

太赫兹微加工波导滤波器

杜亦佳^① 鲍景富*^① 赵兴海^② 郑英彬^②

^①(电子科技大学 成都 611731)

^②(中国工程物理研究院电子工程研究所 绵阳 621900)

摘要: 该文提出应用微加工(Micromachining)技术设计制作太赫兹6阶并联电感耦合波导带通滤波器的方法。立足于现有工艺条件,通过分析加工因素对滤波器电磁性能的影响,将工艺和设计参数相互折中达到优化设计的目的,避免因工艺原因造成的器件性能急剧恶化,最终得到插入损耗小、可靠性好、可集成的太赫兹滤波器。采用微加工深刻蚀(ICP)、溅射电镀金属、键合等工艺步骤,最终制作完成的单个微加工滤波器划片后体积为24.0 mm×5.0 mm×1.66 mm。应用可调测试夹具固定微加工滤波器,通过功率计测试其功率衰减,得到其中心频率为141.5 GHz,3 dB带宽为10.6%,中心频率处功率衰减小于1 dB,验证了工艺方法的有效性。

关键词: 微加工技术; 太赫兹器件; 波导滤波器

中图分类号: TN713.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)03-0728-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00832

Terahertz Micromachined Waveguide Filter

Du Yi-jia^① Bao Jing-fu^① Zhao Xing-hai^② Zheng Ying-bin^②

^①(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

^②(China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: This paper presents the method of designing and fabricating 6-pole TeraHertz (THz) iris band-pass filter by adopting micromachining technology. Based on the existing process conditions, through analyzing the influence of process factors on electromagnetic property of filters, the process and designing parameters are mutually compromised to avoid sharp deterioration of device performance due to process factors so that the design can be optimized, and ultimately the integratable THz filter of small insertion loss and high reliability is obtained. By applying the processing methods including Inductively Coupled Plasma (ICP) etching, evaporating, electroplating gold and bonding, the single after-dicing micromachined filter with the volume of 24.0 mm × 5.0 mm × 1.66 mm is fabricated. The filter is fixed by applying tunable measurement clamp, and the power meter is adopted to test its power attenuation. Measurements results show that the center frequency of a 10.6% 3 dB fractional bandwidth is 141.5 GHz, and the power attenuation is less than 1 dB at 141.5 GHz, thus proving the effectiveness of the proposed processing method.

Key words: Micromachining technology; Terahertz device; Waveguide filter

1 引言

滤波器是所有电子系统最重要的器件之一,在太赫兹(THz)系统中,THz滤波器用于滤除环境噪声和不需要的频率成分,以提高系统性能^[1,2]。由于波导滤波器是完全的金属闭合结构,避免了电磁辐射和介质损耗,不需要考虑封装问题,相比于其他类型的滤波器有高Q值、低插损、功率容量大等特点^[3-6]。

在THz波段,波长变短滤波器尺寸减小,应用传统机械加工工艺(铣、磨、抛等)制作,加工误差过大,会导致滤波器损耗增大、Q值降低,而且难以集成进行批量化生产。而微加工技术采用光刻、腐蚀、电镀等工艺手段来获得复杂的微细结构^[7,8],加工精度在微米量级,THz科学技术的一个重要发展趋势就是和微纳米科学和工艺结合^[9]。文献[10]也指出微加工技术可用来加工微屏蔽线、波导、天线、平面传输线、可动梁等THz器件和结构,并使其具有优异的性能。

本文从目前已有的微加工工艺条件出发,选取工艺难度小的THz波导滤波器形式,设计加工出中

2011-08-11 收到, 2011-11-16 改回

国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金(11176006)和国家部委基金(9140A23070311DZ0210)资助课题

*通信作者: 鲍景富 baojingfu@uestc.edu.cn

心频率为141.5 GHz，带宽为10.6%电感膜片耦合波导滤波器。由于THz器件结构尺寸微小，在制作时极易引起表面不平整和结构不连续，导致器件性能恶化，所以本文同时研究工艺因素(表面粗糙度、垂直方向陡峭度等)对滤波器性能的影响，为设计提供指导，给出THz波导滤波器的设计思路，得到最终的滤波器设计。最后，根据本文提出的工艺流程加工样品，采用功率计测试其滤波特性。

2 太赫兹波导滤波器设计与优化

为了保证一定的带外抑制提高矩形系数，合理地应用微加工工艺，中心频率为 140 GHz、带宽为 10%的微加工波导带通滤波器采用 6 阶并联电感膜片耦合的形式，结构如图 1 所示。

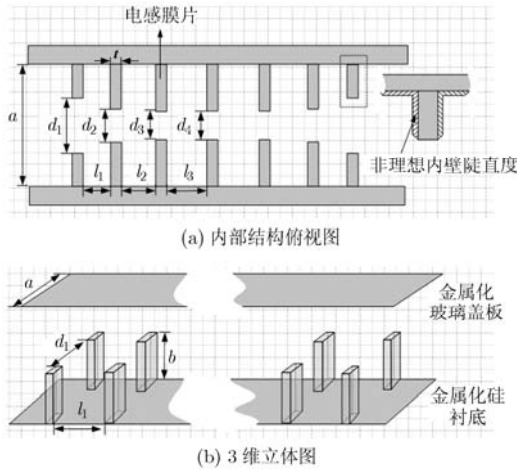


图 1 微加工波导带通滤波器结构图

整个滤波器结构对称，6 个矩形波导谐振器之间通过电感膜片耦合，谐振腔长度分别为 l_1, l_2, l_3 ，膜片空隙分别为 d_2, d_3, d_4 ，相同尺寸的终端矩形波导与谐振器之间也通过膜片耦合，膜片空隙为 d_1 。波导滤波器的输入输出接口均采用标准波导接口 BJ1400(波导尺寸 $a = 1.651 \text{ mm}$ ， $b = 0.8255 \text{ mm}$)，便于与其他 THz 器件连接。

2.1 膜片加工因素的影响

在微加工滤波器的设计中，为了减小工艺加工难度同时增加膜片的可靠性，膜片厚度 t (如图 1 所示)不能无限薄。在低频段，膜片厚度较小时可以忽略其对滤波器性能的影响^[11]，但是在 THz 频段，这种经验不再适用。当膜片有一定厚度时，其等效电路如图 2 所示，有两个电抗元件 X_A 和 X_B 。

根据图 2，以 ABCD 矩阵为桥梁推导出电抗元件参数 X_A 和 X_B 与膜片 S 参数的关系如式(1)所示。

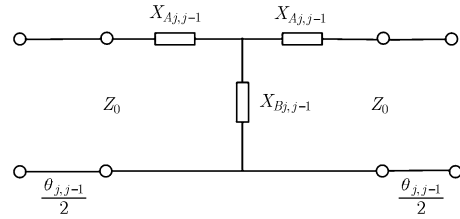


图 2 有一定厚度时的膜片等效电路模型

$$\left. \begin{aligned} X_A &= Z_0 \left(\frac{1 - S_{21} + S_{11}}{1 - S_{11} + S_{21}} \right) \\ X_B &= Z_0 \left(\frac{2S_{21}}{1 - 2S_{11} + S_{11}^2 - S_{21}^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

把 X_A 和 X_B 的表达式代入式(2)计算得出阻抗变换器参数。

$$K = \tan \left(\frac{\theta}{2} + \arctan \left(\frac{X_A}{Z_0} \right) \right) \quad (2)$$

而谐振器的实际电长度也附加了一定厚度的膜片所带来的传输线效应，如式(3)所示，其中 θ_j 是矩形波导谐振器本身的电长度。

$$\left. \begin{aligned} \Phi_j &= \frac{\theta_{j-1,j}}{2} + \theta_j + \frac{\theta_{j,j+1}}{2} \\ \theta_{j-1,j} &= -\arctan \left(\frac{2X_{Bj-1,j}}{Z_0} + \frac{X_{Aj-1,j}}{Z_0} \right) \\ &\quad - \arctan \left(\frac{X_{Aj-1,j}}{Z_0} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

所以，当膜片厚度和缝隙宽度发生变化时，其 S 参数发生变化， X_A, X_B, K 以及 $\theta_{j-1,j}$ 均会发生变化。图 3 表明了当其他尺寸不变时，膜片厚度的变化对滤波器性能产生的影响。当 t 从 0.005 mm 到 0.21 mm 变化时，随着 t 的增大，滤波器带宽变窄，中心频率略有变高，要通过调节膜片缝隙 d 和谐振腔长度 l 来加以改善；只有当 $t < 0.01 \text{ mm}$ ， t 的影响较小可以忽略，图 3(a)中所示当 $t = 0.005 \text{ mm}$ 与 $t = 0.01 \text{ mm}$ 两种情况下的性能曲线基本一致。膜片厚度在大于 0.01 mm 时对滤波器中心频率和带宽影响较大，在设计优化时应该充分考虑它带来的影响，在工艺能够实现的膜片厚度基础上整体优化滤波器结构。表 1 给出了在保持滤波器带宽和中心频点相同的情况下，膜片厚度分别为 0.1 mm 和 0.3 mm 的滤波器尺寸对比。

另外，由于刻蚀工艺的局限性，膜片壁陡直度不是绝对的 90° (如图 1(a)所示)，耦合窗尺寸出现偏差而导致谐振腔之间的耦合系数受到影响，耦合系数计算公式如式(4)所示^[12]。

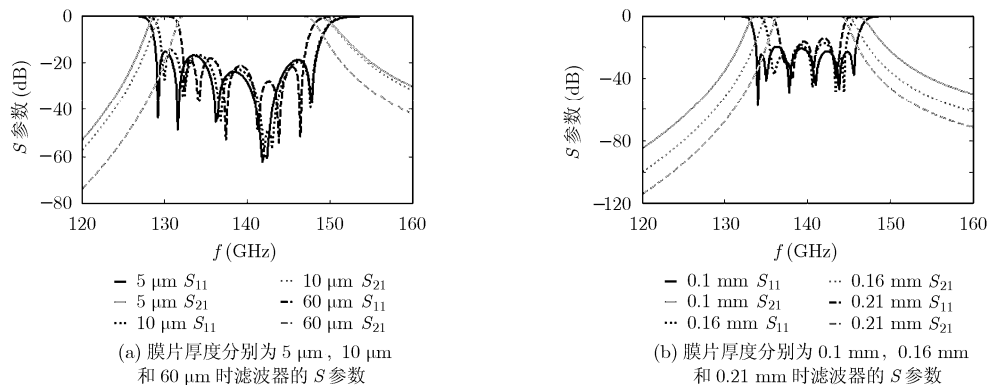
图3 膜片厚度对滤波器 S 参数的影响

表1 膜片厚度为 0.1 mm 和 0.3 mm 中心频点为 140 GHz 的波导滤波器结构尺寸 (mm)

膜片厚度(mm)	a	b	l_1	l_2	l_3	d_1	d_2	d_3	d_4	t
0.1	1.651	0.8255	1.052	1.204	1.235	0.935	0.678	0.613	0.602	0.1
0.3	1.651	0.8255	0.926	1.093	1.127	1.032	0.812	0.759	0.75	0.3

$$k_{j,j+1} = \frac{BW}{f_{\text{res}}} \frac{1}{\sqrt{g_j g_{j+1}}} \quad (4)$$

其中 g_j 为切比雪夫低通原型滤波器的参数值, f_{res} 为谐振频率, BW 为相对带宽。膜片壁陡直度导致滤波器耦合膜片的有效缝隙宽度和有效膜片厚度的变化。而从前面分析看到, 缝隙宽度和膜片厚度变化会导致带宽和中心频率的变化。图 4 给出了当电感膜片呈现梯形时滤波器的性能曲线图, 当膜片陡直度为 75° 的时候, 性能恶化得较为厉害, 中心频率与带宽出现较大偏移, 但是当膜片陡直度为 89° 的时候, 滤波器性能得以保持。

综合考虑膜片厚度的影响和工艺误差带来的倾斜度问题, 设计 $t = 0.1 \text{ mm}$, 采用模式匹配法进行优化, 设计尺寸如表 1 所示, 得到微加工滤波器 S 参数仿真结果如图 5 所示, 中心频率为 140 GHz, 3 dB 带宽为 10%, 阻带抑制在 153 GHz 和 130 GHz 时均大于 34 dB。由于采用标准波导尺寸, 波导的刻蚀深度为 0.8255 mm, 而膜片的厚度只有 0.1 mm, 对微加工刻蚀提出了挑战。感应耦合等离子 ICP 刻蚀技术具有加工精度高、大面积刻蚀均匀性好、污染小和刻蚀垂直度好等特点, 可以获得较大的深宽比 ($>20:1$), 所以本文在硅片上刻蚀矩形波导结构时采用这种方法。

2.2 工艺因素对波导谐振腔 Q 值的影响

矩形波导谐振腔的无载 Q 值可由式(5)来表示, 其中 Q_c 为有耗导体壁但腔内填充介质为无耗时 Q 值, R_s 为波导内部金属壁表面电阻^[13]。 a , b , d 分别为矩形波导横截面长、宽和谐振腔的长度, η 为

波阻抗, k 为传播常数。 Q_{pro} 表示由于工艺因素的不理想性带来的能量损耗, 腔体内部表面金属化质量、金属镀膜厚度、均匀性和粗糙度等都不同程度地影响电磁波的损耗。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{Q} &= \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_{\text{pro}}} \\ Q_c &= \frac{2\omega_0 W_c}{P_c} = \frac{(kad)^3 b \eta}{2\pi^2 R_s} \frac{1}{(2a^3 b + 2bd^3 + a^3 d + ad^3)} \\ R_s &= \sqrt{\omega \mu_0 / 2\sigma} \end{aligned} \right\} (5)$$

图 6(a)和图 6(b)分别为当所镀金属为金(电导率 $\sigma = 41000000 \text{ S/m}$)时, 谐振腔 Q 值随金属厚度和金属表面粗糙度的变化情况, 利用 3 维仿真软件 HFSS 进行有限元数值计算得到。图 6(b)为均匀粗糙度的计算结果, 计算时金属厚度取为无限大, 从图中可以看出, 谐振腔 Q 值随金属厚度增加而变大, 当金属厚度大于 $15 \mu\text{m}$ 之后 Q 值基本保持不变, 因为此时金属厚度已经远远大于电磁波趋肤深度; 而当粗糙度大于 $1.2 \mu\text{m}$ 后会造成 Q 值急剧下降。工艺加工中有限的金属厚度和不可避免的粗糙度都会造成谐振腔 Q 值的下降, 本文通过反复工艺试验将粗糙度控制在 $1 \mu\text{m}$, 并尽可能增加金属电镀厚度来保证谐振腔 Q 值。

3 工艺流程

本文所采用的工艺流程如图 7 所示, 在硅片上实现, 采用标准的微加工工艺实现, 和 IC 工艺相兼容, 是一种可与其他微加工器件以及 IC 集成的 THz 滤波器结构。在工艺制作时, 首先在厚度为 1 mm

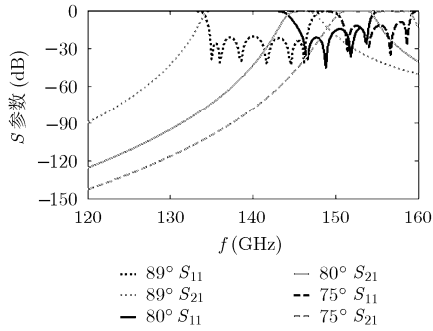


图 4 膜片加工陡直度对滤波器 S 参数的影响

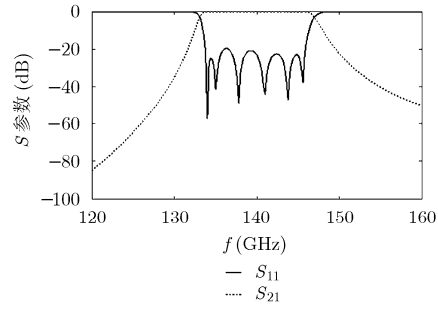
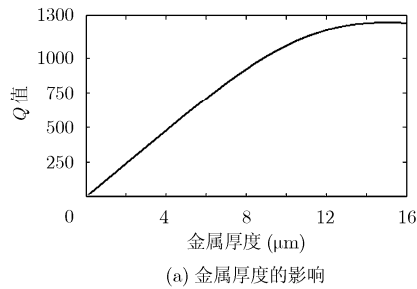
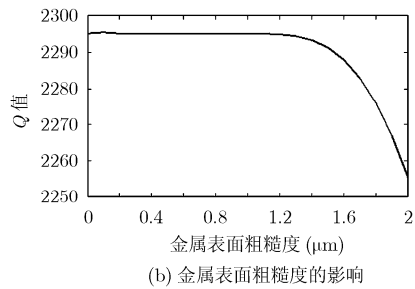


图 5 并联电感耦合波导滤波器 S 参数



(a) 金属厚度的影响



(b) 金属表面粗糙度的影响

图 6 谐振腔 Q 值的变化曲线

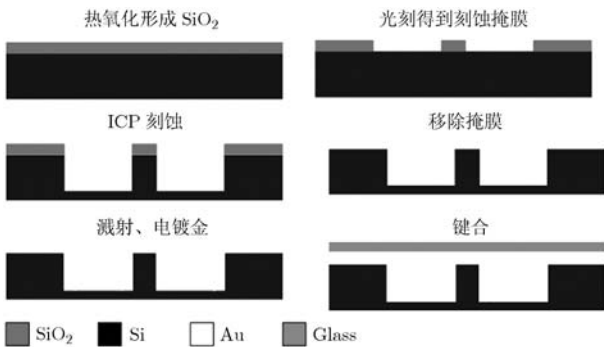


图 7 微加工滤波器加工工艺流程

的硅片上采用热氧化形成氧化层，其厚度大于 3 μm ；光刻腐蚀氧化层，形成深槽刻蚀掩模，采用 ICP 刻蚀机刻蚀出图形结构，刻蚀深度为 0.825 mm；通过溅射工艺得到一层 0.4 μm 厚度的 Cr/Au 作为种子层，然后再电镀一层 8 μm 厚的 Au。最后采用 Au-Si 共晶键合技术键合一镀有 Au 层的玻璃盖板，形成金属化的波导密封结构。

本文所采用的工艺流程是通过溅射和电镀两次工艺加厚腔体内部表面金属。通过反复实验摸索，找到可以保证膜片陡直度、镀膜厚度、表面金属化均匀性和粗糙度的工作参数，最终腔体内部表面金属厚度达到 8 μm ，最大粗糙度只有 0.8 μm ，膜片陡直度控制在 89° 以内，保证了谐振腔 Q 值和滤波器性能。

图 8 所示为未加金属化盖板的滤波器内部结构，ICP 刻蚀膜片 SEM 照片如图 8(b)所示。为了测试固定方便，加大了终端矩形波导的尺寸使得滤波器长度变大，终端矩形波导长度均为 8.15 mm。最终制作完成的单个微加工滤波器外径尺寸为 24.0 mm \times 5.0 mm \times 1.66 mm。

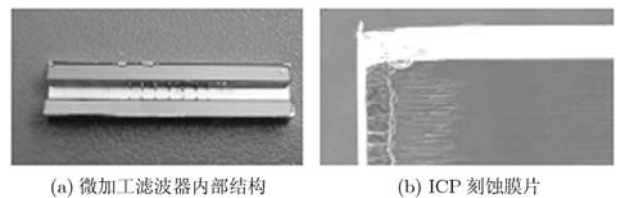


图 8 微加工波导滤波器加工实物图

4 测试结果

使用功率计测量所加工滤波器的传输损耗，首先将低频频率源倍频到测试频段，然后用功率计测量滤波器的传输衰减。在测试中使用可调夹具固定滤波器，这种可调夹具固定微小器件时能够尽可能减小与测试波导之间连接损耗，提高测量精度。实际用作测量滤波器的尺寸为表 1 第 1 行所示尺寸，微加工滤波器衰减特性的测试结果如图 9 所示，测试结果显示加工的滤波器样品和预期要求基本吻合，但是功率衰减变大，3 dB 带宽为 134 GHz-149 GHz，中心频率为 141.5 GHz，中心频点的衰减为

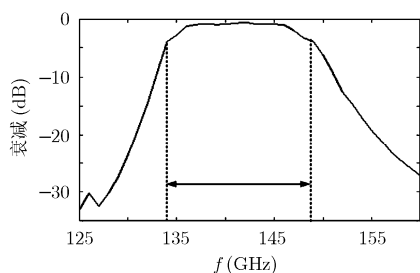


图9 微加工滤波器功率衰减特性测试结果

0.67 dB, 带宽内最低插入衰减为 0.60 dB。同时从测试结果看到, 在 153 GHz 时, 衰减 ≥ 15 dB, 在 130 GHz 时, 衰减 ≥ 23 dB。表 2 给出了本文所述滤波器和文献中相近滤波器的性能比较。

表 2 并联膜片耦合波导滤波器性能比较

损耗(dB)	f_0 (GHz)	3 dB 带宽	谐振腔个数	来源
-1.75(中心频率处)	96.77	1.3%	2	文献[4]
-2(最小)	149	10.74%	5	文献[6]
-0.67(中心频率处)	141.5	10.6%	6	本文
-0.60(最小)				

造成测量结果中功率衰减增加、阻带抑制恶化以及中心频率、带宽偏移的原因可能有以下几个方面: 首先是腔体内表面金属化误差包括不均匀性、粗糙度等因素造成波导内壁表面电阻增大, 使得功率损耗增大; 其次是工艺流程中键合过程存在缝隙, 导致能量损失; 另外, 测量过程中存在由测量夹具连接误差和对准误差等原因导致的测量误差。

5 结束语

本文介绍了采用微加工工艺设计制作中心频率为 140 GHz 的电感膜片耦合波导滤波器的方法。对工艺带来的误差和非理想性因素进行电磁性能分析, 用分析结果指导设计, 综合考虑加工难度、工艺误差、可靠性、滤波器性能等方面的制约关系, 实现了结构参数和工艺流程的设计优化。整个 THz 滤波器结构在硅基上实现, 与系统级封装(SOP)技术相兼容, 克服了传统机械加工手段误差大、表面粗糙度大等缺点, 适宜于高精度大批量加工。测试结果表明, 该滤波器相对带宽为 $\pm 5.3\%$ (134 GHz - 149 GHz), 中心频点处功率衰减小于 1 dB, 是一种插入损耗低、可集成的 THz 滤波器, 可应用于 140 GHz 通信系统中, 发挥其插损极低的优点减小放大器的压力, 增大频率源的输出功率。同时也证明了本文所采用工艺方法的有效性, 提出的工艺流程也可用于制作同频段或者更高频段的波导滤波器、混频器以及天线等器件。

参考文献

- [1] 郑新, 刘超. 太赫兹技术的发展和在雷达和通讯系统中的应用[J]. 微波学报, 2010, 26(6): 1-6.
Zheng Xin and Liu Chao. Recent development of THz technology and its application in radar and communication system[J]. *Journal of Microwaves*, 2010, 26(6): 1-6.
- [2] Lu Ming-zhi, Li Wen-zao, and Brown E R. High-order THz bandpass filters achieved by multilayer complementary metamaterial structures[C]. 35th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Rome, Italy, Sept. 5-10, 2010: 1-2.
- [3] Sang-June P, Reines I, Patel C, et al. High-Q RF-MEMS 4-6-GHz tunable evanescent-mode cavity filter[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, 58(2): 381-389.
- [4] Song Sang-sub and Seo Kwang-Seok. A W-band air-cavity filter integrated on a thin-film substrate[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2009, 19(4): 200-202.
- [5] Shang X, Ke M, Wang Y, et al. Micromachined W-band waveguide and filter with two embedded H-plane bends[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2011, 5(3): 334-339.
- [6] Bui L Q, Ball D, and Itoh T. Broad-band millimeter-wave E-plane bandpass filter[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1984, 32(12): 1655-1658.
- [7] Somjit N, Stemme G, and Oberhammer J. Power handling analysis of high-power W-band all-silicon MEMS phase shifters[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2011, 58(5): 1548-1555.
- [8] Todd S T, Huang X T, Bowers J E, et al. A novel micromachining process using DRIE, thermal oxidation, electroplating, and planarization to create high aspect ratio coplanar waveguides[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2010, 19(1): 55-63.
- [9] 刘盛纲, 钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(5): 481-486.
Liu Sheng-gang and Zhong Ren-bin. Recent development of terahertz science and technology and it's applications[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2009, 38(5): 481-486.
- [10] Lubecke V M, Mizuno K, and Rebeiz G M. Micromachining for terahertz applications[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1998, 46(11): 1821-1831.
- [11] Oloumi D, Kordzadeh A, and Neyestanak A A L. Size reduction and bandwidth enhancement of a waveguide bandpass filter using fractal-shaped irises[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, 8: 1214-1217.
- [12] Lee Jong-Hoon, Kidera N, DeJean G, et al. A V-band front-end with 3-D integrated cavity filters/duplexers and antenna in LTCC technologies[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, 54(7): 2925-2936.
- [13] Pozar D M. *Microwave Engineering* [M]. Third Edition, New York: Wiley, 2005: 280-281.

杜亦佳: 女, 1987年生, 博士生, 研究方向为射频微电子器件和太赫兹无源器件。

鲍景富: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究领域为射频微机电系统、频率合成技术和低相位噪声技术等。

赵兴海: 男, 1984年生, 助理研究员, 研究方向为射频微机电系统。