受賞記念講演：平成12年度技術進歩賞

高出力圧電セラミックトランスの開発

佐々木康弘, 山本 満, 井上 武志

日本電気(株)機能材料研究所, 〒216-8555 川崎市宮前区宮崎 4-1-1.

Development of High Power Piezoelectric Transformers

Yasuhiro Sasaki, Mitsuru Yamamoto and Takeshi Inoue

NEC, Corporation, 4-1-1 Miyazaki, Miyamae-ku, Kawasaki 216-8555.

Received November 19, 2001

SYNOPSIS

Low-profile inverter power sources are increasingly required for backlight systems of liquid crystal display. A great deal of attention has been focused on the application of miniaturized transformers to such power sources. The output performance of piezoelectric transformers, which operate in the third order longitudinal vibration mode with dimensions of l 42 mm $\times$ w 5.5 mm $\times$ t 1.4 mm, was studied. The piezoelectric ceramic material: $0.05\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})\text{O}_3$ - 0.48PbZrO_3 - 0.47PbTiO_3 was employed for these transformers. The values of efficiency for the transformers reach maximum when connecting a load resistance of around 100 k Ω which is assumed to be that of a cold cathode fluorescent lamp. The transformer with seven ceramic layers in the driver section, generates an output power of 3 W and shows the step-up voltage ratio over 60.

KEY WORDS

piezoelectric, ceramics, transformer, high power, mechanical quality factor, cold cathode fluorescent lamp, inverter, power source

Received November 19, 2001

1 緒 言

近年、液晶ディスプレイ (LCD: Liquid Crystal Display) の普及が急速に進み、バックライトインバータの昇圧トランスとして、圧電トランスが注目され実用化がなされている。液晶バックライトには、冷陰極管 (CCFL: Cold Cathode Fluorescent Lamp) が用いられている。CCFL は、その点灯開始時には、1000 V ~ 1500 V の高電圧が、また定常点灯時には、500 V 程度の電圧を印加して 5 mA 程度の電流を供給することが必要である。圧電トランスは、昇圧比に負荷依存性をもつため、このような CCFL の点灯特性に良好に整合し、バラストコンデンサなしで電圧調整することができる。Fig.1 にはノートパソコンに用いられている CCFL の特性を示す。起動点灯時の CCFL はインピーダンスが極めて高いため、圧電トランスは高昇圧比を示し、高電圧を発生する。また、定常点灯時には 100 k Ω 程度にまで CCFL のインピーダンスが低下するため、圧電トランスの昇圧比は下がり、安定した点灯電圧程度の出力を発生することになる。このような特性上の利点とともに、圧電ト

ランスは不燃性、低ノイズ、そして何よりも矩形薄板形状であり、大画面化が進む LCD においてインバータの小型薄型化のニーズに対しても特徴を活かせるため、特にノート PC などの LCD バックライトインバータ用では、圧電トランスの利用

Fig.1 Characteristics of Cold Cathode Fluorescent Lamp for the notebook-type of computers.

が盛んに進められている¹⁻⁸⁾。

我々は、LCDバックライトインバータ用として対称ローゼン3次型圧電トランスを提案し、その優れた特性を既に示している¹⁻⁴⁾。近年、TFT (Thin-film Transistor) の製造技術の向上に伴い、LCDは薄型化と大画面化が益々進み、これに伴い、CCFLも細管化と長尺化がすすめられ、そのため、起動電圧がより高くなってきた。そこで、圧電トランス素子自体の昇圧比を高めるために積層型圧電トランスのニーズが高まっている。圧電トランスの入力側(駆動部)を積層構造とすることで、入力側のインピーダンスを下げ、入出力のインピーダンス比率を変化させ、昇圧比を高くすることができる。

本報告では、高信頼性、高昇圧比、高効率動作を特徴とする長さ縦振動3次モードで動作する圧電トランスの諸特性について述べる。

2 圧電材料

圧電トランスでは、圧電共振に基づく大振幅の弾性波が利用される。従って、高出力圧電トランスの設計開発には、圧電材料の大振幅共振下における諸特性(特に機械的品質係数 Q_m)を知り、これを向上させることが重要である。しかし、これまでの研究では、そのほとんどが非共振駆動した場合に限られており、大振幅の共振駆動に関する研究は不十分であった。これに対し、連続電圧波を印加して、圧電振動子の大振幅共振下での諸特性を簡易に測定することができる定電流駆動による自動測定法が新たに開発され、高出力圧電材料の開発が加速された^{9,10)}。我々は同手法を用いて $\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbZrO_3 - PbTiO_3 三成分材料の大振幅諸特性を検討した^{10,11)}。その結果、圧電トランス向けに、大振幅特性の優れた $0.05\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})\text{O}_3$ - 0.48PbZrO_3 - 0.47PbTiO_3 の組成を有する圧電セラミック材料を実現した。この材料の小振幅で測定された代表的材料定数をTable 1に示した。さらに、同材料を $143 \times w \times t$ mmの矩形状圧電横効果振動子に加工し、低電流駆動法を用いて、振動子の先端振動速度の実効値 v の関数として Q_m および温度上昇の測定結果をFig.2にプロットする。同材料の20℃の温度上昇で定義した使用振動速度限界は0.5 m/sである。

3 圧電トランスの構造

Fig.3は長さ縦3次モードで動作する対称ローゼン3次型圧

Table 1 Characteristics of a piezoelectric material.

Density ρ ($\times 10^3$ kg/m ³)		7.93
Elastic compliance s_{11}^E ($\times 10^{-12}$ m ² /N)		11.8
Dielectric constant ϵ_{33}^T		1100
Piezoelectric constant d_{31} ($\times 10^{-12}$ C/N)		-122
Mechanical quality factor Q_m		1500

電トランスの構造を示している。このトランスは両端部に対称に入力用電極と、中心部に出力用の電極が形成されている。また、入力部を図のようにセラミックス層と電極層を交互に積層し、各電極層を電氣的に並列に接続した高昇圧比を有する積層構造トランスとして使用することもできる。Fig.4は、トランスの機械的な変位分布と応力分布を示す。Fig.3およびFig.4が示すように、このトランスの電気端子は支持部も兼ねて、長さ縦3次振動モードの振動の節部において接続できる。1957年、Rosen博士により開発された圧電トランスは、出力電気端子が振動の腹の部分で接続されるため、トランスの信頼性が劣るといわれているが、本構造圧電トランスは、振動の節部での接続支持が可能であるため、高出力動作時においても信頼性は高い。

Fig.2 (a) Mechanical quality factor Q_m (b) temperature rise ΔT as functions of effective vibratory velocity v .

Fig.3 Structure of a piezoelectric ceramic transformer.

Fig.4 Mechanical displacement distribution and stress distribution of the piezoelectric transformer.

Fig.5 Structure model for analysis.

バックライトインバータ用圧電トランスでは、圧電横効果 (k_{31} モード) と圧電縦効果 (k_{33} モード) が、それぞれ、入力部および出力部で使われている。一般に電気機械結合係数 k_{31} と k_{33} は、理想的な細長棒の結合係数として定義される。しかし、このトランスのような長方形プレート構造では、実効的な電気機械結合係数 $k_{31, \text{eff}}$ および $k_{33, \text{eff}}$ は幅振動モードとの結合のため、理論値より減少した値となる。さらに、幅方向の振動モードはスプリアスとなる場合もある。したがって、トランス形状の寸法は、設計段階で幅方向の振動がスプリアスとならないように設計を施す必要がある。例えば設計時に有限要素法を用いた振動モード解析などを併用するとこの問題を解決できる。

4 分布定数等価回路を利用した圧電トランスの設計手法

対称ローゼン3次型圧電トランスは、長さ方向において中心から対称構造をなしている。したがって、解析を行う上では、

Fig.6 Distributed equivalent circuit of the piezoelectric transformer.

Fig.5に示される片側半分のトランス構造を想定し、等価回路においても同様のモデルを考慮すれば十分である。Fig.6に、入力側積層層数を n 層と想定した際の Mason の研究に基づいて描いた本構造圧電トランスの分布定数等価回路図を示す^{8,12)}。ここで、 R_2 は、本トランスに接続する負荷抵抗を R_L とすると、

$$R_2 = 2R_L \quad (1)$$

の関係がある。

Fig.6の等価回路は、縦続接続の2端子回路であり、その F 行列は、以下のように表せる。

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega n^2 C_{d1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{n\phi_1} & 0 \\ 0 & n\phi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z}_{01} \\ 0 & j\sin\theta_1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \frac{1}{j\dot{Z}_{01}\tan\frac{\theta_1}{2}} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & j\dot{Z}_{01}\tan\frac{\theta_1}{2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & j\dot{Z}_{02}\tan\frac{\theta_2}{2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z}_{02} \\ 0 & j\sin\theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\phi_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & j\frac{1}{\omega C_{d2}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C_{d2} & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

F 行列の各定数を用いて、圧電トランスのパワー伝送効率 η 、および昇圧比 G は次式で与えられる。

$$\eta = \frac{R_2}{|AR_2 + B|} \cdot \text{Re} \left(\frac{\dot{C}R_2 + \dot{D}}{AR_2 + B} \right) V_1^2 \quad (3)$$

$$A_v = \left| \frac{R_2}{AR_2 + B} \right| = \left| \frac{2R_L}{2AR_L + B} \right| \quad (4)$$

次に負荷回路について述べる。本圧電トランスの負荷としては、先にも述べたがLCDバックライト用のCCFLを想定し

た、バックライトのCCFLには、輝度向上等を図るために、反射板等が付随している構造となっており、このような構造が浮遊容量を生じ、効率劣化等の悪影響を及ぼすことになる。そこで、浮遊容量を考慮した解析・設計が重要である。したがって、負荷回路にはCCFLの特性を考慮して、Fig.7に示すように負荷抵抗 R_L に対して、それぞれ並列に浮遊容量(ストレーキャパシタ) C_{st} を、直列にバラストキャパシタ C_B を配置して解析を行うことにした。ただし、バラストキャパシタ C_B は、電磁型トランスにおいては、点灯開始時の電圧調整に使われる素子であるが、先にも述べたとおり、圧電トランスでは、その必要がなく、ここでの解析では、 C_B は無いものとして行うことにする。

$C_{st}=5\text{pF}$, $C_B=\infty\text{F}$ とした時の効率 η および昇圧比 G の負荷依存性を入力部の積層数 $n=1, 5, 7$ について解析した結果をFig.8に示す。解析の結果から、 η は n に対して依存せず、また R_L が数十~100k Ω の付近で高いレベルの η を維持することがわかる。 G については、 n に対し線形増加している。また先にも述べたとおり圧電トランスは負荷依存性をもっており、 $n=5, 7$ のが積層品については、 R_L が1000k Ω となると数百倍もの G が得られることわかる。解析結果の一例として、Fig.8より $n=7$ では、CCFLの擬似負荷抵抗100k Ω に対して、効率95%以上、60以上の昇圧比を示す。

Fig.7 Load circuit with stray capacitance C_{st} and ballast capacitor C_B .

Fig.8 Efficiency η and Step-up voltage ratio G as functions of load resistance R_L .

5 圧電トランスの特性

5.1 試料

142mm $\times$ w5.5mm $\times$ t1.4mmの積層数 $n=1, 5, 7$ の圧電トランスを作製してこの評価を行った。上記圧電材料をベースに、 $n=1$ のトランスは焼結ブロックに研削加工、電極形成をおこない作製した。また、 $n=5, 7$ の積層型は圧電アクチュエータやセラミックコンデンサーで用いられるグリーンシート法により作製した¹³⁾。内部電極にAg-Pd合金を使用し、焼成は1100°C、2時間大気中でおこなった。作製した積層型トランスの内部電極部近傍の写真をFig.9に示す。

圧電トランスは機械振動を利用したデバイスであり、その電気的な出力に応じ、機械的出力も増大する。例えば、細棒の圧電振動子を共振で駆動した場合の、振動の節部に発生する応力振幅の実効値 σ と、その先端振動速度振幅の実効値 v の関係を計算し、Fig.10にプロットした。 σ と v は比例関係にある。また、 v^2 と出力は比例関係にあるので、圧電トランスの高出力化をはかるためには、圧電材料の振動速度特性を十分発揮できる高信頼性圧電トランス製造技術開発が重要になる。具体的には焼結体気孔の除去、電極とセラミックスの接合強度の向上、低抵抗電極、分極処理技術の最適化によるダメージの低減などが主な研究開発の要素である。

5.2 実装パッケージ

圧電トランスは大振幅で駆動されるため、支持に起因する振動阻害の動特性への影響を顕著に受ける。理想的には電気

Fig.9 SEM image around internal electrode.

Fig.10 Effective stress σ vs. effective vibration velocity v for piezoelectric resonator.

端子の取り出しを兼ねた構造体を基板上に設け、それをもちいて振動の節で、圧電トランスを柔軟に支持することが望ましい。Fig.11には上記概念をもとに考案した実装パッケージを示す。3次モードで駆動する本圧電トランスの3つの振動の節部を、電気端子を兼ねた金属バネを上下部から接触させることで支持をおこなっている。これにより大振幅駆動時も、圧電トランスの特性を損なわない支持構造が実現できる。

5.3 出力特性

Fig.12には100k Ω の負荷抵抗を接続して、正弦波電圧により、1W以下の電力で駆動させた際の、圧電トランスの効率 η および昇圧比 G の周波数特性を示す。 η は周波数 f を100kHzから高くすると、共振周波数付近で最大ピークとなり、その

Fig.11 Packaging technology for the piezoelectric transformer.

Fig.12 Efficiency η and step-up voltage ratio G for the piezoelectric transformer as a function of frequency.

後減少する。 G が最大になる f において、出力電力も最大になるため、圧電トランスの振動速度が大きくなり、圧電材料の特性に起因する機械的品質係数(損失の目安となる数値) Q_m 値が小さくなる。そのために、 η が若干下がる傾向が観察される。また、 G が最大になる f より高い周波数側で η は最大値をとる。故に、インバータ用途として駆動する際には、共振よりも高い周波数領域で駆動・制御して使うことが望ましい。また、周波数を調整することにより圧電トランスの G は調整可能である。

Fig.13に圧電トランス($n=1, 7$)の出力電力 P_{out} および温度上昇 ΔT の関係を示す。 P_{out} の増加により、発熱をともない P_{out} の飽和現象が見られる。また、積層型は単層に比べて温度上昇が大きい。これはFig.14に示すように n の増加により Q_m が低下するためであり、この要因として電極抵抗による損失の増大が考えられる。

5.4 輝度効率

Fig.15には圧電トランス($n=1$)および従来の電磁トランスを用いインバータ電源を作製し、それをノートパソコン用冷却陰極管に接続し、輝度効率の評価をおこなった結果について示す。圧電型は電磁型に比べ10%程度輝度効率が高い。これは、圧電トランスは電力伝送効率が高く、そのフィルタ作用により出力電圧波形が正弦波になるためと考えられる。

Fig.13 Temperature rise ΔT as a function of output power P_{out} .

Fig.14 Mechanical quality factor Q_m as a function of the number of ceramic layers.

Fig.15 Luminous efficiency η_{LE} for a typical electromagnetic inverter and a piezoelectric inverter.

Fig.16 Luminous efficiency η_{LE} for inverters employed piezoelectric transformers with single layer and 7 layers.

同様に $n=1, 7$ の圧電トランスを用いたインバータの輝度効率評価をおこなった。その結果を Fig.16 に示す。積層圧電トランスは単層より輝度効率がやや向上している。これは、トランスを積層化したことにより、予備昇圧のためのインダクタやオートトランス等を省くことができたため、回路的な特性として輝度効率が向上しているものと考えられる。尚、Fig.17 は圧電トランスを搭載した LCD バックライトインバータのモジュール外観を示している。

6 ま と め

液晶画面のバックライトインバータ向けに、長さ縦振動 3 次モードで動作する昇圧型圧電トランスを提案し、この開発をおこなった。圧電トランスの高出力化をはかるため圧電セラミック材料の探索をおこない、また分布定数等価回路解析で圧電トランスの諸特性を計算し、最適設計を行う方法について示した。この設計に基づいて圧電トランスの製造をおこ

Fig.17 Inverter power source.

なった。その結果、3W 以上の出力が得られ、冷陰極管の点灯実験をおこなったところ、電源の電力伝送効率のみならず輝度効率の向上が確認された。

圧電トランスは CCFL 点灯インバータ用途として、各メーカーが採用しつつあり、市場でようやく市民権を得た状況にある。しかしながら、この技術は完成されたものではなく、圧電材料、電極材料、構造、実装技術などさらなる技術改善により特性向上の可能性がある。また、その応用開発も重要である。例えば、電磁トランスでは正常動作不能な強力磁場中の電源用途がある。井森らは¹⁴⁾、本報告圧電トランスを用いた光電子増倍管用高電圧コンバータを試作し、強力磁場中における安定動作に成功している。

さらに、圧電トランスの昇圧応用とともに、小型電子機器の電源として用いられる AC-DC アダプタのような降圧応用についても、その期待度は高い。我々は、そのようなニーズにも応えるべく輪郭広がり振動モードを用いた圧電トランスを提案している^{15,16)}、また、高出力セラミック圧電材料の強力超音波デバイスへの応用も期待される。今後は、高出力圧電技術応用範囲の拡大に向けて精力的に開発を行っていきたいと考えている。

謝 辞

最後に、栄誉ある賞をいただきました粉体粉末冶金協会に感謝申し上げます。

文 献

- 1) 田上悟, 袴田洋代, 川島進吾, 福岡晃, 坂口竜夫, 座間浩一: "圧電トランス式インバータの開発", NEC 技報, Vol.47, No.10 (1994)106-110.
- 2) S.Kawashima, O.Ohnishi, H.Hakamata, S.Tagami, A.Fukuoka, T.Inoue and S.Hirose: "Third order longitudinal mode piezoelectric ceramic transformer and its application to high-voltage power inverter", Proc. IEEE US Symp., (1994)525-530.
- 3) 井上武志, 広瀬精二: "圧電トランス", 日本音響学会誌, 55 (1999)504-511.

- 4) T.Inoue, M.Yamamoto, S.Kawashima and S.Hirose: "Third order longitudinal mode piezoelectric ceramic transformer for high-voltage power inverter", IEICE Trans. Electron., Vol.E81-C, No.7 (1998)1128-1135.
- 5) 勝野超史, 佐藤宏行, 熊坂克典, 布田良明: "圧電トランスインバータの開発", Tokin Technical Review, 23(1996)77-82.
- 6) K.Kanayama and N.Maruko: "Property of alternately poled piezoelectric ceramic transformers", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.36, Part 1, No.5B (1997)3048-3049.
- 7) 杉山直巳, 大内努: "圧電トランス/インバータ", Materials Integration, Vol.12, No.6 (1999)27-31.
- 8) M.Yamamoto, Y.Sasaki, C.Amemiya, T.Inoue, S.Saito, T.Inoi and S.Hirose: "Design method of multilayer piezoelectric ceramic transformer used in a power inverter for a color LCD backlight", World Congress on Ultrasonics Proc., (1997)276-277.
- 9) S.Takahashi and S.Hirose: "Vibration-Level Characteristics of Lead-Zirconate-Titanate Ceramics", Jpn. J. Appl. Phys., 31 (1992)3055.
- 10) S.Takahashi Y.Sasaki, S.Hirose and K.Uchino: "Stability of $\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3\text{-Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})\text{O}_3$ Piezoelectric Ceramics under Vibration-Level Change", Jpn. J. Appl. Phys., 34(1995)5328.
- 11) 佐々木康弘, 高橋貞行: " $\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ 三分系圧電セラミックスの高振動レベル特性", 平成6年度粉体粉末冶金協会秋季大会講演概要集, (1994)168.
- 12) D.A.Berlincourt, D.R.Curran and H.Jaffe: "Physical Acoustics", Vol.1A, Chapt.3, Academic Press, (1964)223-256.
- 13) 斎藤晋, 雨宮千夏, 北見剛, 佐々木康弘, 猪井隆之, 越智篤: "積層一体焼結圧電セラミックトランスの開発", NEC 技報, Vol.49, No.10 (1996)131-134.
- 14) M.Imori, T.Taniguchi and H.Matsumoto: "A photomultiplier high-voltage power supply incorporating a ceramic transformer driven by frequency modulation", IEEE Trans. Nulc. Sci., 45 (1998)777-781.
- 15) 山本満, 佐々木康弘, 越智篤, 井上武志: "輪郭広がり振動モードを利用した圧電トランス", 1999年電子情報通信学会春季大会講演予稿集, 基礎・境界, A-11-2(1999)267.
- 16) 山本満: "輪郭広がり振動を利用した降圧型圧電トランス", 超音波テクノ, Vol.11, No.10 (1999)18-22.