

异向介质体内太赫兹波增强效应及谐振特性研究

孟庆龙¹ 邵文毅² 李建龙³ 张彬¹

¹四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

²四川大学制造学院, 四川 成都 610065

³四川大学原子核科学技术研究所, 四川 成都 610065

摘要 基于开口谐振环(SRR)的电磁响应特性以及严格电磁场理论,研究了由开口谐振环结构构成的异向介质体内的太赫兹波增强效应及谐振行为。仿真模拟了谐振环结构体内电场、电场能量密度和能流量的空间分布,讨论了电场能量密度随入射太赫兹波频率的变化规律。此外,还分析了谐振环结构参数对异向介质的谐振特性及其太赫兹波增强效应的影响。研究结果表明,在开口谐振环结构的开口缝隙处存在显著的太赫兹波增强效应,不仅电场显著增强,而且还会出现电场能量密度极值,并且,谐振时的电场增强效应比非谐振时明显增大。此外,谐振频率和电场能量密度均会随着谐振环结构参数的变化而呈现明显变化。

关键字 光谱学;太赫兹波;增强效应;严格电磁场理论;异向介质

中图分类号 TN761 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.023001

Study on the Enhancement Effect of Terahertz Wave and the Resonance Characteristics in Metamaterial

Meng Qinglong¹ Shao Wenyi² Li Jianlong³ Zhang Bin¹

¹School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

²School of Manufacturing Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

³Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract Based on the electromagnetic response characteristics of split ring resonators (SRRs) and the rigorous electromagnetic field theory, the enhancement effect of terahertz (THz) wave and the resonance characteristics in the metamaterial consisting of split ring resonators are studied. The spatial distributions of the electric field, the electric energy density and the power flow in split ring resonators are mainly simulated. The variation of the electric energy density with different terahertz frequencies is also investigated. Furthermore, the effect of the parameters of the split ring resonators on the enhancement effect of terahertz wave and the resonance characteristics in the metamaterial are analyzed. It can be shown from our simulation results that the enhancement effect of terahertz wave occurs obviously in the gap of the split ring resonators. Not only the electric field near the opening is obviously stronger than that in other regions, especially in the gap of the split ring resonators, but also the maximum of the electric energy density appears in the opening of the SRRs, and the electric field is obviously stronger near the resonance frequency of the SRRs. Moreover, the resonance frequency and the electric energy density vary obviously with the parameters of the SRRs.

Key words spectroscopy; terahertz wave; enhancement effect; rigorous electromagnetic field theory; metamaterial

OCIS codes 300.6495; 040.2235; 310.6628; 160.3918; 260.5740

收稿日期: 2013-10-21; 收到修改稿日期: 2013-10-23; 网络出版日期: 2014-00-00

基金项目: 中国工程物理研究院太赫兹科学技术基金(CAEP THZ201204)、四川省教育厅创新团队计划(13TD0048)、四川大学优秀青年学者计划(2011-2-B17)

作者简介: 孟庆龙(1989—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹传输与通信、太赫兹调制等方面的研究。

E-mail: scumql@163.com

导师简介: 张彬(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事高功率激光技术、光束传输变换和控制、非线性光学等方面的研究。E-mail: zhangbinff@sohu.com(通信联系人)

1 引言

异向介质又名左手介质(LHM)或负折射介质(NIM),是20世纪90年代末期出现的一种新型周期结构(periodic structure)的人工电磁介质。异向介质同时具有负的介电常数及磁导率,从而导致在其中传播的电磁波的电场 \mathbf{E} 、磁场 \mathbf{H} 及波矢量 \mathbf{k} 三者构成左手系,而非非常规介质遵循的右手法则。异向介质的概念雏形需要追溯到20世纪60年代,Veselago^[1]从理论上对其进行了研究,并预言异向介质具有一系列超常规的电磁特性,包括左手特性、负折射特性、逆多普勒效应、逆切伦科夫辐射效应等。由于自然界中并没有发现负折射介质,因而在此后近30年里负折射介质因缺乏实验证实而一直停留在理论的层面。直到2000年,Smith等^[2]通过将细导线阵列与开口谐振环(SRR)阵列合理布局,历史上第一次制造出了异向介质,这一突破性成果使得该领域研究进入了实质性阶段。到目前为止,人们已设计并制造出多种新型结构的异向介质,包括结构单元为 Ω 形的异向介质^[3-4]、开口方环结构的异向介质^[5]、结构单元为S形的异向介质^[6]、结构单元为螺旋形的异向介质^[7]等。

基于谐振环结构的异向介质在太赫兹(THz)波频段^[8-10]具有良好的物理特性,且易于制造,近年来引起人们的广泛关注。Padilla等^[11]在2007年提出了一系列人工超材料。本文重点针对其中一种典型的开口谐振环结构,研究了太赫兹波在其中传输时,结构体内的太赫兹波的增强效应以及谐振行为,仿真模拟了谐振环结构体内电场、电场能量密度以及能量流的空间分布,定量地分析了电场能量密度随太赫兹波频率的变化。此外,还进一步讨论了谐振环结构参数对结构体内谐振频率和太赫兹波增强效应的影响。

2 异向介质结构与理论模型

本文采用由开口谐振环结构和衬底构成的典型异向介质结构,如图1所示。

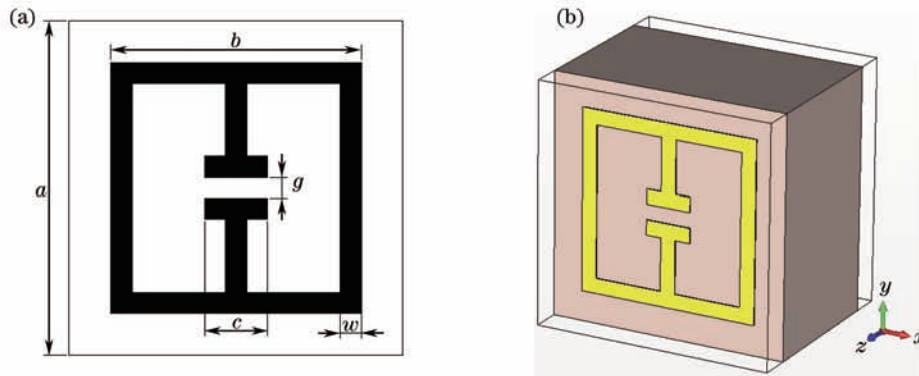


图1 开口谐振环的(a)结构参数与(b)仿真边界条件

Fig.1 (a) Parameters of split ring resonators and (b) boundary conditions in simulation

在太赫兹频段对异向介质进行研究时,考虑的结构单元尺寸一般小于 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 。假设开口谐振环的边长 $b=60 \mu\text{m}$,环宽 $w=5 \mu\text{m}$,开口缝隙 $g=5 \mu\text{m}$,开口宽度 $c=15 \mu\text{m}$,厚度 $t=0.3 \mu\text{m}$;衬底边长 $a=80 \mu\text{m}$,厚度 $h=50 \mu\text{m}$ 。衬底材料为GaAs,其介电常数 $\varepsilon=12.94+0.0774i$;开口谐振环结构采用金属Au,其电导率为 $\sigma=4.09 \times 10^7 \text{ S/m}$ 。

本文基于严格电磁场理论建立异向介质结构模型和数值模拟。设异向介质结构的衬底平面垂直于 z 轴方向,太赫兹波沿着 z 轴入射。对于线性介质, $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}$, $\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H}$,电磁场的传输遵从麦克斯韦方程组,即

$$\begin{cases} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = i\omega\mu H_x, & \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = -i\omega\varepsilon E_x \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = i\omega\mu H_y, & \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = -i\omega\varepsilon E_y \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = i\omega\mu H_z, & \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = -i\omega\varepsilon E_z \end{cases}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{D} , \mathbf{E} , \mathbf{B} , \mathbf{H} , ω , μ , ε , μ_0 , ε_0 分别表示电磁场的电位移、电场强度、磁感应强度、磁场强度、电磁场频率、介质的磁导率、电导率以及真空中的磁导率和电导率。

由于在分界面上不存在自由电荷和传导电流,因而太赫兹波的电场强度和磁场强度的切向分量、电位移矢量和磁感应强度的法向分量均须连续。于是,在研究对象的各个区域内,太赫兹场的通解(s波)为

$$\begin{cases} E_y = \sum_{\omega} e_y \exp[ik_0(\alpha x) + i\omega t] \{ \exp[i\Gamma(z + h/2)]u + \exp[-i\Gamma(z + h/2)]d \} \\ \sigma_0 H_x = - \sum_{\omega} h_x \exp[ik_0(\alpha x) + i\omega t] \{ \exp[i\Gamma(z + h/2)]u - \exp[-i\Gamma(z + h/2)]d \} \\ \sigma_0 H_z = \sum_{\omega} h_z \exp[ik_0(\alpha x) + i\omega t] \{ \exp[i\Gamma(z + h/2)]u - \exp[-i\Gamma(z + h/2)]d \} \end{cases} \quad (2)$$

采用严格的电磁场傅里叶模式理论对上述方程组进行求解,经复杂的数理处理过程,可确定各个区域内的太赫兹波场的空间分布^[12-13],其光强可表示为

$$I \propto \left[\sum_{m,n} E_{xm} E_{xn}^* + E_{ym} E_{yn}^* + E_{zm} E_{zn}^* \right]. \quad (3)$$

利用(3)式即可计算太赫兹波在异向介质结构体内的空间分布。

3 仿真结果与讨论

3.1 太赫兹波增强效应

仿真模拟了开口谐振环结构体内电场、电场能量密度和能流量的空间分布,并讨论了电场能量密度随入射太赫兹波频率的变化规律。

图2给出了在谐振频率下开口谐振环结构体内电场和电场能量密度的空间分布。从图2可以看出,开口谐振环结构体内的电场主要集中在开口缝隙处,此处的电场最强,电场能量密度的极值也出现在开口缝隙处,而在其余区域电场强度和电场能量密度则很弱,在有些区域甚至几乎为零。由此可见,在谐振环开口缝隙处产生了显著的电场增强效应。

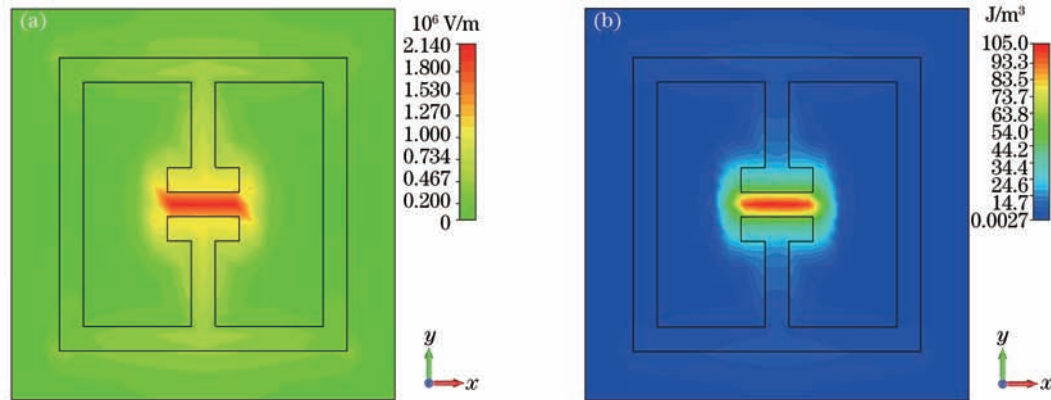


图2 谐振频率下谐振环结构体内的(a)电场分布和(b)电场能量密度分布

Fig.2 Spatial distributions of (a) the electric field and (b) the electric energy density in split ring resonators at the resonance frequency

太赫兹波通过开口谐振环能量流分布的典型结果如图3所示。从图3可以发现:在远离开口谐振环的空间中,太赫兹波能量流是平行分布的,且与 xy 平面垂直;当靠近谐振环时,除了中心小部分的太赫兹波依然保持垂直入射到谐振环外,其他部分均发生弯曲,且绝大部分均从上下两根金属线条弯曲流入到中间开口处。进一步分析图3可知,开口中心处能流线密集,说明谐振环将大部分太赫兹波能量聚集在中间开口区域,从而也进一步印证了谐振环开口处的电场增强效应最强。

为了便于进一步定量分析,图4给出了异向介质结构体在谐振环开口缝隙附近区域的电场能量密度分布。从图4可以清楚地看到,电场能量密度在开口缝隙处最高,而在远离开口的区域明显减弱,这也进一步说明了谐振环结构的开口缝隙处的电场增强效应。

图5给出了开口谐振环透射谱以及开口缝隙附近区域内的平均电场能量密度随太赫兹频率的变化曲线。图5(a)显示出该开口谐振环的谐振频率为0.43 THz,而图5(b)则说明了在谐振频率下,在开口缝隙处的

电场能量密度达到最大值。由此可见,电场不仅在开口缝隙处产生了增强效应,而且在谐振时的增强效应最强。

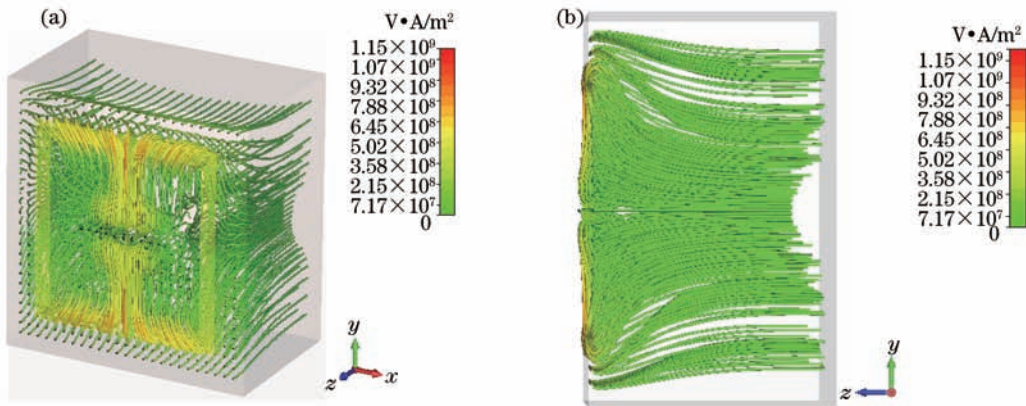


图3 开口谐振环内的能流分布。(a)三维分布;(b)侧面分布图

Fig.3 Spatial distributions of the power flow in split ring resonators. (a) Three-dimensional distribution; (b) lateral distribution

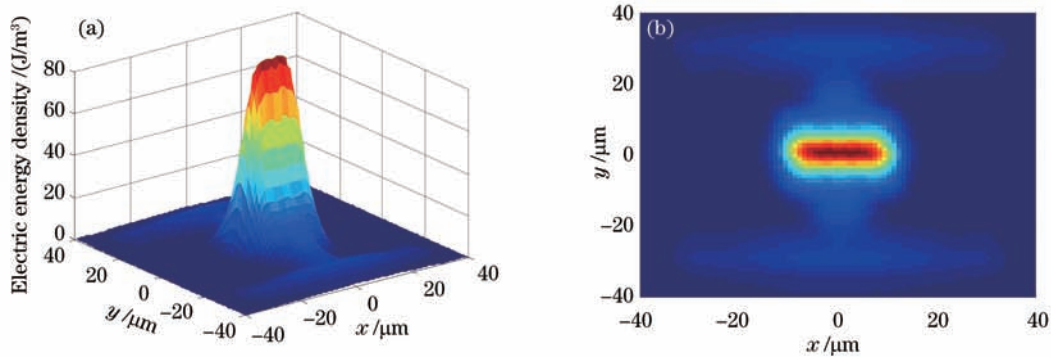


图4 谐振频率下开口处电场能量密度分布。(a)三维分布;(b)等高线分布

Fig.4 Distributions of the electric energy density in the opening of split ring resonators at the resonance frequency. (a) Three-dimensional distributions; (b) contourmap

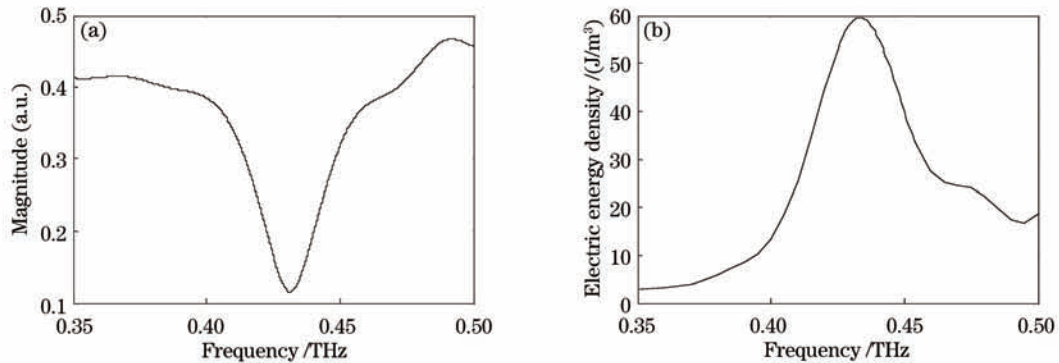


图5 SRR结构(a)透射谱和(b)电场能量密度随太赫兹频率的变化

Fig.5 (a) Transmission spectrum and (b) variation of the electric energy density with THz frequencies in split ring resonators

3.2 谐振环结构参数对谐振频率及太赫兹波增强效应的影响

进一步分析了改变谐振环的结构参数(谐振环的开口缝隙、开口宽度、环宽和衬底材料)对谐振频率和太赫兹波增强效应的影响。在分析开口缝隙和开口宽度时,可近似将开口缝隙处等效为一个平板电容,其电容及相应的谐振频率可分别表示为

$$C = \epsilon S / 4\pi d, \quad (4)$$

$$f = 1/(2\pi\sqrt{LC}), \quad (5)$$

式中 ϵ 为衬底的介电常数, d 为开口缝隙宽度, L 为开口谐振环的等效电感。

图6~8分别给出了不同开口缝隙、不同开口宽度、不同环宽所对应的谐振环透射谱和电场能量密度随太赫兹频率的变化曲线。计算中,谐振环结构参数与图1相同。

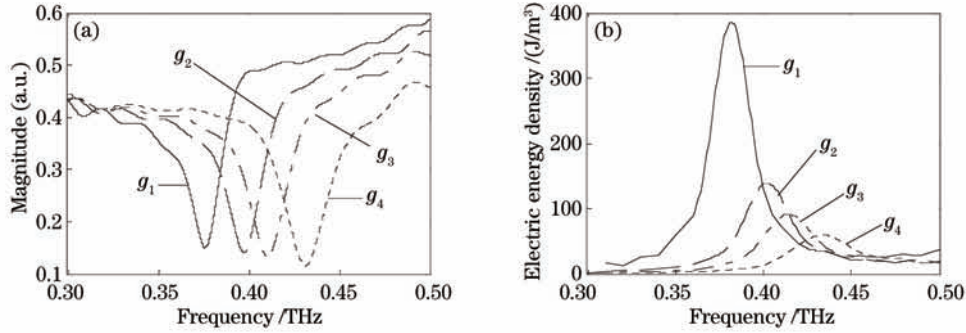


图6 $c=15\ \mu\text{m}$, $w=5\ \mu\text{m}$ 时,开口缝隙不同时,(a)透射谱和(b)电场能量密度随太赫兹频率的变化,其中开口缝隙 $g_1=2\ \mu\text{m}$, $g_2=3\ \mu\text{m}$, $g_3=4\ \mu\text{m}$, $g_4=5\ \mu\text{m}$

Fig.6 (a) Transmission spectrum and (b) variation of the electric energy density with THz frequencies of the different gap space of split ring resonators when $c=15\ \mu\text{m}$, $w=5\ \mu\text{m}$, where the gap $g_1=2\ \mu\text{m}$, $g_2=3\ \mu\text{m}$, $g_3=4\ \mu\text{m}$, $g_4=5\ \mu\text{m}$

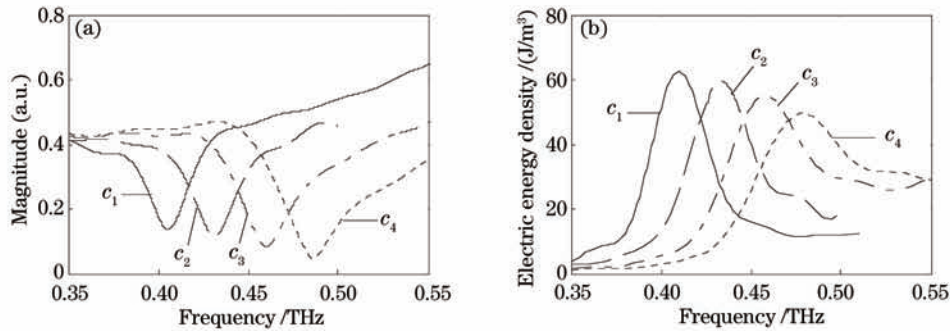


图7 $g=5\ \mu\text{m}$, $w=5\ \mu\text{m}$ 时,开口宽度不同时,(a)透射谱和(b)电场能量密度随太赫兹频率的变化,其中开口宽度 $c_1=20\ \mu\text{m}$, $c_2=15\ \mu\text{m}$, $c_3=10\ \mu\text{m}$, $c_4=6\ \mu\text{m}$

Fig.7 (a) Transmission spectrum and (b) variation of the electric energy density with THz frequencies of the different gap length of split ring resonators when $g=5\ \mu\text{m}$, $w=5\ \mu\text{m}$, where the gap width $c_1=20\ \mu\text{m}$, $c_2=15\ \mu\text{m}$, $c_3=10\ \mu\text{m}$, $c_4=6\ \mu\text{m}$

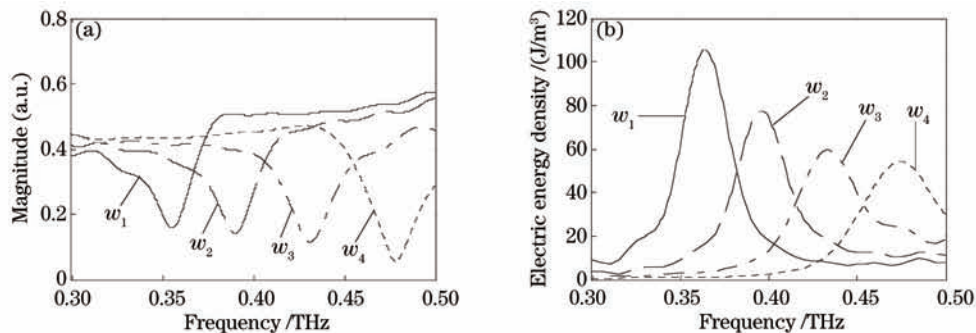


图8 $g=5\ \mu\text{m}$, $c=15\ \mu\text{m}$ 时,环宽不同时,(a)透射谱和(b)电场能量密度随太赫兹频率的变化,其中环宽 $w_1=1\ \mu\text{m}$, $w_2=3\ \mu\text{m}$, $w_3=5\ \mu\text{m}$, $w_4=7\ \mu\text{m}$

Fig.8 (a) Transmission spectrum and (b) variation of the electric energy density with THz frequencies of the different width of split ring resonators when $g=5\ \mu\text{m}$, $c=15\ \mu\text{m}$, where the width of split ring resonators $w_1=1\ \mu\text{m}$, $w_2=3\ \mu\text{m}$, $w_3=5\ \mu\text{m}$, $w_4=7\ \mu\text{m}$

从图6~8可以看出,随着开口缝隙的增大、开口宽度的减小以及环宽的增大,谐振频率均会向高频段移动,谐振环结构内电场能量密度的最大值逐渐减小,说明电场增强效应逐渐减弱。引起谐振频率向高频段移动的主要原因是:1)随着开口缝隙的增大,等效平板电容间距变大,等效电容 C 变小,进而导致谐振频率

增大;2)随着开口宽度的减小,等效平板电容的面积 S 变小,等效电容 C 变小,进而致使谐振频率变大;3)随着环宽的增大,谐振环等效电感减小,因而谐振频率增大。

图9为衬底材料从GaAs(介电常数 $\epsilon_{\text{GaAs}}=12.94$)变成 Al_2O_3 ($\epsilon_{\text{Al}_2\text{O}_3}=9.9$)、FR-4($\epsilon_{\text{FR-4}}=4.3$)、Roster-5870($\epsilon_{\text{Roster}}=2.33$),而其他参数与图1相同的情况下,谐振环透射谱和电场能量密度随太赫兹频率的变化曲线。从图9可以看出,当衬底材料从GaAs依次变成 Al_2O_3 、FR-4、Roster-5870时,谐振频率向高频段移动,同时,电场能量密度的最大值依次增大,说明电场的增强效应依次增强。而谐振频率向高频段移动的主要原因是随着衬底材料介电常数的减小,等效电容 C 变小,从而致使谐振频率变大。

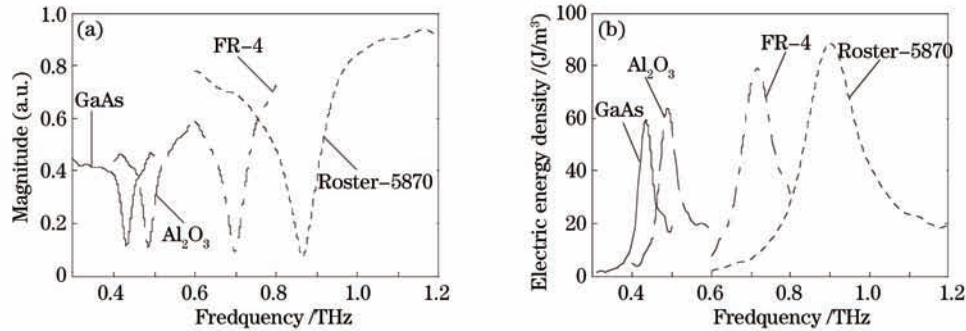


图9 $g=5\ \mu\text{m}$, $c=15\ \mu\text{m}$, $w=5\ \mu\text{m}$, 衬底材料不同时的(a)透射谱和(b)电场能量密度随太赫兹频率的变化

Fig.9 (a) Transmission spectrum and (b) variation of the electric energy density with THz frequencies of the different substrate material, for substrate materials with different permittivity values, $g=5\ \mu\text{m}$, $c=15\ \mu\text{m}$, $w=5\ \mu\text{m}$

4 结 论

基于严格电磁场理论对异向介质结构内的太赫兹增强效应及谐振特性进行了理论分析。数值模拟了太赫兹波入射到由典型的开口谐振环构成的异向介质时,异向介质结构体内的电场、能量流和电场能量密度空间分布及其随太赫兹频率的变化规律。结果表明,谐振环结构仅在开口缝隙处表现出显著增强的电场,且谐振时的电场最强,说明在谐振环开口处产生了太赫兹波的增强效应。此外,还进一步分析了谐振环结构参数的改变对谐振频率和电场能量密度的影响。数值模拟表明,不同结构参数的开口谐振环具有不同的谐振频率,并且,随着开口缝隙和环宽的增大以及开口宽度的减小,谐振频率向高频段移动,相应的太赫兹增强效应有所减弱。

参 考 文 献

- 1 V G Veselago. Electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Sov Phys Uspekhi, 1968, 10(4): 509-514.
- 2 D R Smith, W Padilla, D C Vier, *et al.*. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. Phys Rev Lett, 2000, 84(18): 4184-4187.
- 3 L Ran, J Huangfu, H Chen, *et al.*. Experimental study on several left-handed metamaterials [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2005, 51: 249-279.
- 4 Huangfu J, Ran L, Chen H, *et al.*. Experimental confirmation of negative refractive index of metamaterial composed of Omega-like metallic patterns [J]. Appl Phys Lett, 2004, 84(9): 1537-1539.
- 5 Meng Fanyi, Wu Qun, Wu Jian. Design and modeling for 1.7-2.7 GHz broad-band left-handed material with miniaturized unit cell and its Characterization [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(5): 2194-2199.
孟繁义, 吴群, 吴健. 1.7-2.7 GHz宽频带小单元异向介质设计及其介质参数提取[J]. 物理学报, 2006, 55(5): 2194-2199.
- 6 H Chen, L Ran, J Huangfu, *et al.*. Left-handed material composed of only S-shaped resonators [J]. Phys Rev E, 2004, 70(5): 057605.
- 7 Juan D Baena, Ricardo Marques, Francisco Medina. Artificial magnetic metamaterial design by using spiral resonators [J]. Phys Rev B, 2004, 69(1): 014402.
- 8 Su Jian, Chen Heming. Terahertz wave modulator based on liquid-crystal-filled photonic crystal [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2710-2713.

- 苏 坚, 陈鹤鸣. 基于液晶光子晶体的太赫兹波调制器[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2710-2713.
- 9 Xue Chaomin, Liu Jiansheng, Zheng Zheng, *et al.*. Terahertz filters [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(1): 43-49.
- 薛超敏, 刘建胜, 郑 铮, 等. 太赫兹滤波器[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(1): 43-49.
- 10 Tie-Jun Wang, Shuai Yuan, Yanping Chen, *et al.*. Intense broadband THz generation from femtosecond laser filamentation [J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(1): 011401.
- 11 W J Padilla, M T Aronsson, C Highstrete, *et al.*. Electrically resonant terahertz metamaterials: theoretical and experimental investigations [J]. Phys Rev B, 2007, 75(4): 041102.
- 12 Li Jianlong, Zhu Shifu, Fu Kexiang. A recursive algorithm for electromagnetic fields and its application in micro-nano optical elements [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(5): 3192-3198.
- 李建龙, 朱世富, 傅克祥. 电磁场递推算法及微纳光学元件中的应用[J]. 物理学报, 2010, 59(5): 3192-3198.
- 13 Li Jianlong, Shao Wenyi, Zeng Bing, *et al.*. Terahertz enhancement effect in micro-ring resonator structure [J]. High Power Laser and Partical Beams, 2013, 25(6): 1513-1518.
- 李建龙, 邵文毅, 曾 冰, 等. 微谐振环结构体内太赫兹波增强效应[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(6): 1513-1518.