

# АНАЛОГОВИ ФУНКЦИОНАЛНИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВАТА НА ПИЕЗОТРАНСФОРМАТОРНИ ЕЛЕМЕНТИ С ЛИНЕЙНО УПРАВЛЕНИЕ

П.Ж.Тодоров  
В.Д.Тодорова

Технически Университет - Габрово  
Технически Университет - Габрово

**Abstract.** *Using the phenomenon of “induced” piezoelectricity inside non-polar dielectric materials with higher value of the permittivity  $\epsilon$  presents an opportunity for development of electrostrictive piezotransformer elements with linear control. In this paper has been shown the possibility of making various analogue functional transducers, such as balanced modulators, mixers, driver-power-amplifier modulators, analogue and frequency multipliers and detectors, on the basic of this phenomenon. Moreover, one and the same electrostrictive piezotransformer element with dimensions of a microelectronic product can realise several functions simultaneously. Three constructive variants of the electrostrictive piezotransformer elements have been demonstrated. Some results of their experimental investigation have been presented and discussed.*

## ВЪВЕДЕНИЕ

Електромеханичните свойства на сегнетоелектриците при прехода им от параелектрична в сегнетоелектрична фаза [1] позволява пиезоэффектът в сегнетофаза да се тълкува като електрострикция, т.е. линеаризирана спонтанна поляризация.

При сегнетоелектриците, които не притежават пиезоэффект в парафаза, единственият възможен електромеханичен ефект в това състояние е електрострикцията. Възникването на спонтанна поляризация при сегнетоелектричния фазов преход води до спонтанна деформация, стойността на която е пропорционална на квадрата на поляризацията, т.е. това е електрострикционна деформация. Деформацията, предизвикана от външно електрическо поле в сегнетофаза, също е свързана с електрострикцията.

Връзката между пиезоелектричните, диелектричните и електрострикционните коефициенти в материали от типа  $\text{BaTiO}_3$  е следната [2]:

$$d_{ij} = 2 Q_{klij} \cdot P_{sk} \cdot \chi, \quad (1)$$

$Q$  - коефициент на електрострикция;  $P$  - поляризация;  $\chi$  - диелектрична възприемчивост, като:

$$P = \chi \cdot E = \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)E. \quad (2)$$

В дадения случай пиезоэффектът в сегнетофаза може да се разглежда като електрострикция, но уравнение (1) е валидно само за пиезоелектрични материали, при които над точката на Кюри пиезоелектричният ефект е нулев ( $P = 0$ ).

Центросиметричният неполярен диелектрик във външно електрическо поле притежава само електрострикционни свойства, но полето води до изчезване на центъра на симетрия в структурата на диелектрика, т.е. той все едно, че става полярен. Създават се условия за проявяване на пиезоелектричен ефект, който се нарича „индуциран“ пиезоэффект [3, 4]. В резултат от линеаризацията на електро-стрикцията в неполярните линейни диелектрици зависимостта на поляризацията от интензитета на полето има линеен характер.

„Индуцираният“ пиезоэффект в неполярните диелектрици практически може да се наблюдава само в диелектрични материали с много висока диелектрична проникваемост ( $\varepsilon_r > 1000$ ) според (2), при сравнително високи електрострикционни коефициенти според (1).

В някои непиезоелектрични материали (или сегнетоелектрици в парафаза) с високо  $\varepsilon_r$  стойността на „индуцирания“ пиезоэффект е достатъчна за реализация на аналогови функционални устройства.

Резултатите от изследванията на такива керамични диелектрични материали са представени в [5]. На тяхна основа са реализирани електрострикционни пиезотрансформатори, които позволяват да се решат редица проблеми на класическите пиезотрансформатори, свързани с температурна нестабилност, хистерезис на управляващите характеристики, зависимост на управляващия параметър от времето на въздействие и броя на циклите (стареенето) и др.

## 1. ЕЛЕКТРОСТРИКЦИОННИЯТ ПИЕЗОТРАНСФОРМАТОР С ЛИНЕЙНО УПРАВЛЕНИЕ КАТО ЕЛЕМЕНТ НА АНАЛОГОВИ ФУНКЦИОНАЛНИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Аналогови функционални преобразуватели на базата на пиезотрансформатори с линейно управление могат да се реализират като се използват:

- пиезоелектрични материали в сегнетофаза;
- непиезоелектрични материали с високо  $\varepsilon_r$ ;
- сегнетоелектрични материали в паратофаза.

Ако възбудителната секция на трансформатора е изпълнена от диелектрик без остатъчна поляризация (или с незначителната), то

зависимостта на коефициента на трансформация от управляващото напрежение  $k_u = f(U_{\text{упр}})$  е линейна [3].

Като се отчете връзката между входното и изходното напрежения на пиезотрансформатора

$$u_O = k_u \cdot u_I \quad (3)$$

и се представи  $k_u$  като функция на управляващото входно напрежение във вида [3]

$$k_u = k_{u0} + \alpha \cdot u_I, \quad (4)$$

се получава:

$$u_O = k_{u0} \cdot u_I + \alpha \cdot u_I^2, \quad (5)$$

$k_{u0}$  - коефициент на предаване по напрежение при отсъствие на управляващо електрическо поле;  $\alpha = \Delta k_u / \Delta u_{\text{упр}}$  - коефициент на пропорционалност.

Като се има предвид, че стръмността на управляващата характеристика

$$S = \Delta k_u / \Delta E_{\text{упр}}, \quad (6)$$

то

$$\alpha = S/h, \quad (7)$$

$h$  - дебелина на управляващата (възбудителната) секция на пиезотрансформатора.

Нека входният сигнал е сума от два хармонични сигнала:

$$u_I = U_{1m} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + U_{2m} \sin(\omega_2 t + \varphi_2). \quad (8)$$

Изходната (генераторната) секция на пиезотрансформатора има капацитивен характер, в резултат на който в спектъра на изходния сигнал отсъствува постоянната съставяща, т.е. отпада изразът  $\alpha(U_{1m}^2 + U_{2m}^2)/2$ . След заместване на (8) в (5) и тригонометрични преобразувания за изходния сигнал се получава:

$$\begin{aligned} u_O = & k_{u0} U_{1m} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + k_{u0} U_{2m} \sin(\omega_2 t + \varphi_2) + \\ & + \alpha \cdot U_{1m} U_{2m} \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \varphi] + \alpha \cdot U_{1m} U_{2m} \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + \varphi] - \\ & - 0,5\alpha \cdot U_{1m}^2 \cos 2(\omega_1 t + \varphi_1) - 0,5\alpha \cdot U_{2m}^2 \cos 2(\omega_2 t + \varphi_2), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\varphi' = \varphi_1 - \varphi_2; \quad \varphi'' = \varphi_1 + \varphi_2.$$

Тъй като пиезотрансформаторният елемент представлява резонансна система, на изхода му се получават само тези хармоници, честотите на които се намират в лентата му на пропускане.

Ако в честотната лента на пиезотрансформатора влизат само честотите  $\omega_1$ ,  $(\omega_1 + \omega_2)$  и  $(\omega_1 - \omega_2)$ , тогава изходният сигнал е:

$$u_0 = k_{u0} U_{1m} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \alpha U_{1m} U_{2m} \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \varphi'] + \alpha U_{1m} U_{2m} \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + \varphi]. \quad (10)$$

Тази сума от три хармонични трептения описва амплитудно модулирано трептение с носеща честота  $\omega = \omega_1$  и честота на модулация  $\Omega = \omega_2$ .

От анализа на (10) се налага още един съществен извод. Тъй като  $U_{1m}$  влиза във всички събираеми, то дълбочината на модулация се определя от големината на нискочестотното напрежение  $U_{2m}$  за дадена стойност на  $k_{u0}$ . Обстоятелството, че дълбочината на модулацията не зависи от носещия входен сигнал позволява пиезотрансформаторният елемент да се използва за усилване по мощност на модулирания сигнал.

Ако  $k_{u0} = 0$ , т.е. входната секция е изготвена от пиезоелектричен материал или сегнетоелектрик в парафаза, то уравнение (10) придобива вида:

$$u_0 = \alpha U_{1m} U_{2m} \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \varphi'] + \alpha U_{1m} U_{2m} \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + \varphi]. \quad (11)$$

В спектъра на изходния сигнал отсъства носещата честота. Израз (11) представлява аналитично описание на балансна модулация.

При  $k_{u0} = 0$  израз (9) се опростява и придобива вида:

$$u_0 = \alpha U_{1m} U_{2m}^2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \varphi'] + \alpha U_{1m}^2 U_{2m} \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + \varphi'] - 0,5\alpha U_{1m}^2 \cos 2(\omega_1 t + \varphi_1) - 0,5\alpha U_{2m}^2 \cos 2(\omega_2 t + \varphi_2). \quad (12)$$

Ако честотната лента на пиезотрансформатора позволява преминаването на сигнал с честота  $(\omega_1 - \omega_2)$  или  $(\omega_1 + \omega_2)$ , то елементът изпълнява функцията на смесител на честота. Фактът, че изходният сигнал на този смесител е пропорционален на произведението  $U_{1m} U_{2m}$ , позволява реализацията на аналогов умножителен елемент.

В случая, когато на входа на пиезотрансформатора постъпва само един хармоничен сигнал

$$u_1 = U_{1m} \sin(\omega_1 t + \varphi_1), \quad (13)$$

израз (9) приема вида:

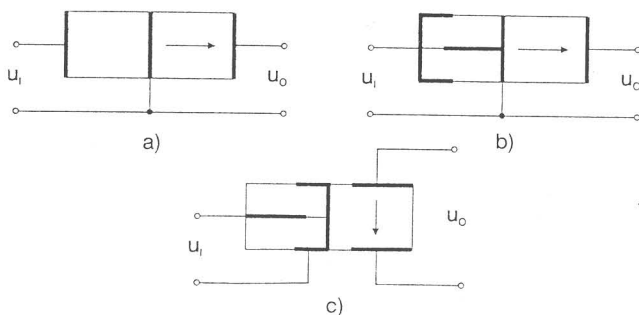
$$u_o = - 0,5\alpha \cdot U_{1m}^2 \cos 2(\omega_1 t + \varphi_1). \quad (14)$$

Анализът на този израз показва възможността за реализация на удвоител на честота и квадратор ( $Y = a \cdot X^2$ ).

Нека на входа на пиезотрансформатора да постъпва амплитудно модулиран сигнал с честота на модулация в лентата му на пропускане. В този случай входният сигнал е сума от три хармонични трептения с честоти  $\omega$ ,  $(\omega + \Omega)$  и  $(\omega - \Omega)$ . Когато пиезо-трансформаторният елемент изпълнява функцията на смесител, в изхода му се получава сигнал с честота  $\Omega$ . В този случай пиезотрансформаторът изпълнява и ролята на детектор.

## 2. КОНСТРУКТИВНИ ВАРИАНТИ НА МНОГОСЛОЙНИ ЕЛЕКТРОСТРИКЦИОННИ ПИЕЗОТРАНСФОРМАТОРИ

За изследване на посочените по-горе възможности за реализация на аналогови функционални преобразуватели са разработени три типа многослойни електрострикционни пиезотрансформаторни елемента, представени на фиг. 1. Възбудителните им секции са изготвени от кондензаторна керамика на основата на  $\text{BaTiO}_3$ , модифицирана с  $\text{GeO}_2$ , представляваща сегнетоелектричен материал в парафаза при стайна температура. Избран е материал е HV-47000 с  $\epsilon_r = 13620$ . Генераторната секция на пиезотрансформатора е изготвена пиезокерамика оловен цирконат-титанат от типа ПКМ-05.



Фиг. 1. Конструктивни варианти на многослойни електрострикционни пиезотрансформаторни елементи

Пиезотрансформаторът от фиг. 1,а представлява биморфна структура от два дискови елемента. Възбудителната секция е с

диаметър  $\varnothing = 12$  mm и дебелина  $h = 0.2$  mm, а генераторната - с  $\varnothing = 14$  mm и  $h = 1$  mm. Резонансната честота на образеца е  $f_r = 30$  kHz.

На фиг. 1,b е показана конструкцията от напречно-надлъжен тип с двуслойна възбудителна секция с геометрични размери (5 x 5 x 0.4) mm и генераторна секция с размери (5 x 1 x 0.4) mm. Честотата на основния резонанс за тази конструкция е  $f_r = 212$  kHz.

Конструкцията от фиг. 1,c представлява електрострикционен пиезотрансформатор от напречно-напречен тип с двуслойна възбудителна секция с геометрични размери (5 x 5 x 0.4) mm и генераторна секция с размери (5 x 5 x 1) mm. Честотата на основния й резонанс е  $f_r = 145$  kHz.

Изследванията показват, че най-голям коефициент на трансформация има образецът от фиг. 1,b, като  $k_u \approx 0.25$ .

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

Като е използван пиезотрансформаторния метод [5], е изследвана линейната зависимост  $k_u = f(E_{\text{упр}})$  за три биморфни структури от фиг. 1,a, на които възбудителните секции са изготвени от кондензаторна сегнетокерамика с  $\epsilon_r = 13600$ ;  $\epsilon_r = 14600$  и  $\epsilon_r = 17700$ .

Пиезоактивността на стрикционния пиезотрансформатор се характеризира чрез два параметъра: обхват на линейно управление  $D$  и стръмност на линейно управление  $S$ .

Обхватът на линейно управление  $D$  е областта от постоянното електрическо поле, в която коефициентът на трансформация се изменя линейно, а стръмността се определя по формула (6).

Резултатите от експерименталните изследвания на опитни образци пиезотрансформаторни елементи с конструкция от фиг. 1,a за трите типа кондензаторна сегнетокерамика са представени в таблица 1.

Таблица 1

Материал за възбудител	$D, \text{V/mm}$	$S, \cdot 10^{-6} \text{mm/V}$
Керамика $\text{BaTiO}_3:\text{GeO}_2$ с $\epsilon_r = 13600$	80	39.4
Керамика $\text{BaTiO}_3:\text{GeO}_2$ с $\epsilon_r = 14600$	70	50.0
Керамика $\text{BaTiO}_3:\text{GeO}_2$ с $\epsilon_r = 17700$	65	86.8

Анализът на експерименталните резултати показва, че коефициентът на трансформация на електрострикционните пьезотрансформатори може да се увеличи по следните начини:

- при използване на кондензаторна сегнетокерамика с по-високо  $\epsilon$  за изготвяне на възбудителната секция;
- чрез реализация на многослойна възбудителна секция;
- при използване на пьезокерамичен материал с по-висок пьезомодул за изготвяне на генераторната секция. В този последен случай трябва да се отчита факта, че увеличаването на пьезомодула на пьезокерамиката води до стесняване на обхвата на линейно управление.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Като заключение може да се отбележи, че функционалните възможности на пьезотрансформаторите с линейно управление на коефициента на предаване по напрежение са твърде широки и на тяхна основа могат да се създават различни аналогови функционални преобразуватели, като: амплитудни модулатори, смесители, усилватели на мощност, умножители, удвоители на честота, квадратори и детектори. При това, пьезотрансформаторният елемент с габарити на микроелектронно изделие е многофункционален и може да реализира едновременно няколко функции.

## ЛИТЕРАТУРА :

1. Физика сегнетоелектрических явлений. Отв. ред. Г.А.Смоленский, А., Наука, 1985
2. Жабитенко Н.К. и др. Управляемый акустозлектрический преобразователь. ПТМ, 1974, No 15
3. Иванец В.А. и др. Бесгистерезисные твердотельные элементы с индуцированным пьезоэффектом. Оптоэлектронная и полупроводниковая техника, вып. 3, Киев, 1983, сс. 88 -91
4. Мирошниченко А.П. и др. Измерение малых величин коэффициента электромеханической связи пьезотрансформаторным методом. Диэлектрики и полупроводники, вып. 20, Вища школа, Киев, 1981, сс. 65 -69
5. Тодоров П.Ж. Изследване безхистерезисното линейно управление на промишлена сегнетокерамика. Сб. доклади на XXI научна сесия „Ден на радиото '86“, т. I, София, 1986, сс. 567 - 572
6. Тодорова В.Д., П.Ж Тодоров. Тактильный сенсор на основе электрострикционного пьезотрансформатора. Сб. доклади на Трета международна конференция „РОБКОН'83“, София, 1986, сс. 121 - 129