

太赫兹无线通信系统中的反射器研究 *

张 戎 黎 华 曹俊诚[†] 封松林

(信息功能材料国家重点实验室,中国科学院上海微系统与信息技术研究所,上海 200050)

(2008年9月12日收到 2008年11月24日收到修改稿)

采用传输矩阵方法和菲涅尔公式,根据 THz 频段不同区域内材料折射率的特点,计算模拟了聚合体聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF)聚碳酸酯(polycarbonate, PC)一维光子晶体对 THz 波的反射作用。结果表明这种反射器在亚太赫兹频段具有较好的反射性能和较大的反射带宽。此外,根据计算结果,本文还对 THz 反射器的理论研究和设计进行了讨论。

关键词: 太赫兹反射器, 太赫兹无线通信, 一维光子晶体

PACC: 4225G, 4280S

1. 引 言

近 25 年来,短程无线通信系统的带宽需求呈几何级数增长,平均每 18 个月增长一倍。按照这种趋势,未来 10 年内将达到 15 Gbps 的无线数据传输率^[1]。目前已有的或新出现的系统如蓝牙、无线局域网(WLANs)、无线个人局域网(WPANs)、超宽带无载波通信(UWB)等使用的带宽均在数 MHz 和数 GHz 之间^[2-4],并不能提供足够高的数据传输率以满足未来的需要,而数 10 GHz 的通信系统尚未广泛应用^[5],但最多可以满足未来 10—15 年的带宽需求。可以预见,巨大的带宽需求必将推动短程宽带无线通信频段进入 THz 领域,THz 短程无线通信系统的研发与推广迫在眉睫。基于一些基本因素的考虑,特别是从链接预算上分析,THz 短程无线通信系统将与目前的 WLAN 和 WPAN 系统有着很大的差别。为了弥补 THz 波在空气中较高的损耗,将需要一个高增益的发射器,如基于肖特基二极管的倍频电路^[6]、InP 耿氏器件^[7]、太赫兹量子级联激光器(THzQCL)^[8-10]等,并且需要一个足够灵敏的探测器或接收天线,如基于肖特基二极管、高迁移率晶体管^[11]或太赫兹量子阱探测器(THzQWIP)^[12-14]等,同时采用点对点“瞄准线(line of sight)”的直线连接方

式。对于这样的系统,室内的物体如静态的家具或者移动的人都会成为直线连接的障碍,这种情况下就必须考虑包括反射在内的连接路径,但由于室内常见的物体表面如墙面的涂料等对 THz 的反射作用都很弱,所以需要研究一种高反射率的 THz 反射器(又称 THz 镜),用来覆盖在墙面上的一些特殊区域通过反射等非直线连接路径来维持已有的连接。目前较理想的 THz 反射器是聚合体 THz 介质镜,这是一种一维光子晶体,由介电常数不同的两种材料交替层叠而成,具有较高的反射率、较宽的反射带宽和全方位反射等优点,如文献[15]中提到的聚丙烯/高阻硅构成的介质镜就非常适合 330—370 GHz 频段无线通信的应用。

一维光子晶体对光的反射机理为光子禁带的产生,大的光子禁带要求光子晶体中不同材料的介电常数差别要大,同时材料的吸收损耗要小,因此以往的研究通常忽略掉材料的色散或者损耗,适用于一般介电常数随频率变化不大且损耗较小的材料。最近,文献[16]中提出了一种铁电全聚合体空心布拉格(PVDF/PC)光纤在 THz 波段具有非常好的传输性能,在一定程度上反映出这种材料组合对 THz 波较强的反射性能。由于 PVDF 特殊的介电常数特性,本文将采用传输矩阵方法和菲涅尔公式进行数值模拟,对这组材料组成的一维光子晶体在 THz 频段不

* 国家重点基础研究发展计划(批准号 2007CB310402)、国家自然科学基金创新群体项目(批准号 X0721004)和上海市基础研究重大项目(批准号 06dj14008)资助的课题。

† 通讯联系人 E-mail: jccao@mail.sism.ac.cn

同区域的反射性能进行了详细研究,期望得到一种性能优良的 THz 反射器.

2. 一维光子晶体带隙的传输矩阵理论

根据多层介质薄膜的传输矩阵理论^[17-19], 相邻两层界面处的电磁场有如下的关系:

$$\begin{bmatrix} E_n \\ H_n \end{bmatrix} = M_i \begin{bmatrix} E_{n+1} \\ H_{n+1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

n 表示第 n 层界面, $n + 1$ 表示第 $n + 1$ 层界面, $i = 1, 2$ 分别表示两种不同的材料, 折射率分别为 n_1, n_2 , 材料厚度分别为 h_1, h_2 .

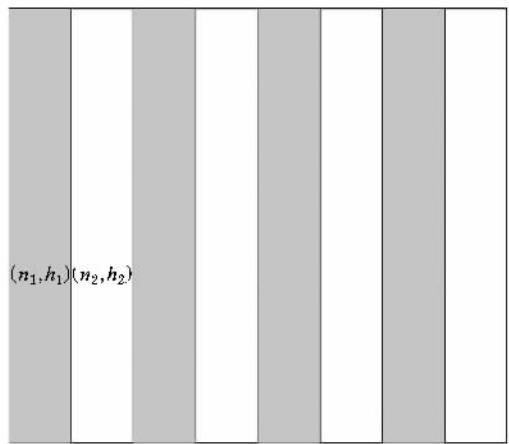


图 1 一维光子晶体结构示意图

M_i 为每一层的特征矩阵:

$$M_i = \begin{bmatrix} \cos\beta_i & -j \frac{\sin\beta_i}{P_i} \\ -j P_i \sin\beta_i & \cos\beta_i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中

$$\beta_i = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_i h_i \cos\theta_i, \quad (3)$$

$$P_i = \begin{cases} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_i \cos\theta_i, & \text{TE 波,} \\ \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_i / \cos\theta_i, & \text{TM 波,} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $n_i, h_i, \theta_i, \lambda_0$ 分别表示第 i 层的折射率、厚度、入射角和真空中的波长, j 为虚数符号, TE 和 TM 分别表示 s 方向偏振和 p 方向偏振.

若整个光子晶体有 N 个周期, 则传输矩阵可以写成

$$M = (M_1 M_2)^N = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

反射系数为

$$r = \frac{(M_{11} + M_{12} P_0) P_0 - (M_{21} + M_{22} P_0)}{(M_{11} + M_{12} P_0) P_0 + (M_{21} + M_{22} P_0)}, \quad (6)$$

其中 P_0 的表达式与 P_i 相同, 相应采用光子晶体外部材料的折射率和入射角.

3. 数值模拟方法

PC 的介电常数为 2.56, 且不随频率变化而改变. PVDF 是一种铁电材料, 随频率的介电响应为

$$\epsilon_{\text{PVDF}} = \epsilon_{\text{opt}} + \frac{(\epsilon_{\text{dc}} - \epsilon_{\text{opt}}) \omega_{\text{TO}}^2}{\omega_{\text{TO}}^2 - \omega^2 + j\gamma\omega}. \quad (7)$$

根据文献[16], $\epsilon_{\text{opt}} = 2.0$, $\epsilon_{\text{dc}} = 50.0$, $\omega_{\text{TO}} = 3.0$ THz, $\gamma = 0.1$ THz, 可以得到 PVDF 的折射率随频率响应关系($n = \sqrt{\epsilon}$), 如图 2 所示.

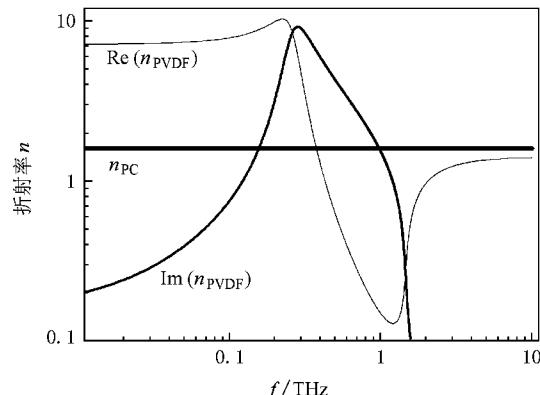


图 2 PVDF 与 PC 的介电常数随频率的变化关系

由此可见, PVDF 的折射率在 THz 频段随频率变化显著, 且存在明显的折射率虚部, 需要考虑 THz 波在其中的吸收损耗.

当电磁波入射到具有复数折射率的介质中时, 其折射角为一个复角, 电磁波在介质中的传播方向由折射率的实部和虚部共同决定. 根据折射定律

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2, \quad (8)$$

可得

$$\begin{aligned} n_2 \cos\theta_2 &= n_2 \sqrt{1 - \sin\theta_2^2} \\ &= \sqrt{n_2^2 - (n_2 \sin\theta_2)^2} \\ &= \sqrt{n_2^2 - (n_1 \sin\theta_1)^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

这样便可以利用光子晶体外部材料的折射率和入射角方便地求出 $n_2 \cos\theta_2$, 从而避免了在求解 β_i , P_i 时计算复折射角带来的麻烦.

目前,静态点对点的通信系统已达到60 GHz,但由于各种原因尚未得到广泛应用,100 GHz左右的高清电视也得到演示^[20],而300 GHz左右频段(275 GHz以上,比如受关注的330—370 GHz频段大气窗口)的短程无线通信则是未来的发展趋势。对于大于1 THz的区域,由于空气强烈的吸收,高的数据传输率已难以维持。另外,根据PVDF的折射率曲线图可以发现,在100 GHz附近PVDF的折射率实部远大于虚部,且与PC的折射率(1.6)差别较大,因此可以形成较大的光子禁带。在1 THz附近,折射率的虚部远大于实部,且实部小于空气折射率,下面会指出这种情况下会出现完全反射的现象,理论上具有较高的反射率;在2 THz附近,与在100 GHz附近类似,PVDF的折射率虚部远小于实部,且折射率实部与PC的折射率存在较明显差异,所以周期性的光子晶体结构反射器同样可以形成较大的光子禁带;而对于大于3 THz的区域,PVDF与PC的折射率相近,只能形成较小的反射带宽,不再适合用做反射器。所以根据短程无线通信的现状和发展趋势,以及PVDF材料的折射率特性,下面分别从100 GHz以下亚太赫兹频段,300 GHz附近和1 THz附近三个频段研究PVDF/PC太赫兹反射器的性能。

4. 反射率的模拟结果

4.1. 100 GHz以下亚太赫兹频段

根据多层膜反射理论,若忽略材料损耗,当光正入射时,取膜的光学厚度为四分之一波长时反射率最大,称为四分波条件。这里可以表示为

$$\operatorname{Re}(n_{\text{PVDF}}) d_{\text{PVDF}} = n_{\text{PC}} d_{\text{PC}} \\ = \lambda_0 / 4 = c / (4f), \quad (10)$$

Re表示取实部, d_{PVDF} , d_{PC} 表示层厚度。

如将某一特定频率 f_0 代入(10)式则可得出相应的 $(d_{\text{PVDF}})_0$ 和 $(d_{\text{PC}})_0$ 。理论上由这样的厚度层叠而成的光子晶体有一围绕 f_0 宽度为 Δf 的光子禁带,且在 f_0 反射率最大。所以,如果无线通信系统工作在60 GHz附近频段,根据四分波条件表达式可以计算出这种反射器应用在60 GHz附近范围内膜的最佳厚度,然后将膜厚作为已知条件与材料折射率(包含折射率虚部)一并代入传输矩阵进行计算,取周期数为5(下同),结果如图3所示。同样可以计算出100 GHz附近范围内的情况。

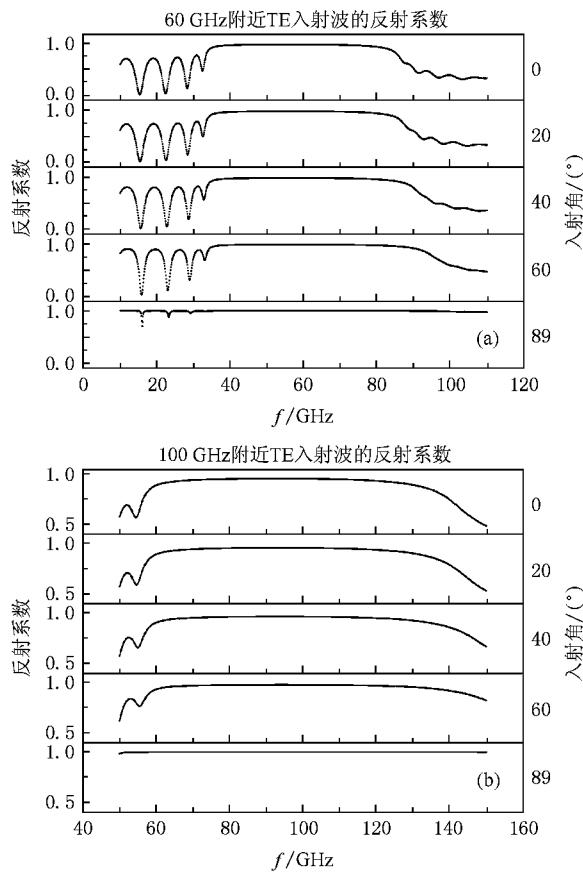


图3 (a) 60 GHz 和 (b) 100 GHz 附近 TE 波(s 方向偏振电磁波)的反射系数随频率的变化关系(其中角度表示入射角)

可见,由于100 GHz以下区域PVDF的折射率虚部相对较小,实部与PC的折射率差别也很大,因此能够形成很大的光子禁带,而较低的损耗对光子禁带影响不大。如在60 GHz附近有大于40 GHz的区域反射率在95%以上,在100 GHz附近有接近70 GHz的区域反射率在93%以上,相比较而言,由于100 GHz处PVDF的折射率虚部稍大,吸收损耗较大,反射率较低,但仍具有很好的反射性能。对于TM入射波(p 方向偏振的电磁波)也有类似的结果。

4.2. 330—370 GHz 频段

观察PVDF折射率随频率变化图可以发现,在300 GHz附近材料具有很大的虚部折射率。如果不考虑损耗,根据四分波条件而形成的一维光子晶体的反射特性将如图4(a)所示,在300—370 GHz区间内存在一个光子禁带,具有很高的反射率。但如考虑到损耗,结果则大为不同,如图4(b)所示。300—370 GHz间光子禁带不再存在,这主要是由于在高损耗的情况下,电磁波进入介质后很快衰减,近乎被限

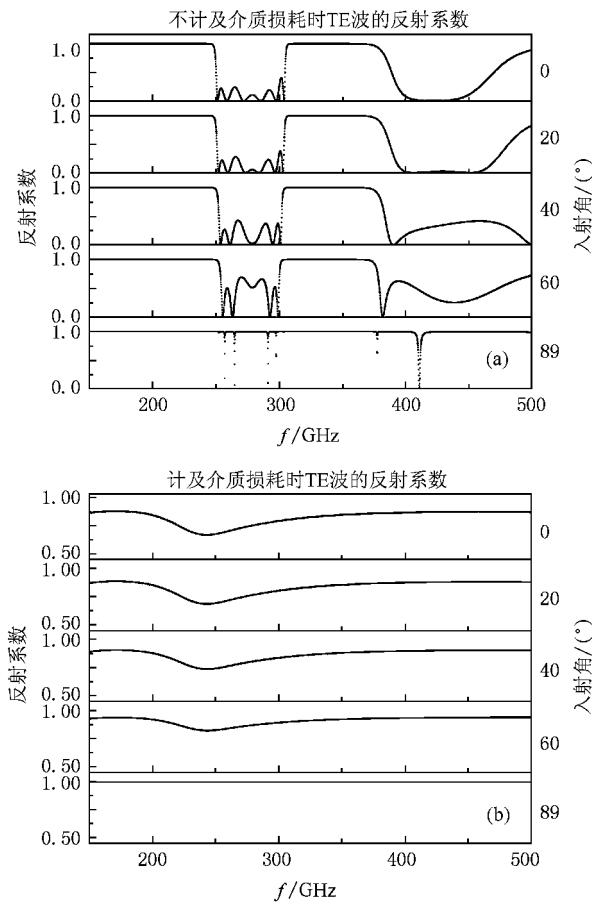


图 4 反射率随频率变化关系图(其中角度表示入射角) (a) 不考虑 PVDF 的折射率虚部的计算结果 (b) 计入折射率虚部的正常情况

制在介质表面附近而无法达到下层介质中,自然多层膜的结构不再起作用,只与表面单层有关。这样的膜被称为“厚膜”,其反射率几乎就是膜层无限厚时的值。

对比单 PVDF 材料的反射系数图(图 5),可以发现图 4(b)与图 5 在 250—500 GHz 区域内基本一致,而图 4(b)中小于 200 GHz 部分较高的反射率主要是因为 200 GHz 以下介质损耗较小同时波长相对较长,电磁波穿透到下层介质,光子禁带

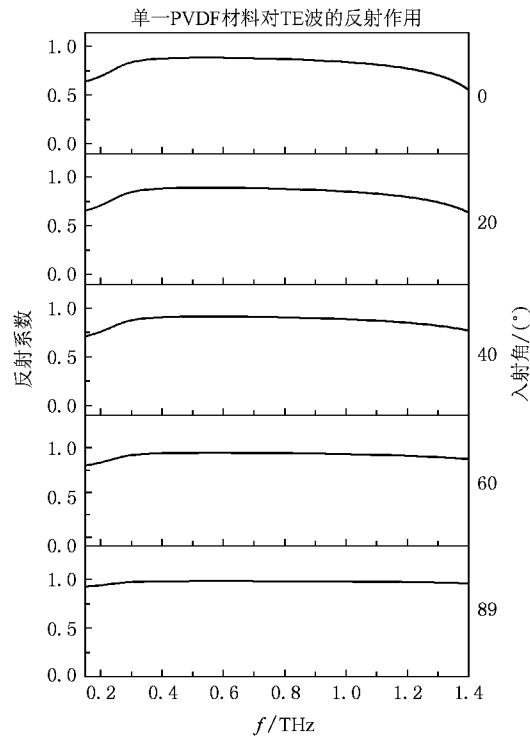


图 5 单一 PVDF 材料对电磁波的反射率(其中角度表示入射角)

得以形成。

计算结果表明,在 300 GHz 附近,由于 PVDF 材料较高的吸收损耗使得一维光子晶体结构不再起作用,只与 PVDF 材料的反射系数有关。当入射角小于 40 度时,PVDF 的反射系数不尽人意,只有约 80% 左右,而对于 TM 模反射系数更低,因此这种材料不适用于用作这一频段的 THz 反射器。

4.3. 0.6—1.2 THz 频段

在 1 THz 附近,PVDF 的折射率实部较小,甚至小于空气折射率,而虚部相对较大。考虑到前面的计算结果,较大的虚部势必会造成光子禁带无法形成。但由于相对较大的折射率虚部且实部甚小,根据菲涅尔公式,对于纯虚数的折射率,假定 $n_1 = a + bi$:

$$r_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} = \frac{\sqrt{a^2 - (a \sin \theta_1)^2} - j \sqrt{b^2 + (a \sin \theta_1)^2}}{\sqrt{a^2 - (a \sin \theta_1)^2} + j \sqrt{b^2 + (a \sin \theta_1)^2}} = \frac{x - jy}{x + jy}, \quad (11)$$

所以有

$$R_{\perp} = |r_{\perp}|^2 = 1. \quad (12)$$

对于 R_{\parallel} 也有类似的结果,因此材料将表现出与入射角和偏振无关的完全反射,PVDF 材料在 1

THz 附近正好具有类似这样的特性。

计算结果已表示在图 5 中,在这一频率区域内反射系数随频率的增加下降,1 THz 时 0°角入射的反射系数为 0.83,随着入射角增大,反射系数也逐渐增大超过 90%,总体来看反射效率也不是很理想。可见 PVDF 用作空心波导覆层时由于较大的入射角($\sim 89^\circ$)而具有很好的反射性能,但由于与“折射率为纯虚数”这一理想条件存在一些差异,所以若用作全方位的反射器,性能尚有欠缺。

另外对于 2—2.6 THz 的频率区域,由于与 100 GHz 以下情况类似,PVDF 的折射率虚部很小,实部与 PC 折射率存在一定差异,从而能够形成光子禁带,具有较高的反射率。而由于材料折射率差异不如 100 GHz 以下情况大,所以禁带宽度较小。但实际上对于较高的频率,强烈的衰减会使通信连接极其不稳定,所以大于 1 THz 的频率范围已不再适合室内宽带无线通信。

5. 结 论

材料的色散和吸收损耗会对光子晶体的禁带产

生不同程度的影响,较低的损耗会影响禁带的位置和宽度,并在一定程度上降低反射率,而较大的损耗则会使禁带无法形成。PVDF 材料由于其非常有趣的介电常数频率响应特性,在 THz 频段的不同区域有着不同的反射特性。理论计算表明,PVDF/PC 组成的一维光子晶体适合用作亚太赫兹频段的反射器,反射效率高且反射带宽大,而对于较高的频段,其反射效率在入射角度较小时下降到约 80% 左右,性能不太理想。一维光子晶体一般理论指出,在周期一定的情况下,两种材料折射率差异越大则形成光子禁带越大;而若折射率差异一定,则周期数越多光子禁带也会相应增大,但存在一个极限^[21]。所以,根据理论和本文的计算结果,良好的 THz 反射器的材料除了需要具有良好的物理柔韧性外(可以伪装为墙纸等,粘贴在房间内特定位置),首先要求一定的折射率差异从而具备形成较大的光子禁带的可能,同时还要求材料有较小的吸收损耗以保证多层膜的结构能产生作用。另外在实际应用中综合考虑成本与性能,适当增加周期数,器件性能也会得到一定的改善。

- [1] Piesiewicz R, Kleine-Ostmann T, Krumbholz N, Mittleman D, Koch M, Schoebel J, Kürner T 2007 *IEEE Antennas Propag. M.* **49** 24
- [2] WWiSE IEEE 802.11n Proposal, IEEE 802.11-05/0150rl, March 2005
- [3] PHY Proposal to IEEE 802.15.3a, IEEE 802.15-03/I05rl, March 2003
- [4] O'Brien D C, Faulkner G E, Jim K, Zyambo E B, Edwards D J, Whitehead M, Stavrinou P, Parry G, Bellon J, Sibley M J, Lalithambika V A, Joyner V M, Samsudin R J, Holburn D M, Mears R J 2003 *IEEE Commun. Mag.* **41** 58
- [5] Smulders P 2002 *IEEE Commun. Mag.* **40** 140
- [6] Ward J, Schlecht E, Chattopadhyay G, Maestrini A, Gill J, Maiwald F, Javadi H, Mehdi I 2004 *IEEE MTT-S Digest* **3** 1587
- [7] Eisele H, Kamoua R 2004 *IEEE T. Microw. Theory* **52** 2371
- [8] Williams B S 2007 *Nature Photonics* **1** 517
- [9] Li H, Cao J C, Han Y J, Guo X G, Tan Z Y, Lü J T, Luo H, Laframboise S R, Liu H C 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 043101
- [10] Cao J C, Li H, Han Y J 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 953
- [11] Ma M R, Chen Y L, Wang L M, Wang C 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1854
- [12] Liu H C, Song C Y, SpringThorpe A J, Cao J C 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 4068
- [13] Cao J C 2006 *Physics* **35** 953 (in Chinese) [曹俊诚 2006 物理 **35** 953]
- [14] Tan Z Y, Cao J C 2008 *Physics* **37** 199 (in Chinese) [谭智勇、曹俊诚 2008 物理 **37** 199]
- [15] Krumbholz N, Gerlach K, Rutz F, Koch M, Piesiewicz R, Kürner T, Mittleman D 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 202905
- [16] Skorobogatiy M, Dupuis A 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 113514
- [17] Ji J R 2007 *Advanced Optics* (Beijing: Science Press) p132 (in Chinese) [季家铭 2007 高等光学教程(北京 科学出版社)第 132 页]
- [18] Wang H, Li Y P 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2172 (in Chinese) [王辉、李永平 2001 物理学报 **50** 2172]
- [19] Wang T B, Liu N H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5878 (in Chinese) [王同标、刘念华 2007 物理学报 **56** 5878]
- [20] Hirata A, Kosugi T, Takahashi H, Yamaguchi R, Nakajima F, Furuta T, Ito H, Sugahara H, Sato Y, Nagatsuma T 2006 *IEEE T. Microw. Theory* **54** 1937
- [21] Pavese L, La Revista del N 1997 *Cimento* **20** 18

Research on reflectors in terahertz wireless communication systems^{*}

Zhang Rong Li Hua Cao Jun-Cheng[†] Feng Song-Lin

(State-Key Laboratory of Functional Materials for Informatics , Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 200050 , China)

(Received 12 September 2008 ; revised manuscript received 24 November 2008)

Abstract

Terahertz (THz) wireless communication system , which exhibits great potential in the future short-range wireless communications , is known to be a kind of ultra-broadband system with high data rates . THz sources , modulators and detectors are key elements in these systems , while in order to maintain high-quality connection , the THz reflectors are also very important . Here , a reflector which is a kind of one-dimensional photonic crystal made of polyvinylidene fluoride (PVDF)/polycarbonate (PC) is studied carefully . According to the refractive indices of materials in the THz range , the reflection coefficients for THz waves are obtained through transfer-matrix method and Fresnel formula calculation . We demonstrate that , in sub-THz waveband , this device shows high performance and wide reflection band . Furthermore , based on the calculation , the research and the design of THz reflectors are also discussed in this article .

Keywords : terahertz reflectors , terahertz wireless communication , one-dimensional photonic crystal

PACC : 4225G , 4280S

* Project supported by the Special Funds for Major State Basic Research Project (Grant No. 2007CB310402) , the Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60721004) , and the Shanghai Municipal Commission of Science and Technology (Grant No. 06dj14008).

† Corresponding author , E-mail : jccao@mail.sim.ac.cn