

文章编号 1004-924X(2011)04-0754-08

面向聚合物微器件超声波精密封接的阵列微导能结构

罗 怡¹, 张苗苗², 孙屹博², 王晓东¹

- (1. 辽宁省微纳米技术及系统重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:为提高聚合物超声波精密封接的可控性, 预防高温场下聚合物的熔融流延影响封接界面质量和精度, 提出了阵列式微导能结构。以聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)微小管道的封接为实验对象, 研究了阵列微导能结构的尺度对超声波封接过程的影响; 采用热压成型工艺在被封接表面制作了 5 组不同高度的微结构。采用基于声波传递效率反馈的超声波精密封接方式, 对超声波作用下聚合物界面的润湿行为进行了观察分析, 讨论了结构尺度对超声波封接质量的影响。结果表明, 随着微结构尺寸的增大, 实现完全联接需要的超声波能量呈递增的趋势。该种微导能结构有效控制了聚合物熔融流延, 获得了均一的封接面, 可实现高质量精密封接。

关键词:超声波精密封接; MEMS; 聚合物器件; 导能结构; 润湿

中图分类号: TB559 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111904.0754

Micro energy director array for ultrasonic precise sealing of polymer MEMS device

LUO Yi¹, ZHANG Miao-miao², SUN Yi-bo², WANG Xiao-dong¹

- (1. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of ultrasonic bonding process for a polymer Electro-Mechanical System(MEMS) and to prevent the flow of polymer under a high temperature, a micro energy director array was proposed. Based on the experiment of PMMA micro-pipe sealing, the influence of micro energy director array on the process of ultrasonic sealing was studied. Five kinds of micro energy directors with different heights were fabricated on the sealing surface by a hot embossing technique. The method of ultrasonic precise sealing based on acoustic transfer efficiency feedback was used in the experiment to study the influence of the height of the micro-array structure on the quality of ultrasonic sealing and to observe the wetting behavior of micro-array structure. Experimental results indicate that the ultrasonic energy to achieve complete connection increases with increasing the height of micro energy director array. The micro energy director can control the flow of the melting-polymer ef-

收稿日期: 2010-08-31; 修订日期: 2010-10-27.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 50775024; No. 50975037)

fectively and can obtain the uniform sealing surface and high quality precise sealing.

Key words: ultrasonic precise sealing; Micro-electro Mechanical System(MEMS); polymer device; energy-oriented structure; wetting

1 引言

聚合物材料以其价格低廉、制作成本低、易于批量制作等优点已经广泛应用于微流控生物芯片、微型燃料电池、微阀、微泵等 MEMS 器件的制造。随着聚合物材料在 MEMS 领域越来越广泛的应用,聚合物微器件的快速精密封接已成为 MEMS 制造技术中的关键环节^[1],例如在聚合物微流控芯片的制作中,为形成封闭的微通道网络而进行的基片与盖片的键合;微阀、微泵等功能器件的密封组装,以及与其它微流体器件的集成等。

目前,在 MEMS 领域应用的聚合物封接方法主要包括热键合^[2]、胶/溶剂粘结^[3]、激光/微波焊接^[4-5]等,但这些方法大都在封接效率和封接质量上存在一定的问题。超声波封接技术以其高效率,无其他物质引入,局部产热等优点在 MEMS 领域倍受关注,2006 年, R. Truckenmüller 首次应用超声波封接技术实现了微流控芯片的封装及微泵、微阀的组装,验证了超声波封接技术应用于微器件封装的可行性^[6]。2009 年 Kim Jong-baeg^[7]实现了外径和内径分别为 1.8 mm 和 0.85 mm 的醋酸纤维素微器件的密封联接。2009 年 S. H. Ng^[8]采用超声波技术在 1 s 内实现了外径为 3 mm 的 PMMA 管道与微流控芯片的封接,接头处的承压能力为 6 bar。上述研究报道将超声波焊接技术拓展到了聚合物 MEMS 器件封接领域,验证了该技术的可行性,但是对于器件微小化后引入的封接质量对输入能量的敏感性未加讨论和深入研究。

在宏观塑料超声波焊接中,为了促进焊件界面的产热速率以提高效率,通常在接头表面制作突起的导能筋^[9]。对于超声波焊接中的导能结构, M. R. Rani 等研究了不同的接头形式,结果表明表面带有粗糙结构的封接强度大于尺寸较大的导能结构的封接强度,同时吸收能量较小,微器件变形较小^[10]; Jianhui Qiu 等认为对于一定的表面结构的高度和粗糙度,存在合适的压力使键合

效果最佳^[11]; Buckley 等将粗糙表面的形貌简化为理想的矩形模型,采用近似的挤出流体理论来模拟润湿过程,其研究结果表明封接面的表面形貌对聚合物的扩散润湿过程非常敏感,差的表面平整度容易在封接面产生不均匀扩散,从而增加缺陷发生的几率^[12-13]。

在 MEMS 领域由于微器件尺寸很小,传统的导能筋结构并不适用,在目前针对 MEMS 器件的超声波封接技术中基本不采用导能结构,而是以平面接头进行封接^[8]。同一批试件中,由于封接表面的表面形貌和粗糙度存在差异,对封接面的接触面积、接触方式及接触力等有一定的影响,因此在超声波封接过程中封接界面的产热速率及产热区域存在着一定的差异,使超声波封接过程具有一定的随机性,进而影响了封接的精度^[14]。

为了消除微器件接头表面形貌和粗糙度差异对封接质量的影响并提高产热效率,本文提出在微器件表面制作阵列微导能结构的方法,用一组凸起的点阵结构代替传统的导能筋结构,一方面减小了超声波封接过程中的初始接触面积,可以提高超声波产热效率;另一方面,均布的点阵结构可以使聚合物熔融流延均布,提高封接面的一致性。根据宏观超声波焊接中对于导能筋结构的研究结果,三角形导能结构的产热速率要高于半圆形及方形等^[15],基于此种现象本文设计的点阵微导能结构采用四棱锥体结构,采用硅模具及热压成型技术在基片的封接表面制作,研究了不同尺度的微导能结构阵列对超声波封接参数、润湿行为和封接质量的影响规律。

2 阵列微导能结构设计制作

在宏观聚合物超声波焊接技术中,截面为三角形的导能筋相比于其它形状接触面积小,可大幅提高超声波的声能密度,使接头达到更高的温度。据此特点,本文设计了四棱锥体微导能结构。以 PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)微管道为实验器

件,应用超声波封接技术将其与基片进行熔融封接,其结构如图 1 所示,微管道的尺寸为外径 $\Phi 3$ mm,内径 $\Phi 1$ mm,阵列微导能结构制作于基片表面。实验中采用 PMMA 材料(旭化成,上海)的玻璃转化温度约为 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$,熔化温度约为 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

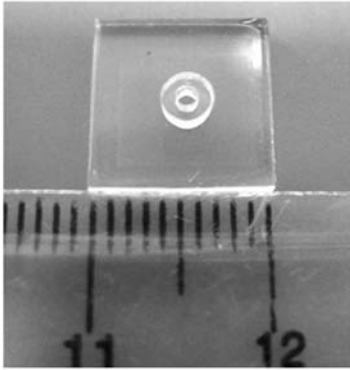


图 1 基片与微管道配合实物图

Fig. 1 PMMA micro connector and substrate for bonding experiment

首先采用各向异性湿法腐蚀工艺制作硅模具^[16],采用 $\langle 100 \rangle$ 晶向的 n 型掺杂硅片(麦克斯,洛阳),结构尺寸由掩模板的窗口尺寸决定,腐蚀液为 $\text{KOH} : \text{IPA} : \text{H}_2\text{O} = 40 \text{ g} : 30 \text{ ml} : 100 \text{ ml}$ (体积比),腐蚀温度为 $73\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。利用硅的各向异性腐蚀倾斜角为 54.7° 的特点,自停止腐蚀获得四棱锥微结构模具,如图 2 所示。研究了阵列微导能结构的尺寸对封接的影响,制作了表面带有阵列微导能结构的基片,如图 3(a)所示,其截面示意图如图 3(b)所示。分别设计了 5 组不同尺寸的微导能结构,如表 1 所示。

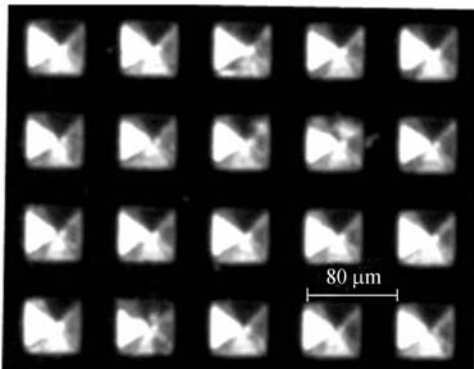


图 2 实验中使用的硅模具

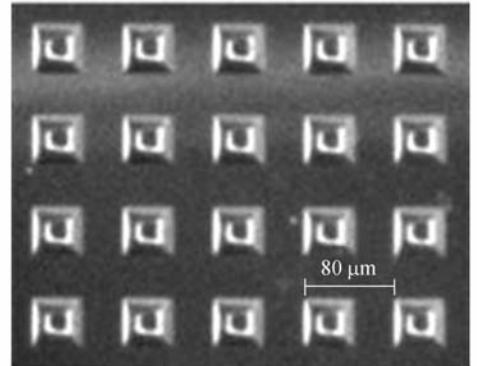
Fig. 2 Si mold used in experiment

表 1 PMMA 基片表面微导能结构尺寸

Tab. 1 Size of micro-array structure on PMMA substrate

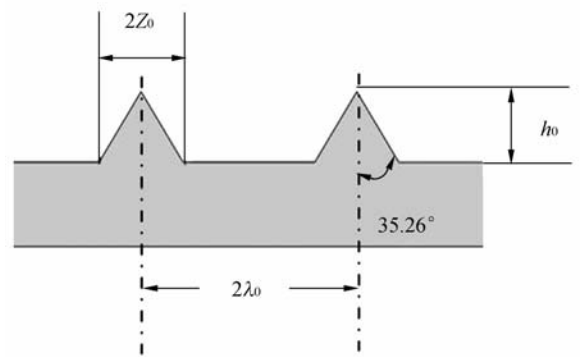
实验编号	I	II	III	IV	V
$2Z_0/\mu\text{m}$	10	20	30	40	50
$2\lambda_0/\mu\text{m}$	80	80	80	80	80

热压设备选用大连理工大学设计制作的用于微系统技术的 RYJ-II 型热压机^[17],热压工艺参数为:热压温度 $135\text{ }^{\circ}\text{C}$,压力 2.5 MPa ,保温保压时间 300 s 。



(a) PMMA 基片上热压成型的结构

(a) Micro-array structures embossed on substrate



(b) PMMA 压印成型结构侧面示意图

(b) Profile sketch of embossed structure

图 3 PMMA 压印成型结构放大照片及截面示意图

Fig. 3 Micro-array structure and profile sketch of PMMA substrate

3 超声波封接实验装置

超声波精密封接实验装置如图 4 所示。应用 60 kHz 超声换能器提供高频、低振幅超声波振

动,较高的频率可在相对较小的振幅下为封接提供足够快的产热率,减小振幅可以降低微器件所受到的机械振动负载,更适用于微器件的封接。采用高细分步进电机及直线导轨驱动超声波工具头的纵向移动,应用微位移传感器检测工具头与零件相互接触位置附近的一段微小距离,可提高控制工具头的运动精度并施加稳定的压力。承载零件的平台装有压力传感器,用于实时检测直线导轨驱动工具头对零件施加的压力。



图4 超声波精密封接实验装置

Fig. 4 Ultrasonic precise bonding mechanism

为了检测并控制超声波封接过程,实验采用基于声波传递效率反馈的超声波精密封接方式,其机理为通过检测由超声波工具头产生并穿过待封接的两层聚合物材料传递到基片底面的超声波振动信息来反馈控制超声波能量的通断。在超声波封接过程中,聚合物器件界面温度升高,其局部由玻璃态转变为粘弹态,随着粘弹性体更加剧烈地产热进而转变为粘流态,随着状态的转变聚合物材料的弹性模量大幅下降^[18],其对声波的传递效率将大幅度衰减。由于超声波工具头提供的振动保持恒定,因此通过检测传递到基片底面的振动信息即可反映聚合物器件对声波传递效率的衰减程度。为了检测基片底面的振动,在承载平台上安装了压电陶瓷传感器,其控制系统结构如图5所示,该传感器信号经过电荷放大器转换为模拟电压信号,应用数据采集卡(研华 PCI-1712,中国)将其转换为数字信号输入到工控机及控制程序,进而控制超声波电源及支线导轨的移动。整个控制流程通过 LabVIEW 软件实现。

对于聚合物的超声波封接,在超声波施加之初,聚合物处于玻璃态,传递到压电传感器并经过压电效应获得的初始输出电压较大。在超声波作

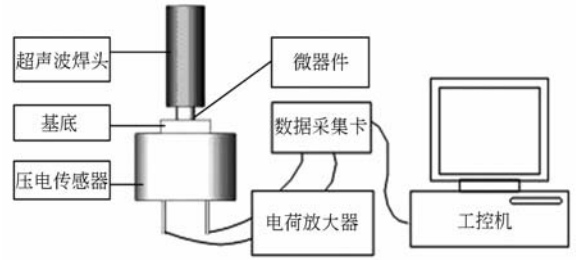


图5 基于振幅反馈控制方法的超声波精密封接原理图

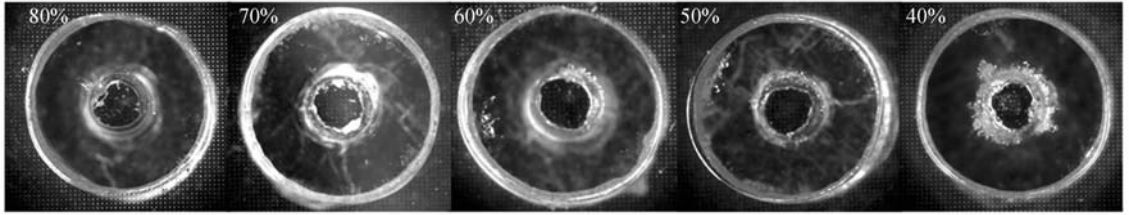
Fig. 5 Principle diagram of ultrasonic bonding based on ultrasound propagation

用下,聚合物向粘弹态转变,此时通过封接界面传递到基片底部的超声波能量有一部分就会被储存在处于粘弹态的聚合物中,压电传感器检测到的振动信号减弱,相应的输出电压值不断减小,封接界面处粘弹态聚合物的体积越大,传感器检测到的振动幅度越小,输出电压值越小。因此通过控制电压幅值的衰减比控制超声波的通断时间,可以有效控制聚合物的熔融体积。采用电压幅值反馈控制模式进行超声波封接,以聚合物的力学状态控制超声波的通断,体现了聚合物在超声波场中的变化规律,实现了微器件封接中输入能量的自适应精确控制,为微器件的精密封接提供了一种可行的方法。

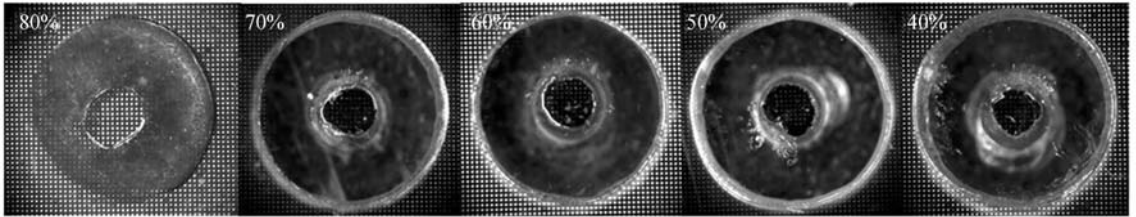
4 实验结果及讨论

本文基于前述装置及控制方法对如表1所示的几种不同尺寸的阵列微导能结构的基片进行了实验。对每个试件分别选择电压幅值衰减比 ρ 为80%,70%,60%,50%和40%进行了超声波封接实验,并通过光学显微镜观察封接界面的封接程度。实验中采用的工艺参数为:超声振幅 $A=6\ \mu\text{m}$,超声频率 $f=60\ \text{kHz}$,触发压力 $F_T=15\ \text{N}$,保压时间 $t_H=5\ \text{s}$ 。所有的超声波封接实验均在10 s内完成。

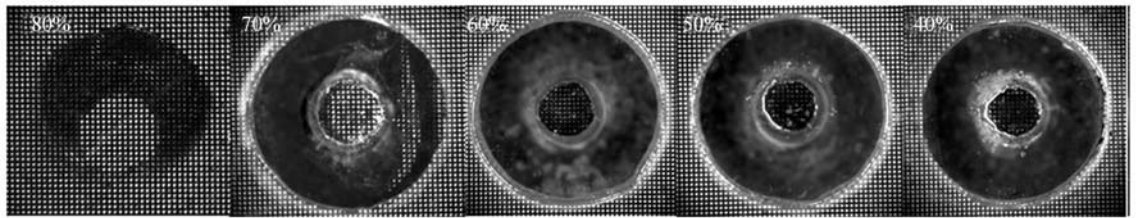
图6给出了不同尺寸的微导能结构在不同电压幅值衰减比封接模式下的熔接效果。I组实验中,电压幅值衰减比为80%封接参数下的封接界面透明度良好,微导能结构熔融完全,无明显气泡,封接面边缘无熔融流延溢出,质量较好。随着电压幅值衰减比由70%减小到40%,封接面边缘开始有熔融流延溢出,并不断增多,封接界面气泡



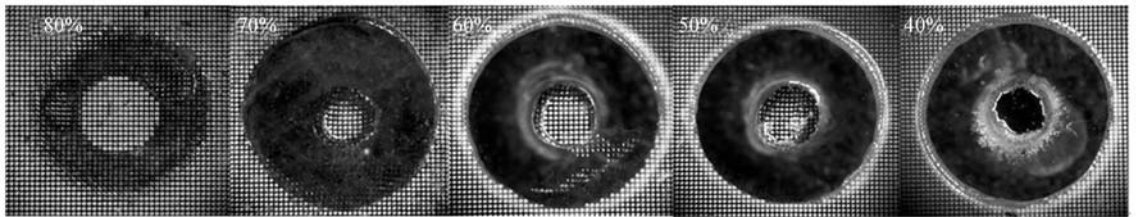
(a) I 组尺寸的微导能结构在各参数下的熔接效果
 (a) Micrograph of bonding interfaces at parameters I



(b) II 组尺寸的微导能结构在各参数下的熔接效果
 (b) Micrograph of bonding interface at parameters II



(c) III 组尺寸的微导能结构在各参数下的熔接效果
 (c) Micrograph of bonding interface at parameters III



(d) IV 组尺寸的微导能结构在各参数下的熔接效果
 (d) Micrograph of bonding interface at parameters IV



(e) V 组尺寸的微导能结构在各参数下的熔接效果
 (e) Micrograph of bonding interface at parameters V

图 6 不同尺寸的微导能结构在各电压幅值衰减比参数下的熔接层显微照片
 Fig. 6 Micrograph of bonding interfaces at different parameters

数量不断增加,当幅值衰减比达到40%时,熔融聚物流延堵塞了微管道。同样的趋势出现在II-V组实验中,随着幅值衰减比的减小,微管道封接面的封接程度不断增大,其不同之处体现在同一幅值衰减比参数下的封接程度上:在80%衰减比参数下,I组实验中微导能结构熔融完全,封接面质量良好,II-V组实验中微管道脱落,未实现封接,从脱落微管道的封接区域可以看出其微导能结构局部熔融,不能实现有效封接;在70%衰减比下,II组实验中的微导能结构熔融完全,封接面质量较好;60%衰减比下III组封接面质量最佳;50%下IV组、V组均获得质量较好的熔接层。

超声波封接过程中,封接面间相互接触的聚合物在高频率的相互摩擦下升温熔融,熔融的聚合物吸收一部分由焊头传递来的超声波能量,从而导致传递到基片底面的超声波振动的衰减,熔体体积越大,吸收的超声波能量越大,基片底面的振动衰减程度也就越大。各组实验现象证实了这一规律:随着衰减比值由80%减小到40%,熔融聚合物呈递增的趋势。

由图可见,不同尺寸的微导能结构在实现理想封接时的最佳参数存在着一定的差异。此现象反映微导能结构熔融物的润湿铺展规律。超声波焊接过程中的熔体流动属于聚合物的压流行为,同时由于聚合物熔体黏度值很大,因此熔体对封接件表面的润湿主要是依靠熔体的挤出流动实现的。在超声波封接的初始阶段,微导能结构与另一表面的接触部分发生高频率摩擦,当界面温度超过聚合物的熔融温度时,熔融区域将在压力和超声载荷的作用下发生流动。挤出的熔融聚合物在上下表面间不断铺展,最终形成熔接层,实现界面的封接。熔融聚合物的铺展程度在一定程度上直接决定了封接面的质量,当微导能结构尺寸较小时,所需要填充上下封接面间隙的熔融聚合物相对减少,在相同参数下,熔融聚合物在压力的作用下被挤向封接面的间隙,在试样封接界面上铺展,实现两封接表面紧密封接;而随着微导能结构尺寸增大,熔融的聚合物大部分或者完全被挤向未熔融微导能结构的侧面,无法形成封接两表面有效的熔接层,导致微管道封接不完全封接甚至脱落。由此可见,大尺寸微导能结构若要实现

完全熔融,势必增加超声波的能量,以实现熔融聚合物在封接面间的完全铺展。

在脱落的微管道封接表面,可以观察到出现了与基片上微导能结构对应的凹陷结构,说明在超声波封接过程中不仅微导能结构发生熔融坍塌,与微导能结构接触的表面也发生了熔融。在施加超声波过程中,微导能结构受到两方面的作用,步进电机施加的压力以及高频率的超声振动,基片上的微导能结构在超声波的作用下,反复与微管道底部撞击摩擦,两者接触区域的温度迅速升高,当达到玻璃点转化温度时,聚合物向黏弹态转化,处于黏弹态的聚合物在压力的作用下挤出,形成“凹坑”。微导能结构的高度和施加的超声波的能量在其形成过程中的影响较大,超声波能量较小时,微结构尖端熔融的聚合物相应减少,高度较大的表面结构仍具有较大的刚度,容易将微管道表面的熔融聚合物挤出形成凹坑。随着超声波能量的施加,表面结构不断地从尖端向上熔融,熔融的聚合物被挤出,不断在封接界面铺展,上下界面处于熔融状态的聚合物得到了较大程度的融合,为其分子链跨界面扩散形成熔接层提供了更大的接触面积。

5 结 论

本文针对聚合物MEMS器件的超声波精密封接提出了阵列微导能结构,利用硅模具热压成型的方法制作了5组不同尺寸的四棱锥型阵列微导能结构,分别对每种尺寸微器件进行了一系列电压幅值衰减比的超声波封接实验,对超声波封接过程中界面聚合物的润湿行为进行了观察分析,研究了微导能结构的结构尺度对超声波封接质量的影响。结果表明,该种微导能结构可以消除微器件表面形貌和粗糙度对封接质量的影响,实现封接过程中熔融聚合物的有效控制,获得良好的封接面,且所有封接实验都在10 s内实现,封接效率高。界面实现完全熔接所需要的能量随着微导能结构的尺寸增大而增大;小尺寸微导能结构更有利于熔融聚合物在封接表面的铺展,在较小的超声波能量下即可实现微器件的精密封接,封接所需时间更短。

参考文献:

- [1] LEE S J, LEE S Y. Micro total analysis system (mu-TAS) in biotechnology[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2004, 64: 289-299.
- [2] BOHM S, DILGER K, HESSELBACH J, et al.. Micro bonding with non-viscous adhesives [J]. *Microsystem. Technologies*, 2006, 12(7): 676-679.
- [3] LI J H, CHEN D, CHEN G. Low-temperature thermal bonding of PMMA microfluidic chips [J]. *Analytical Letters*, 2005, 38(7): 1127-1136.
- [4] USSING T, PETERSEN L V, NIELSEN C B, et al.. Micro laser welding of polymer microstructures using low power laser diodes [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 33(1-2): 198-20.
- [5] YUSSUF A A, SBARSKI I, HAYES J P, et al.. Microwave welding of polymeric-microfluidic devices [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, 15: 1692-1699.
- [6] TRUCKENMÜLLER R, AHRENS R, CHENG Y, et al.. An ultrasonic welding based process for building up new class of inert fluidic microsensors and actuators from polymers[J]. *Sensors and Actuators*, 2006, 132(1): 385-392.
- [7] KIM J, JEONG B, CHIAO M. Ultrasonic bonding for MEMS sealing and packaging[J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2009, 32(2): 461-467.
- [8] NG S H, WANG Z F, ROOIJ N F de. Microfluidic connectors by ultrasonic welding[J]. *Microelectronic Engineering*, 2009, 86(4-6): 1354-1357.
- [9] 刘川. 超声波塑料焊接机理和工艺试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
LIU CH. *The mechanism of ultrasonic plastic welding and the study of experiments*[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003. (in Chinese)
- [10] RANI M R, PRAKASAN K, RUDRAMOORTHY R. Study of different joints for ultrasonic welding of semicrystalline polymers [J]. *Experimental Techniques*, 2009(7/8): 36-42.
- [11] QIU J H, ZHANG G H, WU Y B. Proposal of ultrasonic welding technique and weld performances applied to polymers[J]. *Polymer Engineering and Science*. 2009(12): 1755-1759.
- [12] PAUL B C, JUNJIE W, HAUGHIE D W. The integrity of welded interfaces in ultra high molecular weight polyethylene: part 1—Model[J]. *Biomaterials*, 2006(6): 3178-3186.
- [13] HAUGHIE D W, PAUL B C, JUNJI W. The integrity of welded interfaces in ultra-high molecular weight polyethylene: part 2—Interface toughness [J]. *Biomaterials*, 2006(7): 3875-3881.
- [14] 孙屹博, 罗怡, 王晓东. 聚合物微器件压力自适应超声波精密联接[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(5): 1189-1195.
SUN Y B, LUO Y, WANG X D. Ultrasonic precise bonding for polymer micro device based on adaptive pressure control[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5): 1189-1195. (in Chinese)
- [15] BENATAR A, ESWARAN R V, NAYAR S K. Ultrasonic welding of thermoplastics in the near-field[J]. *Polymer Engineering and Science*. 1989, 29(23): 1689-1698.
- [16] 陶琳, 罗怡, 张彦国, 等. 超声波键合能量引导微结构 PMMA 基片的制作[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(6): 1373-1378.
TAO L, LUO Y, ZHANG Y G, et al.. Fabrication of micro energy director on polymethyl methacrylate substrate for micro ultrasonic bonding[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6): 1373-1378. (in Chinese)
- [17] 罗怡, 王晓东, 杨帆, 等. 变温蠕变实验的 COP 微流控芯片热压制备[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(7): 1090-1095.
LUO Y, WANG X D, YANG F, et al.. Variable temperature quasi-creep experiment for fabrication of microfluidic chip using Cyclo-olefin Polymer (COP) [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1090-1095. (in Chinese)
- [18] 何曼君, 张红东, 陈维孝, 等. 高分子物理 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 2007: 232-239.
HE M J, ZHANG H D, CHEN W X, et al.. *High Polymer Physics* [M]. Shanghai: The publisher of Fudan University, 2007: 232-239. (in Chinese)

作者简介:



罗 怡(1973—),女,安徽合肥人,副研究员,1994年于大连理工大学获学士学位,2001年于上海大学获博士学位,主要从事微装配和微纳加工技术的研究。E-mail: luoyi@dlut.edu.cn



孙屹博(1983—),男,吉林通化人,博士研究生,2005年于大连理工大学获学士学位,主要研究方向为聚合物的MEMS制造。E-mail: sun200181410@163.com



张苗苗(1986—),女,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向为聚合物微器件的超声波封接。E-mail: mmz11@yahoo.cn



王晓东(1967—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1989年于南京航空学院获学士学位,1992年于哈尔滨船舶工程学院获硕士学位,1995年于哈尔滨工业大学获博士学位,主要从事微装配技术与系统、精密仪器设计与制造等方面的研究。E-mail: xdwang@dlut.edu.cn

● 下期预告

Y 孔分形频率选择表面的传输特性

王珊珊^{1,2},高劲松¹,冯晓国¹,赵晶丽¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室,吉林 长春 130033;2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

为了满足现代通信设备多频带及集成化要求,将分形理论应用于频率选择表面(FSS)设计,使单屏FSS具有多频谐振特性。首先,以结构对称、抗交叉极化特性好的Y孔单元为例,经过递归、迭代产生二阶Y孔分形单元,给出计算单元几何分布的公式。然后,结合Floquet周期条件,应用全波周期矩量法得到描述FSS表面电流分布的电场积分方程,定量地分析了入射电磁波在不同极化方式下Y孔分形FSS单元的极子长度、孔径宽度等结构参数及排布方式对其频率响应特性的影响。最后,采用成熟的镀膜、光刻工艺制备Y环分形FSS样件并在半电波暗室进行FSS传输特性测试。实验结果与数值结果一致,显示在第一谐振波长的经验估算值约为 $0.79 \times (4 \text{ 倍极子长度})$,孔径宽度W由1 mm增至1.5 mm时,带宽展宽650 M,角度稳定性对单元排布方式较敏感。结果表明,单屏分形FSS具有多频谐振的特性,其透过率及-3 dB带宽均可通过参数优化满足工程应用基本要求。