

11. 半導性強誘電体磁器板の屈曲現象

吉 崎 未来彦

はじめに 圧電/電歪材料に誘起されるひずみ量は 10^{-3} 程度(例えば、1 cmの試料が $10\mu\text{m}$ 伸びる)と小さいので変位を拡大する構成が用いられる。その1つにバイモルフ型がある。伸縮特性の異なる2枚の圧電磁器板を貼り合わせて屈曲変位に変換するこのタイプは、発生力、応答速度は高くはないが、容易に大きな変位量(数 $100\mu\text{m}$)の得られるデザインとして広く用いられている。しかし、バイモルフ形変位素子で従来問題とされていることは、その貼り合わせ構造に由来する、①使用耐久性(約 10^8 サイクル)の低さと②変位量ドリフト(クリープ)などであった。もし、一枚(モノリシック)の磁器板で屈曲変位を得ることができれば、これらの問題点が一挙に解決できると同時に、生産工程が単純化されて低コスト化をもたらす。

理論 n形の半導性を有するモノモルフを考える。半導体に金属を接合させると、電子のエネルギーバンド構造に、ショットキ型の障壁が形成されることはよく知られている。図1(a)には両面に金属電極をもつ厚さ t_0 の半導体磁器のバンドモデルを示す。図中、障壁の高さの ϕ_0 は金属と半導体の仕事関数の差である。この試料の左電極に+Vの電圧を印加するとバンド構造は図1(b)のように変化する。障壁高さ ϕ_0 が大きい場合には、電界は磁器内で一様にはならずほぼ右の接合部に集中して加わると近似することができる。磁器板の中心を原点にとった座標位置Zを用いると、電界分布 $E(Z)$ および障壁厚さ t_0 はそれぞれ次式で与えられる。

$$E(Z) = \frac{qN_d}{\epsilon_0\epsilon} [Z - t_2 + t_0] \quad (1)$$

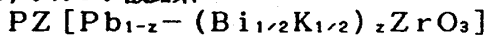
$$(\text{ただし } t_2 - t_0 < Z < t_2)$$

$$t_0 = \left[\frac{2\epsilon_0\epsilon}{qN_d} (\phi_0 + V) \right]^{1/2} \quad (2)$$

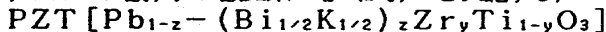
ここで、 q は電子の電荷、 N_d はドナー密度、 ϵ_0 は真空誘電率、 ϵ は半導体の比誘電率である。ショットキ障壁厚みはシリコンなどでは通常 μ オーダーであるが、誘電率を2桁高く、ドナー密度を4桁程度低くすることに依って数 100μ オーダーにすることができる。

試料の作製 実用材料として、圧電定数が大きく、半導性を生じ易い物質でペロブスカイト型構造を持つ固溶系として、

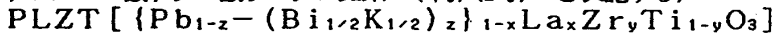
(a) ジルコン酸鉛系



(b) ジルコン酸チタン酸鉛系 ($y:(1-y)-z$ と表記する)



(c) ジルコン酸チタン酸ランタン鉛系 ($x/y/(1-y)-z$ と表記する)



を取り上げた。

試料は金属酸化物を用いて普通焼成によって作製し、その後所定のサイズ($25 \times 4 \times 0.4\text{ mm}$)に切断、銀電極を焼き付けた。生ずる変位量の大きさは $100\mu\text{m}$ に達し、同サイズの圧電バイモルフ型素子の変位量と同程度である。また、数ボルトの低電圧で駆動することもできる。

組成を変化させることによって、結晶構造、比誘電率、キャリア密度、キャリア移動度といったモノモルフの特性を決定する諸要素を変化させることが出来る。

実験 各組成の諸特性を測定し研究を進めた。

「電圧変位特性」

変位量、変位の方向の変化(p~nの相転移点)を測定した。図2(a)はn typeの(b)はp typeのモノモルフの変位と(c)オーミックベーストを用いたときの変位を示す。右上がりな型、左上がりな型を示し、オーミックベーストのものは通常の圧電体と同様の変位を示した。図3はPZ系の組成による変位量の変化を表わし、(KBi)の添加量が増大するに連れて半導体的になり変位量が増大するが、結晶構造の変化によって圧電性を失い変位量は小さくなっていく。図4はPZTの組成によるモノモルフ特性を示した。結晶構造の相転移点付近ではモノモルフになりにくいことがわかる。

「誘起歪みのX線の解析」

ショットキ型モデルの検証のために正極面と負極面の格子定数の電圧依存性をX線的に調べた。n型の結果を図5に示す。負極面への電界集中がよくわかる。電極にはカーボン電極を用いた。

「ホール効果」

ホール係数によるpnの判定とキャリア密度の算出を行なった。下表に結果を示す。

試料名	変位特性	ホール係数(m^3/C)	PN	キャリア密度(m^{-3})	キャリア移動度(m^2/Vs)
3/52/48-20	右上がり	$5.0\text{E}-3$	N	$1.5\text{E}+21$	$5.0\text{E}-9$
3/52/48-50	左上がり	$-5.0\text{E}-4$	P	$1.5\text{E}+22$	$5.0\text{E}-10$

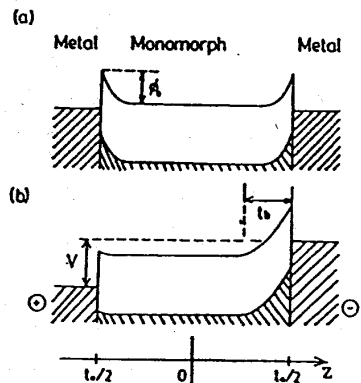


図1 モノモルフのエネルギーバンドギャップ

変位特性による p n の判定とホール係数による判定は一致している。シリコンなどと比較するとキャリア密度と殆ど変わらないが、移動度はかなり低い。もともと、絶縁体であるため、伝導帯の幅も狭くバンドギャップも広いと思われる。

「動的電圧電流特性」図6に示すように特徴的な山が表れる。移動するチャージ量（電流値を積分したもの）は通常の圧電体に比べてかなり高く、変位の大きな素子ほど、移動するチャージ量が多い。おそらく、強誘電的分域反転に由来するものと思われる。

「屈曲の共振特性」(図7)を測定したところ Q 値は約50で、ブザー、スピーカーや圧電ポンプなどの応用分野に広く代替していくことができよう。

まとめ 半導性圧電体磁器を用いた新方式のモノモルフ屈曲素子を提案し、その検証を行なった。原理は半導体—金属間のショットキ（あるいはモット）障壁における不均一な電界分布に由来し、屈曲変位量は、圧電定数、キャリア密度が大きく、誘電率の小さな物質ほど大きい。具体的にPZ, PZT, PLZT系磁器において実施例が示され、かつ動的変位特性においても共振現象が観測された。実用化に当たっては、材料としてPLZT系のものが優れた特性を示した(図8(a), (b))。モノモルフアクチュエータの作製法としてグリーンシート法が有効であると思われる。この方法を用いると薄膜の大量生産が可能となる。いくつか試作を行っており、焼成条件の最適化を進めている。

【参考文献】

- (1) 内野研二：圧電／電歪アクチュエーター、森北出版（1986）
- (2) 御子柴宣夫：半導体の物理、培風館（1982）
- (3) J. K. Lee and M. A. Marcus: Ferroelectrics 32 93 (1981)

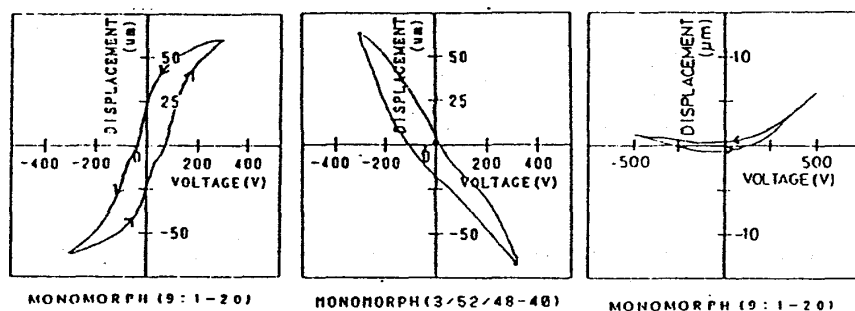


図2 (a) n typeの電圧変位特性 (b) p typeの電圧変位特性 (c) オーミックペースト

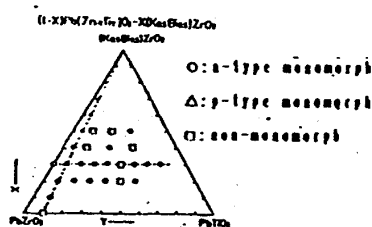


図4 PZTの組成によるモノモルフ特性

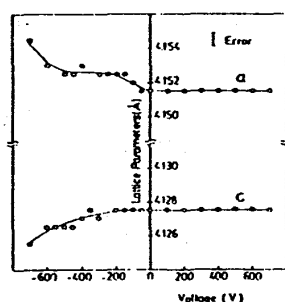


図5 格子定数の電圧依存性

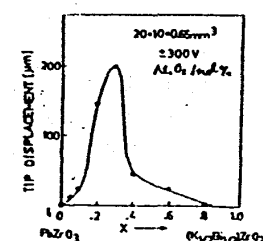


図3 PZの組成による変位量の変化

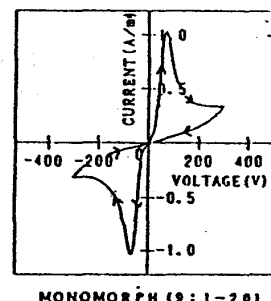


図6 動的電圧電流特性

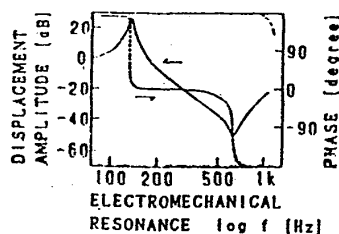


図7 屈曲振動の周波数特性

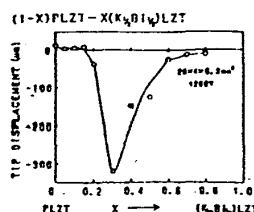


図8(a) PLZTの組成による変位量

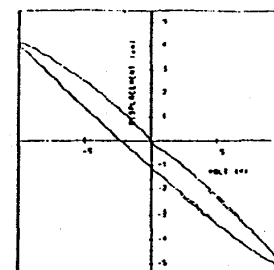


図8(b) 低電圧駆動モノモルフの実例