

THz 波段的 F-P 光子晶体滤波器^{*}

周 梅¹⁾ 陈效双^{2)†} 王少伟²⁾ 张建标²⁾ 陆 卫²⁾

1) 中国农业大学理学院应用物理系, 北京 100083)

2) 中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

(2005 年 11 月 23 日收到, 2005 年 12 月 11 日收到修改稿)

理论上设计了一系列一维非周期光子晶体, 这些光子晶体具有超窄带滤波的特性, 并利用成熟的半导体工艺制备出了具有此性能的滤波器. 通过比对理论和实验上的透射光谱, 得到了两者符合较好的结果.

关键词: THz 波段, F-P 滤波器, 非周期, 光子带隙

PACC: 7820P, 4270Q

1. 引言

THz (Terahertz) 波段是介于红外与微波之间的一个波段, 其频率范围一般在 0.1—10 THz (1 THz = 10^{12} Hz), 具有广泛的应用前景, 而以往却是研究得最少. 由于最近发现 THz 波段在医学影像、化学检测与分析、天文学甚至无线通讯等领域有着巨大的应用潜力^[1-3], 使得人们对该领域产生了很大的兴趣. 最近 THz 波段激光器 (4.4 THz) 的研制成功^[1], 无疑将对该领域起到极大的促进作用. 众所周知, 对于任何波段电磁波的应用都有三个重要环节: 光源、传输和探测, 只有对这三个重要环节的研究都有所突破, 才能真正实现 THz 波段的应用. 目前对 THz 波段的研究主要集中在 THz 光源和探测上, 控制其传输方面的研究相对较少.

光子带隙作为光子晶体的一个基本特性, 具有控制电磁波传输的能力^[4-6], 可应用于如滤波器、偏振器及反射器等许多光学元件^[7-10], 因此对 THz 波段光子晶体的研究有利于人们对 THz 波段电磁波传输的调控. 尽管大部分光子晶体材料的实验研究都集中在微波^[9, 11, 12]、红外^[13, 14]及可见^[15, 16]波段, 但是最近, 人们也通过微机械加工^[17]、激光快速原位成形 (laser rapid prototyping) 等方法^[8, 18, 19]制备出了 THz 波段的光子晶体, 这些对 THz 波段光子晶体的

研究和应用都具有相当重要的意义.

作为最简单的一维光子晶体, 其理论研究和实验研究都已经比较成熟^[20], 而且早在光子晶体的概念提出之前就已经得到广泛应用. 比如光学薄膜中的 $\lambda/4$ 高反膜就属于一种特殊结构的一维光子晶体, 在激光和光学设备中应用广泛. 然而, 这种多层膜的高反区 (反射率高于 95% 的区域, high refractive region, HRR) 较窄, 除了增大高、低折射率层的折射率反差外^[21], 如果适当地引入无序, 也可以使 HRR 变宽^[6, 22]. 当前对一维系统光局域的理论^[23-30]和实验^[31]研究表明, 如果在一维多层周期膜系 (一维光子晶体) 中引入无序, 光就会被局域起来. 因此, 可以利用这种特性, 来实现光子晶体的一些特殊用途. 本文就是利用这样的特性, 在理论上设计了 THz 波段的 F-P 光子晶体滤波器, 并借助于成熟的半导体工艺制备出具备此性质的样品.

2. THz 波段 F-P 滤波器的设计

常规的超窄带通滤光片多采用类似于 F-P 干涉仪的结构, 即在两个 $\lambda/4$ 膜系构造的高反射层间夹共振腔的设计. 这种设计可以给出带宽非常窄的滤光片, 但它对膜系中厚度的涨落非常敏感. 只要膜层厚度出现微小的涨落, 就会使滤光片的性能明显退化. 为此, 我们提出用非周期型的膜系替代常规的两

^{*} 国家重点基础研究发展规划 (973) 批准号: 2001CB61040), 中国科学院“百人计划”基金 (批准号: 200012), 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 30234040), 上海科学技术委员会重点基金项目 (批准号: 02DJ14066) 和上海市自然科学基金 (批准号: 03ZR14023) 资助的课题.

[†] E-mail: xschen@mail.sitp.ac.cn

个 $\lambda/4$ 膜系和中间的共振腔层,来构造 THz 波段的超窄带通滤光片.所谓非周期型的膜系是指相对于 $\lambda/4$ 膜系等规整的周期膜系有一个随机的涨落.这种膜系同样可以得出带宽非常窄的滤光片,而且大大降低了滤光片对膜层厚度涨落的敏感度.我们选择与半导体集成工艺相兼容的硅材料($\text{Si}, n = 3.4, k = 1 \times 10^{-7}$)和空气($n = 1.0, k = 0$)来设计 THz 波段 F-P 滤波器.根据已知材料的折射率,定出各层介质材料四分之一波长的物理厚度 $d_i = \lambda/(4n_i)$,其中 λ 为透射峰的中心波长,在这里我们取值为 $113\mu\text{m}$; n_i 为第 i 层介质的折射率.然后对 d_i 进行随机变化,由此可以获得各层介质厚度的初始值.再结合预先

设置的超窄带通滤光片的目标透射谱曲线,经过随机探索式的优化后,就可以获得如表 1 所示的各介质层厚度.本文研究了 a, b, c 三种结构.三个膜系相应的理论透射谱如图 1 所示, $113\mu\text{m}$ 处的透射率高于 97%, 结构 a 的半峰宽为 7nm, $\Delta\lambda/\lambda < 7 \times 10^{-5}$.除此峰之外,在 78— $210\mu\text{m}$ 之间透射谱的透射率都低于 1%.从这几个结构的透射图中可以看出随着层数的减少,透射峰的中心波长的半峰宽不断展宽,但是其透射率没有很大的变化.从半峰宽的公式中很容易理解,半峰宽与滤光片的厚度 h 成反比,所以要想得到单色性更好的器件可以增加层数来实现.

表 1 所设计透射峰位 $113\mu\text{m}$ F-P 滤波器的膜系(单位: μm)															
材料	Si	Air	Si	Air	Si	Air	Si	Air	Si	Air	Si	Air	Si	Air	Si
a	24	26	25	25	9	25	9	57	9	25	9	25	25	26	24
b			11	29	8	28	8	57	8	28	8	29	11		
c					9	29	8	57	8	29	9				

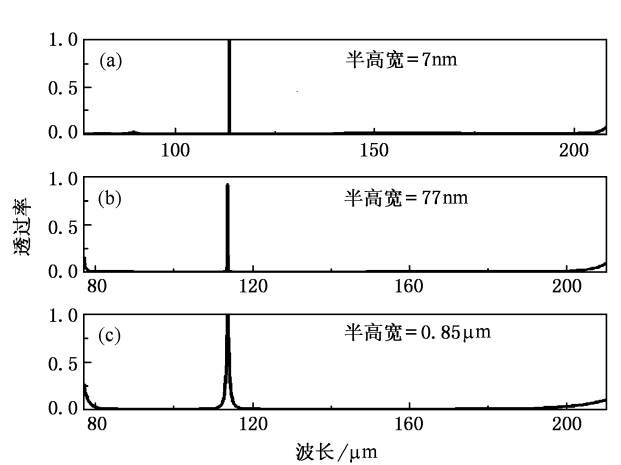


图 1 理论设计的透射峰位于 $113\mu\text{m}$ 的透射光谱

3. THz 波段 F-P 滤波器的制备

以上膜系的设计和对存在随机厚度涨落时的统计结果表明,膜系的制备确实可行,因此我们利用文献[32]中反应离子刻蚀设备对表 1 的膜系进行刻蚀.图 2 是我们制备样品的示意图,样品长 2cm,其中支撑部分长 1cm,有结构部分长 1cm.图 3 是电子显微照片,图 3(a)是结构 b 的 F-P 滤波器,从图中可以看出制备的样品从左到右每层膜厚比较均匀,而且样品上下的厚度均匀性很好.这说明了在样品的制备过程中从刻蚀开始到刻蚀结束的均匀性很

好.在显微镜下测量了样品的每一层厚度,可以知道所制备的样品尺寸涨落在 2%—11% 变化,基本上符合制备前的估计.

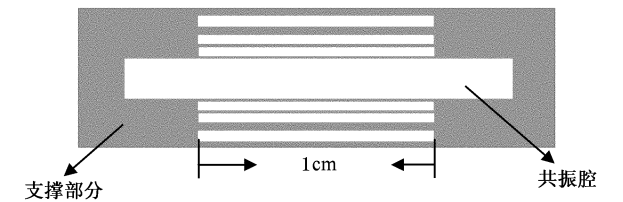


图 2 结构 b 样品的平面示意图(灰色表示硅,白色表示空气)

4. THz 波段 F-P 滤波器的性质表征

因单个样品的高度只有 $120\mu\text{m}$ (见图 4),而普通的红外傅里叶光谱仪的光斑尺寸约为 3mm,都无法满足测试单个样品的要求.只能将单个样品叠加起来,直到尺寸大于 3mm,然后将叠加后的样品固定在测试平台上.中红外光谱测试所用的仪器是 Bruker IFS 66v/s FTIR 光谱仪,探测器是 FIR DTGS,光源是硅碳棒,测量范围 $400\text{—}8000\text{cm}^{-1}$ ($1.25\text{—}25\mu\text{m}$).远红外光谱是在 Necolet 公司的 FT-IR20SX 光谱仪上测量的,光源是汞灯,探测器是 TGS,测量范围 $40\text{—}400\text{cm}^{-1}$ ($25\text{—}250\mu\text{m}$).同时也用 THz 波段的光谱仪测试了样品,测试条件是:GaAs 光源,ZnTe 晶体探测器,BS 偏振分束器,测量范围 $0\text{—}70\text{cm}^{-1}$

(大于 $143\mu\text{m}$).

图 4 是样品测试示意图,箭头表示入射光.图 5

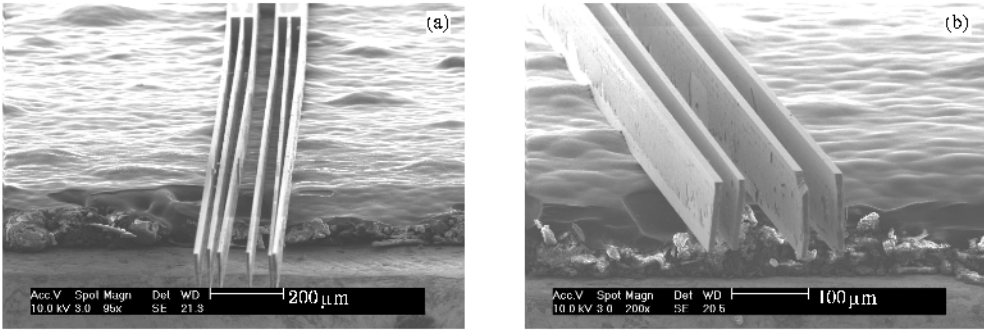


图 3 F-P 光子晶体滤波器的电子显微(SEM)照片

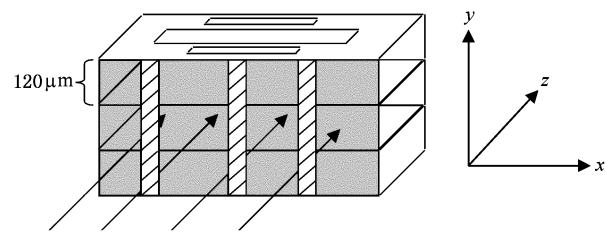


图 4 测试示意图(箭头表示入射光 ;不同条状阴影区表示厚度不同 ,单个样品的厚度为 $120\mu\text{m}$)

是样品 a 中红外和远红外波段测量的光谱图 ,实线是理论计算的谱线 ,短线是实验测量的谱线 .在第二部分理论设计中仅考虑到了单个 F-P 滤波器每层厚度的涨落对其滤波性能的影响 ,并未考虑多个滤波器叠加在一起后 ,不同滤波器之间厚度涨落的因素 .测试仪器的光入射到样品上后(见图 4),沿着 x 轴的相同位置的透射光谱是光通过多个不同厚度滤波器的叠加平均 ,而不同位置的滤波器之间厚度的涨落对透射峰也存在一个叠加平均影响 ,所以探测器探测到的是透射光谱的叠加平均 .除了考虑以上因素外 ,还必需考虑入射光的角度 .因为理论计算中的入射光是平行光 ,而在光谱测量中 ,入射光不可能是严格的平行光 ,还有一定的角度 .图 5 中理论光谱是考虑了厚度涨落和入射光角度两个因素后的理论光谱 .图 5 比较了考虑光谱叠加后的理论计算光谱和实验测量光谱 ,两者在中红外波段的透射峰位比较符合 .理论计算在 $10\mu\text{m}$ 处出现了透射抑制区 ,同样在实验测量中 ,在这个位置也出现了透射降低 .图 5 (b) 远红外波段 ,透射峰主要集中在 $20\text{—}75\mu\text{m}$ 之间 .在这个波段理论计算和实验测量光谱也是符合的 .在 $80\text{—}225\mu\text{m}$ 之间没有透射 ,没有出现第二部分理论设计中 $113\mu\text{m}$ 处的透射峰 .这是因为 F-P 滤波器

不同位置的透射光谱以及不同角度光入射后的光谱

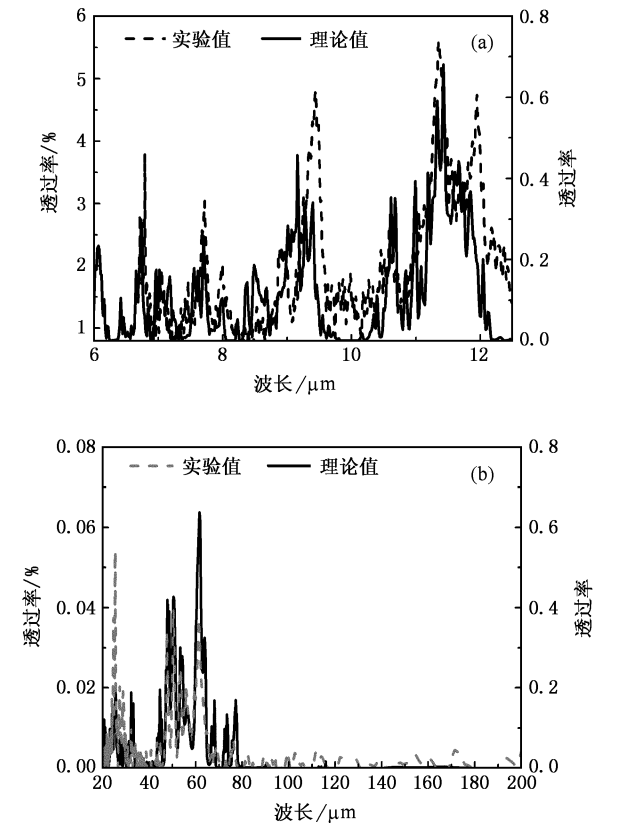


图 5 样品 b 的中红外 (a) 和远红外 (b) 的透射光谱

叠加 ,在 $113\mu\text{m}$ 处的透射峰被平均掉了 .也就是说考虑到实际测量中出现的因素后 ,比如单个滤波器中硅膜厚度和空气膜厚度涨落引起在这个位置的透射峰移动 ,相同结构的多个滤波器之间厚度的微小涨落导致透射峰出现在不同的位置 ,光谱叠加后出现在这个位置的透射强度就大大下降了 ;还有入射光的角度也同样导致这样的效果 ,这些因素的综合结果使得此位置的透射峰消失 .

5. 结 论

本文以硅和空气为材料设计了透射峰为 $113\mu\text{m}$ 非周期的 THz 波段的 F-P 滤波器,透射峰的透射率高于 95%,样品 a, b, c 半峰宽分别为 7nm, 77nm,

850nm.除此峰外,在 $77\text{--}210\mu\text{m}$ 之间的高反区的透射率都低于 1%.利用文献 [32] 中的设备制备出三种结构的样品,从 SEM 上显示,制备样品的尺寸涨落在理论设计考虑范围内.用红外光谱仪表征了样品的透射光谱特性,与理论计算光谱基本一致.并分析了所设计的 $113\mu\text{m}$ 透射峰未被测量到的原因.

-
- [1] Köhler R, Tredicucci A, Beltram F, Beere H E, Linfield E H, Davies A G, Ritchie D A, Iotti R C, Rossi F, 2002 *Nature* **417** 156
- [2] Carlo Sirtori 2002 *Nature* **417** 132
- [3] Jiang Z, Zhang X C 1998 *Opt. Lett.* **23** 1114
- [4] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [5] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [6] Li H Q, Gu G C, Chen H, Zhu S Y 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 3260
- [7] Joannopoulos J D, Villeneuve P R, Fan S 1997 *Nature* **386** 143
- [8] Sandhya Gupta, Tuttle G, Sigalas M, Ho K M 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 2412
- [9] Özbay E, Michel E, Tuttle E, Biswas R, Sigalas M, Ho K M 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 2059
- [10] Zhu S Y, Chen H, Huang H 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 205
- [11] Kao A, McIntosh K A, McMahon O B, Atkins R, Verghese S 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 145
- [12] Guida G, Brillat T, Ammouche A, Gadot F, De Lustrac A, Priou A 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 4491
- [13] Rosenberg A, Tonucci R J, Lin H B, Shirley E L 1996 *Phys. Rev. B* **54** R5195
- [14] Grüning U, Lehmann V, Engelhardt C M 1995 *Appl. Phys. Lett.* **66** 3254
- [15] Alasov Y A, Bo X Z, Sturm J C, Norris D J 2001 *Nature* **414** 289
- [16] Barra A, Cassagne D, Jouanin C 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 627
- [17] Chi C C, Wang H D, Pai S S *et al* 2002 *Proceedings of SPIE* **4643** 19
- [18] Jin C J, Cheng B, Li Z, Zhang D, Li L M, Zhang Z Q 1999 *Optics Communications* **166** 9
- [19] Wanke M C, Lehmann O, Müller K, Wen Q, Stuke M 1997 *Science* **275** 1284
- [20] Gu P F, Qin X Y, Chen H X *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 773 (in Chinese) [顾培夫、秦晓芸、陈海星等 2005 物理学报 **54** 773]
- [21] Yeh P 1988 *Optical Waves in Layered Media* (New York : Wiley)
- [22] Feng Z F, Wang Q Y, Feng S, Cheng B Y, Zhang D Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **54** 1583 (in Chinese) [冯志芳、王义全、冯 帅、程丙英、张道中 2004 物理学报 **54** 1583]
- [23] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [24] Soukoulis C M 1993 *Photonic Band Gaps and Localization* (New York : Plenum)
- [25] Frigerio J M, Rivory J, Sheng P 1993 *Optics Communications* **98** 231
- [26] Kondilis A, Tzanetakis P 1992 *Phys. Rev. B* **46** 15426
- [27] Kondilis A, Tzanetakis P 1994 *J. Opt. Soc. Am. A* **11** 1661
- [28] Zhang D Z, Hu W, Zhang Y L, Li Z L, Chen B Y, Yang G Z 1994 *Phys. Rev. B* **50** 9810
- [29] Sheng P, White B, Zhang Z Q, Papanicolaou G 1990 *Scattering and Localization of Classic Waves in Random Media*, edited by P. Sheng (Singapore : World Scientific) p563
- [30] McGurn A R, Christensen K T, Mueller F M, Maradudin A A 1993 *Phys. Rev. B* **47** 13120
- [31] Zhang D Z, Li Z L, Hu W, Cheng B Y 1995 *Appl. Phys. Lett.* **67** 2431
- [32] Zhou M, Chen X S, Xu Jing, Lu W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3583 (in Chinese) [周 梅、陈效双、徐 靖、陆 卫 2004 物理学报 **53** 3583]

F-P photonic crystal filter in terahertz region ^{*}

Zhou Mei¹⁾ Chen Xiao-Shuang^{2)†} Wang Shao-Wei²⁾ Zhang Jian-Biao²⁾ Lu Wei²⁾

¹⁾ *Physics Department of China Agriculture University, Beijing 100083, China*

²⁾ *National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*

(Received 23 November 2005 ; revised manuscript received 11 December 2005)

Abstract

A series of one-dimensional disordered photonic crystals were designed for use as filters. We prepared the filters experimentally and measured the transmission characteristic of the filters by using infrared spectrometer. The experimental results are in agreement with the calculation results.

Keywords : THz region , F-P filter , non-periodic , photonic band gap

PACC : 7820P , 4270Q

^{*} Project supported by the National Key Program for Basic Research of China (Grant No. 2001CB61040), the One-hundred-person Project of Chinese Academy of Sciences (Grant No. 200012), Key Fund of Chinese National Science Foundation (Grant No. 10234040), the Key Fund of Shanghai Science and Technology Foundation (Grant No. 02DJ14066), and the Shanghai Natural Science Foundation (Grant No. 03ZR14023).

[†] E-mail : xschen@mail.sitp.ac.cn