

一种基于梯形压电悬臂梁的能量采集器研究

何挺,马剑强,刘莹,李保庆,褚家如

(中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系,安徽 合肥 230027)

摘要:提出了一种基于 d_{33} 模式的梯形压电悬臂梁式能量采集器。采用梯形悬臂梁结构能提高能量采集器的平均应力和降低其最大应力,增加其输出电压和使用寿命;同时由于压电材料的 d_{33} 系数一般是 d_{31} 系数的 2~3 倍,利用 d_{33} 模式同样能提高能量采集器的输出电压。分析和制备了同尺寸的 d_{31} 模式和 d_{33} 模式两种能量采集器,并进行测试。实验结果表明, d_{33} 模式能量采集器的输出电压约是 d_{31} 模式的 2 倍,具有较高输出电压,与有限元分析结果基本一致。

关键词:能量采集;压电悬臂梁;有限元分析;叉指电极

中图分类号:TM91 **文献标识码:**A

Study on An Energy Harvester Based on Trapezoidal Piezoelectric Cantilever

HE Ting, MA Jianqiang, LIU Ying, LI Baoqing, CHU Jiaru

(Dept. of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: This paper proposes a piezoelectric energy harvester based on a trapezoidal piezoelectric cantilever using the d_{33} mode of the piezoelectric materials. The trapezoidal cantilever structure can improve the average stress of energy harvester and reduce its maximum stress, thus it can increase the output voltage and service life of the harvester. In another word, the d_{33} coefficient of piezoelectric materials is 2-3 times of the d_{31} coefficient, thus the use of the d_{33} mode of piezoelectric material can increase the output voltage of the energy harvester. The energy harvesters of d_{31} mode and d_{33} mode with the same size are analyzed, manufactured and tested. The experimental result shows that the output voltage of d_{33} mode is about 2 times of the d_{31} mode with a higher output voltage and is identical with the result using finite element analysis.

Key words: energy harvesting; piezoelectric cantilever; finite element analysis; interdigital electrodes

0 引言

随着无线传感网络技术的发展,为节点众多的微传感器提供持续工作的电能成为一个难点^[1]。一方面,微电子技术与微机电技术(MEMS)的进步使 MEMS 微传感器及其专用集成电路的能耗越来越小,达到毫瓦级别^[2];另一方面从环境中收集到的能量密度也能达到几毫瓦每立方厘米,这使利用能量收集技术收集到的能量对这些微传感器进行供电成为可能。与电磁式、静电式等发电原理相比,压电式能量采集方法具有结构简单,无需复杂的额外电路,无电磁干扰等特点,得到了国内外广泛的关注^[3]。

压电材料工作模式可分为 d_{31} 模式和 d_{33} 模式两种^[4]。美国奥本大学的 Dongna Shen 等^[5]设计和加

工了 d_{31} 模式的压电悬臂梁,梁的尺寸为 $4.8 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm} \times 0.036 \text{ mm}$,实现了 160 mV 的输出电压和 $2.15 \mu\text{W}$ 的功率输出。袁江波等^[6]也设计了 $60 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 0.45 \text{ mm}$ 的 d_{31} 模式的压电悬臂梁,实现了 5.4 V 的输出电压。由于压电材料的 d_{33} 系数一般是 d_{31} 的 2~3 倍,利用压电材料的 d_{33} 模式可提高能量采集器的输出电压。韩国光云大学的 Jong Cheol Park 等^[7]设计和加工了 d_{33} 模式的压电悬臂梁,梁的尺寸为 $1 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm} \times 0.01 \text{ mm}$,取得了 4.4 V 的输出电压和 $1 \mu\text{W}$ 的功率输出。此外,为提高压电梁的输出,美国密苏里科技大学的 Shahab Mehraeen 等^[8]提出截面形状为梯形的悬臂梁,理论分析认为梯形悬臂梁能产生更均匀的应变和更长的使用寿命,并实验设计了一个长 15 cm 和

收稿日期:2011-11-22

基金项目:国家重点基础研究发展计划基金资助项目(2011CB302101)

作者简介:何挺(1989-),男,安徽六安人,硕士生,主要从事压电能量回收的研究。E-mail: heting@mail.ustc.edu.cn

利用压电材料的 d_{31} 模式的悬臂梁,证明了梯形悬臂梁产生更大的输出电压,其输出功率约为矩形梁的 3 倍。

为提高能量采集器的输出电压,本文将压电材料的 d_{33} 模式与梯形悬臂梁结合起来提出 d_{33} 模式的梯形压电悬臂梁。首先建立了 d_{33} 模式梯形压电悬臂梁有限元模型,分析了梯形梁应力分布与结构参数的关系。在此基础上分析了叉指形电极结构尺寸与弹性层阻抗特性对输出电压的影响,并比较了相同尺寸下 d_{33} 和 d_{31} 模式梯形压电悬臂梁发电能力。最后在梯形压电悬臂梁上加工出叉指电极,对 d_{33} 和 d_{31} 模式梯形压电悬臂梁发电能力进行实验研究。

1 压电能量采集器工作原理

常用于能量采集的压电悬臂梁结构主要由弹性层、压电层和电极层组成。由于外界振动将引起悬臂梁的受迫振动,导致悬臂梁发生弯曲变形,进而引起压电层内应变和应力的变化,最终导致压电层表面电荷的产生。压电材料所受应力与产生电场的关系可用压电方程^[9]表示:

$$S = S^E T + dE \quad (1)$$

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (2)$$

式中: S^E 为 $E=0$ (或常数)时的弹性柔顺系数矩阵; ϵ^T 为 $T=0$ (或常数)时的介电常数矩阵; d 为压电系数矩阵; E 为电场强度; D 为电位移; T 为应力; S 为应变。 d_{31} 模式的压电能量采集器所受拉压应力方向与电极极化方向垂直,电极层在压电层的上下表面,如图 1(a)所示; d_{33} 模式的压电能量采集器所受拉压应力方向与电极极化方向平行,通常压电层上表面采用正负交错的叉指型电极,下表面直接与弹性层相连接,如图 1(b)所示。

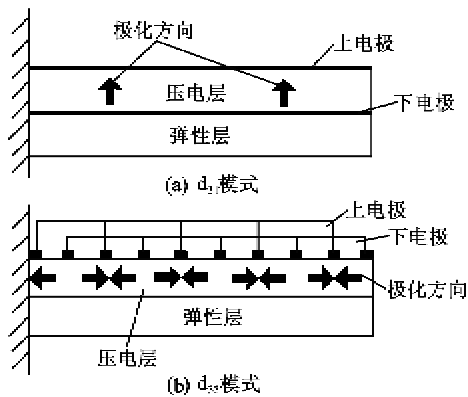


图 1 压电能量采集器原理图

2 d_{33} 模式梯形压电悬臂梁式能量采集器的仿真优化

2.1 结构参数优化

有限元法是工程技术领域应用广泛的数值仿真方法。作为通用的有限元分析软件,ANSYS 能实现多物理场耦合的仿真。本研究使用的压电晶片其相对介电常数矩阵 ϵ_r , d_{33} 模式的压电常数矩阵 d 和刚度系数矩阵 c 分别为

$$\epsilon_r = \begin{bmatrix} 2000 & 0 & 0 \\ 0 & 2000 & 0 \\ 0 & 0 & 2000 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$d = \begin{bmatrix} 600 & 0 & 0 \\ -250 & 0 & 0 \\ -250 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times 10^{-12} \text{ m/V} \quad (4)$$

$$c = \begin{bmatrix} 9.1 & 3.9 & 3.9 & 0 & 0 & 0 \\ 3.9 & 9.1 & 3.9 & 0 & 0 & 0 \\ 3.9 & 3.9 & 9.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 \end{bmatrix} \times 10^{10} \text{ N/m}^2 \quad (5)$$

根据式(2),当整个压电悬臂梁的平均应力增加时,整体输出电压就会增大。根据表 1 的参数建立 d_{33} 梯形压电悬臂梁有限元模型,假定压电层表面的分支电极中心距为 $500 \mu\text{m}$ 。在建立有限元模型时,对压电元件的 d_{33} 模式做 3 个假设^[10]:压电元件极化方向与压电陶瓷长度方向平行;沿分支电极中心线,压电元件极化方向相反;压电元件极化强度均匀分布。

表 1 压电扳子结构参数

	压电层	弹性层
密度/(kg/m^3)	7 500	8 900
弹性模量/ GPa		110
泊松比		0.3
长度 L/mm	20	20
厚度 $H/\mu\text{m}$	100	100

使用 ANSYS 软件对弹性层进行实体建模,对压电层建模时,沿每个分支电极中心线分别建立压电体,并使每个中心线旁的压电体极化方向相反;然

后通过布尔操作将所有体粘结在一起,对弹性层和压电层分别采用 SOLID45 和 SOLID5 进行网格划分,共划分单元数大于 10 万个;最后,在上表面根据所选分支电极中心距和分支电极宽度选择相应节点,建立叉指形电极面。

假设在悬臂梁表面积一定的情况下,悬臂梁根部宽度和自由端宽度之和为 20 mm,对悬臂梁根部的宽度进行优化计算。在给定悬臂梁末端变形量均为 1 mm 情况下,仿真得到的压电悬臂梁最大应力和平均应力与根部宽度的关系,如图 2 所示。当悬臂梁形状从矩形逐渐变为梯形,即随着根部宽度的增加和自由端宽度的减小,悬臂梁的平均应力得到了有效的提高,也降低了其最大应力和增加了其使用寿命。为方便实验,选择根部宽度 15 mm,自由端宽度 5 mm 的梯形悬臂梁进行研究。

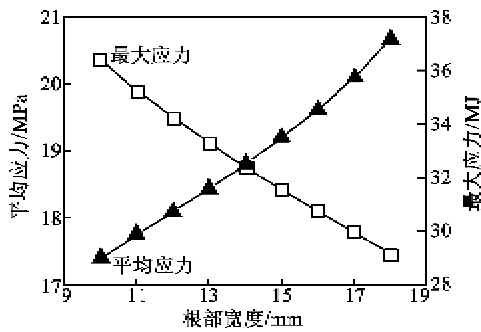


图 2 悬臂梁最大应力和平均应力与根部宽度的关系

2.2 电极优化

由于叉指电极的电极宽度是影响采集器的电压和电量输出的一个重要参数^[11],所以主要对电极宽度进行优化。在对悬臂梁的输出能力进行仿真计算时,需要考虑压电层下表面节点电压耦合所产生的影响。弹性层为导体时,相当于对节点进行电压耦合。弹性层为高阻抗材料时,相当于对节点不进行电压耦合。计算两种条件下的电压和电量输出,并与相同尺寸的 d_{31} 模式梯形压电悬臂梁相比较。

图 3 为悬臂梁末端位移 1 mm 时, d_{33} 模式的上表面叉指形电极宽度和下表面节点是否进行电压耦合与采集器输出电压的关系。利用 ANSYS 计算出相同尺寸下的 d_{31} 模式梯形压电悬臂梁的电压输出为 12 V,如图 3 中虚线所示。通过比较可看出:

1) 随着电极宽度的增大, d_{33} 模式采集器输出电压逐渐减少。这是由于当电极宽度增加时,叉指电极下的死区面积逐渐增大^[12],使工作在 d_{33} 模式的压电材料减少,获得电压减小,但无论电极如何变

化, d_{33} 模式采集器输出电压比 d_{31} 模式大。

2) 当电极宽度为 200 μm 时,压电层下表面节点没有进行电压耦合的 d_{33} 模式能量采集器输出电压最大,约是 d_{31} 模式的 8 倍,压电层下表面节点进行电压耦合的 d_{33} 模式采集器输出电压较小,约为 d_{31} 模式的 3 倍。

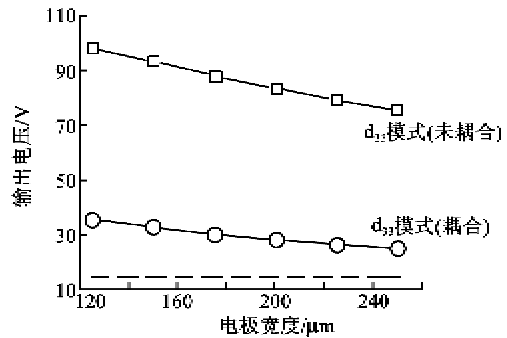


图 3 上表面叉指形电极宽度与采集器输出电压的关系

对电极宽度为 200 μm 时, d_{33} 模式能量采集器压电层的叉指电极单元的两种耦合模式进行电势分析,结果如图 4 所示。由图 4(a)可看出,当压电层下表面节点进行电压耦合时,底电极相互导通,电极间的压电材料只有上部分得到利用,且电势沿厚度分布不均。由图 4(b)可见,当压电层下表面节点没有进行电压耦合时,电势沿梁厚度均匀分布,沿极化方向(梁长度)梯度大,电极间的压电材料都能得到充分利用。因此下表面节点没有耦合的输出电压更大。

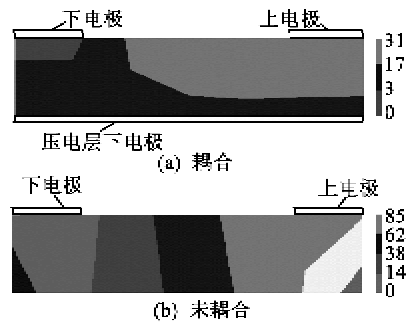


图 4 叉指电极单元电势分布

图 5 为悬臂梁末端位移 1 mm 时, d_{33} 模式上表面叉指形电极宽度和下表面节点是否进行电压耦合与采集器输出电量的关系。利用 ANSYS 计算出相同尺寸下的 d_{31} 模式梯形压电悬臂梁的电量输出为 11×10^{-7} C。通过比较可看出,压电层下表面节点没有进行电压耦合的 d_{33} 模式能量采集器在电极表面上产生的电量要小于下表面节点进行电压耦合时的输出电量,都要远小于 d_{31} 模式电极表面上产生的

电量。这是由于 d_{33} 模式叉指的每个分支电极相当于一个小电容器,采集器的电容值为多个小电容器的并联值,这些电容器的表面积小于 d_{31} 模式采集器电容的表面积,上、下电极的间距又大于 d_{31} 模式采集器电容的间距。因此,对于同等体积的压电陶瓷, d_{33} 模式叉指型电极采集器电容值远小于 d_{31} 模式采集器电容值,使整个装置阻抗增大,输出电流减少。 d_{33} 模式的电量输出随电极宽度变化很小,这主要是由于输出电量 $Q=VC$ (V 为电压, C 为电容),随着电极宽度的增加,电压输出越来越低,采集器电容越来越大,故整体上表现为输出电量变化很小。

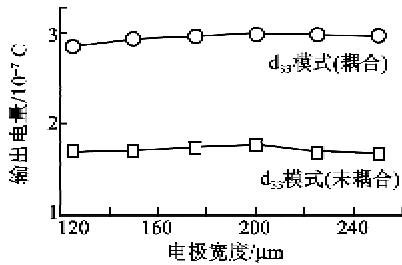


图 5 上表面叉指形电极宽度与采集器输出电量的关系

3 实验和分析

根据优化结果,实验选择梯形压电悬臂梁结果参数为:长度 20 mm,根部宽度 15 mm,自由端宽度 5 mm,压电层和弹性层厚度均为 100 μm 。

首先将铜片加工成弹性层所需尺寸,同时用丙酮溶液清洗压电陶瓷片和铜片上的灰尘、油污等污迹。对于 d_{31} 模式,直接将压电片和铜片用环氧树脂粘接,并引出电极。对于 d_{33} 模式,选择电极宽度为 200 μm ,电极中心距为 500 μm 。首先对压电片上表面电极进行图形化,设计的电极图案如图 6 所示。然后对压电陶瓷进行重新极化,极化条件为:极化温度 100 $^{\circ}\text{C}$,极化场强 2 $\text{V}/\mu\text{m}$,极化时间 1 h。最后压电层的下表面和铜片用环氧树脂相粘接,并引出相应电极。这种 d_{33} 模式的下表面与金属相连,处于导通状态,即对应于上述有限元分析中对压电层下表面节点进行电压耦合。

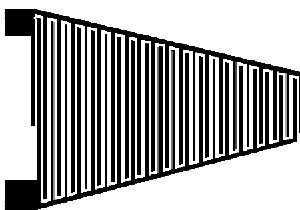


图 6 设计的 d_{33} 模式电极掩膜板

建立如图 7 所示的悬臂梁压电振子发电实验装

置,实验装置主要包括振动台、示波器。振动台型号为北京测振仪器厂生产的 JX-3B 振动传感器校准仪,用于提供标准振动。示波器型号为泰克 TDS210 示波器,用来测量能量采集器的开路输出电压。实验中,在悬臂梁末端附加一铜质量块,质量块长 10 mm,宽 20 mm,高 15 mm,用来降低悬臂梁的共振频率。

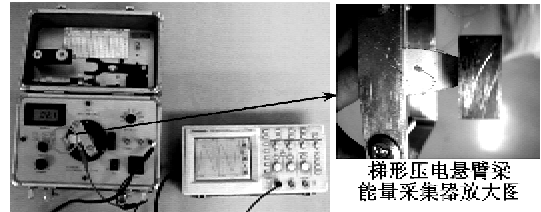


图 7 悬臂梁压电振子发电实验装置

图 8 为在激振频率 10 Hz 下, d_{31} 模式和 d_{33} 模式能量采集器输出开路电压有效值与激振加速度之间的实验关系。由图可看出,实验中,弹性层(金属)的 d_{33} 模式能量采集器的输出电压约为 d_{31} 模式能量采集器输出电压的 2 倍,较小于上述仿真结果的 3 倍。这主要是由于电极下面存在电压死区,且在极化过程中,很难保证极化强度均匀分布。

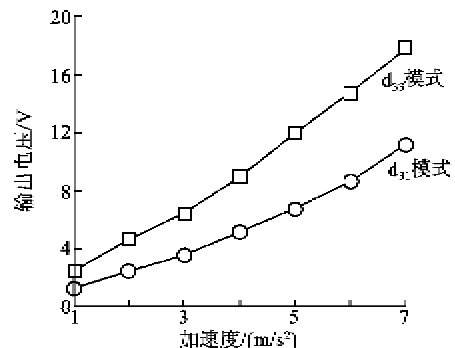


图 8 d_{31} 模式和 d_{33} 模式采集器输出开路电压有效值与激振加速度之间的关系

4 结束语

本文将梯形压电悬臂梁和 d_{33} 模式叉指电极结合起来,提出用于能量采集的 d_{33} 模式的梯形压电悬臂梁。首先利用有限元对梯形悬臂梁进行优化,分析了压电层上表面的叉指形电极结构尺寸和下表面所粘接的弹性层的阻抗特性对输出电压的影响,并将同等尺寸的 d_{33} 和 d_{31} 模式梯形压电悬臂梁发电能力进行对比分析。仿真结果表明,弹性层为高阻抗材料的 d_{33} 模式能量采集器输出电压要大于弹性层为金属时的输出电压,都大于 d_{31} 模式能量采集器输出电压。弹性层为高阻抗材料的 d_{33} 模式能量采集

器在电极表面上产生的电量要小于弹性为金属时的输出电量,都要远小于 d_{31} 模式电极表面上产生的电量。最后对 d_{31} 模式和弹性层为金属的 d_{33} 模式梯形压电悬臂梁发电能力进行实验验证。结果表明, d_{33} 模式能量采集器的输出电压约为 d_{31} 的 2 倍,具有较高的输出电压,与仿真结果基本吻合。

参考文献:

- [1] ROUNDY S, LELAND E S, BAKER J, et al. Improving power output for vibration-based energy scavengers[J]. *IEEE Pervasive Computing*, 2005, 4(1): 28-36.
- [2] ARMS S W, TOWNSEND C P, CHURCHILL D L, et al. Power Management for energy harvesting wireless sensors [J]. *SPIE Int'l Symposium on Smart Structures & Smart Materials*, 2005, 5763(1): 274-282.
- [3] LIU Huicong, TAY C J, QUAN Chenggen, et al. Piezoelectric MEMS energy harvester for low-frequency vibrations with wideband operation range and steadily increased output power [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2011, 20(5): 1131-1142.
- [4] YUAN J B, XIE T, SHAN X B, et al. Resonant frequencies of a piezoelectric drum transducer [J]. *Journal of Zhejiang University Science A*, 2009, 10(9): 1313-1319.
- [5] SHEN Dongna, PARK J H, AJITSARIA J, et al. The design, fabrication and evaluation of a MEMS PZT cantilever with an integrated Si proof mass for vibration energy harvesting [J]. *J Micromech Microeng*, 2008, 18(5): 055017.
- [6] 袁江波, 单小彪, 谢涛, 等. 悬臂梁单晶压电发电机的实验 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5): 1072-1077.
- [7] PARK J C, PAR J Y, LEE Y P. Modeling and characterization of piezoelectric d_{33} -mode mems energy harvester [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2010, 19(5): 1215-1222.
- [8] MEHRAEEN S J, CORZINE K A. Energy harvesting from vibration with alternate scavenging circuitry and tapered cantilever beam [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(3): 820-830.
- [9] 张福学. 现代压电学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [10] 刘卫民, 陈勇, 刘永刚. 交叉指形电极压电纤维复合材料的优化设计 [J]. *机械工程材料*, 2006, 30(2): 29-31.
- [11] MATHERS A, MOON K S, YI J G. A vibration-based PMN-PT energy harvester [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(7): 731-739.
- [12] 王红艳, 谢涛, 王志彬. 压电纤维复合材料悬臂梁发电性能分析 [J]. *传感器与微系统*, 2010, 29(3): 46-49.
- (上接第 871 页)
- [2] 胡军, 龙望成, 何金良, 等. ZnO 压敏电阻残压比的影响因素分析 [J]. *高电压技术*, 2011, 37(3): 555-561.
HU Jun, LONG Wangcheng, HE Jinliang, et al. Influence factors of residual voltage ratio of ZnO varistor [J]. *High Voltage Technology*, 2011, 37(3): 555-561.
- [3] SAI Y L T, HUANG G L, WEI C C. Improvement of nonlinearity in a ZnO varistor by Al_2O_3 doping [J]. *J Mat Sci Lett*, 1985, 4: 1305-1307.
- [4] 唐鑫, 吕海峰, 马春雨, 等. Be 掺杂纤锌矿 ZnO 电子结构的第一性原理研究 [J]. *物理学报*, 2008, 57(12): 7807-7813.
TANG Xin, LV Haifeng, MA Chunyu, et al. First-principle study of electronic structure of Be-doping wurtzite ZnO [J]. *Acta Phys Sin*, 2008, 57(12): 7807-7813.
- [5] 曹全喜, 雷天民, 黄云霞, 等. 固体物理基础 [M]. 1 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 162-163.
- [6] 刘建军. 掺 Ga 对 ZnO 电子态密度和光学性质的影响 [J]. *物理学报*, 2010, 59(9): 6465-6472.
LIU Jianjun. The effect on electronic density of state and optical properties of ZnO by doping Ga [J]. *Acta Phys Sin*, 2010, 59(9): 6465-6472.
- [7] LOOK D C, CLAFLIN B, ALIVOV Y I, et al. The future of ZnO light emitters [J]. *Phys Stat Sol*, 2004, 10: 2203-2212.
- [8] CARLSON W G, GUPTA T K. Improved varistor nonlinearity via donor impurity doping [J]. *J Appl Phys*, 1982, 53(8): 5746-5753.
- [9] MATSUOKA M. Nonohmic properties of Zinc oxide ceramics [J]. *Jpn J Appl Phy*, 1971, 10(6): 736-746.
- [10] 李建英. 晶界氧吸附对 $SrTiO_3$ 基压敏陶瓷的作用 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34(11): 1730-1733.
LI Jianying. The role of oxygen on $SrTiO_3$ based varistor ceramics [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2005, 34(11): 1730-1733.