

文章编号: 2095-4980(2015)02-0179-05

## 微加工工艺误差对 THz 折叠波导行波管性能影响

王亚军<sup>a,b</sup>, 徐翱<sup>a,b</sup>, 颜胜美<sup>a,b</sup>, 金大志<sup>a,b</sup>, 向伟<sup>a,b</sup>

(中国工程物理研究院 a.电子工程研究所; b.微系统与太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 在太赫兹频段, 折叠波导慢波结构主要采用微细加工技术完成。讨论了目前折叠波导慢波结构主要的微加工工艺, 分析了主要工艺误差包括波导深度、侧壁垂直度对 0.41 THz 折叠波导慢波结构高频特性的影响。通过分析比较,  $a$  值对折叠波导行波管性能影响很大, 需要在工艺中精确控制。在侧壁垂直度为  $89^\circ$  范围以内, 侧壁垂直度的变化对折叠波导行波管性能影响不大。通过仿真分析, 确定了工艺中必须控制加工精确度的工艺步骤, 这对 0.41 THz 折叠波导行波管的研制有非常重要的意义。

**关键词:** 折叠波导; 慢波结构; 冷测特性; 工艺误差; 太赫兹

**中图分类号:** TN124

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201502.0179

## Effect of microfabrication process on Terahertz folded waveguide TWT

WANG Yajun<sup>a,b</sup>, XU Ao<sup>a,b</sup>, YAN Shenmei<sup>a,b</sup>, JIN Dazhi<sup>a,b</sup>, XIANG Wei<sup>a,b</sup>

(a.Institute of Electronic Engineering; b.Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

**Abstract:** In THz range, most of the folded waveguide slow-wave structures are fabricated by microfabrication processes. The principal microfabrication processes for fold waveguide structure nowadays are discussed. The influence of microfabrication process errors including the depth  $a$  and sidewall profile on the high frequency characteristics of 0.41 THz folded waveguide slow-wave structures are analyzed. Through the analysis, the depth  $a$  shows great influence on the performance of folded waveguide Travelling Wave Tubes(TWTs), therefore, it should be controlled accurately in the process. The sidewall profile has little effect on the performance of folded waveguide TWTs when the angle is above  $89^\circ$ . The key processes are determined by simulation, which is helpful for developing THz folded waveguide TWTs.

**Key words:** folded waveguide; slow-wave structure; cold characteristics; process errors; Terahertz

太赫兹(Terahertz, 1 THz=10<sup>12</sup> Hz)是指频率在 0.1 THz~10 THz(波长在 3  $\mu\text{m}$ ~3 mm)之间的电磁波, 位于红外和微波之间。由于 THz 电磁波具有瞬态性、宽带性、相干性和光子能量低等特点, 使它在物体成像、环境监测、医疗诊断、射电天文、卫星通信和军用雷达等方面具有重大的科学价值和广阔的应用前景。目前, 阻碍太赫兹技术发展的其中一个重要原因是缺乏大功率、宽带宽、轻量化、小体积的太赫兹源。目前研究表明微型折叠波导行波管是一种极具发展潜力的太赫兹器件, 能够产生高功率的 THz 波输出。国内外许多研究机构对太赫兹折叠波导行波管放大器和振荡器开展了研究, 其涉及工作频点主要包括 0.14 THz, 0.22 THz, 0.34 THz, 0.65 THz, 0.67 THz 和 0.85 THz<sup>[1-6]</sup>。在太赫兹低频段, 折叠波导慢波结构的加工主要采用精密微铣削的方法。工作频率高于 0.3 THz, 采用精密机械加工的方法难以保证折叠波导结构的尺寸, 而主要采用微细加工技术, 包括深反应离子刻蚀(Deep Reactive Ion Etching, DRIE)技术, 光刻、电铸和注塑(Lithographie Galvanofornung Abformung, LIGA)以及 UV-LIGA 技术(SU-8 紫外曝光技术)等。0.41 THz 是太赫兹频段另一个大气窗口, 在 0.395 THz~0.42 THz 范围内其衰减系数基本一致, 其理论带宽可以达到 35 GHz。本文首先介绍慢波结构的主要微细加工技术, 针对所设计的 0.41 THz 折叠波导慢波结构, 讨论了在 UV-LIGA 工艺中工艺误差对折叠波导行波管性能的影响, 从而得出工艺中需要重点注意的地方, 有针对性地优化工艺, 提高加工精确度, 对保证折叠波导行波管性能有非常积极意义。

收稿日期: 2014-09-03; 修回日期: 2014-11-27

基金项目: 中国工程物理研究院超精密加工技术重点实验室资助项目(ZZ13006)

## 1 折叠波导慢波结构的微加工

折叠波导慢波结构的微加工是首先制造出2个镜像匹配的二等份折叠波导,然后再将这2个匹配的镜像结构焊接成完整的折叠波导线路。其主要加工难点在于:a)加工尺寸小,加工精确度高。随着频率上升到太赫兹频段,慢波结构关键尺寸已从毫米量级减小到微米量级。此外,由于趋肤深度(以无氧铜的电导率 $\sigma=5.8\times 10^7$  S/m计算,在0.41 THz趋肤深度为 $\delta=0.1\ \mu\text{m}$ )与表面粗糙度相比拟,引起高频损耗增加,因此必须保证微细加工的加工精确度和粗糙度;b)对准精确度高。由于折叠波导慢波结构特殊的制作方法,需要先制作2个镜像的二等份结构,再将其键合在一起,因此在键合对准时必须保证两半之间的对准精确度,才能形成电磁波传播的有效途径。

目前,折叠波导结构的微加工技术主要有LIGA技术、UV-LIGA技术、DRIE技术等。

LIGA技术是通过X射线光刻PMMA光刻胶,并电铸成型来实现折叠波导的微加工。Shin等人<sup>[7]</sup>采用2步LIGA技术制作了工作在0.1 THz的折叠波导结构,其加工精确度误差小于 $2\ \mu\text{m}$ ,工艺中2次光刻的对准精确度为 $2\ \mu\text{m}\sim 3\ \mu\text{m}$ ,其表面粗糙度为70 nm。LIGA技术能够获得高精度、大深宽比的结构,其主要缺点是需要同步辐射光源。

UV-LIGA技术利用深紫外光源替代X射线同步辐射源,并使用SU-8负性光刻胶。冯进军等人<sup>[8]</sup>采用UV-LIGA技术制作了W波段折叠波导结构,在SU-8胶膜高度为794  $\mu\text{m}$ 时侧壁垂直度为 $91^\circ$ 。此外,他们也采用UV-LIGA技术制作了0.34 THz的折叠波导结构,样品经过氢炉退火后侧壁粗糙度Ra为44.9 nm,侧壁垂直度约为 $90^\circ$ <sup>[4]</sup>。Makarova等人<sup>[9]</sup>采用UV-LIGA技术制作了0.22 THz折叠波导结构,首先通过一步光刻形成折叠波导槽,再采用电火花加工(Electrical Discharge Machining, EDM)方法加工电子注通道,最后采用低温Au-Au热压键合的方法形成折叠波导电路。相比于LIGA技术,采用SU-8光刻胶的UV-LIGA技术也可得到具有垂直的侧壁外形和高深宽比的厚膜图形,然而SU-8光刻胶在光刻胶沉积、曝光前烘等方面存在一定的困难,最常遇到的问题是光刻胶的内部应力,这些应力会造成光刻胶开裂以及从基底脱落。另外,SU-8光刻胶的去胶也存在一定的困难,目前主要采用高温熔盐的方法,这会给样品结构带来一定的损伤。

DRIE技术是一种各向异性的反应离子刻蚀过程,用于微细加工高深宽比的硅结构,通过这些硅结构来制作金属模具。利用DRIE技术,通过刻蚀弯曲槽然后涂覆金属薄膜,也可以通过刻蚀的硅结构作为电铸模具,来加工出高深宽比结构的折叠波导慢波电路。李含雁等人<sup>[10]</sup>采用两步的DRIE技术加工W波段行波管折叠波导慢波结构,加工的折叠波导硅槽深为946  $\mu\text{m}$ ,侧壁垂直度为 $91^\circ$ ,电子注通道深为225  $\mu\text{m}$ ,侧壁垂直度为 $90^\circ$ 。采用磁控射频溅射的方法,在折叠波导结构中溅射金属铜作为电磁波传输的介质。NG公司在研制0.67 THz折叠波导行波管中,采用DRIE技术来制作折叠波导慢波结构。为了最小化折叠波导电路的相位改变,维持注波相互作用,他们使用绝缘体上硅(Silicon-On-Insulator, SOI)圆片,采用DRIE中刻蚀气体对 $\text{SiO}_2$ 的刻蚀选择性来精确控制折叠波导槽的深度<sup>[11]</sup>。通过两步刻蚀工艺形成折叠波导槽和电子注通道,然后将几个趋肤深度厚的无氧铜电镀在折叠波导槽中,最后通过键合形成整个折叠波导线路。在0.85 THz折叠波导行波管的研究中,他们继续采用DRIE技术,同时为了进一步有效控制相速,采用双SOI衬底来控制折叠波导槽和电子注通道的深度。

由于微加工技术为平面技术,加工的折叠波导结构的电子注通道为矩形。为了匹配圆形电子注,美国海军实验室开发了嵌入聚合物单丝的UV-LIGA技术,在涂覆光刻胶之前首先固定好圆形微丝,在一次光刻和电镀后将单丝取出,最后得到圆形电子注通道的折叠波导慢波结构<sup>[12]</sup>。该方法一次光刻就能形成整个折叠波导结构,不存在两次光刻对准和两半折叠波导对准精确度的问题,同时可以通过不同形状的单丝制作不同形貌的电子注通道。但相比于两半加工再对准焊接的方法,该方法在一次光刻中需获得整个折叠波导的深度,较小的侧壁垂直度变化都会带来图形上下线宽较大的变化,此外在光刻前微丝的精确固定也存在一定的困难。

考虑到慢波结构的机械性能和导热性,作者主要采用UV-LIGA技术制作折叠波导慢波结构。其具体的工艺流程见图1。首先通过1次光刻形成折叠波导槽,再通过第2次光刻形成电子注通道。图2为制作的0.22 THz折叠波导结构SEM照片。在0.41 THz,折叠波导慢波结构的尺寸相比于0.22 THz更小,更适合微加工技术,因此将继续采用UV-LIGA工艺。下面主要讨论在UV-LIGA工艺中工艺误差对0.41 THz折叠波导慢波结构性能的影响。

## 2 工艺误差的影响

在折叠波导结构的微加工过程中,为了保证结构完整,常常需要使电镀金属的厚度超过所需结构的高度,再通过化学机械研磨和抛光等方法将厚度减薄,从而获得折叠波导槽的深度 $a$ 。在该工艺中,需要实时测量基片的

厚度,同时保证整个基片厚度的均匀性。这在工艺过程中很难控制,从而导致折叠波导槽和电子注通道的深度变化,影响结构性能。另一方面,如前面所述,由于 SU-8 为负胶,胶膜厚度较大,一次曝光时间较长,需要优化曝光时间,否则会使光刻胶曝光过度或曝光不够,从而影响 SU-8 胶膜侧壁垂直度,同时 SU-8 胶在前烘和后烘过程中内应力也会影响胶膜侧壁垂直度,进而影响折叠波导槽的垂直度。下面主要从这两个方面介绍工艺误差对折叠波导结构高频特性的影响。

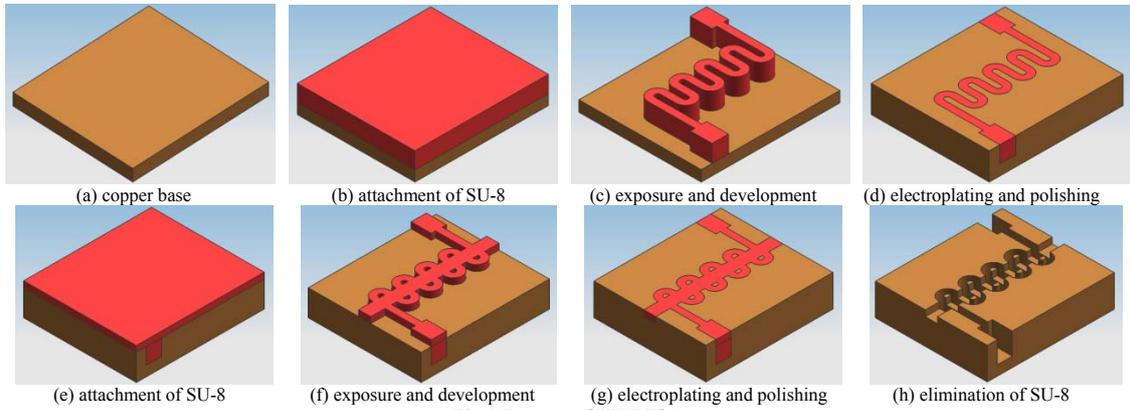


Fig.1 Process of UV-LIGA  
图 1 UV-LIGA 工艺流程

2.1 折叠波导深度  $a$  的影响

图 3 是折叠波导深度  $a$  分别增大和减小  $5 \mu\text{m}$  时,折叠波导高频性能的变化。从图 3(a)中可以看出,当  $a$  增加时截止频率下降,工作频带向低端移动,在中心频率  $0.41 \text{ THz}$  处色散曲线变得更平坦,因此其工作带宽会变大。同时,在中心频率处,色散曲线的变化将导致同步电压变化,在  $a$  增大的过程中,同步电压将减小。从图 3(b)和图 3(c)可以看到,随着  $a$  的增加,耦合阻抗变低,而每个周期的损耗也降低。耦合阻抗和损耗都与折叠波导行波管的增益有关。耦合阻抗降低,增益会减小,而损耗降低,增益会增大。因此耦合阻抗和损耗这 2 个高频特性将共同决定行波管的增益。图 4 是不同  $a$  值下折叠波导行波管的增益特性。从图中可以看出,随着  $a$  的增加,其带宽明显增大,3 dB 带宽从  $7 \text{ GHz}$  增大到  $14 \text{ GHz}$ ,而最大增益从  $27.8 \text{ dB}$  减小为  $25.6 \text{ dB}$ 。由于不同  $a$  值下色散曲线的变化导致同步电压变化,在增益特性曲线中, $a$  值不同,其同步电压也不同,分别为各自的最佳同步电压。由此可以得到, $a$  值变化  $5 \mu\text{m}$  对折叠波导行波管的增益和带宽都有很大影响,在折叠波导慢波结构的微加工过程中,特别是在基片研磨抛光的过程中,需要精确控制研磨厚度和均匀性,使折叠波导槽的深度  $a$  尽量靠近设计值,从而保证折叠波导行波管的性能。

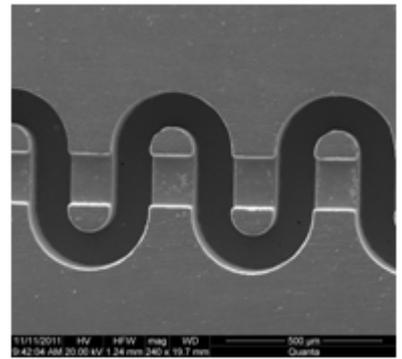


Fig.2 SEM photo of 0.22 THz folded waveguide circuit by UV-LIGA  
图 2 UV-LIGA 工艺制作的 0.22 THz 折叠波导电路

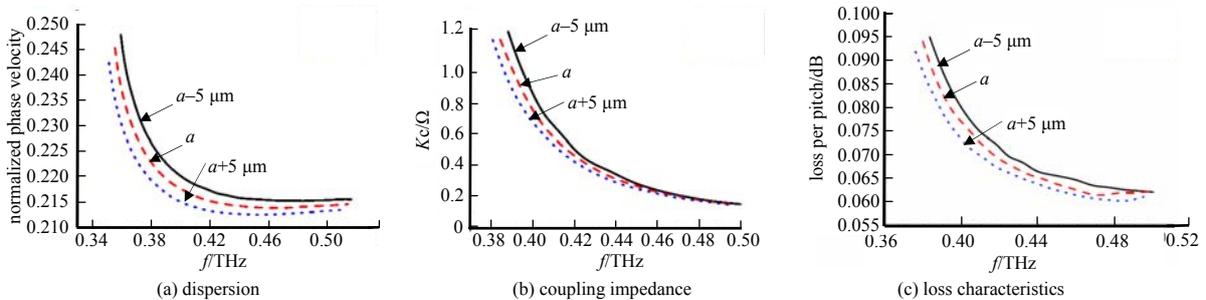


Fig.3 Dispersion, coupling impedance and loss characteristics at different  $a$  values

图 3 不同  $a$  值下的色散、耦合阻抗、损耗特性

2.2 侧壁垂直度的影响

当 SU-8 曝光时间、前后烘时间和温度控制不好时,将会导致 SU-8 胶上下线宽不一致,使得电镀后折叠波

导槽上下宽度不一致,侧壁垂直度较差。下面主要分析在第一步光刻中 SU-8 胶上下线宽不一致时导致折叠波导结构变化对行波管性能的影响。选择折叠波导槽上下线宽相差  $6\ \mu\text{m}$  和  $10\ \mu\text{m}$  时,即侧壁垂直度分别为  $88.9^\circ$  和  $88.2^\circ$  进行分析。图 5 是折叠波导槽侧壁垂直度为  $88.9^\circ$ ,  $88.2^\circ$  和  $90^\circ$  时高频特性比较。从图 5(a) 中可以看出,当侧壁垂直度降低时,截止频率下降,工作频带向低端移动,同步电压将减小。从图 5(b) 可以看出,当侧壁垂直度降低时,耦合阻抗降低。从图 5(c) 可以看出,损耗随着垂直度的降低而降低。同时,可以得到,侧壁垂直度为  $88.9^\circ$  和  $90^\circ$  时,归一化相速、耦合阻抗、损耗变化都较小,这说明在一定的侧壁垂直度范围内,整管特性不会变化很大,不需要保证垂直度为  $90^\circ$ ,这在工艺上也是很难实现的。在高频特性的仿真中,由于上下线宽变化只为几个微米,因此必须进行局部加密。进行了不同程度的局部加密比较,直到仿真结果基本不变。在仿真中,局部加密的最大单元长度为  $4\ \mu\text{m}$ ,最大计算网格数为 157 167。图 6 是不同侧壁垂直度下折叠波导行波管的增益特性。从图中可以看出,随着侧壁垂直度的增加,最大增益基本不变,其带宽有所减小。在侧壁垂直度为  $90^\circ$  和  $88.9^\circ$  时,其带宽基本不变,均大于  $8\ \text{GHz}$ ,而当垂直度为  $88.2^\circ$  时,其带宽减小为  $7\ \text{GHz}$ 。同样,由于侧壁垂直度变化时色散曲线的变化导致同步电压变化,在增益特性曲线中,其同步电压为各自的最佳同步电压。由此可以得到,在设计  $0.41\ \text{THz}$  折叠波导慢波结构中,侧壁垂直度对整管的影响不是很大,在垂直度为  $88.9^\circ$  时,其整管性能基本不变,这在工艺上也是可以实现的。

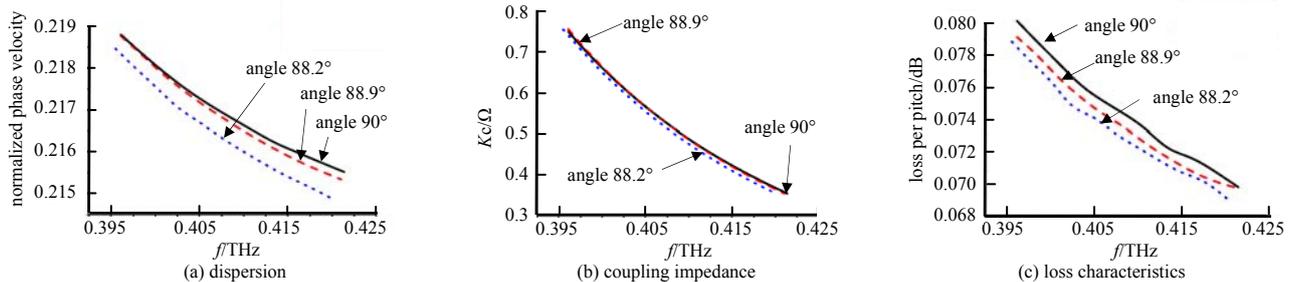


Fig.5 Dispersion, coupling impedance and loss characteristics at different sidewall profiles

图 5 不同侧壁垂直度下的色散、耦合阻抗、损耗特性

### 3 结论

随着折叠波导行波管的工作频率上升到太赫兹频段,传统的精密加工技术已经不能满足要求,需要结合微细加工技术的优势。本文重点介绍了折叠波导慢波结构微加工工艺研究现状,分析了目前采用的 UV-LIGA 工艺中较难控制的 2 个工艺步骤引起的结构变化对折叠波导行波管性能的影响。通过分析可以得到,折叠波导槽深度  $a$  对折叠波导的高频特性有很大影响。 $a$  值增大,会导致色散曲线下移,同步电压变小,同时,耦合阻抗降低,损耗也有相应的变化。 $a$  值的增大还会导致增益减小,带宽变大,因此在设计折叠波导慢波结构  $a$  时要兼顾功率和带宽。对于折叠波导结构的侧壁垂直度的影响,通过分析可以得到,在目前工艺上能够实现的侧壁垂直度  $89^\circ$  条件下,侧壁垂直度的变化对折叠波导行波管的性能影响不大。因此,在工艺中需要针对微加工工艺中影响折叠波导槽深度  $a$  的工艺步骤,实时监控电镀后研磨抛光厚度,有针对性地开展工艺优化,减小加工误差。而对于影响侧壁垂直度的工艺步骤,需要进一步优化 SU-8 胶光刻、前烘和后烘等工艺,使其侧壁垂直度控制在  $89^\circ$  范围以内。通过仿真分析,确认微加工工艺误差对折叠波导行波管性能的影响,从而控制工艺参数,尽量减小误差,这对成功研制折叠波导行波管有非常积极的意义。

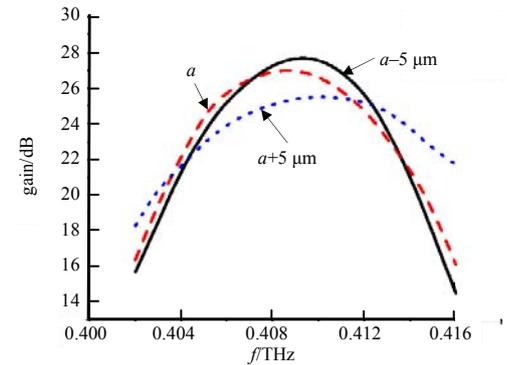


Fig.4 Gain vs. frequency at different  $a$  values

图 4 不同  $a$  值下增益随频率的关系

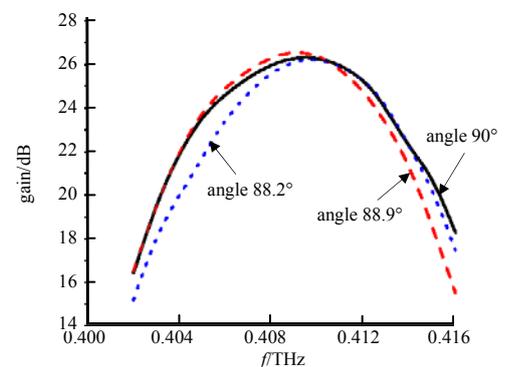


Fig.6 Gain vs. frequency at different sidewall profiles

图 6 不同侧壁垂直度下增益随频率的关系

## 参考文献:

- [1] WANG Yajun, CHEN Zhang. Investigation of 0.14THz Folded Waveguide TWT[C]// 2013 IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Paris:[s.n.], 2013:1-2.
- [2] 徐翱,周泉丰,阎磊,等. 0.22 THz 折叠波导行波管初步实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(11):2954-2958. (XU Ao, ZHOU Quanfeng, YAN Lei, et al. Initial experimental study on 0.22 THz folded waveguide TWT[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(11):2954-2958.)
- [3] 徐翱,周泉丰,阎磊,等. 0.34 THz 折叠波导行波管设计与流通管实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(2):153-157. (XU Ao, ZHOU Quanfeng, YAN Lei, et al. Design for 0.34 THz folded waveguide TWT and runner pipe experiment[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(2):153-157.)
- [4] 冯进军,唐烨,李含燕,等. 340 GHz 太赫兹返波振荡器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(1):32-37. (FENG Jinjun, TANG Ye, LI Hanyan, et al. 340 GHz Terahertz Backward Wave Oscillators[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(1):32-37.)
- [5] Tucek J C, Basten M A, Gallagher D A, et al. A 100 mW, 0.670 THz power module[C]// 2012 IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey, CA:[s.n.], 2012:31-32.
- [6] Tucek J C, Basten M A, Gallagher D A, et al. 0.850 THz vacuum electronic power amplifier[C]// 2014 IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey, CA:[s.n.], 2014:153-154.
- [7] Shin Young-Min, So Jin-Kyu, Han Seong-Tae, et al. Microfabrication of millimeter wave vacuum electron devices by two-step deep-etch x-ray lithography[J]. Appl. Phys. Lett., 2006,88(9):091916.
- [8] FENG Jinjun, REN Dapeng, LI Hanyan, et al. Study of high frequency Folded Waveguide BWO with MEMS technology[J]. Terahertz Science and Technology, 2011,4(4):164-180.
- [9] Makarova Olga V, Divan Ralu, Tucek John, et al. Fabrication of solid copper 220 GHz folded waveguide circuits by UV lithography[C]// 2010 IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey, CA:[s.n.], 2010:183-184.
- [10] 李含雁,冯进军,白国栋. DRIE 技术加工 W 波段行波管折叠波导慢波结构的研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011,6(4):427-431. (LI Hanyan, FENG Jinjun, BAI Guodong. Microfabrication of W band Folded Waveguide Slow Wave Structure using DRIE technology[J]. Journal of CAEIT, 2011,6(4):427-431.)
- [11] Basten Mark A, Tucek John C, Gallagher David A, et al. A 0.85 THz vacuum-based power amplifier[C]// 2010 IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey, CA:[s.n.], 2012:39-40.
- [12] Joye Colin D, Calame Jeffrey P, Nguyen Khanh T, et al. Microfabrication of fine electron beam tunnels using UV-LIGA and embedded polymer monofilaments for vacuum electron devices[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2012,22:015010.

## 作者简介:



王亚军(1984-),男,四川省绵阳市人,硕士,助理研究员,主要从事太赫兹微型电真空器件研究.email:yjwang01@163.com.

徐翱(1982-),男,武汉市人,博士,副研究员,主要从事太赫兹微型电真空器件及特种电真空器件研究.

颜胜美(1979-),男,湖南省娄底市人,在读博士研究生,主要从事大功率太赫兹真空电子器件研究.

金大志(1970-),男,四川省遂宁市人,博士,研究员,主要从事特种电真空器件研究.

向伟(1967-),男,重庆市人,博士,研究员,主要从事特种电真空器件研究.