

在太赫兹波段的开口共振环的不同开口形状对透过率频谱的影响*

李磊¹⁾ 周庆莉¹⁾ 施宇蕾^{1)†} 赵冬梅¹⁾ 张存林¹⁾
赵昆²⁾ 田璐²⁾ 赵卉²⁾ 宝日玛²⁾ 赵嵩卿²⁾

1) (太赫兹光电子学省部共建教育部重点实验室; 北京市太赫兹波谱与成像重点实验室; 中关村开放实验室; 首都师范大学物理系, 北京 100048)

2) (中国石油大学(北京)理学院, 北京 102249)

(2010年3月18日收到; 2010年4月28日收到修改稿)

通过对不同开口形状的太赫兹 (THz) 波段共振环 (SRR) 的有限时域差分 (FDTD) 模拟, 发现了 SRR 不同开口形状在发生共振时对开口间距的平均值具有相同的透过率频谱分布的均值效应; 并且观察到了在开口边缘很尖的特殊条件下, SRR 开口将出现导通现象. 此结果可为今后 SRR 开口工艺设计与质量控制提供参考, 也可为 SRR 工作机理的进一步分析研究提供有关的依据.

关键词: 太赫兹, 开口共振环, 开口形状, FDTD

PACS: 95.85.Hp, 81.05.Bx, 76.70.Hb, 61.50.Ah

1. 引言

开口共振环 (SRR) 是一种可以实现负磁导率的人工材料^[1-3]. 伴随着近几十年 THz 光学和微加工技术的发展, THz 波段的 SRR 从理论和实践上也越来越多地被人们研究: 通过改变 SRR 的一些基本参数, 可以对不同的共振频率进行控制^[4]; 通过改变 SRR 的一些基本参数, 可以对不同的共振频率进行控制^[4]; 通过改变 SRR 的结构, 发现了不对称传输^[5]、类光纤传输^[6]等现象. 但是, 考虑 SRR 中电子与电磁波相互作用的复杂性, 直到目前它的共振频率位置和结构参数之间还没有找到一个明确的定量关系.

本文所作的模拟都是 THz 垂直于 SRR 表面入射, 如图 1 所示. THz 波垂直入射 SRR 的透过谱如图 2 所示: ω_{\perp} 表示当 THz 的偏振方向跟共振环的开口边垂直时的透过率, 此时只有一个共振峰; ω_{\parallel} 表示当 THz 的偏振方向跟共振环的开口边平行时

的透过率, 此时有两个共振峰, 分别标记为 $\langle 1, 0 \rangle$ 和 $\langle 1, 1 \rangle$ (跟文献[7]中表示类似). 当共振峰 $\langle 1, 0 \rangle$ 发生共振时, 共振电流的瞬间分布如图 3 所示, 电流从开口的一端通过整个 SRR 结构到达另一端.

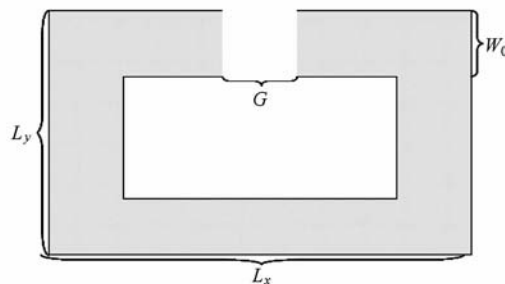


图 1 SRR 示意图

在 SRR 与电磁波相互作用的过程中, SRR 这种人工材料跟传统材料相比, 边界条件的影响重大, 比如开口宽度的细微变化对共振位置有明显的影晌^[4]. 然而本文的工作将介绍如果按照一定规律去改变边界条件, 共振频率位置是可以不受影响的.

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2007CB310408, 2006CB302901), 国家自然科学基金 (批准号: 10804077, 10904098, 11011120242), 北京市教委项目 (批准号: KM200910028006), 北京市科技新星, 北京市属市管高校人才强教计划资助项目, 国家信息功能材料重点实验室, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所资助的课题.

† 通讯联系人: E-mail: yulei_shi@hotmail.com

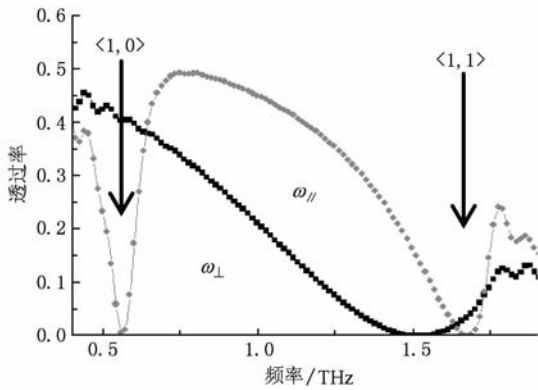


图2 THz波段SRR的透射率(为了便于区分,两个共振峰分别标记为$\langle 1, 0 \rangle$和$\langle 1, 1 \rangle$)

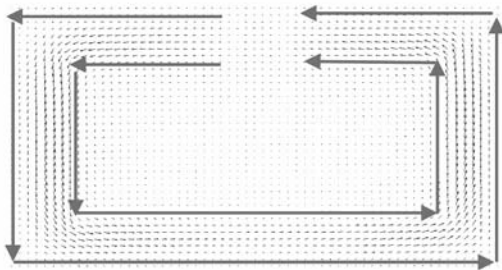


图3 SRR$\langle 1, 0 \rangle$共振峰,瞬时共振电流分布(为了观察方便,在SRR结构上加上“→”)

这不仅可以使样品的设计条件更宽松,而且可以从一个侧面反映出SRR与电磁波相互作用的实质.

2. 理论推导

根据经典电磁场理论,设电场传播速度为光速 C ,低频共振时,SRR内圈层电场实现振荡对应的频率为

$$f_{in} = f_0 = C/[2 \times (L_x + L_y - 4W_0) - G].$$

同理SRR外圈层电场实现振荡对应的频率为

$$f_{out} = f_{w_0} = C/[2 \times (L_x + L_y) - G].$$

从实验结果来看,低频共振时,SRR整体的共振频率刚好介于内圈层电场振荡频率与外圈层电场振荡频率之间,我们可以把这种关系表述为类似于中值定理的形式

$$f_{w_0} - f_0 = \alpha(L_x, L_y, W_0, H, G, \epsilon_1, \epsilon_2) W_0 f, \quad (1)$$

其中$\alpha(L_x, L_y, w_0, H, G, \epsilon_1, \epsilon_2)$为引入的结构因子,$\epsilon_1, \epsilon_2$为金属及基底的介电常数,$H$为SRR厚度,$f$为通过实验得到的共振频率.结构因子$\alpha$可以通过

$$\alpha(L_x, L_y, W_0, H, G, \epsilon_1, \epsilon_2) = (f_{w_0} - f_0)/W_0 f$$

来测定.

由于α的影响因子较多且具体决定机理比较复杂,还不能从理论上给出定量关系,但是通过下文可以看出,在保证$\alpha(L_x, L_y, W_0, H, G, \epsilon_1, \epsilon_2)$中涉及到的参量不变的情况下,改变开口的形状和位置,(1)式的结果也不会改变.

3. 样品设计

不改变$\alpha(L_x, L_y, w_0, H, G, \epsilon_1, \epsilon_2)$中涉及到的参量,而改变开口的形状,可以设计出如下几种样品,如图4所示.

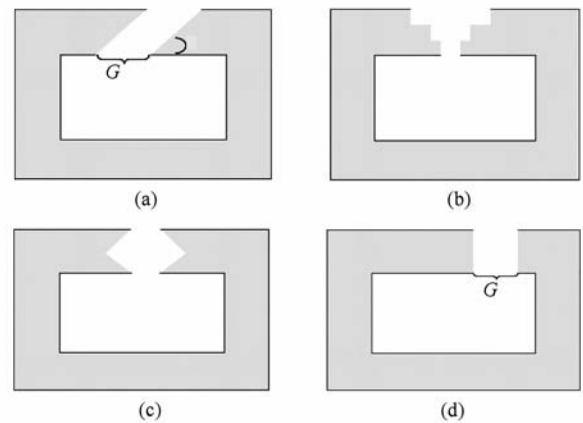


图4 厚度相同的SRR样品(采用不同的开口形状及不同位置的开口)

图4(a)样品开口形状为平行四边形,倾角为θ,横向的宽度为 G ; (b)样品开口形状为三层对称阶梯形,横向宽度的平均值为 G ; (c)样品开口形状为六边形,横向宽度平均值为 G ; (d)样品开口位置向边缘移动.所有样品的厚度 H 都为 $2 \mu\text{m}$,开口宽度 G 为 $4 \mu\text{m}$,金属线宽 W_0 为 $3 \mu\text{m}$,横向宽度 L_x 为 $52 \mu\text{m}$,纵向宽度 L_y 为 $32 \mu\text{m}$, (d)样品的开口横向移动距离为 $6 \mu\text{m}$.

4. FDTD 模拟结果

本文所作的三维模拟都是THz垂直于SRR表面入射,并且为了避免基底对SRR的迟滞效应,对上述四种样品的FDTD模拟是在真空中进行的.

4.1. THz 偏振方向与SRR开口边平行

当THz的偏振方向跟开口边平行时模拟的透射率如图5所示.在 0.806 THz 处,所有样品都同时

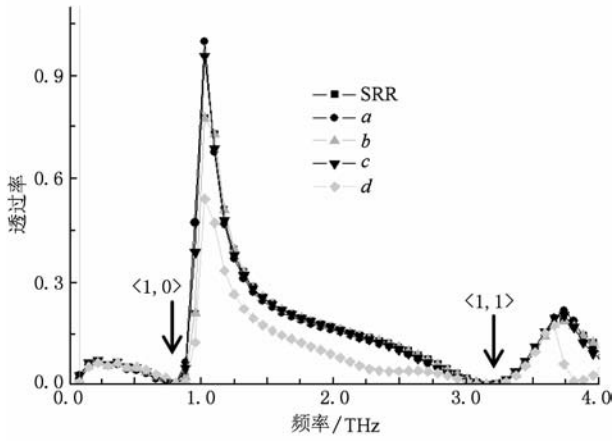


图5 不同样品在 THz 偏振方向平行于开口边时的透过率(为了作比较,也把经典 SRR 的透过率表示出来)

实现了 $\langle 1, 0 \rangle$ 峰的共振. 这说明低频共振的位置只跟开口的平均宽度有关, 平均宽度不变, 低频振荡位置就不变. 值得注意的是, 在 3.15 THz 处, 所有样品也都同时实现了 $\langle 1, 1 \rangle$ 峰的共振. 这是因为高频振荡的电流其实是把低频振荡的电流截断在不同的区域, 而在开口附近的情况是一样的, 所以在开口处对 $\langle 1, 0 \rangle$ 峰适用的均值效应也同样适用于 $\langle 1, 1 \rangle$ 峰. (d) 样品与其他曲线有所偏离, 这可能是由于(d) 样品开口设置的不对称性造成的.

对于图 4 中(a) 样品, 在保持开口宽度不变的情况下把倾角 θ 逐渐减小, 样品的透过率如图 6(a) 所示. 当倾角小于 16° 的时候, 透过率发生了明显的变化, 并且倾角为 15° 时的透过率跟不设开口的闭合矩形环的透过率符合很好. 这就意味着当倾角小于 16° 的时候, 共振电流是导通的. 值得注意的是, 此时并不是真正意义上的“环”电流, 因为开口导通, 电致磁效应^[5] 消失, SRR 内部电子运动情况会有很大变化, 这也导致了此时的透过率比原来 $\langle 1, 0 \rangle$ 共振时更大. 实际上从图 6(b) 来看, 电流导通的情况更容易理解: 在越趋近开口尖端处电荷积累就越多, 所以当倾角小到一定程度时, 尖端处局部电压过强, 开口肯定会导通. 这是一种类似于避雷针的尖端放电效应.

4.2. THz 偏振方向与 SRR 开口边垂直

当 THz 偏振方向垂直于开口边入射时, 透过率如图 7 所示. 只要是开口在中间的样品, 甚至是没有开口的样品, 它们的透过率曲线几乎完全重合, 而开口偏离中间的样品在一些特定位置上则表现出

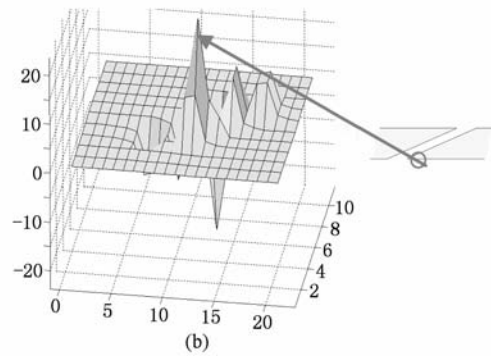
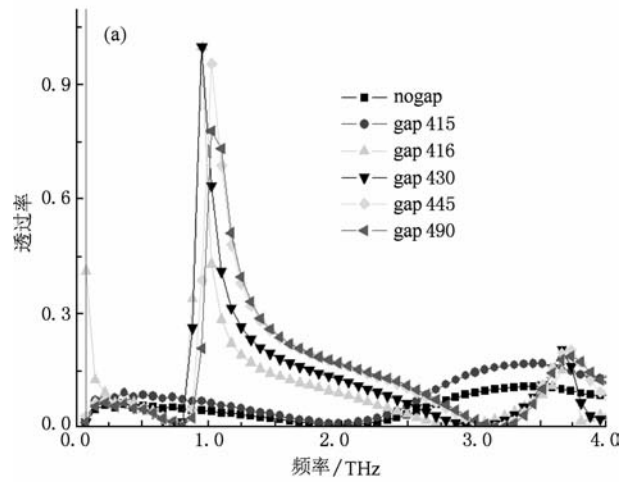


图6 (a) 倾角变化的一系列样品的透过率(“gap415”表示平均宽度为4, 倾角为 15° , 此处的经典 SRR 用“gap490”表示. 为了对比, 把没有开口同尺寸的矩形环的透过率也表示出来并标记为“nogap”); (b) 当倾角为 16° 时开口处电荷的分布图

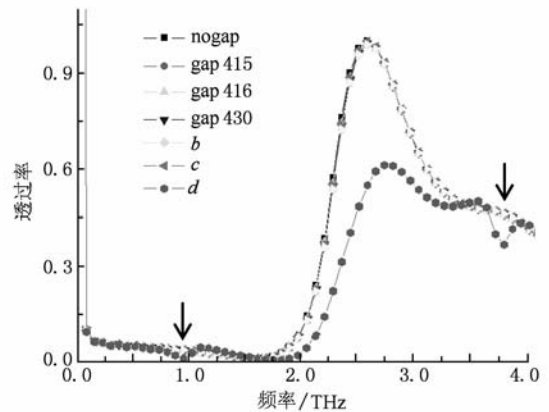


图7 不同样品在 THz 偏振方向垂直于开口边时的透过率

明显的不同. 这是因为此时 SRR 内部的电流都是按照平行于偏振方向流动的, 在与开口边相连的两臂表现最为突出, 越靠近中间的位置, 电流就越弱, 最中间的地方电流几乎为 0, 所以不同的开口设计, 甚至有没有开口都对电流的影响很小, 从而对最终的

透过率没有影响. 而偏离中间的开口却正好影响了电流的主要通道, 所以会有明显的差异, 并且可以预见开口越偏离中间, 对此方向上的透过率影响越大.

5. 结 论

综上所述, 当 THz 偏振方向平行于 SRR 开口边入射时, 保证平均宽度不变的情况下 SRR 开口形状的改变并不影响两个共振频率的位置, 这可以使我

们对样品的设计有更大的随意性. 当开口形状包含的锐角过小时(本样品中角度小于 16°), 开口就有可能出现导通, 这个结论提醒我们在设计包含锐角的样品时应该更加谨慎. 当 THz 偏振方向垂直于 SRR 开口边入射时, 偏离中间位置的开口结构会带来更为丰富的共振信息. SRR 环的独特性质使得它在 THz 领域的研究具有深远的意义. 本文通过研究 SRR 的开口参数对于其性能的影响, 可以为今后 THz 波段超材料的设计提供一定的参考, 也可为 SRR 工作机理的进一步分析研究提供有关的依据.

- [1] 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
- [2] Sun Y Z, Ran L X, Peng L, Wang W G, Li T, Zhao X and Chen Q L 2009 *Chin. Phys. B* **18** 174
- [3] Ma H, Qu S B, Xu Z, Zhang J Q, Wang J F 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1025
- [4] Xu X L, Quan B G, Gu C Z, Wang L 2006 *J. Opt. Soc. Am. B*

23 6

- [5] Singh R, Plum E, Menzel C, Rockstuhl C, Azad A K, Cheville A A, Lederer F, Zhang W, Zheludev N I 2009 *Phys. Rev. B* **80** 153104
- [6] Robert F S 2010 *Science* 327
- [7] Padilla W J, Taylor A J, Highstrete C, Mark I, Averitt R D 2006 *Phys. Rev. Lett.* **99** 107401

The influence of different opening shapes of split-ring resonator on its transmittance in terahertz band*

Li Lei¹⁾ Zhou Qing-Li¹⁾ Shi Yu-Lei^{1)†} Zhao Dong-Mei¹⁾ Zhang Cun-Lin¹⁾
Zhao Kun²⁾ Tian Lu²⁾ Zhao Hui²⁾ Bao Ri-Ma²⁾ Zhao Song-Qing²⁾

1) (Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

2) (College of Science, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

(Received 18 March 2010; revised manuscript received 28 April 2010)

Abstract

Through the FDTD simulation of the transmittance in terahertz band of the split-ring resonator (SRR) with different opening shapes, we found a mean gap effect of SRR during the resonance and a particular conduction phenomenon in case of very sharp edge of the split.

Keywords: THz, SRR, opening shapes, FDTD

PACS: 95.85. Hp, 81.05. Bx, 76.70. Hb, 61.50. Ah

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2007CB310408 and 2006CB302901), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10804077, 10904098, 11011120242), Beijing Municipal Commission of Education (Grant No. KM200910028006), Funding Project for Academic Human Resources Development in Institutions of Higher Learning under the Jurisdiction of Beijing Municipality, and the State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences.

† Corresponding author. E-mail: yulei_shi@hotmail.com