

圆环结构人工电磁吸波材料的仿真与实验研究*

程用志¹⁾ 肖 婷¹⁾ 杨河林^{1)†} 肖柏勋²⁾

1) (华中师范大学物理科学与技术学院, 武汉 430079)

2) (长江大学工程地球物理研究中心, 荆州 434023)

(2009 年 11 月 2 日收到; 2009 年 12 月 25 日收到修改稿)

提出了两种圆环型微波电谐振结构, 这两种谐振结构分别与金属线进行适当的组合形成电磁耦合单元, 对正入射的电磁波产生谐振响应并具有强烈的吸收作用. 通过对两种耦合单元的电磁仿真和优化计算使其各自获得最佳的吸波性能. 在微波段 8—12 GHz 利用自由空间法对这两种耦合结构的电磁特性(即反射系数 S_{11} 和透射系数 S_{21}) 进行实验测量, 在 10.7 GHz 和 10.07 GHz 吸收率分别达到 95% 和 98% 以上.

关键词: 耦合单元, 吸收率, 阻抗匹配

PACC: 7300, 7785, 7790

1. 引 言

人造介质的历史可追溯到 1914 年 Lindman 用随机排列的微小螺旋线所制作的一种螺旋介质材料. 1948 年, Kock 认为人造大尺度固体电介质中所含有的微小金属微粒和普通电介质分子所起的作用一样, 他通过制作轻巧的微波透镜证实了自己的预言, 并修正了人造介质的等效折射率^[1]. 1968 年, Veselago 预测的左手材料^[2](即具有负介电常数 ($\epsilon(\omega) < 0$) 和负磁导率 ($\mu(\omega) < 0$) 的材料) 更是为近些年人们所热衷的一类人工电磁材料的研究提供了理论基础. 自 2001 年 David Smith 根据 Pendry 等人提出的建议, 制造出在微波波段具有负折射率的材料以来, 无论是在理论上还是在实际应用方面, 对人工电磁材料的研究取得了突破性的进展. 这类人工电磁材料通常具有严格对称结构, 周期性排列, 且对电磁波产生奇异的作用, 因此, 在微波领域的应用受到人们的广泛关注. 基于人工电磁材料而制作的定向耦合器^[3]、隐身材料^[4]和电小尺寸天线^[5]等, 其性能比传统的器件都有较大的改善.

自从 Landy 等人提出了在吉赫兹波段具有理想吸波特性的开口谐振方环, 衬底和金属线三层耦合结构^[6], 便引起了广大科研工作者的极大兴趣^[7,8].

随后 Avitzour 等人又陆续提出了在太赫兹波段具有吸波特性的三层或多层耦合结构^[9-11], 并对其吸波特性进行了详细的理论分析和实验验证. 这些耦合结构都有一些共同的特点, 都基于有效介质理论^[12]和理想阻抗匹配理论^[9], 金属谐振环, 衬底(基板材料), 金属线等三层或多层耦合结构, 周期性排列, 窄带吸波特性.

本文在 Landy 等人提出的开口谐振方环的基础上, 设计了两种在吉赫兹波段具有理想吸波特性的开口谐振圆环, 衬底和金属线三层耦合结构, 对这两种圆环耦合结构进行了电磁仿真计算, 分析了这两种开口谐振圆环微结构的差异对谐振频率点选择的影响, 并通过优化组合使其获得最佳的吸波特性. 利用自由空间法对这两种最佳耦合结构的电磁特性(即反射系数 S_{11} 和透射系数 S_{21}) 进行实验测量. 测量结果与仿真值基本吻合. 这为结构体吸波材料的设计和进一步研究提供了一个新的思路.

2. 理论分析

复合材料的吸收率 $A(\omega)$ 通常由反射率 $R(\omega)$ 和透射率 $T(\omega)$ 表示, 即 $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$, 或 $A(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$, 则透射率 ($T(\omega) = |S_{21}|^2$) 和反射率 ($R(\omega) = |S_{11}|^2$) 分别表现为 S 参数的形式. 因此, 影响材料吸波特性的直接因素

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2008AA12Z102)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: hlyang@phy.ccnu.edu.cn

主要是反射率和透射率^[13]. 对于复合电磁材料, S 参数主要取决于材料的复折射率 $\tilde{n}(\omega) = n_1 + in_2$ 和复阻抗 $\tilde{z}(\omega) = z_1 + iz_2$, 对于厚度为 d 的复合材料, 则有

$$S_{21}^{-1} = \left[\sin(\tilde{n}kd) - \frac{i}{2} \left(\tilde{z} + \frac{1}{\tilde{z}} \right) \cos(\tilde{n}kd) \right] e^{ikd}, \quad (1)$$

其中 $k = \omega/c$, c 为真空中的光速, 当复合材料在自由空间中实现完全阻抗匹配时(即 $\tilde{z}(\omega) \approx 1$), 则(1)式可简化为

$$S_{21}^{-1} = [\sin(\tilde{n}kd) - i\cos(\tilde{n}kd)] e^{ikd}, \quad (2)$$

将其化为指数形式

$$S_{21}^{-1} = e^{-i(a_1-1)kd} e^{n_2kd}, \quad (3)$$

因此透射率

$$T(\omega) = |S_{21}|^2 = e^{-2n_2kd}, \quad (4)$$

所以, 当 $n_2 \rightarrow \infty$ 时, 则有 $\lim_{n_2 \rightarrow \infty} T(\omega) = 0$. 同样, 通过理论推导可以得到

$$R(\omega) = |S_{11}|^2 = \left(\frac{\tilde{z}(\omega) - 1}{\tilde{z}(\omega) + 1} \right)^2. \quad (5)$$

所以, 当 $\tilde{z}(\omega) \rightarrow 1$ 时, 则有 $\lim_{\tilde{z}(\omega) \rightarrow 1} R(\omega) = 0$.

根据以上的理论推导公式, 当复合电磁材料的耦合结构实现了理想的阻抗匹配($\tilde{z}(\omega) = 1$), 便可获得理想的吸收率 $A(\omega) \approx 1$.

3. 耦合吸波结构设计及仿真分析

3.1. 耦合结构单元

本文设计了如图 1(a) 和 (b) 两种圆环结构谐振单元, 分别与 (c) 中的金属线进行组合形成 (d) 所示的三层结构(其中 I 层为圆环谐振结构; II 层为空白的 FR-4(lossy) 基板填充层, 我们也把此层称为阻抗匹配层; III 层为金属线). 其中, 图 1(a) 和 (b) 所示的圆环结构为纯铜, 厚度 $35 \mu\text{m}$, 线宽为 0.6 mm , 圆环内径 1.35 mm , $G = 0.2 \text{ mm}$, 分别附着在长 $A = 12 \text{ mm}$, 宽 $B = 4.2 \text{ mm}$, 厚 $d = 0.3 \text{ mm}$ 的 FR-4(lossy) 基板材料上; (c) 所示的覆铜线尺寸, $H = 11.8 \text{ mm}$, $L = 1.7 \text{ mm}$, 厚 $35 \mu\text{m}$ 铜的电导率 $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$, FR-4(lossy) 基板的复合介电常数 $\tilde{\epsilon} = 4.9 + 0.025i$. 这些结构均对正入射电磁波的电场具有强烈的谐振作用. 当电磁波照射到电谐振结构上, 会形成一个阻带, 把阻带的最低频率点称为谐振点, 因此这个现象也称为频率选择特性.

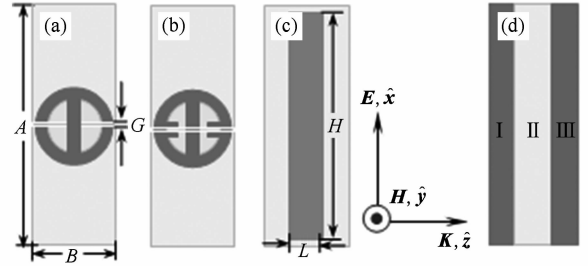


图 1 (a), (b) 分别为圆环谐振结构; (c) 金属线; (d) 谐振环与金属线的耦合结构单元

3.2. 单元仿真结果及分析

我们采用时域有限差分方法(FDTD)对图 1(d) 所示的单个三层耦合结构单元进行了仿真计算. 激励源设置为从 z 方向入射的平面波, 电场 E 沿 x 方向、磁场 H 沿 y 方向. x 方向设置为 PE(perfectly electric) 边界, 即理想导电边界, y 方向设置为 PM(perfectly magnetic) 边界, 即理想导磁边界, z 方向设置为开放边界. 图 1(d) 中 II 层阻抗匹配层的厚度 D 取不同值, 仿真结果也会存在很大的差异. 我们把图 1 中 (a) 与 (c) 组合形成 (d) 所示的耦合结构命名为 ac, 把 (b) 与 (c) 组合形成 (d) 所示的耦合结构命名为 bc. 取不同厚度的 D 值分别对 ac 和 bc 的单个单元进行仿真, 并进行优化计算以获得最小的 S 参数, 从而得到最大的吸收率 $A(\omega)$. 其仿真结果如图 2 所示.

从图 2(a) 和 (b) 可以清晰地看到, 两种耦合结构在整个频率范围内, 透射率接近于零, 即 $T(\omega) \rightarrow 0$; 这一方面说明这两种复合结构的复折射率 $\tilde{n}(\omega) = n_1 + in_2$ 的虚部 $n_2 \rightarrow \infty$, 另一方面由于 III 层金属线对一定频段电磁波的屏蔽作用. 反射率除了在某个频率点附近以外都接近于 1. 当 $D = 0.6 \text{ mm}$ 时, ac 耦合结构单元在 $\omega = 11.2 \text{ GHz}$ 时得到最小反射率 $R(\omega) \rightarrow 0$, 吸收率 $A(\omega) = 99.27\%$; 而当 $D = 0.9 \text{ mm}$ 时, bc 耦合结构单元在 $\omega = 10.55 \text{ GHz}$ 时得到最小反射率 $R(\omega) \rightarrow 0$, 吸收率 $A(\omega) = 99.13\%$.

图 3(a), (b) 和 (c) 是电谐振结构表面感应电流分布示意图. 由图可见, 对于 ac 耦合结构, 电磁波垂直照射到开口圆环结构(如图 1 中的 (a) 所示) 上, 电场平行于中间金属线, 磁场垂直于两边开口缝隙, 激发金属细线形成表面感应电流, 该电流产生磁场与 III 层金属线激发的反向电流所产生的磁场进行耦合产生强烈的谐振作用(如图 3 中的 (a), (c) 所示), 从而极大地减小了电磁波的反射, 此时

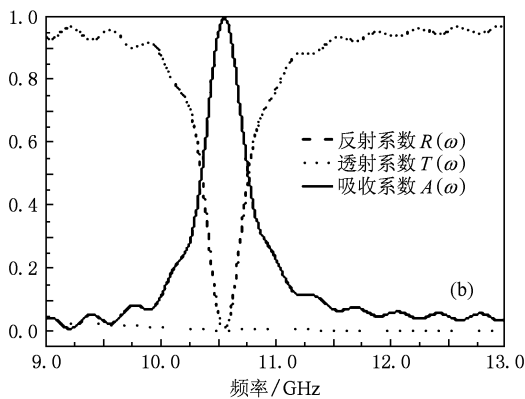
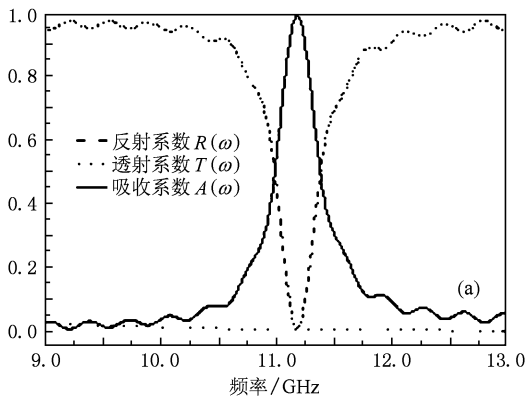


图2 单个耦合结构单元的仿真结果 (a) II层厚度 $D = 0.6$ mm 的 ac 耦合结构; (b) II层厚度 $D = 0.9$ mm 的 bc 耦合结构

的频率点称为谐振点. 根据有效电路理论, 谐振频率表示成如下形式: $\omega_0 = 2\pi f_0 = 1/\sqrt{LC}$, 我们可以把这种圆环结构等效为电感电容谐振(LC)电路^[14], 也把这种结构称为电磁电感电容谐振器(EMLCR). 则对于 ac 结构的中心谐振频率为 11.2 GHz, 而对 bc 结构的中心谐振频率为 10.55 GHz, 中心频率向低频移动了 0.65 GHz. 这可能由两方面的原因造成的, 一方面根据上述等效电路理论, bc 结构相对于 ac 结构增加了中心的缝隙面积, 相当于增大了电容 C, 因此, 随着缝隙面积的增大, 中心谐振频率 ω_0 自然减小; 另一方面阻抗匹配厚度 D 的大小也会使谐振频率点产生平移.

4. 实验及其结果分析

基于以上的设计仿真, 采用 PCB(Printed Circuit Board) 工艺制作了 ac 耦合结构和 bc 耦合结构测试样品进行实验验证(即在 $13\text{ cm} \times 14\text{ cm} \times 0.3\text{ mm}$ 大小的环氧板上镀了周期性排列的 10×31 个 $35\text{ }\mu\text{m}$ 厚如图 1(a), (b) 和 (c) 所示结构的铜). 实验测

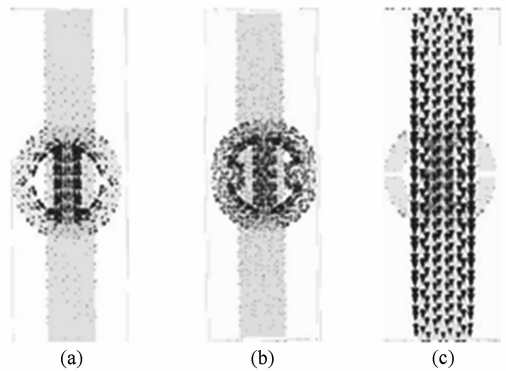


图3 (a), (b) 和 (c) 为电谐振结构受电磁波的激发作用而产生的电流分布示意图

试样品部分截图如图 4 所示, 用矢量网络分析仪(Agilent PNA E8362) 连接两个双脊喇叭天线(发射线性极化电磁波的频率范围 8—12 GHz), 在自由空间对实验样品的 S 参数进行测量.

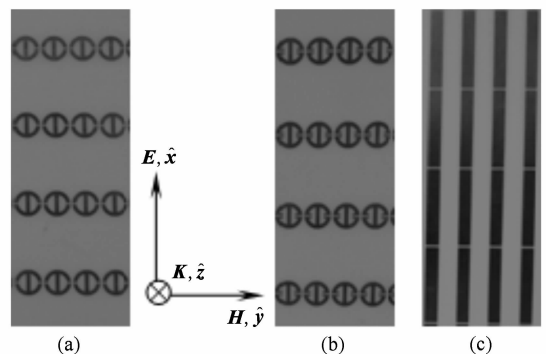


图4 测试样品的部分截图 (a) ac 耦合结构的正面截图; (b) bc 耦合结构正面图; (c) ac 和 bc 两种耦合结构背面截图

自由空间法测试装置如图 5 所示, (a) 图为透射系数测试装置, 在两个喇叭天线中间放置一个矩形开孔(开孔尺寸为 $12\text{ cm} \times 13\text{ cm}$) 大金属板作为参考板. 首先测试开孔金属板的透射, 再把试验样品放入大金属板的矩形开孔处测量其透射系数 (S_{21}), (b) 图为测试试验样品的反射特性, 把两喇叭天线与材料表面的法线成 7.5° 夹角放置, 用和材料一样大小的金属板作为参考面, 首先测试金属板的反射, 再测量材料的反射系数.

图 6(a) 为周期性排列的 10×31 个 ac 耦合结构单元的仿真与实验测试结果. 从图 6(a) 中可以看出, 对于多个 ac 耦合结构单元, 在 $\omega = 10.7\text{ GHz}$ 时的仿真值反射系数 S_{11} 和透射系数 S_{21} 分别为 -37.2 dB 和 -29 dB , 此时换算成的吸收率 A 大于

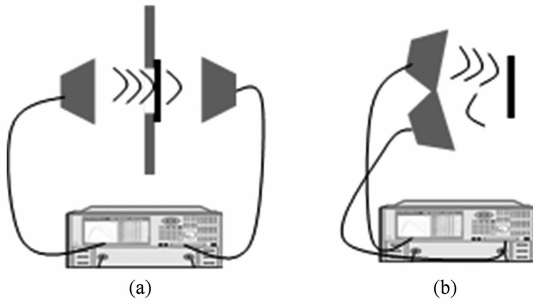


图5 (a)和(b)为自由空间法实验装置示意图

99.5%. 反射系数 S_{11} 的实验结果与仿真结果符合得非常好,都在同一频率点达到最低值,而透射系数 S_{21} 的实验测试最低值的频率点与仿真值产生了一点偏差,误差主要可能是在测透射时 ac 耦合结构试验样品的组合产生的偏差造成的. 无论是仿真,还是实验,ac 耦合结构对电磁波的透射率几乎接近于零;反射系数在 $\omega = 10.7$ GHz 接近于零,这说明我们设计的 ac 耦合结构具有理想的吸波特性和吸收率达到 95% 以上.

在 ac 耦合结构的基础上,在同等条件下,我们也对多个 bc 耦合结构单元进行了仿真和测试. 如图 6(b) 所示,无论是反射系数,还是透射系数,实验结果与仿真结果都符合得非常好,同时在 $\omega = 10.07$ GHz 达到最低值,通过 S 参数的线性变换和计算可得,吸收率 A 的仿真值大于 99.5% 以上,实验值也达到 98% 以上. 这说明 bc 耦合结构相对于 ac 结构有更大的吸收率,通过改变谐振圆环的微结构,可以增大电磁耦合结构的吸收率. 无论是 ac 耦合结构还是 bc 耦合结构,相对于单个单元的仿真结果(如图 2 所示),多个单元仿真的谐振频率点都向低频移动了近 0.5 GHz,且吸收率更高,这主要是多个 ab 耦合结构单元周期性排列(如图 4)的结果,多个相同的 I 层和 III 层(如图 1(d))电结构之间发生强烈的耦合谐振作用,促使谐振频率点向低频移动,从而进一步增强了对电磁波的吸收能力.

比较仿真与实验结果,发现实验和仿真的 S 参数的 dB 值在整个频率范围内有微小的差异,这主要是仿真是在理想条件下,而实验要受到镀铜厚度的均匀性,结构的细微差异及仿真中设定的 PCB 板基体材料电磁参数与实验用材料的细微差异等其他实验条件的影响.

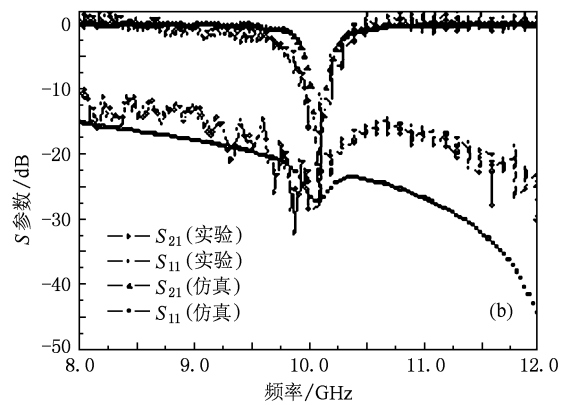
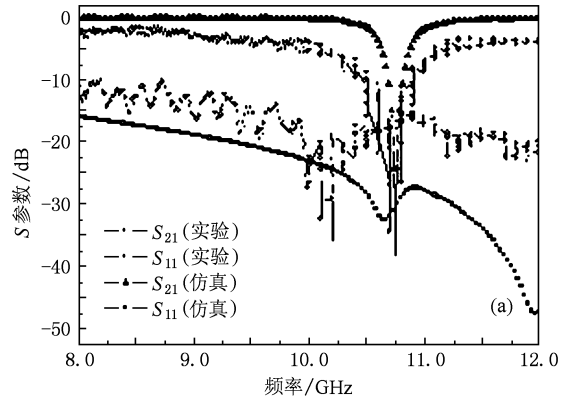


图6 实验与仿真对比结果 (a)ac 耦合结构;(b)bc 耦合结构

5. 结 论

本文设计了两种圆环电谐振结构,与金属线进行适当的组合形成耦合结构,采用时域有限差分法对这两种耦合结构进行仿真计算,并对圆环微结构的变化对谐振频率点的选择差异进行了分析. 对这两种耦合结构的单个单元仿真计算,分别在 11.2 GHz 和 10.55 GHz 得到最大吸收率 99.27% 和 99.13%;对这两种耦合结构周期性排列的多个单元进行仿真计算和实验测量,其吸收率的测量值分别达到 95% 和 98% 以上. 我们设计的人工电磁吸波结构相对于以往的涂层结构^[15]和蜂窝结构^[16]吸波材料,具有质量轻,厚度薄并且不受波长的限制(吸波结构厚度大约是谐振波长的 1/30),制作工艺上实现起来比较容易等特点. 总之,本文所设计的圆环结构吸波材料具可用于雷达吸波材料,微波探测器,具有广泛的应用前景.

- [1] Kock W E 1948 *Bell. Syst. Tech. J* **27** 58
- [2] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [3] Xiao S S, Shen L F, He S L 2004 *IEEE Photonics Technology Letters* **16** 171
- [4] Leonhardt U 2006 *Science* **312** 1777
- [5] Akalin T, Danglot J, Vanbesien O, Lippens D A 2002 *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* **12** 48
- [6] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [7] Lu J, Chen X Y, Wang J B 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7200 (in Chinese) [卢俊、陈新邑、汪剑波 2008 物理学报 **57** 7200]
- [8] Jia H Y, Gao J S, Feng X G, Sun L C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 506 (in Chinese) [贾宏燕、高劲松、冯晓国、孙连春 2009 物理学报 **58** 506]
- [9] Avitzour Y, Yaroslav A, Urzhumov, Shvets G 2009 *Phys. Rev. B* **79** 045131
- [10] Tao H, Landy N I, Bingham C M, Zhang X, Averitt R D, Padilla W J 2008 *Optics Express* **16** 10
- [11] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, Jokerst N, Smith D R, Padilla W J 2009 *Phys. Rev. B* **79** 125104
- [12] Smith D R, Pendry J B 2006 *Opt. Soc. Am. B* **23** 391
- [13] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617
- [14] Schuring D, Mock J J, Smith D R 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 041109
- [15] Zhang S Q, Shi Y L, Huang C G, Lian C C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5508 (in Chinese) [张拴勤、石云龙、黄长庚、连长春 2007 物理学报 **56** 5508]
- [16] He Y F, Gong R Z, Wang X, Zhao Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5261 (in Chinese) [何燕飞、龚荣洲、王鲜、赵强 2008 物理学报 **57** 5261]

Study on the simulation and measurement of ring structures metamaterial absorber*

Cheng Yong-Zhi¹⁾ Xiao Ting¹⁾ Yang He-Lin^{1)†} Xiao Bo-Xun²⁾

1) (College of Physical Science and Technology, Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China)

2) (Engineering Geophysical Research Center, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

(Received 2 November 2009; revised manuscript received 25 December 2009)

Abstract

In this paper, two kinds of ring-type microwave electric resonant structures were proposed, which were appropriately assembled with metal wires to form electromagnetic coupling units. The coupled structures have resonance response to the incident electromagnetic wave, and absorb the electric and magnetic fields strongly. We simulated these two kinds of coupled structures, and then optimized the simulation results to achieve the best absorption properties. The electromagnetic properties (the reflection coefficients S_{11} and the transmission coefficients S_{21}) of metamaterial absorber sample were measured using free space method in microwave frequency from 8 to 12 GHz. At 10.7 GHz and 10.07 GHz, the absorptivity reaches 95% and 98%, respectively.

Keywords: coupling unit, absorptivity, impedance matched

PACC: 7300, 7785, 7790

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2008AA12Z102).

† Correspondent author. E-mail: hlyang@phy.ccnu.edu.cn