

超宽带异向介质平面倒 F 天线*

杨 锐[†] 谢拥军 胡海鹏 王 瑞 满明远 吴召海

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, 西安 710071)

(2009 年 7 月 23 日收到; 2009 年 8 月 22 日收到修改稿)

将异向介质地板引入平面倒 F 天线 (PIFA) 的设计中, 探索了这种天线的新型辐射特性. 修正的 PIFA 传输线模型中, 利用异向介质的谐振电路取代了传统辐射贴片不连续性而引起的电容效应, 从物理上有效地解释了这种 PIFA 辐射性能的提高. 数值和实测数据表明, 该 PIFA 天线 -10 dB 相对带宽超过了 100%, 谐振频率包含无线局域网各通信标准及城域网 2—6 GHz 固定和移动宽带无线接入系统的所有载波频段. 在 2.4/2.5 GHz 时, 该天线将得到全向的辐射方向图, 而在 3.8 GHz 和 5.1—5.8 GHz 频带内, 该天线更集中具有后向辐射.

关键词: 异向介质, 传输线模型, 平面倒 F 天线, 超宽带

PACC: 4110H

1. 引 言

自从 1996 年开始, Pendry 等^[1]相继提出采用周期性排列的导线和开口谐振环结构可以在微波频段内产生负的介电常数和磁导率, Veselago^[2]沉寂了近 30 年的异向介质先驱理论再度成为科学界的研究热点. 2001 年, Smith 等^[3]根据 Pendry 等的研究成果, 利用以铜为主的复合材料成功验证了异向介质的负折射现象, 至此, 这种自然界并不存在的人工介质正式步入了工程现实^[4—13].

近年来, 异向介质的应用早已渗透到了各类微波器件的设计和开发中. 具体到天线方面, Wu 等实现了基于异向介质后向波的小型化天线^[14], Yang 等则提出了具有主瓣宽度窄、仰角低特点的异向介质微带天线^[15]. 但是, 设计者们都希望天线的带宽能够覆盖多个工作频段以满足越来越多的无线通信标准. 与此同时, 对于移动终端所使用的天线, 如平面倒 F 天线 (PIFA), 同时兼顾超宽带并满足小型化又非常困难. 现有文献对于这方面的研究也都多愿意尝试将 PIFA 设计成多频工作而不是超宽带^[16—18]. 另一方面, 异向介质固有的强色散和有耗特性也似乎阻碍了异向介质加载天线带宽性能的提高. Hao 等研究了异向介质电小天线并指出加载

材料的损耗将使天线性能恶化^[19]. Tretyakov 等数值仿真了部分填充色散异向介质的微带天线, 发现天线带宽将小于单纯空气填充的天线^[20]. Yang 等则分析和设计了含有异向介质双层基底的亚波长谐振腔微带天线, 虽然突破了传统微带天线的窄带局限, 但前提假设为异向介质是各向同性的均匀介质^[21].

基于以上考虑, 本文将异向介质地板引入 PIFA 的设计中, 实现了具有超宽带特性的异向介质 PIFA. 通过对 PIFA 传输线模型修正分析, 可以看出, 异向介质谐振电路替代传统辐射贴片的开路电容将有可能提高该 PIFA 的辐射特性. 数值和实测数据表明, 这种天线 -10 dB 相对带宽达到了 100% 以上, 谐振频率包含无线局域网和城域网 IEEE 802.11 a/b/g 标准及 802.16 e 标准的各载波频段. 在 2.4/2.5 GHz 时, 这种天线将得到全向的辐射方向图, 而在 3.8 GHz 和 5.1—5.8 GHz 频带内, 这种天线将具有后向辐射特性.

2. 理论分析

图 1 给出了加载异向介质地板的 PIFA 模型. 可以看出, 周期性金属贴片覆盖的基板结构替代了传统的金属地板. 其中天线各参量的物理尺寸为 $l_1 =$

* 国家自然科学基金 (批准号: 60771040) 和重点实验室基金 (批准号: 9140C0704060804) 资助的课题.

[†] E-mail: mattomato811118@yahoo.com.cn

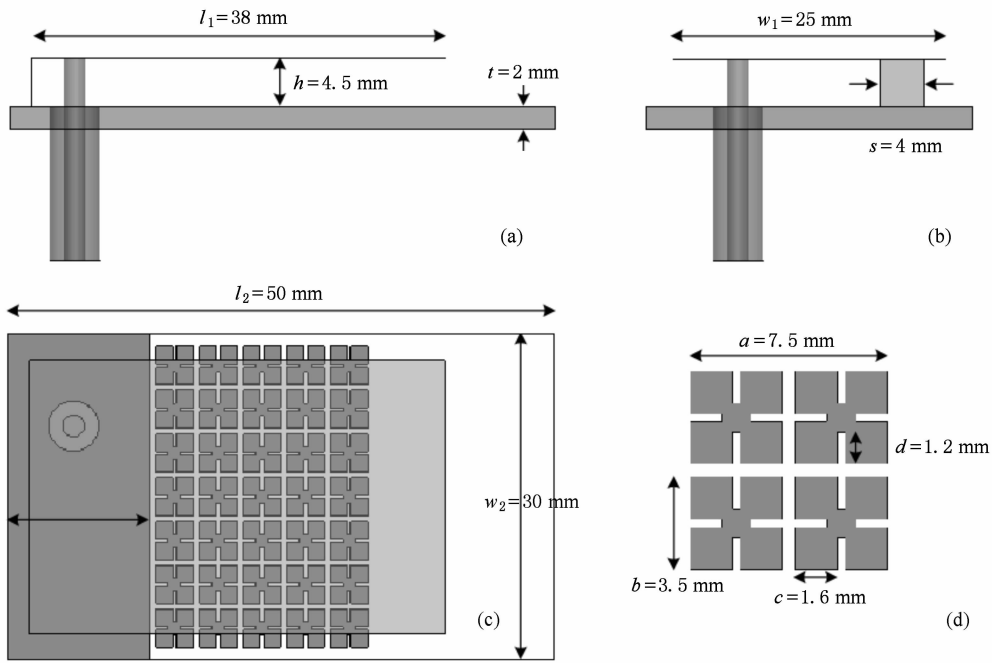


图1 加载异向介质的 PIFA 模型 (a)主视图;(b)侧视图;(c)俯视图;(d)异向介质谐振单元

38 mm , $w_1 = 25$ mm, $l_2 = 50$ mm, $w_2 = 30$ mm, $h = 4.5$ mm, $g = 13$ mm, $s = 4$ mm, $a = 7.5$ mm, $b = 3.5$ mm, $c = 1.6$ mm, $d = 1.2$ mm, 基底的材料为聚四氟乙烯 $\epsilon_r = 2.55$, 厚度 $t = 2$ mm. 图2给出了异向介质 PIFA 的传输线模型. 我们知道, 由于 PIFA 贴片终端和地板之间形成了辐射缝隙, 边缘场兼顾着储能

和辐射的作用. 当异向介质地板引入后, 由贴片不连续性所造成的电容效应将被异向介质的谐振电路取代. 另一方面, 与传统 PIFA 相同, 边缘场辐射所导致的能量流失仍然可以用一个并联导纳来表示.

由图2, 异向介质 PIFA 的输入导纳可以表示为

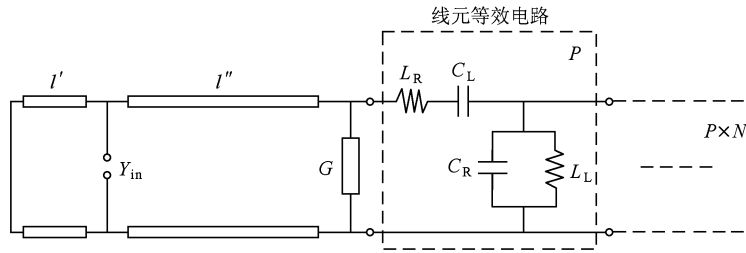


图2 加载异向介质的 PIFA 的传输线模型

$$\begin{aligned} Y_{in} &= Y_1 + Y_2, \\ Y_1 &= -jY_0 \cot(\beta l'), \\ Y_2 &= Y_0 \frac{Y_s + jY_0 \tan(\beta l'')}{Y_0 + jY_s \tan(\beta l'')}, \end{aligned} \tag{1}$$

其中, l' 和 l'' 分别为辐射贴片上馈电点到短路端和开路端的距离并满足 $l' + l'' = l_1$, Y_s 为辐射缝隙的导纳且具有以下形式:

$$Y_s = G + M, \tag{2}$$

M 表示了异向介质谐振电路的等效导纳. 我们知道, 当异向介质取得双正参数时, 分布参数将只由 L_R 和 C_R 表示. 而当异向介质取得双负参数时, 分布参数 L_L 和 C_L 将起主要作用, 但由于寄生效应, L_R 和 C_R 也将存在.

图3给出了该异向介质的本构参数, 可知在 1—7 GHz 介质的相对介电常数和相对磁导率均为正数, 而且数值非常稳定, 有效地减小了色散特性. 当 l'' 趋近于 $1/4$ 波长时, $Y_2 = Y_0^2/Y_s$. 此时若异向介

质电路发生谐振或成感性, Y_2 将有可能成为纯电纳或具有容性,这意味着 Y_{in} 将能够更加接近实数,从而使得天线在其谐振频点周围工作的相当平稳,为获得良好的带宽特性提供了可能. 为了验证以上理论,图 4 给出了该天线馈电点的输入阻抗,可以看出,2.2—8 GHz 频段内输入阻抗的实部相比于虚部将起主导作用,并且非常接近 50 Ω 的天线特性阻抗. 输入阻抗具有三个波峰值,对应实部最接近 50 Ω 且虚部最接近 0 的频点,这也正好预示了该异向介质 PIFA 的谐振频点.

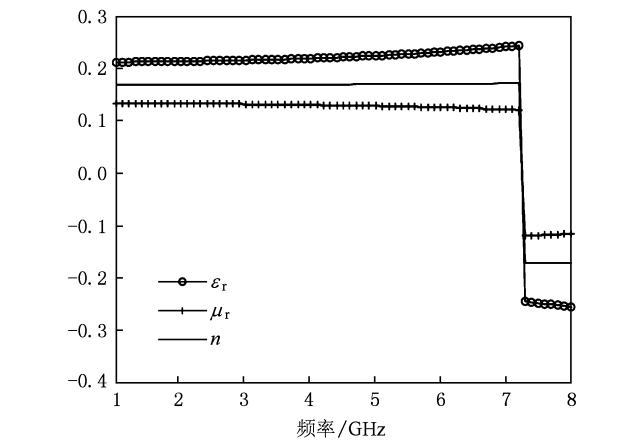


图 3 异向介质的本构参数

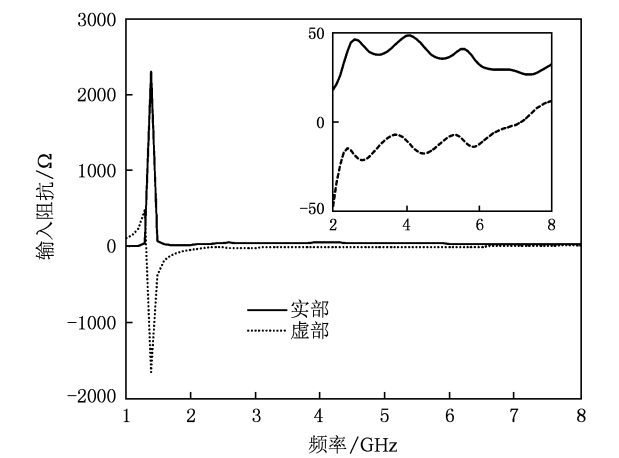


图 4 异向介质 PIFA 的输入阻抗

另一方面,异向介质地板对不同频段电磁波所呈现的反射和透射现象也将改变天线的辐射特性. 在 1—7 GHz 的双正参数对应传输通带,也就是说,天线的辐射功率将直接透射过异向介质地板而不是反射,这将造成该天线的后向辐射增强. 从这个意义上来说,异向介质 PIFA 在使用时需要相应的

调整摆向,从而更有效的利用后向辐射.

3. 数值和实测结果

利用 Ansoft HFSS 11.0 对异向介质 PIFA 进行全波仿真,并且与实际天线测量结果进行比对. 图 5 给出了该异向介质 PIFA 的加工实物. 图 6 则给出了此新型 PIFA 和传统地板 PIFA 的回波损耗,从仿真结果可以看出,以 4.8 GHz 为中心频率,异向介质 PIFA 小于 -10 dB 的相对带宽达到了 100% 以上,大大改善了传统 PIFA 通常 10% 的窄带宽局限. 而且,实测结果与仿真结果较为符合,证明了异向介质 PIFA 分析和设计的正确性. 谐振频带包含了无线通信中 IEEE 802.11 a/b/g 标准 2.4/2.5 GHz 和 5.1—5.8 GHz 以及 IEEE 802.16 e 标准 2—6 GHz 固定和移动宽带无线接入系统的所有载波频段,使得该天线有着广阔的实际应用前景. 值得注意的是,在整个异向介质 PIFA 天线的设计中,并没有附加任何的匹配网络来提高宽带,所以这个新型天线的效率会很高,而且更有利于小型化的实现. 图 7 给出了该天线在三个谐振最强频段的辐射方向图,可以看出,在 2.4/2.5 GHz 时,这种天线得到了全向的辐射方向图,而在 3.8 GHz 和 5.1—5.8 GHz 时,这

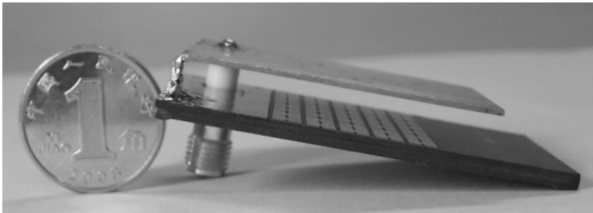


图 5 加载异向介质 PIFA 实物

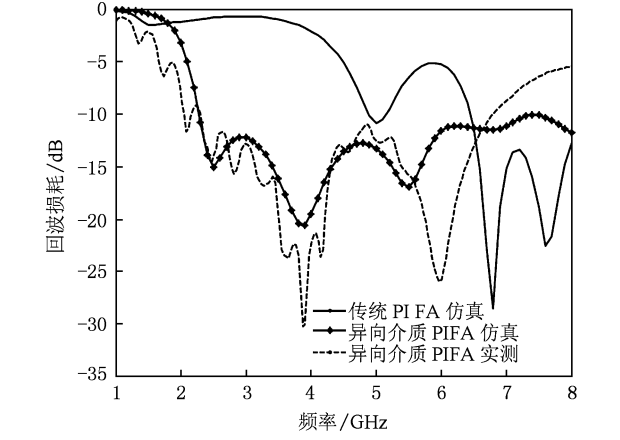


图 6 传统 PIFA 和加载异向介质 PIFA 的回波损耗

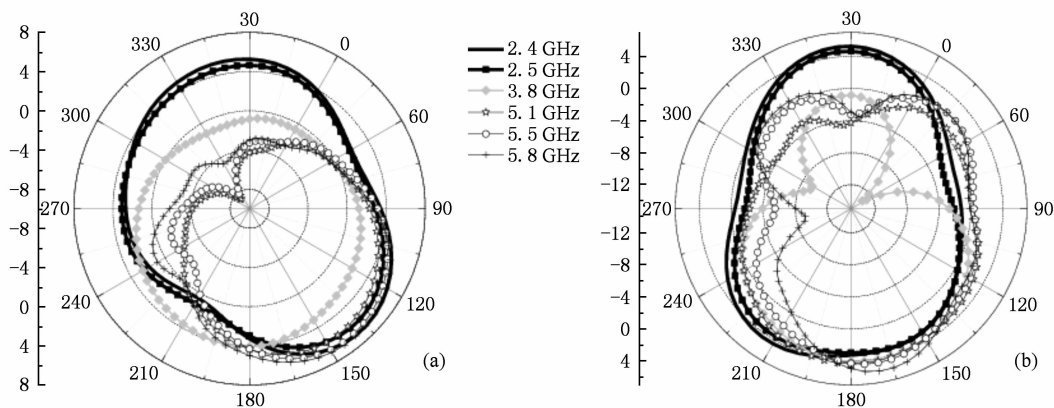


图 7 加载异向介质 PIFA 的辐射方向图 (a) $\phi = 0^\circ$; (b) $\phi = 90^\circ$

种天线更集中具有后向辐射特性. 对于这一特异的辐射特性,在实际使用该异向介质 PIFA 时,需要相应的调整天线的摆向,将其放在安装基板的反面. 所以,除了贴片尺寸,天线高度,短路片宽度等这些传统参量,基板的材质和厚度也将至关重要.

表 1 给出了此新型 PIFA 在不同基板上的带宽特性,例如对于示例天线当基板厚度 $t = 2\text{ mm}$,介电常数 $\epsilon_r = 2.55$ 时,加载异向介质 PIFA 的天线带宽为 2.2 GHz 到 7.4 GHz,三个谐振频点为 2.5,3.8

和 5.5 GHz,相应的谐振强度为 -15.0 , -20.4 和 -19.6 dB . 可以看出,对于同一基板材料,基板的厚度并不会剧烈的影响到天线的带宽,而且谐振频点和谐振强度也相对稳定. 而基板的介电常数不同,天线的带宽却有所不同,尤其当 $\epsilon_r = 1$ 时,天线的谐振带宽将分为两部分. 但是,该异向介质 PIFA 的带宽均能覆盖无线局域网和城域网 IEEE 802.11 a/b/g 标准及 802.16 e 标准的各载波频段,极大地改善了传统 PIFA 的窄带宽局限.

表 1 不同基板对异向介质 PIFA 带宽特性的影响

t/mm	1		2		3	
	(2.4 GHz,2.8 GHz)		(2.4 GHz,2.6 GHz)		(2.3 GHz,3.0 GHz)	
	(3.4 GHz,6.6 GHz)		(3.3 GHz,6.6 GHz)		(3.2 GHz,6.6 GHz)	
$\epsilon_r = 1$	2.6 GHz	-11.1 dB	2.5 GHz	-11.5 dB	2.6 GHz	-11.5 dB
	4.5 GHz	-43.1 dB	4.5 GHz	-38.5 dB	4.4 GHz	-40.0 dB
	6.1 GHz	-24.7 dB	6.1 GHz	-24.5 dB	6.0 GHz	-21.8 dB
$\epsilon_r = 2.25$	(2.3 GHz,7.0 GHz)		(2.2 GHz,7.4 GHz)		(2.2 GHz,7.2 GHz)	
	2.5 GHz	-14.0 dB	2.5 GHz	-15.0 dB	2.5 GHz	-15.1 dB
	4.0 GHz	-23.3 dB	3.8 GHz	-20.4 dB	3.8 GHz	-19.2 dB
$\epsilon_r = 4.4$	(2.2 GHz,>8 GHz)		(2.2 GHz,6.8 GHz)		(2.2 GHz,6.5 GHz)	
	2.5 GHz	-16.7 dB	2.4 GHz	-19.0 dB	2.5 GHz	-20.2 dB
	3.6 GHz	-20.0 dB	3.3 GHz	-18.4 dB	3.2 GHz	-17.5 dB
	5.3 GHz	-14.1 dB	6.0 GHz	-18.2 dB	5.8 GHz	-19.5 dB

4. 结 论

本文研究了加载异向介质地板 PIFA 的新型辐射特性. 通过对 PIFA 传输线模型的修正分析,从物

理上有效地解释了该 PIFA 带宽性能提高. 数值与实测数据表明,这种天线 -10 dB 相对带宽达到了 100% 以上,谐振频率包含无线局域网络各通信标准及城域网 2—6 GHz 固定和移动宽带无线接入系统的应用载波频段,大幅度地提高了传统 PIFA 的窄

带局限. 在 2.4/2.5 GHz 时,这种天线将得到全向的辐射方向图,而在 3.8 GHz 和 5.1—5.8 GHz 频带内,这种天线将具有后向辐射特性. 最后,对异向介

质地板各参量影响下的 PIFA 辐射特性也做了详尽的讨论并给出了仿真结果.

[1] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773

[2] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509

[3] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77

[4] Yang R, Xie Y J, Li X F, Wang Y Y, Wang R, Jiang J 2008 *Europhys. Lett.* **84** 34001

[5] Yang R, Xie Y J, Yang X D, Wang R, Chen B T 2009 *Opt. Express* **17** 6101

[6] Zhang D K, Zhang Y W, He L, Li H Q, Chen H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 772 (in Chinese) [张东科、张冶文、赫 丽、李宏强、陈 鸿 2005 物理学报 **54** 772]

[7] Zhuang F, Shen J Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 955 (in Chinese) [庄 飞、沈建其 2005 物理学报 **54** 955]

[8] Zheng Q, Zhao X P, Fu Q H, Zhao Q, Kang L, Li M M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5683 (in Chinese) [郑 晴、赵晓鹏、付全红、赵 乾、康 雷、李明明 2005 物理学报 **54** 5683]

[9] Zhang G M, Peng J C, Jian Z J, Huang X Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1846 (in Chinese) [张高明、彭景翠、翦知渐、黄小益 2006 物理学报 **55** 1846]

[10] Meng F Y, Wu Q, Wu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2194 (in Chinese) [孟繁义、吴 群、吴 健 2006 物理学报 **55** 2194]

[11] Cao J X, Hu W, Luo H L, Yang X B 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2131 (in Chinese) [曹京晓、胡 巍、罗海陆、杨湘波 2007 物理学报 **56** 2131]

[12] Dai X Y, Wen S C, Xiang Y J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 186 (in Chinese) [戴小玉、文双春、项元江 2007 物理学报 **57** 186]

[13] Zhang C M, Sun M Z, Yuan Z L, Song X P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1758 (in Chinese) [张淳民、孙明昭、袁志林、宋晓平 2009 物理学报 **58** 1758]

[14] Wu M F, Meng F Y, Wu Q, Wu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6368 (in Chinese) [武明峰、孟繁义、吴 群、吴 健 2006 物理学报 **55** 6368]

[15] Yang R, Xie Y J, Wang P, Li L 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 064108

[16] Komulainen M, Berg M, Jantunen H, Salonen E T, Free C 2008 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **56** 944

[17] Pazin L, Telzhensky N, Leviatan Y 2008 *IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett.* **7** 197

[18] Wang Y S, Lee M C, Chung S J 2007 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **55** 805

[19] Hao Y, Zhao Y, Lee Y J, Youngs L J 2007 *Loughborough Antennas Propag. Conf.* 57

[20] Tretyakov S A, Ermutlu M 2005 *IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett.* **4** 266

[21] Yang R, Xie Y J, Wang P, Yang T M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4504 (in Chinese) [杨锐、谢拥军、王鹏、杨同敏 2007 物理学报 **56** 4504]

Ultra wideband planar inverted-F antenna with metamaterials loading^{*}

Yang Rui[†] Xie Yong-Jun Hu Hai-Peng Wang Rui Man Ming-Yuan Wu Zhao-Hai

(*National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

(Received 23 July 2009; revised manuscript received 22 August 2009)

Abstract

Metamaterial ground plane is introduced to planar inverted-F antenna (PIFA) design to explore the potential improvement in radiation. Through replacing the conventional capacitance by a metamaterial resonance circuit, the modified PIFA transmission line model physically interprets its novel properties. As is shown, such metamaterial PIFA exhibits a -10 dB return loss for more than 100% of bandwidth with resonance covering all wireless local area network applications and broadband wireless access from 2 GHz to 6 GHz. Nearly omnidirectional radiation pattern is achieved at 2.4/2.5 GHz, but mainly backward radiation is obtained at 3.8 GHz and 5.1—5.8 GHz.

Keywords: metamaterials, transmission line model, planar inverted-F antenna, ultra wideband

PACC: 4110H

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60771040) and State Key Laboratory Foundation (Grant No. 9140C0704060804).

[†] E-mail: mattomato811118@yahoo.com.cn