

文章编号: 1007 - 4252(2003)03 - 0355 - 07

压电变压器的研究进展

余厉阳, 王德苗, 董树荣
(浙江大学信息系, 杭州 310027)

摘要: 压电变压器利用压电陶瓷材料自身的压电和逆压电效应来实现升降压, 同传统的电磁变压器相比较, 具有体积小、无电磁污染、升压比随工作频率和阻抗变化的特点。本文详细评述了用于压电变压器的铁电陶瓷材料的电畴特性、性能参数和掺杂改性的方法, 以及压电变压器的变压原理、一般等效电路图和各种各样的压电变压器, 分析了现阶段压电变压器存在的问题, 并展望了压电变压器的发展方向。

关键词: 电畴特性; 压电变压器; 压电陶瓷材料; 等效电路图

中图分类号: TM282 文献标识码: A

Progress of piezoelectric transformer

YU Li - yang, WANG De - miao, DONG Shu - rong

(Department of Information and Electronics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The piezoelectric transformer is a device that transforms voltage by piezoelectric effect and converse piezoelectric of ceramic material. Compared with electromagnetic transformer, it has favorable characteristics of miniaturization, electromagnetic - noise free and the variable voltage gain with frequency and impedance. In this paper, the ferroelectric domain structure, properties and the effect of doping of ferroelectric - ceramic material are reviewed, and the principle of transforming voltage, the equivalent circuit and variable piezoelectric transformer are also shown. And furthermore, the problem of piezoelectric transformer is analyzed and the prospects of piezoelectric transformer is forecasted.

Key words: ferroelectric domain structure; piezoelectric transformer; piezoelectric ceramic material; equivalent circuit

1 引言

压电变压器的研制开始于 20 世纪 50 年代, 是一种利用压电振子的振动来实现电 - 机 - 电转换的电子变换器, 具有小体积、无电磁污染、小功率输出的特点, 被广泛用于各种冷阴极荧光管和小型 AC - DC 与 DC - DC 转换器。许多研究者致力于压电变压器的压电材料的开发^[1-3], 并对压电变压器的升压

比、输出功率、效率同热应力、尺寸等关系展开了研究。本文将对适用于压电变压器的陶瓷材料和压电变压器的研究现状进行简单介绍。

2 压电陶瓷材料

用于压电变压器的材料以 PZT($\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$) 为主体的三元系和四元系压电陶瓷或以 PbTiO_3 为主体

的多元系压电陶瓷。如图 1 所示,这类材料都是钙钛矿结构,一般通式为 ABO_3 , 其极性主要来源于从高温顺电相到低温铁电相的点群相变引起的原子非简谐振动的冻结,即 B 原子相对于氧八面体沿图 1 示的 3 个四重轴、4 个三重轴和 6 个二重轴之一的偏移,这样一个晶胞就成了一个偶极子。如果一个晶体中的所有偶极子都朝向同一方向,则材料就呈现单畴态。但从能量角度分析,单畴态的铁电体对称性较顺电相降低,能量升高。因此存在单畴态多畴化的趋势,以降低单畴化所引起的静电能和应变能。

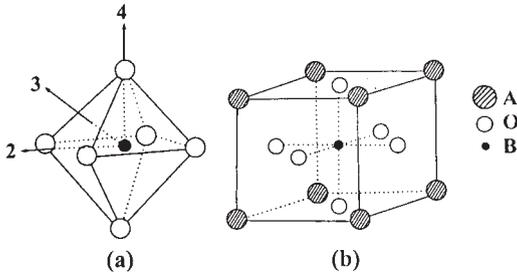


Fig. 1 (a) Spontaneous polarization of perovskite, (b) Structure of perovskite

图 1 钙钛矿结构的自发极化方向(a)和结构基元(b)

最为常见的用于压电变压器的材料是以 PZT 为主体的压电陶瓷。PZT 相对于 $PbTiO_3$ 等材料来说,具有耦合因数高的特点。原因是 PZT 在 $x = 0.53$ 附近是三角(点群 $3m$) - 四方(点群 $4mm$) 相界,即准同型相界。在此相界附近,四方相和三角相之间的自由能差很小,易相互转变,导致陶瓷体内不同晶粒间或同一晶粒内,同时存在四方相和三角相结构。在四方相区,自发极化沿任一 $[001]$ 方向有 6 个可能取向。在三角相区,自发极化沿任一 $[111]$ 方向

有 8 个可能取向。这样在两相共存的相重叠区,自发极化的可能取向就增多为 14。因而在单畴化处理时自发极化排列程度增高,电畴的定向充分,畴壁转向过程中的内摩擦加剧,导致在相界附近,压电常量、机电耦合因数和电容率呈现峰值,但也引起了介电损耗增加,机械品质因数降低。

对于压电变压器来说,除了要具备以上的优点外,还需要有好的温度稳定性、时间稳定性、机械强度和频率稳定性。通常通过添加掺杂离子取代 A 位的 Pb 或 B 位的 Zr 、 Ti 来改善性能,提高稳定性。表 1 中列出了不同离子添加物对材料性能的影响。这些掺杂离子常常通过同取代离子电价和半径的差异来影响性能。

典型的用于压电变压器的三组元压电材料有:

$PbTiO_3 - PbZrO_3 - Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ 系;

$PbTiO_3 - PbZrO_3 - Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ 系;

$PbTiO_3 - PbZrO_3 - Pb(Cd_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ 系;

$PbTiO_3 - PbZrO_3 - Pb(B_{1/2}Te_{1/2})O_3$ ($B = Mn, Ni, Co, Mg$ 等)系;

$PbTiO_3 - PbZrO_3 - Pb(B_{1/3}Sb_{2/3})O_3$ ($B = Mn, Ni$)系;

这些材料的共同特点是径向机电耦合因素 k_p 和 Q_m 值都很高。进一步固溶化合物,可以得到四元系的材料。一般一种组元选用受主添加物,另一种选用施主添加物,能获得更高的 k_p 和 Q_m 值。周桃生等^[4]利用掺杂办法制备出高性能的四元系压电陶瓷材料 PMMN - PZT, 其分子式为 $Pb_{1-0.02}(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_A(Mn_{1/3}Nb_{2/3})_B Ti_c Zr_D O_3 + 2mol\% Sr$ ($D = 9A, C = D, A + B + C + D = 1$), 其性能参数为纵向长度伸缩振动机电耦合因素 $k_{33} \sim 0.73$, 横向长度伸缩振动机电耦合因素 $k_{31} \sim 0.31$, $Q_m \sim 3500$, $tg\delta \sim 0.2\%$, 制成的压电变压器输出功率高达 65W。

表 1 掺杂离子的分类

Table 1 Classification of doping ions

等价	MgO 、 CaO 、 SrO 、 BaO 等碱土金属(取代 Pb^{2+}) Sn^{4+} 、 Hf^{4+} 等(取代 Ti^{4+} 、 Zr^{4+})	等离子添加物影响视不同离子而定。但都有以下特性:居里温度 T_c 降低,电容率 ϵ 升高,压电应变常数 d 增加,晶格 c 轴与 a 轴比降低
施主	La_2O_3 、 Nd_2O_3 、 Bi_2O_3 、 Sb_2O_3 、 Nb_2O_5 、 Ta_2O_5 、 WO_3 、 ThO_2	$\epsilon \uparrow$; 机电耦合因数 k 增大; 机械品质因数 Q_m 降低; 老化率 & 减小
受主	Fe_2O_3 、 CoO	$\epsilon \downarrow$; 频率常量 N 升高; $Q_m \uparrow$; & \uparrow
变价	Cr_2O_3 、 U_2O_3 、 MnO_2	$\epsilon \downarrow$; $N \uparrow$; $Q_m \uparrow$; 温度系数变小; & \downarrow

传统的 PZT 材料含有大量的铅, 其中氧化铅约占原料总质量的 70% 左右, 这样在制备加工过程中会给环境和人类带来损害。因此非铅基压电陶瓷 [5-9] 同陶瓷的低温烧结 [10, 11] 一起成为了陶瓷研究的热点。而可供选择的非铅基压电陶瓷体系主要有:

BaTiO₃ 与 BaMO₃ (M = Zr, Sn, Hf, Ce) 或 K(Nb, Ta)O₃ 组成的二元系;

NaNbO₃ 与 B⁺²TiO₃ (B⁺² = Ca, Sr 等) 或 A⁺²NbO₆ (A⁺² = Ca, Ni, Mg 等) 组成二元系;

(Bi_{1/2}Na_{1/2})TiO₃ 与钛酸盐或铋酸盐组成的二元系陶瓷;

在 Semolensky 原则的指导下, 通过改性和掺杂选择新的陶瓷体系;

但以上各种非铅基压电材料同 PZT 系的压电材料比还存在种种不足。概括起来主要有:

1. 压电铁电性能不好, 无法通过进一步的掺杂大幅度改变性能;
2. 工作温区比较窄, 居里点不高, 在室温附近存在相变, 使用不方便;
3. 矫顽场、电导率高, 极化困难。

因此发展非铅基的环境友好性的压电铁电材料是当务之急。

3 压电变压器

3.1 压电变压器的特性

压电变压器一般适用于高压、低功率和正弦波变换的情况, 存在许多有别于传统电磁变压器的特性, 对电路设计提出了不同的要求。

1. 能量传递特性: 能量从驱动振子传递到发电振子是利用机械波来完成的, 其波形是正弦驻波, 在压电变压器的两端正好是波腹。

2. 对工作频率的依赖特性: 压电变压器只有工作在谐振频率及附近时, 升压比最大。

3. 阻抗特性: 在谐振频率时输入阻抗绝对值最低, 在反谐振频率时最高, 负载 R_L 升高而降低。随负载的增加, 升压比增加达到饱和, 但效率下降。

4. 温度特性: 压电变压器的工作参数随温度的变化, 会发生漂移。具体表现为, 随压电变压器的输入输出电压越高, 瓷片由于介质损耗引起的温升也越高。在低于某一电压值时, 温度随电压线性增加,

当超过此值时, 温度会急剧上升。此时, 谐振频率漂移, 升压比下降, 效率降低, 发热严重。

3.2 压电变压器的设计

利用压电方程:

$$S = sT + dE \quad (1)$$

$$D = dT + \varepsilon E \quad (2)$$

波动方程:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3)$$

再结合本构方程和电学、机械边界条件可以推出 Lagrange - Maxwell 方程式:

$$I = YV + Av \quad (4)$$

$$F = zv - AV \quad (5)$$

进而得到如图 2 所示的 Mason 型等效电路图。其中 C_{01} , C_{02} 分别是变压器输入端和输出端的静电容; m , C_m , R_m 分别是变压器在谐振频率附近机械系统的等效质量、等效力顺和等效电阻; R_L 是负载电阻; ϕ 、 ψ 分别是变压器输入端和输出端的机电变换系数。

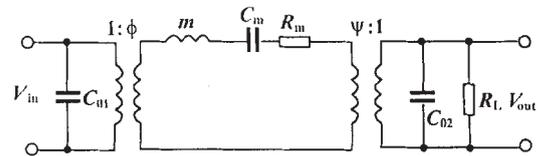


Fig. 2 General equivalent circuit of piezoelectric converter

图 2 压电变压器的一般等效电路图

Mason 型等效电路用简单的电路元件表达了材料性能参数、尺寸等同升压比、输出功率之间的关系, 是设计压电变压器最常用的手段 [12]。其缺点是动态电容、电感、电阻等参数难于确定。对于不同的压电变压器常常需要重新推导等效电路图, 而对于形状复杂的叠层式压电变压器来说, 动态电感等参数的获得更是困难。因此对复杂的压电变压器, 通常采用有限元分析法 [13]。用有限元分析法是对三维振动的模拟, 对不同的压电变压器可采用相同的分析方法, 可以获得精确的结果。缺点是难于确定外部阻抗对压电变压器的影响。在设计过程中共同使用有限元分析法和等效电路法, 可以很好的利用两者间的优点 [14]。

由于 Mason 型等效电路是针对一维振动的压电振子,而实际上的压电振子是三维振动,具有理论上存在无限多个振动模式,而有实用价值的振动模式有限的特点。因此需要对压电振子的尺寸进行严格的控制,以便消除各种寄生振荡,可使振子近似作为一维振动处理。表 2 列出了几种较为常见的压电振子的尺寸特点,可以作为设计压电变压器的依据。

3.2 驱动荧光管的压电变压器

此类变换器具有高升压比、小电流输出的特点,如典型的 Rosen 型压电变压器^[15],其开路升压比可

达 300 左右,被广泛应用在驱动液晶显示器的背光源上。

其开路升压比公式为:

$$A_{\infty} \approx \frac{4}{\pi^2} Q_m k_{31} k_{33} \frac{l}{t} \quad (6)$$

从公式(6)中可知,这种压电变压器的开路升压比同长宽比成正比。理论上通过增大 l/t 可以获得高的升压比。结构示意图如图 3 所示,可以看出,它的厚度远小于长度。故输入端为低阻抗,输出端为高阻抗,用来达到升压的目的。同时由于驱动部分和发电部分的极化方向不同,故其声速不一样,导致

表 2 常见的压电振子特性

Table 2 Properties of the general piezoelectric vibration

名称	示意图	特点	尺寸要求
横向伸缩振子		极化方向同振动方向垂直。 利用 k_{31}	$l > 4w, w > t$
纵向伸缩振子		极化方向同振动方向平行。 利用 k_{33}	$w > t, l > t$
圆片径向伸缩振子		极化方向同振动方向垂直 向伸缩振动。利用 k_p	$r > 5t$
圆片厚度伸缩振子		极化方向同振动方向平行。 利用 k_t (厚度振动机电耦合因数)	$r > 10t$

* l - 长度; w - 宽度; t - 厚度; r - 半径

声阻抗不同。经过推倒可知,为了使两部分声阻抗匹配,并保证每部分相当于一个 $\lambda/2$ 的谐振子(当工作于全波谐振态时),压电变压器两部分的宽度和长度应稍有不同:

$$l' = \frac{l}{\sqrt{1 - k_{33}^2}} \quad (7)$$

$$w't' = wt \sqrt{1 - k_{33}^2} \quad (8)$$

工作于全波模式下的 Rosen 型压电变压器也叫二次型变换器,如图 3 所示,其特点是在全波工作模式下只有两个节点,输出端子恰好处于振子的波腹处,导致导线和电极间连接的可靠性降低。

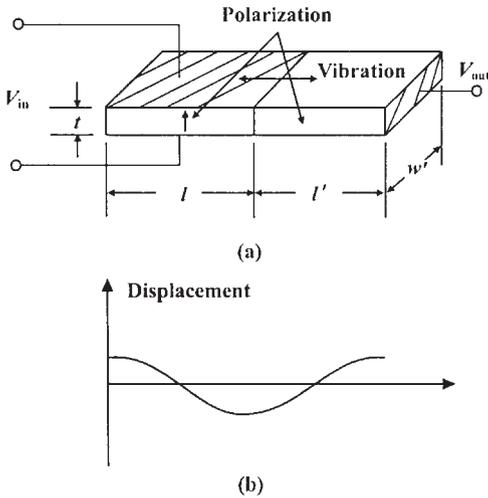


Fig. 3 Schematic and displacement of Rosen piezoelectric converter

图 3 Rosen 型压电变压器的示意图和位移分布图

Shoyama M.^[16] 和 Sakurai K.^[17] 等人在二次 Rosen 型压电变压器的基础上开发出了三次 Rosen 型压电陶瓷变换器(如图 4 所示)。三次型同二次型相比,具有输出阻抗小,输出功率更高,导线同电极连接可靠性高的特点。

图 5 是一类大功率输出的压电变压器的示意图^[18, 19],同 Rosen 型比,其特点是工作频率高,输出功率高,升压比低。如 Jun Hui Hu 等人^[20]研制的变压器在 20℃,负载 860Ω 时,工作频率 818kHz,最大输出功率 1.8W,能量密度 14.3W/cm³,最大效率和升压比分别为 92.3% 和 1.9。

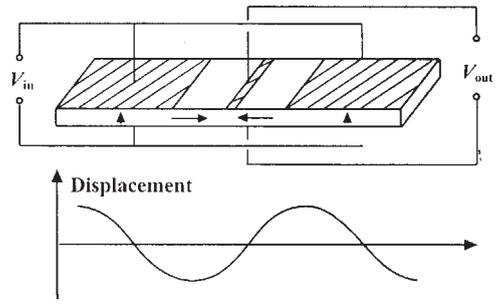


Fig. 4 Schematic and displacement of 3rd-order Rosen piezoelectric converter

图 4 三次 Rosen 型压电变压器示意图和位移分布图

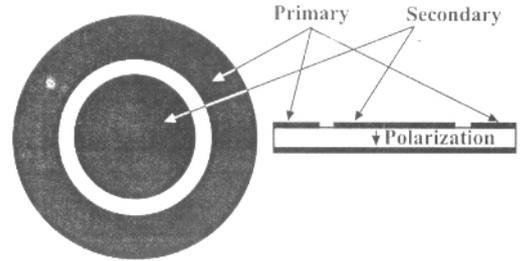


Fig. 5 Schematic of Ring shaped piezoelectric converter

图 5 圆形压电变压器示意图

对于驱动荧光管的压电变压器来说,高升压比是一个很重要的性能参数。Burhanettin^[21] 等人在 Rosen 型压电变压器的基础上开发出了圆形的横纵式压电变压器,获得了更高的升压比。这种变换器用切向机电耦合系数 k_{15} 和径向耦合系数 k_p 代替 Rosen 型的 k_{31} 、 k_{33} 。由于 k_{15} 常常是 k_{31} 的两倍,因此能获得更高的升压比。

3.3 AC-DC、DC-DC 转换器

典型的 AC-DC、DC-DC 转换器具有高效率、高能量密度、高输出功率、小输出阻抗的特点,被大量用于电脑笔记本的适配器和手机充电器等产品上。图 6 所示的是一种典型的 AC-DC 转换器的结构示意图。NEC 公司的 Ohnishi 等人^[22]研制的这种压电变压器尺寸为 15mm × 15mm × 2.2mm,工作频率为 2MHz,效率高达 90%,能量密度 20W/cm³。

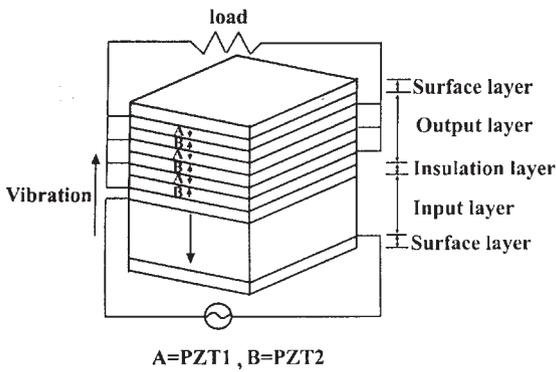


Fig. 6 Schematic of thickness extensional vibration piezoelectric converter

图 6 厚度伸缩振动压电变压器示意图

3.4 压电变压器的新应用

Itoh 等人^[23, 24]利用压电变压器高升压比的特点, 用作等离子放电的激发源。具体的方法是在通入特定气体的真空腔体内, 放置压电变压器。在变换器驱动部分通入正弦波电压, 就可在腔体内产生等离子激荡。研究表明, 压电变压器表面某一点的光强度同其电位分布有关。在真空腔内充入的气体不同, 压电变压器的振动模式都会导致放电情况的改变。Itoh 等人已经用这种方法制作了各种各样的荧光板。

4 前景展望

随着打印机、笔记本电脑等新兴电子产品的迅猛发展, 对于压电变压器的研究也越来越多, 但其自身所存在的固有缺点也在很大程度上限制了压电变压器的进一步发展, 突出的问题有

1. 现在用于压电变压器的材料多为 PZT 系的, 还未找到合适的非铅基压电铁电材料;
2. 压电变压器的制备工艺还不能同半导体材料进行无缝隙连接;
3. 压电变压器的工作过多地依赖于谐振频率, 为外部电路的设计带来了困难;
4. 压电变压器的高升压比和大功率输出难以同时得到保证;
5. 压电变压器的研制包括材料设计、尺寸设计、电极设计和电路设计等多个环节, 所涉及的理论面很广, 还未能建立起一套有效的理论公式去指导压电变压器的研制开发;

6. 压电变压器还不够小巧。

对于以上任何一个问题的突破都会带来压电变压器工艺的飞跃。今后的工作重点将集中在研制开发高机械品质因数、机电耦合系数、高稳定性、宽频带的无铅陶瓷材料; 改进陶瓷材料的制备工艺, 降低陶瓷材料的烧结温度; 建立叠层压电变压器的普适升压比公式和等效电路图; 开发和研制适用于各种条件的压电逆变器和变换器的封装结构和外部电路。

参考文献:

- [1] Gie Hyoun Kweon, Young Cheol Lim, Seung Hak Yang. An analysis of the backlight inverter by topologies[A]. *Industrial Electronics*, 2001. *Proceedings. ISIE 2001. IEEE International Symposium on*[C]. 2001, 2: 896 - 900.
- [2] Bove T, Wolny W, Ringgaard E, *et al.* New type of piezoelectric transformer with very high power density[A]. *Applications of Ferroelectrics*, 2000. *ISAF 2000. Proceedings of the 2000 12th IEEE International Symposium on* [C]. 2000, 1: 321 - 324 .
- [3] Flynn A M, Sanders S R. Fundamental limits on energy transfer and circuit considerations for piezoelectric transformers[J]. *Power Electronics IEEE Transactions on*, 2002, 17(1): 8 - 14.
- [4] 周桃生, 邝安祥. 一种大功率压电陶瓷变换器材料的研究[J]. *硅酸盐学报*, 1992, 20(4) 332 - 337.
- [5] Chu Bao - Jin, Chen Da - Ren, Li Guo - Rong. Electrical properties of $\text{Na}_{1/2}\text{Bi}_{1/2}\text{TiO}_3 - \text{BaTiO}_3$ ceramics[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2002, 22(3): 2115 - 2121.
- [6] Moure A, Pardo L, Alemany C. Piezoelectric ceramics based on $\text{Bi}_3\text{TiNbO}_9$ from mechanochemically activated precursors[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2001, 21(10 - 11): 1399 - 1402.
- [7] Nagata Hajime, Takenaka Tadashi. Additive effects on electrical properties of $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})\text{TiO}_3$ ferroelectric ceramics[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2001, 21(10 - 11): 1299 - 1302 .
- [8] Park Yeong - Joon, Hwang Kyu - Seog, Song Jong - Eun. Growth of calcium phosphate on poling treated ferroelectric BaTiO_3 ceramics[J]. *Biomaterials*, 2002, 23(8): 3859 - 3864.
- [9] Régnauld Von Der, Mühlh, Simon Annie, Khemakhem Hamadi. Pyroelectric and piezoelectric properties of new

- lead-free ceramics with composition $Ba_{1-x}Na_xTi_{1-x}O_3$ [J]. **Annales de Chimie Science des Matériaux**, 2001, **26** (4) 127 – 130.
- [10] Wang X X, Murakami K, Sugiyama O. Piezoelectric properties, densification behavior and microstructural evolution of low temperature sintered PZT ceramics with sintering aids[J]. **Journal of the European Ceramic Society**, 2001, **21** (10 – 11) 1367 – 1370.
- [11] Wang Moo – Chin, Huang Mao – Sung, Wu Nan – Chung. Low – temperature sintering of $12Pb(Ni_{1/3}Sb_{2/3})O_3 - 40PbZrO_3 - 48PbTiO_3$ with V_2O_5 and excess PbO additives [J]. **Journal of the European Ceramic Society**, 2002, **22** (6) 697 – 705.
- [12] Syed E M, Dawson F P, Rogers E S Sr. Analysis and modeling of a Rosen type piezoelectric transformer[A]. Power Electronics Specialists Conference, 2001. **PESC. 2001 IEEE 32nd Annual** [C]. 2001, (4) 1761 – 1766.
- [13] Tsuchiya T, Kagawa Y, Wakatsuki N, *et al.* Finite element simulation of piezoelectric transformers[J]. **Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on**, 2001, **48** (4) 872 – 878.
- [14] Hyun – Woo Joo, Chang – Hwan Lee, Hyun – kyo Jung. Analysis of piezoelectric transformer by using finite element method and equivalent – circuit considering load variation [A]. **Ultrasonics Symposium, 2001 IEEE** [C]. 2001, 1 : 459 – 462.
- [15] Fukunaga H, Kakehashi H, Ogasawara H, *et al.* Effect of dimension on characteristics of Rosen – type piezoelectric transformer[A]. Power Electronics Specialists Conference, 1998. **PESC 98 Record. 29th Annual IEEE** [C]. 1998, 2 : 1504 – 1510.
- [16] Shoyama M, Horikoshi K, Ninomiya T. Steady – state characteristics of the push – pull piezoelectric inverter[A]. Power Electronics Specialists Conference, 1997. **PESC '97 Record, 28th Annual IEEE** [C]. 1997, 1: 715 – 721.
- [17] Sakurai K, Shindou S, Ohnishi K. Piezoelectric ceramic transformer using radial vibration mode disks[A]. **IEEE, Ultrasonics Symp**[C]. 1998, 1: 939 – 944.
- [18] Juhyun Yoo, Kwanghee Yoon, Sangmo Hwang, *et al.* Electrical characteristics of high power piezoelectric transformer for 28 W fluorescent lamp[J]. **Sensors and Actuators A**, 2001, 90: 132 – 137.
- [19] Lee J S, Lee Y H, Chai H I, *et al.* The characteristics of new piezoelectric ballast for fluorescent T8 lamp, Industrial Electronics[A]. **Proceedings. ISIE 2001. IEEE International Symposium on** [C]. 2001, 2 : 947 – 951.
- [20] Jun Hui Hu, Hing Leung Li, Helen Lai Wah Chan. A ring – shaped piezoelectric transformer operating in the third symmetric extensional vibration mode[J]. **Sensors and Actuators A**, 2001, 88: 79 – 86.
- [21] Koc B, Alkoy S, Uchino K. A circular piezoelectric transformer with crescent shape input electrodes[A]. Ultrasonics Symposium, 1999. **Proceedings. 1999 IEEE** [C]. 1999, 2: 931 – 934 .
- [22] Ohnishi O, Kishie H, Iwamoto A, *et al.* Piezoelectric ceramic transformer operating in thickness extensional vibration mode for power supply[A]. **IEEE, Ultrasonic Symp**[C]. 1992, 1: 483 – 488.
- [23] Itoh H, Teranishi K, Suzuki S. Observation of light emissions around a piezoelectric transformer in various gases [J]. Plasma Science, **IEEE Transactions on**, 2002, **30** (4) 124 – 125.
- [24] Teranishi K, Itoh H, Suzuki S. Dynamic behavior of light emissions generated by piezoelectric transformers[J]. Plasma Science, **IEEE Transactions on**, 2002, **30** (4) 122 – 123.