

压电陶瓷变压器研究和发展现状

胡晓冰,李龙士

(清华大学 材料科学与工程系,新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室,北京 100084)

摘要: 概述了压电陶瓷变压器的原理和分类,介绍了各种振动模式的压电陶瓷变压器。并重点叙述了两种电极设计精巧的压电陶瓷变压器。对体型和膜型压电陶瓷变压器的研究进展现状进行了分析。

关键词: 压电陶瓷变压器;振动模式;研究进展

中图分类号: TP211.4 **文献标识码:** A

1 引言

压电陶瓷已经被广泛应用于驱动器、传感器以及变压器等的制作。压电陶瓷变压器是用压电陶瓷材料经烧结、高压极化等工艺制造而成的新型电子变压器。它从 50 年代后期开始研制,并于 70 年代发展起来。与传统的铁芯线绕电磁变压器相比,具有体积小、重量轻、负载短路保护、无电磁干扰及高频下具有更高的能量密度的优点,而且结构简单,制作工艺简便,易批量生产。

压电陶瓷变压器的工作原理可以说是驱动器和传感器的结合:电能经过机械能而转换回电能。和普通电磁变压器一样,压电陶瓷变压器也具有电压变换、阻抗变换和电流变换等特性。在压电陶瓷变压器研制的初期,一般是使用升压变压器,随着研究的逐渐深入,降压变压器的使用也开始日趋广泛。利用压电材料的各种振动模式而设计出的各种压电陶瓷变压器,可以应用到各个领域。近些年来,许多外形简单但电极设计精巧的压电陶瓷变压器也逐渐开始发展。

随着复合组分体系的功能陶瓷材料的研究开发,将电子陶瓷材料与半导体集成电路工艺相结合的趋势也开始引起越来越多关注,这促使包括压电薄膜技术在内的一系列技术也有了全新的进展。而且,随着微电子机械系统(MEMS)制造技术成为集成铁电学研究的热点,使一系列器件,包括压电变压器、压电驱动器、压电加速度传感器等,可以直接与半导体芯片集成或者二次集成,这是压电陶瓷变压器的又一个发展趋势。

2 压电陶瓷变压器的原理和分类

2.1 升压压电陶瓷变压器和降压压电陶瓷变压器

根据变压比不同,压电陶瓷变压器可以分为升压变压器和降压变压器两种。

2.1.1 压电升压变压器

对于压电升压变压器,研制最早是 Rosen 型压电陶瓷变压器,它是长条形片结构,可以分成两部分(如图 1 所示):左半部分的上、下两面涂覆银电极,沿厚度方向极化,作为输入端,称为

驱动部分;右半部分的右端也有银电极,沿长度方向极化,作为输出端,称为发电部分^[1~3]。

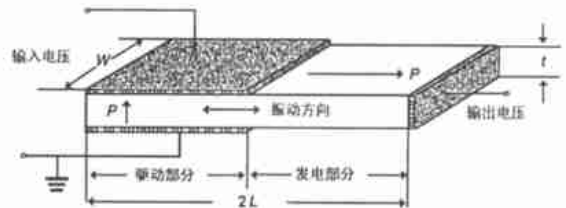


图 1 Rosen 型升压压电陶瓷变压器示意图

Fig 1 Schematic of rosen type step-up piezoelectric ceramic transformer

当正弦交变电压加到驱动部分时,通过逆压电效应和压电效应,在发电部分产生高压。一般输入几伏到几十伏的交变电压,就可以获得几千伏以上的高压输出。在空载情况下,压电陶瓷变压器在谐振时的变压比由下式表示:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{4}{2} K_{31} K_{33} Q_m \frac{l}{t} \quad (1)$$

(1)式中, V_o/V_i 为空载时输出电压与输入电压之比; Q_m 为材料的机械品质因数; K_{31} 、 K_{33} 为材料的机电耦合系数; l 为变压器发电部分的长度; t 为变压器的厚度。

从上式可知,在材料特性不变的情况下,随着 l/t 的增大,变压比随之增大。所以自 20 世纪 80 年代以来,多层压电陶瓷变压器得到了研制和开发^[4],其结构如图 2 所示。

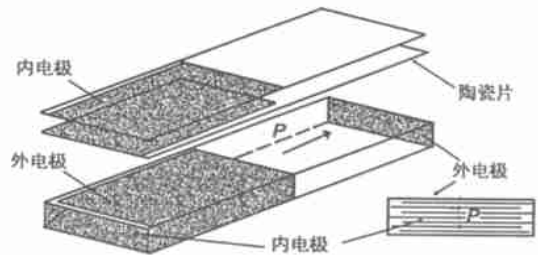


图 2 多层压电陶瓷变压器的结构示意图

Fig 2 Schematic configuration of a multi-layer piezoelectric ceramic transformer

结合外围的驱动电路,压电陶瓷升压变压器可以广泛应用于工业控制监视、个人电脑、笔记本型电脑、移动电话等液晶显示屏的背光电源中,具有广阔的应用前景。一般情况下,它的功率和输出电压可调,工作频率在 60~110kHz 之间。美国宾州州立大学的 Kenji Uchino 等人尝试将其应用在 X 射线频谱分析仪器上,用于提供高达 10kV 及以上的高压。

* 收稿日期:2002-01-03 通讯联系人:胡晓冰

2.1.2 压电降压变压器

图3所示为压电降压变压器的一种。它为叠层结构,工作在较高的频率,并且起到降压的作用^[5]。它工作在厚度扩张振动模式下,输入部分只有一层压电陶瓷,并沿厚度方向极化;输出部分为叠层压电陶瓷,沿厚度方向交替进行极化,各层为电学并联关系,故而可以获得较低的内阻抗。输入部分与输出部分用绝缘层隔开,在上下表面各有一层压电活性很低的表面层。

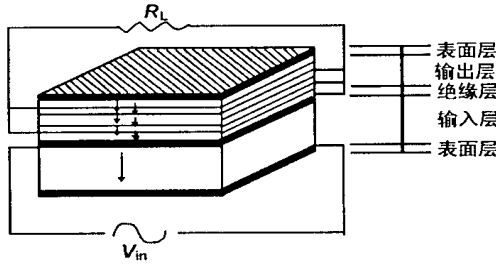


图3 叠层式降压压电陶瓷变压器示意图

Fig 3 Configuration of a multi-layer step-down piezoelectric ceramic transformer

当在输入端加上交流电压时,由于逆压电效应,输入部分的单层压电陶瓷产生沿厚度方向的扩张振动(用机电耦合系数 K_t 表征),振动传递到输出部分后,由于压电效应,在输出端产生了输出电压。这种压电降压变压器的变压比由输入部分与输出部分单层之间的厚度比决定。它的特点是工作能量密度高,工作频率高,因而可以将其制作成表面元件焊接在印刷板上,与同为表面元件的滤波电感与电容一起,可以获得微型的高效率开关稳压电源,实现电子仪器的微型化。

2.2 各种振动模式的压电陶瓷变压器

根据振动模式不同,压电陶瓷变压器可以分为纵向振动(longitudinal)模式变压器、厚度振动(thickness)模式变压器和弯曲(bending)振动模式变压器等。

2.2.1 纵向振动(longitudinal)模式变压器

Rosen型压电陶瓷变压器是纵向振动模式的典型。它工作在谐振状态下,理论计算表明在半波谐振、全波谐振时的质点位移和应力分布如图4所示^[3]。

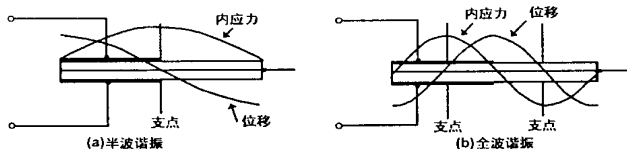


图4 压电陶瓷变压器谐振时的质点位移和应力分布

Fig 4 Ideal distributions of stress and displacement of piezoelectric ceramic transformer

可以看出,普通 Rosen型压电陶瓷变压器有其自身的缺点。这是因为,在两种谐振模式下,输出端导线都焊接在输出端电极上,而这正是振动位移最大的位置。这就是说,导线和电极连接的可靠性比较差,并且导线的质量和连接的方式也阻碍了变压器的振动。

为此,日本 NEC 公司开发出称之为 3 次 Rosen 型的多层压电陶瓷变压器,这种变压器具有更高的可靠性、转换效率和更薄的尺寸。整个变压器瓷片上有 3 个节点,引出导线都焊接在这 3 个节点位置,这就避免了上述普通 Rosen 型变压器的缺点。其结

构和工作时位移及其应力分布曲线如图5所示。

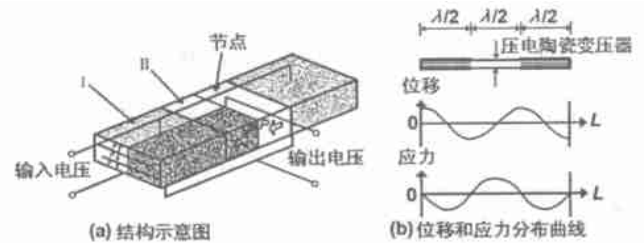


图5 3次 Rosen型多层压电陶瓷变压器的结构、位移和应力分布曲线

Fig 5 Structure and mechanical displacement and stress distributions of the piezoelectric transformer operating in the third order longitudinal vibration mode

以这种 3 次 Rosen 型多层压电陶瓷变压器制作的 LCD 背景光 CCFL 电源,包括驱动电路板在内的整体尺寸为 75mm × 22mm × 7.6mm,质量 14g,输入电压范围 7 ~ 20V,转换效率 92%,工作频率 130kHz^[6]。

2.2.2 厚度振动(thickness)模式变压器

厚度振动模式的代表是叠层式降压压电陶瓷变压器(见图3)。类似地,它的厚度扩张振动模式也有两种,即半波模式和全波模式(又称作一次模式和二次模式),图6给出了这两种模式的位移和应力分布。图6(a)为半波模式,变压器的厚度等于半个波长,其中输入部分和输出部分同步伸缩振动。图6(b)为全波模式,变压器的厚度等于一个波长,输入部分与输出部分之间的扩张和收缩交替进行。由于压电效应产生的电荷与应力成正比,而全波模式的应力最大值在变压器的中部,所以振动能量得到了最大利用,故而此种变压器一般利用这种模式来工作^[5]。

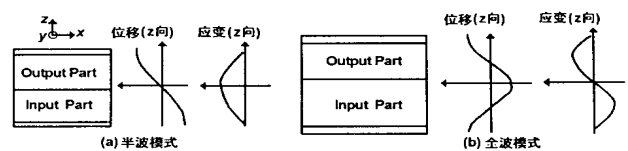


图6 两种振动模式的位移和应力分布

Fig 6 Ideal distributions of stress and displacement of two type of vibration modes

2.2.3 弯曲(bending)振动模式变压器

一种在输入端采取弯曲振动模式的变压器结构如图7所示^[7]。此变压器沿着长度方向极化,电极为沿厚度对称形式,其中,一组输出端电极位于一组输入端电极中间,另外的一对电极(包括输入端和输出端两组)在对面与之对称排列。

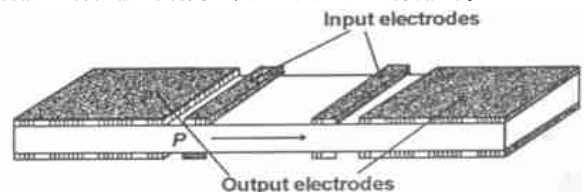


图7 一种弯曲振动模式的压电陶瓷变压器结构示意图

Fig 7 Schematic configuration of a piezoelectric ceramic transformer operating in bending vibration mode

此变压器的工作状态如图8所示。由于施加在两组输入端电极的入端电压极性是相反的,工作时,上下表面分别以厚度切变模式进行收缩和扩张,从而在输入端总体上导致弯曲振动模

式。在输出端仍为长度扩张模式,以产生较高的输出电压。这种变压器的工作频率一般在几百 kHz,效率在 80% 以上。

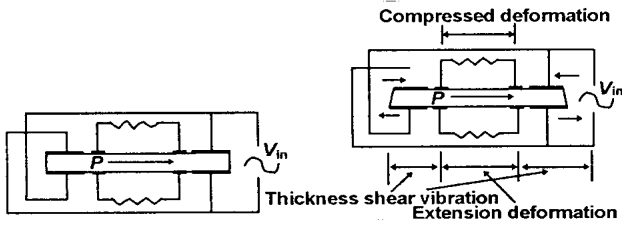


图 8 弯曲振动模式的压电陶瓷变压器工作状态示意图

Fig 8 Image of work condition of piezoelectric ceramic transformer operating in bending vibration mode

3 几种其它新型压电陶瓷变压器的介绍

随着越来越多的应用领域的要求,几种电极涂覆模式精巧而结构简单的压电陶瓷变压器也被开发出来。

3.1 月牙形电极的圆片形压电陶瓷变压器

此变压器由美国宾州州立大学 Kenji Uchino 等人研制开发,结构如图 9 所示。

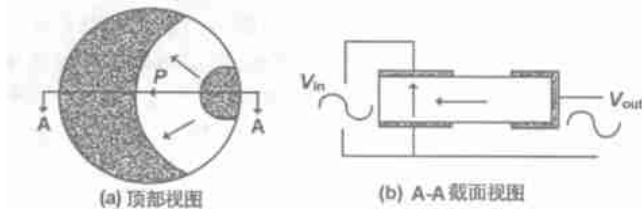


图 9 圆形压电陶瓷变压器及其极化方向

Fig 9 Structure of the circular piezoelectric transformer and its poling direction

该变压器的外形比较简单,但是电极设计比较巧妙。它的输入电极为月牙形,极化方向和 Rosen 型压电陶瓷变压器相似。它在输入端有效地利用了压电陶瓷的平面振动耦合系数 K_p ,在输出端利用了其切变振动耦合系数 K_{15} ,近似工作在压电圆片的径向振动模式频率,而不是像方形片工作在多种振动模式的耦合模式下,所以在负载为 50 到 200k 之间时,变压比介于 43~60 之间,而同样尺寸方形片的变压比在 40 左右。它工作频率在 100kHz 以下,适合彩色液晶显示器背光源的应用^[8]。

3.2 环/菱形点型电极的方形压电陶瓷变压器

为了驱动普通荧光灯方面应用的需要,韩国的 Juhyun Yoo 等人研制了另外一种整体外形和电极形状较为新颖的压电陶瓷变压器,结构如图 10 所示。

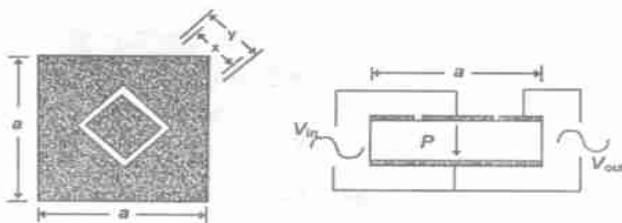


图 10 环/菱形点型电极的方形压电陶瓷变压器

Fig 10 Square piezoelectric ceramic transformer with ring / dot electrode

这种变压器具有较高的转换效率。由于输出端电容的增

加,输出端阻抗降低,使输出电流和功率都得到了有效的提高。通过改变电极面积的比例,可以使机械振动得到最优化,并应用到 14W 荧光灯的电源上。Juhyun Yoo 等人发现,当环形与点形电极面积的比例为 3.14 的时候,此压电陶瓷变压器有较好的性能,工作频率在 74kHz,开路和 500 负载时,变压比分别为 2.928 和 0.344,比较适合驱动普通的荧光灯^[9]。

4 压电陶瓷变压器的研究和发展

4.1 体型 (bulk) 压电陶瓷变压器的研究

随着高性能压电陶瓷材料的发展,人们越来越多地将之用于高压电源变压器。另外,各种电子设备,如便携式电脑、数码相机、个人数码助理 (PDA) 及移动电话等,也要求其电池驱动的电源具有小型且低功耗的特点,这就要求其使用的液晶显示 (LCD) 背景光源的电源变压器相应地具有小型、薄和高效率的特点。这种小型化的压电陶瓷变压器的尺度都在几到几十个毫米左右,属于体型变压器的范围。

自 20 世纪 90 年代以来,日本在压电陶瓷变压器方面进行了大量的研究和开发,在压电陶瓷变压器的应用研究方面出于领先地位。荷兰 PHILIPS 公司在单层 Rosen 型压电陶瓷变压器基础上,开发出了多层 Rosen 型压电陶瓷变压器,在半波谐振时它们的输出功率和变压比都大于单层压电陶瓷变压器,达到了输出功率 2.5W 的技术要求。

目前,Rosen 型升压压电陶瓷变压器已经形成产品,应用于各种高电压和小电流的电子产品中,如高压连续可调稳压器,静电复印机高压电源、负离子发生器、小功率激光管电源、警用电击器高压电源、高压脉冲点火器和液晶显示背景光源等都采用了压电陶瓷变压器。工频降压压电陶瓷变压器研究也已取得重大进展,国内外均已研制出功率十几瓦,输出电压十几伏的接近实用化的样品。此外,美国宾州州立大学、韩国一些大学也开始了压电陶瓷变压器的研究工作,并且取得了很大的进展^[8,9]。

国内在 20 世纪 70 年代末、80 年代初开始研究压电陶瓷变压器,并取得了许多成果。清华大学在当时就研究了压电陶瓷变压器材料的组成、结构与性能和压电陶瓷变压器的输入输出特性,并采用激光全息法测量了压电陶瓷变压器的振动模式,验证了理论分析模型^[2]。随后最早开始了低温烧结独石型多层压电陶瓷变压器的研究,并获得了多项专利^[10,11]。通过研究使 PZT 基压电陶瓷的烧结温度从 1250 降到 960,低烧压电陶瓷材料性能居国际领先水平。同时,采用 Ag/Pd 电极共烧成多层压电陶瓷变压器,交流无空载时的升压比比传统的单层压电陶瓷变压器高 30~40 倍^[4]。国内研究压电陶瓷变压器的单位,研究范围主要集中在大功率压电陶瓷变压器材料和单层压电陶瓷变压器^[12,13],对多层压电陶瓷变压器及其理论模型和驱动电路优化等方面研究较少。

4.2 膜式 (film) 压电陶瓷变压器的研制和开发

随着复合组分体系的功能陶瓷材料的研究开发,将电子陶瓷材料与半导体集成电路工艺相结合的趋势也开始引起越来越多关注,这促使包括压电薄膜技术在内的一系列技术也有了全新的进展^[14]。而且,随着微电子机械系统 (MEMS) 制造技术成为集成铁电学研究的热点,使一系列器件,包括压电变压器、压电驱动器和压电加速度传感器等,都可以直接与半导体芯片集

成或者二次集成。

一直以来,电子陶瓷器件大部分都是用传统的粉末成型、流延工艺或者丝网印刷后再进行烧结而成。在20世纪80年代后期,这些工艺逐渐被薄膜生长技术所补充,例如,脉冲激光沉积(PLD)、化学溶液沉积(CSD)和物理气相沉积(PVD)等。在沉积过程中,电子陶瓷材料一般都是在显微的尺度进行合成,而不需要粉末处理作为中间步骤,所以烧结温度一般大大低于体形陶瓷。最近,越来越多的人开始研究电子陶瓷薄膜的制备工艺,并致力于将电子陶瓷薄膜与传统的电子集成电路相结合,范围包括微压电陶瓷换能器、驱动器、多层铁电薄膜电容器和铁电薄膜随机存储器等。

随着薄膜技术的发展,压电陶瓷膜性能的改善越来越适用于压电陶瓷变压器的制作。一种环状的径向振动模式膜型压电变压器开始进行研究开发,预期的工作频率有望在0.1~10MHz,变压比在0.1~10之间,根据膜的性质,可以预期的转换效率大约在90%左右。目前加拿大学者已经制出直径为5.1mm,厚度为2 μ m的变压器,工作频率为400kHz,升压比为2.25,并可以根据改变外形尺寸和电极涂覆形式来改变变压器的种类^[15]。目前膜式压电陶瓷变压器的研究工作还主要集中在优化材料参数和压电陶瓷膜的制造及其极化工艺上。

5 结 语

随着各个领域的不断需求,压电陶瓷变压器的发展也进入到一个新的阶段。除了要求高性能低烧结温度的压电陶瓷材料和良好的电极材料以外,还需要设计新型的结构和改进器件的生产工艺。作为新型功能陶瓷器件的一种,今后压电陶瓷变压器的发展必须适应电子设备的小型化、多功能和集成化的趋势。

Review on development of piezoelectric ceramic transformers

HU Xiao-bing, LI Long-tu

(State Key Laboratory of New Ceramics and Fine Processing, Department of Materials Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper has described principles and classifications of piezoelectric transformers and discussed piezoelectric transformers operating in some kinds of vibration modes. Two types of piezoelectric transformers with electrodes designed specially were introduced. The research and development on bulk and film piezoelectric transformers was proposed.

Key words: piezoelectric ceramic transformer; vibration mode; research and development

(上接第589页)

- [16] Thorsen T. [J]. Desalination, 1985, 53:217.
- [17] Slater C, Ferrari A, Wisniewski P. [J]. J Environmental Sci Health, 1987, A22:707.
- [18] Mok K W, Pickering P J, Broome J E V. [P]. No. 9859385, 1998.
- [19] Nicod L, Chitry F, Gaubert E, et al. [J]. J Inclusion Phenom Macrocyclic Chem, 1999, 34:145.
- [20] Cabassud C, Couffin N, Wirth D. [J]. Membrane Technology, 2000,

参考文献:

- [1] Rosen C A. Solid State Magnetic and Dielectric Devices [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1959. 171-186.
- [2] Li Longtu, Yao Yijin, Mu Zhenhan. [J]. Ferroelectrics, 1980, (28): 403-406.
- [3] 张福学, 孙 慷. 压电学(下册) [M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [4] Li Longtu, Deng Weiti, Chai Jinghe, et al. [J]. Ferroelectrics, 1990, 101: 193-200.
- [5] Osamu O, Yasuhiro S, et al. IEICE Trans Fundamentals [C]. Japan, Tokyo: Institute of Electronics Information and Communication Engineers, 1994. (E77 - A): 2098-2105.
- [6] Tagami S, Hakamata H, Kawashima S, et al. [J]. NEC Technical Journal, 1994, 47(1): 106-110.
- [7] Tomoaki F, Hiroshi S, et al. [J]. Jpn J Appl Phys, 1999, (38): 3596-3599.
- [8] Burhanettin K, Sedal A, Kenji U. IEEE Ultrasonics Symposium [C]. IEEE Online Publications, 1999. 931-934.
- [9] Juhyun Yoo, Kwanghee Yoon, et al. [J]. Jpn J Appl Phys. 2000, (39): 2680-2684.
- [10] 李龙土, 张孝文, 柴京鹤, 等. [P]. 中国专利: 85100051, 1986.
- [11] 李龙土, 张孝文, 柴京鹤, 等. [P]. 中国专利: 86201450, 1987.
- [12] 周桃生, 邝安祥. [J]. 硅酸盐学报, 1992, 20(4): 332-337.
- [13] 谢菊芳, 邝安祥. [J]. 湖北大学学报, 1993, 15(3): 242-245.
- [14] Setter, Waser. [J]. Electroceramic Materials, 2000 (48): 151-178.
- [15] Russell T. M S Thesis [D]. Canada: Queen's University at Kingston, 1999.

作者简介:

胡晓冰 (1979 -) ,男,河南周口人,在读硕士,2000年于清华大学获得学士学位,现在材料科学与工程系,师承李龙土教授,从事压电和铁电材料与器件的研究。

129:5-9.

- [21] 张贵清,张启修,周康根. 全国首届膜分离技术在冶金中应用研讨会论文集 [C]. 长沙:中南工业出版社,1999.
- [22] 杜 军,刘作华,陶长元,等. [J]. 膜科学与技术, 2000, 20:121.

作者简介:

张 弘 (1979 -) ,女,福建莆田人,在读硕士,2001年于厦门大学获理学学士学位,现就读于厦门大学材料科学与工程系,师承夏海平教授,主要从事膜技术的开发与应用研究。

Application of pressure-driven membrane in metallurgical industry

ZHANG Hong, HE Xu-min, XIA Hai-ping, DING Ma-tai

(Department of Material Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The recent developments on study and industrial application of some separation methods using pressure-driven membrane in metallurgical industry were reviewed.

Key words: pressure-driven membrane; metallurgy; microfiltration; ultrafiltration; reverse osmosis; nanofiltration; membrane distillation