

文章编号: 1007-4252(2008)02-0552-05

## 应用于超声共振检测的 PZT/Si 复合材料换能器

孙宏明, 张志强, 郭航

(厦门大学萨本栋微机电研究中心, 厦门 361005)

**摘要:** 提出并设计了一种应用于超声共振检测的 PZT/Si 复合材料圆片换能器。该换能器是将一小硅片粘贴在 PZT 压电片上复合而成, 硅片中心已有一个应用 MEMS 技术加工制造的倒金字塔小坑。这使得待测样品很容易安装在超声共振谱检测的平台上, 并能提高测量的精确度。文中利用 ANSYS 对该换能器和单独 PZT-4 压电片换能器进行比较分析, 得出了不同结构在相同电压和外力作用下产生的静态位移结果以及共振频率, 并讨论了复合结构参数对换能器工作灵敏度的影响。结果表明, 复合换能器的灵敏度仅降低 4% ~ 4.8%, 可以应用在超声共振谱检测中。

**关键词:** 超声共振检测; PZT/Si 复合换能器; MEMS 微制造

**中图分类号:** TP212.1      **文献标识码:** A

### A PZT/Si composite transducer for resonant ultrasound spectroscopy

SUN Hong-ming, ZHANG Zhi-qiang, GUO Hang

(Pen-Tung Sah Research Centre in Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract** In this paper, a PZT/Si composite transducer for resonant ultrasound spectroscopy (RUS) measurement is proposed and designed. This composite transducer is made of a PZT piezoelectric disk, where a tiny silicon piece is adhered in its centre. For the silicon piece, a pyramid pit is fabricated by using MEMS technology. By using this composite transducer with a central pyramid pit, the tested sample is easily mounted to RUS stage and measurement accuracy can be improved. In the paper, we use finite element method in ANSYS to analyze the performance of composite transducer, and compare it with that of single PZT plate piezoelectric transducer. The results show that the sensitivity of composite transducer decreases only by 4% ~ 4.8% and can be used in RUS measurement.

**Key words** resonant ultrasound spectroscopy; PZT/Si composite transducer; MEMS microfabrication

## 0 引言

利用超声测定样品的弹性常数一般采用两种方法, 一种是“脉冲-回波”(Pulse-Echo)技术, 另一种为“超声共振谱”(Resonant Ultrasound Spectro-

scope, 简称 RUS)技术。在脉冲-回波技术中, 待测试件样品需要紧紧的贴靠在超声激励器件上, 由于声波传播时间精确度受到波长的限制, 因此对于微型试件的测量, 该方法就需要频率非常高的超声激

收稿日期: 2007-07-20      修订日期: 2007-09-22

基金项目: 厦门大学引进人才启动基金资助。

作者简介: 郭航 (1967-), 男, 博士, 副教授 (E-mail: hanggu@xmu.edu.cn)。

励;而相对于脉冲回波技术而言,超声共振谱技术是一种能够测定材料的弹性常数的动态方法,这种方法采用外部的压电超声换能器用来激励和测量具有自由振动试件的谐振频率,而并非采用“发射-回波”的方法来测量,其原理如图 1 所示,该方法利用换能器轻轻地夹持待测试件的边缘,这种接触的影响在实际测量中是可以忽略的,避免了换能器必须紧贴于试件而产生损伤。本文研制一种应用于超声共振检测的新型换能器。

### 1 超声共振谱技术 (RUS)

超声谐振谱分析是上个世纪九十年代发展起来的一种表征材料特性的方法,它的基本原理是通过测量样品的多个固有频率,从而研究样品的弹性特性,该方法被凝聚态物理学家认为是测量确定固体样品弹性常数的最精确的方法。图 1 所示的为利用超声共振谱技术测定样品材料特性的原理图<sup>[1]</sup>:将待测样品放在两个压电换能器之间,一个换能器作为超声发射器,另一个则作为超声接收器。由计算机控制的频率合成器对超声发射器进行扫频,当频率与样品的固有频率相同时,样品被驱动进入自由共振状态,并将信号传递给另一端的超声接收器。由于是在一段频率范围内的扫描,一次测量就可以获得包含样品多个固有共振频率的超声共振谱,由该超声共振谱就可确定该样品的多达 36 个的弹性常数,或作为工程应用的弹性模量、泊松比等,因此该方法是一种动态的无损检测方法。

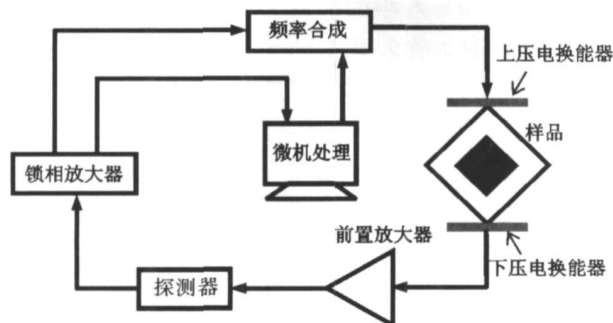


Fig 1 Back diaphragm of RUS apparatus

图 1 超声共振谱技术方块图

### 2 PZT/Si 复合换能器结构的设计

在 RUS 测量过程中,试件样品通常被夹在两片压电换能器之间,压电换能器采用 PZT 或其他的压

电陶瓷或晶体。但是,因为压电片表面是光滑的,试件难以准确地夹在两片压电片中间并且不能保证每次测量装夹的位置都一样。如果试件每次测量的装夹位置发生变化,将导致测得的频率或幅值存在一定差异,从而降低了测量准确性,尤其当试件很小时,这种影响更为显著。针对此问题,本文提出并设计了一种如图 2 所示的结构,在原来的 PZT-4 换能器上复合加上一块小硅片,硅片中心有用 MEMS 体硅加工技术加工的支撑锥孔用来夹固测量试件,使得每次测量试件的位置不发生变化,以保证测量精度。

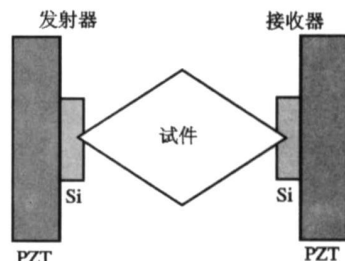


Fig 2 The schematic of composite piezoelectric transducer in RUS

图 2 复合压电材料换能器应用于 RUS 示意图

### 3 发射端复合换能器的电-位移分析

根据图 2 所描述的结构,发射器中的 PZT 受到电压的驱动会发生电致伸缩效应产生位移形变,由于硅材料在换能器中起支撑作用,并没有压电特性,但作为负载,会影响到换能器的工作灵敏度。因此,需要比较复合换能器和单独压电片结构的电致位移灵敏度。本文利用有限元方法分别对两种结构进行静态的电压-位移分析。图 3 所示的为为一硅圆片与 PZT-4 压电圆片粘接在一起的复合结构的 ANSYS 剖分工作图。

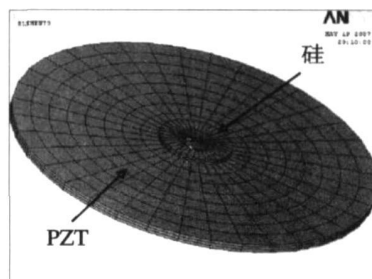
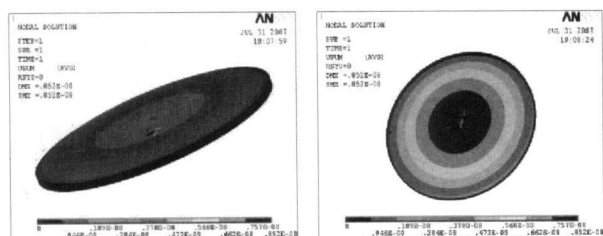


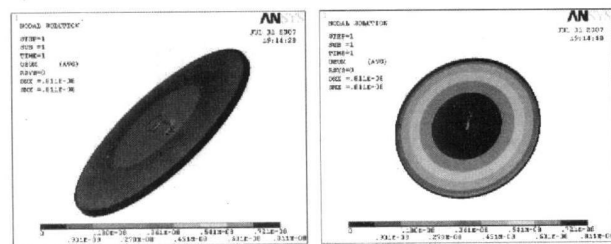
Fig 3 Finite element model of the composite structure

图 3 压电复合板的有限元剖分模型

图 4 所示的分别为施加 20V 电压后单独 PZT-4 与复合结构产生的位移分布图, 其中 PZT-4 圆片的半径为 10mm, 硅片的半径为 0.5mm。由图中可以得出, 单独 PZT-4 压电片中心产生的最大位移为 8.52mm, 复合后的 PZT/Si 结构中心产生的最大位移为 8.11mm。



(a) 单独 PZT-4 片位移分布图



(b) PZT/Si 复合结构位移分布图

Fig 4 Contour of displacement of two different structures at 20V

图 4 施加 20V 电压后两种结构位移分布图

定义压电复合层结构产生的位移与单独 PZT 片产生的相对位移偏差  $S$

$$S = \frac{D_{max1} - D_{max2}}{D_{max1}} \times 100\% \quad (1)$$

式 (1) 中  $D_{max1}$  为单独 PZT-4 圆板的最大位移,  $D_{max2}$  为复合层结构的最大位移。表 1 所示的是通过有限元方法计算得出的不同半径硅片的复合结构在 20V 电压作用下产生的位移和  $S$  值。从表中可得出, 当 PZT-4 和硅片半径比达到 10/0.5 时, 偏差  $S$  可降低到 4.8%。

图 5 所示的是不同半径硅片的复合层结构的电致位移关系曲线。计算中硅片半径最小为 0.5mm, 从图中可以看出, 硅片半径为 2mm 的复合结构电压-位移曲线偏离单独 PZT-4 的较大, 因此其灵敏度降低较大, 而硅片半径为 1mm 和 0.5mm 的复合结构产生的形变大小都很接近单独 PZT-4 结构, 且复合结构产生的位移与施加电压也成线性关系, 这表明复合结构中合理设计压电片与硅片的尺寸对工作灵敏度影响不大。

表 1 复合材料圆板的电致位移结果

Table 1 Results of electrostriction of the composite structures

PZT-4 半径 (mm)	硅半径 (mm)	最大位移 (mm)		偏差 $S$
		PZT-4	复合	
10	2	8.52	6.89	19.2%
10	1	8.52	8.01	6.1%
10	0.5	8.52	8.11	4.8%

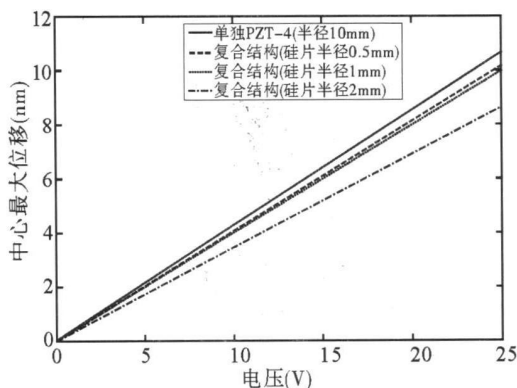


Fig 5 Dependence of maximum displacement on voltage

图 5 不同换能器结构最大位移与电压的关系图

## 4 接收端复合换能器的静力分析

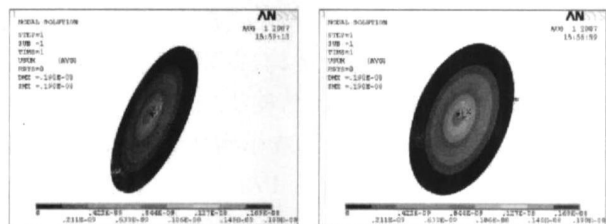
接收端换能器在共振检测中通过试件接收压力信号并转换为电信号, 因此复合层结构在受到外力作用所产生的位移大小会影响到输出的电信号。为了探讨不同结构的接收换能器的压电灵敏度, 可以通过对图 3 所示的模型中心施加沿  $z$  方向的力, 来分析不同结构受力产生的位移情况。

图 6(a) 表示的为半径为 10mm 的 PZT-4 压电片, 在受到 1mN 大小的力的作用下产生的位移情况, 图 6(b) 表示的为硅半径为 1mm 的复合结构在施加同样大小的力后, 产生的位移情况。通过图 (a) 和 (b) 对比可以看出, 两种结构在同一位置施加力, 产生的形变情况相同, 但位移大小有偏差。复合结构在外力的作用下, 产生的最大位移为 1.46mm, 单独压电板产生的位移为 1.69mm。

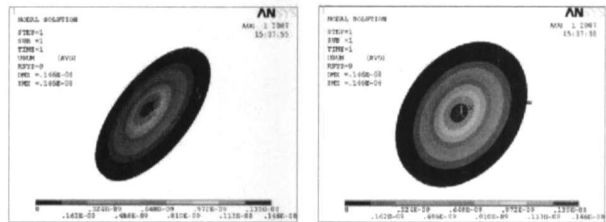
表 2 为不同半径硅片的复合结构在  $1 \times 10^{-3}$  N 力的作用下产生的位移和  $S$  值。从表中可得出当 PZT-4 和硅片半径比达到 10/0.5 时, 位移偏差  $S$  可降低到 4%, 因此复合结构的硅片半径在 0.5~1mm 范围内基本不会影响接收器的工作灵敏度。

图 7 所示的为复合层结构上不同半径的硅片的力-位移关系曲线。从图中可以看出复合结构中硅片半径越小, 受力产生的位移越接近单独 PZT-4 结构,

并且复合结构的位移也与施加的力大小成线性关系。



(a) 单独 PZT 圆板位移分布图



(b) PZT/Si 复合层圆板位移分布图

Fig 6 Contour of displacement of two different structures

图 6 施加相同力的两种结构位移分布图

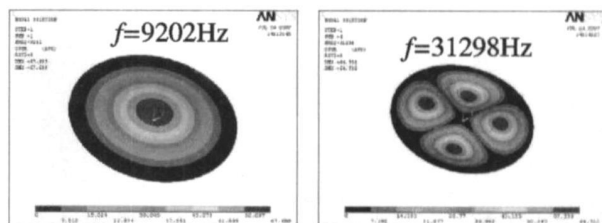
表 2 复合材料圆板的静力分析位移结果

Table 2 Results of static displacement of the composite structures

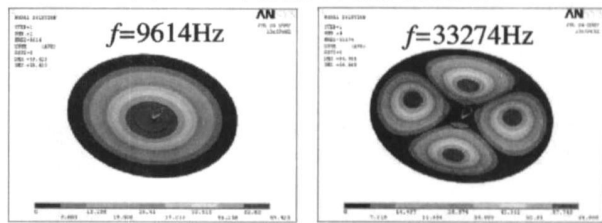
PZT-4 半径 (mm)	硅半径 (mm)	最大位移 (mm)		偏差 S
		PZT-4	复合	
10	2	1.69	1.14	32.5%
10	1	1.69	1.46	13.6%
10	0.5	1.69	1.62	4.0%

有必要了解 PZT/Si 复合换能器结构自身的谐振频率,以便在所测得的试件的超声共振频谱中去掉这些换能器本身的谐振频率,才能进行逆问题的求解。

通过对复合换能器结构进行模态分析,可得到与单独 PZT-4 板在不同阶的共振频率结果,如图 8 所示,单独 PZT-4 和 PZT/Si 复合层结构的共振频率数值上有所不同,PZT/Si 复合层结构的共振频率会高于单独 PZT-4 圆板。通过计算硅片半径为 0.5mm 的复合结构的模态,可计算得出前 9 阶的模态结果,如表 2 所示,各模式下共振频率与单独 PZT-4 压电片相差不大。



单独 PZT-4 圆板的不同阶共振模态图



(a) 复合圆板的不同阶共振模态图

Fig 8 Contour of modal analysis of two different structures

图 8 两种结构的模态分析图

表 2 硅圆片半径为 0.5mm 的复合材料的共振频率

Table 2 Resonant frequency results of composite structure

阶数	单独 PZT-4	复合材料
1	9202 Hz	9232 Hz
2	19126 Hz	19157 Hz
3	31297 Hz	31551 Hz
4	35737 Hz	36180 Hz
5	45700 Hz	45807 Hz
6	54509 Hz	54846 Hz
7	62324 Hz	62477 Hz
8	75403 Hz	76625 Hz
9	79798 Hz	80726 Hz

## 6 PZT/Si 复合材料换能器结构的制作

为了得到如图 2 所示的作为发射和接收器的复合换能器结构,首先利用 MEMS 技术加工出带有小

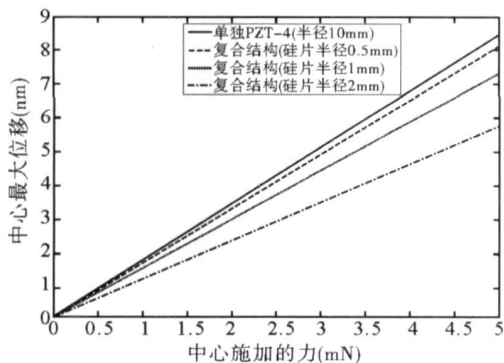


Fig 7 Dependence of maximum displacement on force

图 7 不同换能器结构最大位移与施加力的关系图

## 5 压电复合换能器的共振频率

在超声共振谱检测过程中,驱动样品振动的超声发射器在扫频时,在一些特定的频率换能器自身也会产生共振并通过试件样品传递到接收换能器中,因此

坑的硅圆片结构。其基本过程为在 N(100) 硅片上生长一层厚度约为  $1\mu\text{m}$  的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜, 然后利用光刻技术进行图形加工, 再进行 RIE 刻蚀  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜, 最后腐蚀出倒金字塔形小坑, 将得到的硅圆片结构附贴在 PZT 压电片的中心。如图 9 所示的为已加工出的带有小坑的硅圆片器件以及利用夹具固定的 PZT/Si 复合层压电圆板结构。图 10 所示的为图 9 的硅圆片上中心直径  $100\mu\text{m}$  的小坑从不同角度拍摄的扫描电镜 (SEM) 图片。从 SEM 图片中可以看到, 小坑并不是设计图形的正圆锥坑, 而是倒金字塔形, 这是由于硅腐蚀具有很强的方向性导致的, 但并不影响其作为支撑使用。

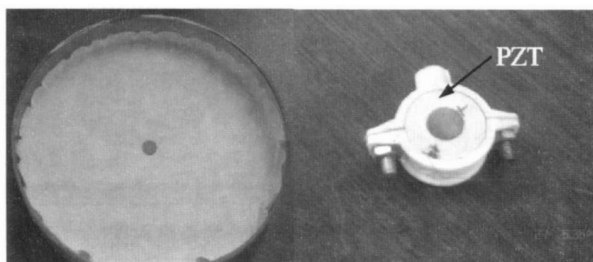
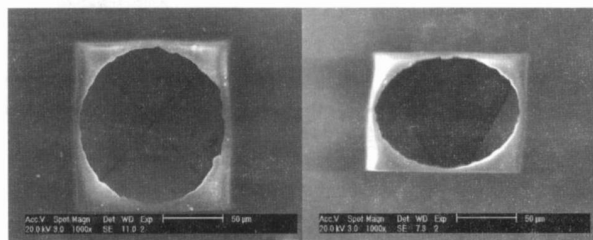


Fig. 9 The device of PZT/Si composite structure

图 9 PZT/Si 复合材料器件图



(a) 正俯视图 (仰角  $0^\circ$ )

(b) 仰角  $60^\circ$

Fig. 10 SEM images of the prick hole in different direction

图 10 不同倾斜角拍摄的锥孔扫描电镜 (SEM) 图

## 7 结论

提出了一种可应用于超声共振谱技术中的圆形 PZT/Si 复合压电换能器结构, 并对它进行分析, 通过与单独 PZT-4 换能器结构进行比较, 得出两种结构的电压-位移偏差可减小到 4.8%, 静力-位移偏差只有 4%, 并且增大 PZT-4 与硅片的半径比, 其工作共振频率数值与单独 PZT-4 相差不大。因此该复合压电换能器的灵敏度降低很小, 可以用于超声共振谱的测量当中。最后利用 MEMS 技术制造出了该复合换能器件。

## 参考文献:

- [1] Hang Guo, Amit Lal. Die-level characterization of silicon-nitride membrane/silicon structures using resonant ultrasonic spectroscopy [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems* 2003, 12(1): 53-63
- [2] 涂远, 等. 压电类智能层合结构的 ANSYS 仿真分析 [J]. *广西大学学报 (自然科学版)*, 2005 30(4): 288-292
- [3] 张福学, 等. 现代压电学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] 张沛霖, 等. 压电测量 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1983