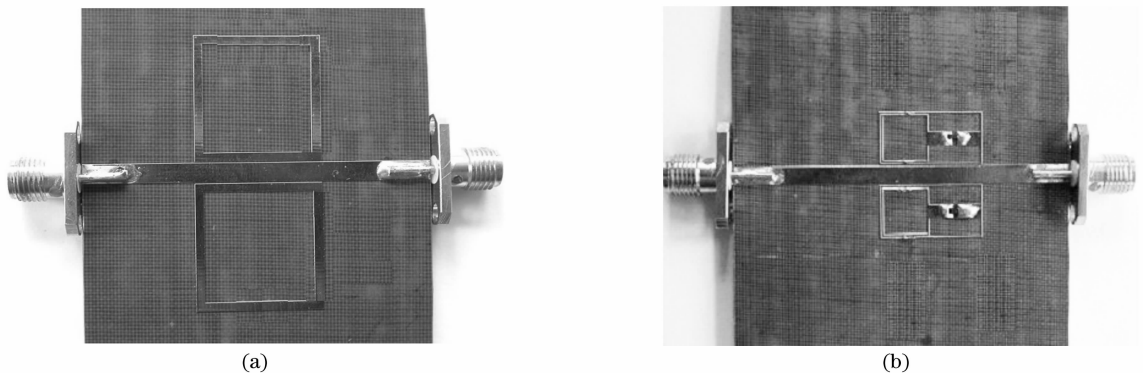


图 4 与单环 VLSRR (a), 双环 VLSRR(b)对应的 CRR 结构

Fig. 4 Closed-ring resonant (CRR) medium corresponding to (a) single-VLSRR and (b) VLSRR

制,有的带隙是源于电谐振机制。

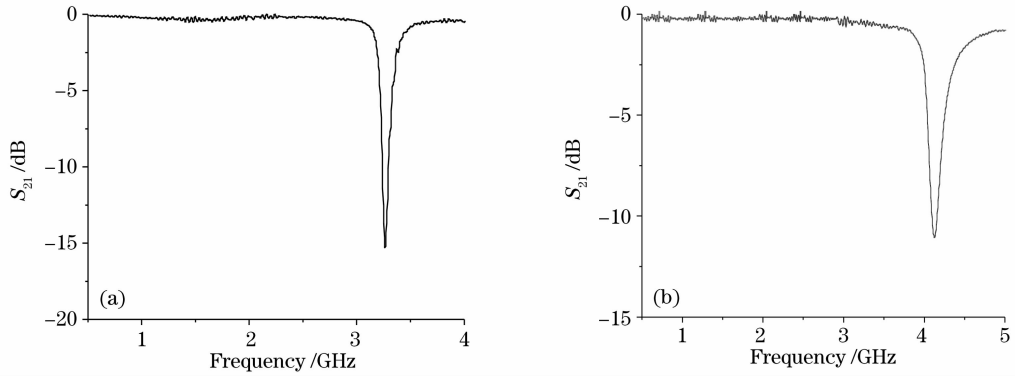


图 5 实验测量的 S_{21} 传输曲线。(a)单环的 CRR 结构, (b) 双环 CRR 结构

Fig. 5 Measured transmission coefficients S_{21} of CRR mudium corresponding to (a) single-VLSRR and (b) double-VLSRR

4 实验结果的理论计算与分析

为了更好地理解基于 VLSRR 滤波器的电磁特性,利用 S 参量的模拟值来计算材料的性质 (ϵ_{eff} , μ_{eff}) 来表征该结构对电磁波的频率响应^[20~22]。这样可以算得该滤波器整体结构对电磁波的频率响应特性,如图 6 所示。

图 6 是通过计算得到对应于图 2 结构的有效介

电常数和有效磁导率随频率的变化关系。对于单环 VLSRR 结构的滤波器,第一个带隙内 $\epsilon_{\text{eff}} > 0, \mu_{\text{eff}} < 0$, 该带隙源于磁谐振机制;第二个带隙 $\epsilon_{\text{eff}} < 0, \mu_{\text{eff}} > 0$, 说明该带隙源于电谐振机制;对于双环 VLSRR 结构的滤波器,第一个和第二个带隙内 $\epsilon_{\text{eff}} > 0, \mu_{\text{eff}} < 0$, 第三个带隙 $\epsilon_{\text{eff}} < 0, \mu_{\text{eff}} > 0$, 说明前两个带隙源于磁谐振机制,第三个带隙源于电谐振机制。

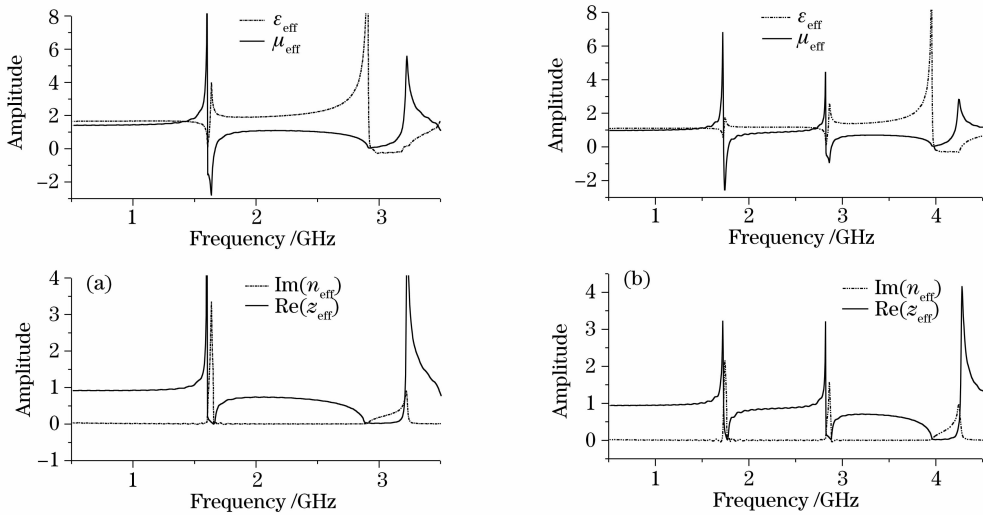


图 6 有效介电常数/有效磁导率及各自对应的有效阻抗的实部/有效折射率的虚部。对应单环 VLSRR(a)和双环 VLSRR(b)有效参量

Fig. 6 Effective permittivity, permeability, $\text{Re } z$ and $\text{Im } n$ of the (a) single-VLSRR and (b) double-VLSRR, respectively

5 结 论

通过在开口谐振环上加载变容二极管设计可调谐滤波器,很好地实现了电磁带隙的可调。通过数值计算整体结构对电磁波的频率响应函数和以及实物上关闭开口处缝隙的谐振环。研究发现对于该可调谐滤波器所形成电磁带隙中,有的带隙是源于磁

谐振机制,有的带隙是源于电谐振机制。尽管目前这种复合介质的特性表现在微波波段,但随着研究人员将纳米技术和人工合成技术应用到这种介质的制备中,在可见光波段得到基于谐振环的特异性材料已为期不远。

参 考 文 献

- 1 Shen Jie, Ma Guohong, Zhang Zhuangjian *et al.*. Research on two-photon absorption on enhancement in one-dimensional photonic crystals with double defect modes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1404~1408
沈 杰, 马国宏, 章壮健 等. 双缺陷模一维光子晶体的双光子吸收增强研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1404~1408
- 2 Wang Hong, Ouyang Zhengbiao, Han Yanling *et al.*. Amplification of one-dimensional photonic crystals defect-mode laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1691~1697
王 宏, 欧阳征标, 韩艳玲 等. 一维光子晶体缺陷模激光器的放大特性[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1691~1697
- 3 Yin Jianling, Huang Xuguang, Liu Songhao. A variable optical attenuator based on the photonic crystal waveguide[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(5): 671~674
殷建玲, 黄旭光, 刘颂豪. 光子晶体波导可调光衰减器 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 671~674
- 4 Tang Bingshu, Li Zhenghua, Liu Lili *et al.*. Numerical research of two-dimensional photonic crystal heterostructures with order-N method[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1195~1199
汤炳书, 李正华, 刘丽丽 等. 二维光子晶体异质结 Order-N 数值研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1195~1199
- 5 D. R. Smith, S. Schultz, N. Kroll *et al.*. Experimental and theoretical results for a two-dimensional metal photonic band-gap cavity[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(5): 645~647
- 6 Z. L. Pokrovsky, A. L. Efros. Electrodynamics of metallic photonic crystals and the problem of left handed materials[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(9): 093901~093904
- 7 R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, **292**(5514): 77~79
- 8 D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier *et al.*. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(18): 4184~4187
- 9 J. B. Pendry. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(18): 3966~3969
- 10 Zhang Z M, Fu C J. Unusual Photon tunneling in the presence of a layer with a negative refractive index[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(6): 1097~1099
- 11 Wu Mingfeng, Meng Fanyi, Wu Qun *et al.*. Design of left-handed microstrip based on DGS and double, layers SRRs structures[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(11): 5790~5794
武明峰, 孟繁义, 吴 群 等. 基于 DGS 和双层 SRRs 结构的左手介质微带线的设计[J]. *物理学报*, 2006, **55**(11): 5790~5794
- 12 Martín F, Falcone F, Bonache J *et al.*. Miniaturized coplanar waveguide stopband filters based on multiple tuned split ring resonators[J]. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, 2003, **13**(12): 511~513
- 13 Falcone F, Martín F, Bonache J *et al.*. Left handed coplanar waveguide band pass filters based on bi-layer split ring resonators [J]. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, 2004, **14**(1): 10~12
- 14 Lapine M, Gorkunov M, Ringhofer K H. Nonlinearity of a metamaterial arising from diode insertions into resonant conductive elements[J]. *Phys. Rev. E*, 2003, **67**(6): 065601-1~065601-4
- 15 Koray Aydin, Irfan Bulu, Kaan Guven *et al.*. Investigation of magnetic resonances for different split-ring resonator parameters and designs[J]. *New J. Phys.*, 2005, **7**(5786): 97257-1~97257-15
- 16 Matthias W. K., Christian E., Martin W. *et al.*. Second-harmonic generation from magnetic metamaterials[J]. *Science*, 2006, **313**(28): 502~504
- 17 Bayindir M, Aydin K, Markos P *et al.*. Transmission properties of composite metamaterials in free space[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(1): 120~122
- 18 Li K, McLean S J, Greegor R B *et al.*. Free-space focused-beam characterization of left-handed materials[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(15): 2535~2537
- 19 Koschny T, Kafesaki M, Economou E N *et al.*. Effective medium theory of left-handed materials[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(10): 107402-1~107402-4
- 20 D. Schurig, J. J. Mock, D. R. Smith. Electric-field-coupled resonators for negative permittivity metamaterials [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(4): 041109-1~041109-3
- 21 Liu Ruopeng, Aloyse Degiron, Jack J. Mock *et al.*. Negative index material composed of electric and magnetic resonators[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(26): 263504-1~263504-3
- 22 Smith D R, Schultz S, Morkos P *et al.*. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients[J]. *Phys. Rev. B*, 2002, **65**(19): 195104-1~195104-5