

RZECZPOSPOLITA  
POLSKA



Urząd Patentowy  
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY**

(19) **PL**

(11) **230284**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **422860**

(22) Data zgłoszenia: **15.09.2017**

(51) Int.Cl.

**B06B 1/06 (2006.01)**

**H01L 41/083 (2006.01)**

**H01L 41/113 (2006.01)**

**H02N 2/18 (2006.01)**

(54)

**Przetwornik piezoelektryczny**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:

**29.01.2018 BUP 03/18**

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:

**31.10.2018 WUP 10/18**

(73) Uprawniony z patentu:

**POLITECHNIKA WROCŁAWSKA, Wrocław, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:

**RYSZARD KACPRZYK, Wrocław, PL**

**AGNIESZKA GRYGORCEWICZ, Wrocław, PL**

**PL 230284 B1**

## Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest piezoelektryczny przetwornik nacisku bądź fal ciśnienia o niskiej częstotliwości na napięcie zmienne, znajdujący zastosowanie między innymi w układach automatyki oraz przetwarzania energii – harvestings

Przetworniki piezoelektryczne przetwarzają energię elektryczną w mechaniczną i odwrotnie. Odształcenia sprężyste piezoelektryka wywołuje w nim powstanie wewnętrznego pola elektrycznego – efekt piezoelektryczny prosty lub umieszczenie materiału w polu elektrycznym prowadzi do zmiany jego wymiarów – efekt piezoelektryczny odwrotny.

Jednym z mechanizmów prowadzących do efektu piezoelektrycznego jest niejednorodne odształcenie dielektryka w obecności zawartego w nim ładunku przestrzennego. Niejednorodne odształcenie może wystąpić w warunkach niejednorodnego nacisku lub niejednorodnych właściwości mechanicznych struktury (rozkładu współczynnika elastyczności). Ilustracją opisanego mechanizmu jest płaska, warstwowa struktura dielektryczna, zawierająca warstwy (1) i (2) o grubościach  $x_1$  i  $x_2$  wykonane z dielektryków o przenikalności elektrycznej względnej  $\varepsilon_1$  i  $\varepsilon_2$  i różnych wartościach współczynnika elastyczności – odpowiednio  $Y_1$  i  $Y_2$  (warstwy „miękką” i „twardą”). Można pokazać, że jeżeli na granicy warstw (1) i (2) rozłożony jest ładunek o stałej gęstości  $q_s$ , wartość współczynnika piezoelektrycznego  $d_{33}$  [pC/N], charakteryzującego właściwości piezoelektryczne struktury warstwowej w warunkach obciążenia przyłożonego w kierunku prostopadłym do płaszczyzny struktury, jest określona zależnością:

$$(1) \quad d_{33} = \frac{2q_s \varepsilon_1 \varepsilon_2 x_2 x_1}{(\varepsilon_1 x_2 + \varepsilon_2 x_1)^2} \left( \frac{1}{Y_1} - \frac{1}{Y_2} \right)$$

Jeżeli współczynnik sprężystości warstwy „miękkiej”  $Y_1$  ma wartość znacznie niższą od wartości współczynnika dla warstwy „twardej”  $Y_2$ , tj. kiedy zachodzi zależność  $Y_1 \ll Y_2$ , wartość współczynnika piezoelektrycznego  $d_{33}$  można określić z zależności:

$$(2) \quad d_{33} \cong K_1 \frac{q_s}{Y_1}$$

gdzie  $Y_1$  – jest współczynnikiem elastyczności warstwy „miękkiej”,  $K_1$  – współczynnikiem zależnym od geometrii i właściwości elektrycznych warstw. Dwukrotnie wyższą wartość współczynnika  $d_{33}$  zapewnia struktura zawierająca dwie (zewnątrzne) warstwy „twarde” i jedną (wewnętrzną) miękką z ładunkami o tej samej gęstości i przeciwnym znaku, rozłożonymi na granicach warstw. Aby struktura mogła wykazywać właściwości piezoelektryczne przez okres technicznej użyteczności musi w tym okresie utrzymać wprowadzony ładunek. Stałość ładunku na granicy faz zapewnia zastosowanie materiałów (warstw) elektretowych. W naturze nie ma materiałów elastycznych (o niskiej wartości współczynnika sprężystości), wykazujących jednocześnie dobre właściwości elektretowe. W ostatnich latach jako materiały elektretowe o niskiej wartości współczynnika elastyczności wykorzystano warstwy dielektryków spienionych – wytworzono tzw. folie elektro-mechaniczne (EMFiT – cellular films) oraz struktury warstwowe, zawierające warstwę miękką w postaci dielektryka włóknistego (na przykład włóknina polipropylenowa).

Znany jest ze zgłoszenia patentowego nr P.421219 przetwornik piezoelektryczny w postaci utworzonej z polimeru o właściwościach elektretowych rurki w przekroju poprzecznym o kształcie spłaszczonej elipsy, która ma, wytworzony formowaniem, bipolarny elektryczny ładunek powierzchniowy, rozmieszczony przy naprzeciwległych spłaszczonych powierzchniach wewnętrznych rurki, przy czym po obu naprzeciwległych stronach rurki, do jej zewnętrznej powierzchni w obszarze nad zgromadzonym powierzchniowo ładunkiem elektrycznym, przymocowane są elektrody. Przedstawione rozwiązanie polega na wykorzystaniu elastycznej rurki polimerowej do wytworzenia trzywarstwowej piezo-aktywnej struktury dielektryk „twardy” – dielektryk „miękki” – dielektryk – „twardy”, z ładunkiem przeciwnego znaku na interfazach. Warstwy „twarde” tworzy ścianka polimeru bazowego, z którego wykonano rurkę, warstwę miękką tworzy układ mechaniczny – szczelina powietrzna wraz z odształcającą się częścią polimeru (ścianki); ładunek wnoszony jest na interfazę, to jest na wewnętrzną powierzchnię szczeliny powietrznej, w trakcie formowania, za pomocą wyładowań niezupełnych, występujących w silnym stałym polu elektrycznym.

Poza powyższym najbardziej zbliżonym do przedmiotowego wynalazku rozwiązaniem znane są także inne przetworniki piezoelektryczne.

I tak, znany jest z polskiego opisu patentowego PL 166542 przetwornik piezoelektryczny, który składa się z dwóch sprężystych płytek neutralnych stanowiących warstwy zewnętrzne, których przeciwne końce połączone są trwale za pomocą dwóch płytek stanowiących warstwę środkową, w jednym końcu sztywną płytką niepiezoelektryczną, a w drugim – płytką piezoelektryczną o aktywności cięć ścinania i kierunku polaryzacji elektrycznej równoległym do długości sprężystych płytek neutralnych. Płytką piezoelektryczną, będącą unimorfem piezoelektrycznym, pokryta jest obustronnie elektrodami przyłączonymi do zacisków.

Znany jest z polskiego opisu patentowego PL 173075 piezoelektryczny przetwornik akustycznych fal powierzchniowych, który składa się z szeregu płytek drgań ścinania o na przemian przeciwnych zwrotach polaryzacji elektrycznej, zamocowanych na powierzchni ciała stałego i połączonych równoległe z generatorem elektrycznym. Szerokość każdej płytki zawarta jest w przedziale  $\lambda/2$ ;  $\lambda/4$ , zaś odległość między płytkami jest mniejsza od  $\lambda/4$ , gdzie  $\lambda$  jest długością akustycznej fali powierzchniowej.

Znany jest z polskiego opisu patentowego PL 175673 przetwornik warstwowy piezoelektryczny przeznaczony do pracy w ośrodku gazowym, który składa się ze wzbudnika drgań, transformatora drgań i płyty promieniującej. Strona wyjściowa transformatora ma kształt rury, do czoła której przymocowana jest promieniująca, płyta z porowatego tworzywa o impedancji akustycznej mniejszej od impedancji akustycznej przetwornika, najkorzystniej wykonana z pumeksu.

Znany jest z polskiego opisu patentowego PL 222289 przetwornik piezoelektryczny, który zawiera warstwę piezoelektryczną z naniesionymi na jej górnej i dolnej powierzchni wieloma elementarnymi elektrodami, niezależnie łączonymi przez programowalny multiprzelącznik z generatorem lub analizatorem. Elektrody górne i dolne mają postać prostoliniowych odcinków paskowych usytuowanych równoległe i w równych odstępach od siebie. W rzucie prostym do płaszczyzny warstwy piezoelektrycznej elektrody górne są ukierunkowane prostopadle do elektrod dolnych a powierzchnie ich obrysów pokrywają się.

Celem według wynalazku jest rozszerzenie możliwości technologicznych oraz poprawienie właściwości piezoelektrycznych przetwornika zawierającego strukturę dielektryk „twardy” – „dielektryk” „miękki” – dielektryk „twardy”, z ładunkiem przeciwnego znaku na interfazach.

Przetwornik piezoelektryczny, utworzony z dwóch rozmieszczonych jedna nad drugą płaskich elektrod oddzielonych od siebie, złożonym z warstw o różnych współczynnikach sprężystości, dielektrykiem złożonym z warstwy polimeru o dobrych właściwościach elektretowych, który stanowi warstwę dielektryka o wyższym współczynniku sprężystości (warstwę „twardą”) oraz szczeliny gazowej która stanowi warstwę dielektryka o niższym stopniu sprężystości (warstwę „miękką”), przy czym na powierzchniach dielektryka od strony szczeliny gazowej znajdują się powierzchniowe ładunki elektryczne, według wynalazku charakteryzuje, się tym, iż w szczelinie gazowej usytuowane są wytworzone z elastomeru odstępniki, które wraz ze szczeliną gazową stanowią warstwę dielektryka o niższym współczynniku sprężystości (warstwę „miękką”). Odstępniki mogą tworzyć rozmieszczone w szczelinie gazowej elastomerowe paski dystansowe ułożone równoległe bądź w siatkę. Warstwę dielektryka o niższym współczynniku sprężystości mogą tworzyć dwie warstwy elastomeru, przy czym jedna z nich zawiera szczelinę gazową (powietrzną). Warstwa dielektryka o niższym współczynniku sprężystości (warstwa „miękką”) jest składnikiem struktur dwu- lub trójwarstwowych, w których pozostałe warstwy tworzy warstwa dielektryka o wyższym współczynniku sprężystości (warstwa „twarda” – polimer o dobrych właściwościach elektretowych) wraz z przylegającymi elektrodami. Elektrody mogą być sztywne lub elastyczne.

Zaletą według wynalazku jest poprawienie właściwości piezoelektrycznych struktur, to jest podwyższenie wartości współczynnika  $d_{33}$  przez zwiększenie elastyczności (obniżenie wartości współczynnika elastyczności  $Y_1$ ) warstwy „miękkiej” dielektryka na skutek wprowadzenia odstępników z elastomeru.

Przedmiot wynalazku został uwidoczniony na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia rozwiązanie w przykładzie wykonania pierwszym w widoku z boku w przekroju, fig. 2 przedstawia rozwiązanie w przykładzie wykonania drugim w widoku z boku w przekroju, fig. 3 przedstawia rozwiązanie w przykładzie wykonania trzecim w widoku z boku w przekroju a fig. 4 odstępniki ułożone w siatkę w widoku z góry.

Przetwornik piezoelektryczny w przykładzie wykonania pierwszym według wynalazku utworzony, jest z dwóch, rozmieszczonych jedna nad drugą płaskich elektrod 1, 2, oddzielonych od siebie, złożonym z warstw o różnych współczynnikach sprężystości, dielektrykiem w postaci, warstwy polimeru o dobrych właściwościach elektretowych, który stanowi warstwę 3 dielektryka o wyższym współczynniku

sprężystości (warstwę „twardą”) oraz szczeliny gazowej 4, w której umiejscowione są przedzielające jej przestrzeń elastomerowe odstępniki 5, które wraz ze szczeliną gazową 4 stanowią warstwę dielektryka o niższym stopniu sprężystości (warstwę „miękką”). Szczelinę gazową 4 stanowi szczelina powietrzna. Warstwa 3 dielektryka o wyższym współczynniku sprężystości – polimer na granicy z gazem ma wytworzony formowaniem powierzchniowy ładunek elektryczny. Polimer ma postać folii (z politetrafluoroetylenem PTFE). Korzystnie polimer może być także wykonany z polipropylenu, polisulfonu oraz innych termoplastów wykazujących dobre właściwości elektretowe, to znaczy właściwości które zapewniają długotrwałe magazynowanie, ładunku elektrycznego. Odstępniki 5 wytworzone są z syntetycznego elastomeru, na przykład silikonowego. Rozmieszczone w szczelinie gazowej 4 odstępniki 5 mają postać równoległych do siebie pasków dystansowych korzystnie ułożonych w siatkę. Powstałe przez podzielenie szczeliny gazowej 4 odstępnikami 5 tunele bądź komory gazowe mają wymiary z zakresu od nanometrów do milimetrów. Jedna elektroda 1 ma postać metalizacji naniesionej na, zewnętrzną powierzchnię warstwy 3 dielektryka o wyższym współczynniku sprężystości – polimer, a druga elektroda 2 jest sztywna. Odstępniki 5 w postaci równoległych pasków bądź siatki nanoszone są na elektrodę 2 sztywną metodą sitodruku stanowiąc jednocześnie dla warstwy polimeru 3 lepiszcze. Na warstwie dielektryka 3 od strony odstępników 5 rozłożone są powierzchniowe ładunki elektryczne. Elektrody 1, 2 mogą być z miedzi.

Przetwornik piezoelektryczny w przykładzie wykonania drugim według wynalazku, zbudowany jest jak w przykładzie wykonania pierwszym z tą różnicą, iż warstwa 3 dielektryka o wyższym współczynniku sprężystości (warstwa „twarda”) – polimer składa się z dwóch warstw rozdzielonych szczeliną gazową 4 z odstępnikami 5, a każda z elektrod 1, 2 ma postać pokrywającej zewnętrzną powierzchnię obu warstw polimeru 3 metalizacji, przy czym na przeciwległych powierzchniach warstw dielektryka od strony odstępników 5 znajdują się ładunki elektryczne o przeciwnych znakach.

Przetwornik piezoelektryczny w przykładzie wykonania trzecim według wynalazku zbudowany jest jak w przykładzie wykonania pierwszym z tą różnicą, iż warstwa dielektryka o niższym współczynniku sprężystości (warstwa „miękką”) składa się z dwóch warstw rozdzielonych warstwą 3 dielektryka o wyższym współczynniku sprężystości polimeru, przy czym jedna z warstw o niższym współczynniku sprężystości ma postać szczeliny powietrznej 4 z odstępnikami 5 a druga elastomeru 6. Na warstwie dielektryka 3 od strony odstępników 5 rozłożone są powierzchniowe ładunki elektryczne. W rozwiązaniu według wynalazku grubość warstw o niższym stopniu sprężystości wynosi od kilku mikrometrów wzwyż, a grubość warstwy o wyższym stopniu sprężystości od mikrometrów do milimetrów.

Przetwornik według pierwszego albo drugiego albo trzeciego przykładu według wynalazku poddaje się formowaniu, to jest działaniu wyładowań niezupełnych występujących w silnym stałym polu elektrycznym. Podczas formowania w silnym, stałym polu elektrycznym, na powierzchni warstwy „twardej” – fig. 1, fig. 3 pojawia się trwały powierzchniowy ładunek elektryczny od strony odstępników 5 lub na przeciwległych, wewnętrznych powierzchniach folii elektretowych – fig. 2 pojawia się trwały powierzchniowy ładunek elektryczny o przeciwnym znaku po obu stronach. Na potrzeby wynalazku ładunek powierzchniowy jest rozumiany jako efektywny ładunek powierzchniowy o niezerowej gęstości składający się również z polaryzacji wolnorelaksacyjnej jak i momentu od ładunku przestrzennego, który może być rozłożony w objętości ścianek szczeliny gazowej. Przykładowo, przetwornik można formować umieszczając go w oleju transformatorowym, przy napięciu stałym, narastającym i przyłożonym do elektrod umieszczonych na jego powierzchni na poziomie 15–20 kV.

W przetworniku według wynalazku po przyłożeniu siły  $F$ , działającej prostopadle do powierzchni elektrod 1, 2 pojawi się na nich ładunek elektryczny i towarzyszące mu napięcie  $U$ . Napięcie  $U$  wykorzystywane jest jako sygnał wyjściowy przetwornika. I tak, jeśli dielektryczny elastomer posiada skończoną rezystywność skrośną  $\rho_v$  oraz przenikalność elektryczną względną  $\epsilon_r$ , wówczas, w przypadku, przyłożenia do struktury naprężeń dynamicznych, to jest kiedy czas przyłożenia – występowania naprężenia na strukturze (przetworniku piezoelektrycznym)  $t$  spełnia warunek:

$$(3) \quad t \ll \tau_M$$

w którym współczynnik  $\tau_M$  – tzw. makswellowska stała czasu dla elastomeru, określony jest zależnością:

$$(4) \quad \tau_M = \epsilon_0 \epsilon_r \rho_v$$

w której  $\varepsilon_0$  jest przenikalnością elektryczną wolnej przestrzeni (stała fizyczna), struktury jak na fig. 1 i 3 wykażą (po uformowaniu tj. po wprowadzeniu ładunku o średniej gęstości powierzchniowej  $q_s$ ) właściwości piezoelektryczne, które można opisać współczynnikiem  $d_{33}$  określonym zależnością:

$$(5) \quad d_{33} \cong K_2 \frac{q_s}{Y}$$

gdzie  $Y$  – jest współczynnikiem elastyczności elastomeru  $K_2$  – współczynnikiem zależnym od wymiarów i geometrii siatki  $M$ , grubości folii elektretowych jak i właściwości elektrycznych materiałów struktury, zaś  $q_s$  – wartością średnią gęstości ładunku wprowadzonego na powierzchnie elektretów podczas procesu ich formowania. W przypadku struktury modelowej jak na Fig. 1, przy grubości warstw: „twardej”  $x_1 = 500 \mu\text{m}$ , (wykonanej a PTFE – Teflon) oraz „miękkiej” o grubości  $x_2 = 400 \mu\text{m}$  (zawierającej siatkę/paski wykonane z elastomeru silikonowego) otrzymano (po uformowaniu struktury) wartość współczynnika piezoelektrycznego na poziomie  $d_{33} = 60\text{--}160 \text{ pC/N}$ . Podobne wartości współczynnika  $d_{33}$  otrzymano dla struktury z Fig. 2 i Fig. 3. W każdym przypadku zastosowano elektrody klejone, wykonane z folii miedzianej.

Rozdzielenie funkcji mechanicznych (wysoka elastyczność lub mała wartość współczynnika sprężystości  $Y_1$  warstwy „miękkiej” oraz elektrycznych (zdolność do długiego przechowywania ładunku) dla składowych polimerów struktury. Za wysoką elastyczność warstwy „miękkiej” odpowiada elastomer oraz sposób jego rozłożenia. Za długi czas przechowywania ładunku odpowiada polimer warstwy „twardej” na przykład PTFE, który nie musi spełniać dodatkowych warunków związanych z jego przetwarzaniem do postaci spienionej lub włóknistej – co ma miejsce w strukturach znanych obecnie. Zaletą według wynalazku jest możliwość wytwarzania elastycznych przetworników wielkowymiarowych oraz matryc przetworników, odpornych na zginanie i uderzenia.

Aby zmniejszyć podatność przetwornika według wynalazku na zakłócenia od zewnętrznych pól elektrycznych odcinki przetwornika poprzez wywinicie jednego z nich o  $180^\circ$  nakładają się na siebie. W takim układzie geometrycznym jedna z elektrod – zewnętrzna tworzy ekran elektrostatyczny, zabezpieczający wnętrze przetwornika wraz z elektrodą wewnętrzną przed zakłóceniami od zewnętrznych źródeł pól.

## Zastrzeżenia patentowe

1. Przetwornik piezoelektryczny, utworzony z dwóch rozmieszczonych jedna nad drugą płaskich elektrod oddzielonych od siebie, utworzonym z warstw o różnych współczynnikach sprężystości, dielektrykiem złożonym z warstwy polimeru o właściwościach elektretowych, który stanowi warstwę dielektryka o wyższym współczynniku sprężystości oraz szczeliny gazowej, która stanowi warstwę dielektryka o niższym stopniu sprężystości, przy czym na powierzchni dielektryka od strony szczeliny gazowej znajduje się powierzchniowy ładunek elektryczny, **znamienny tym**, że w szczelinie gazowej (4) usytuowane są wytworzone z elastomeru odstępniki (5) które wraz ze szczeliną gazową (4), stanowią warstwę dielektryka o niższym współczynniku sprężystości.
2. Przetwornik według zastrz. 1, **znamienny tym**, że odstępniki (5) mają postać pasków dystansowych.
3. Przetwornik według zastrz. 1, **znamienny tym**, że odstępniki (5) mają postać siatki dystansowej.
4. Przetwornik według zastrz. 1, **znamienny tym**, że stanowi przetwornik trójwarstwowy, który zawiera dwie warstwy dielektryka o niższym współczynniku sprężystości, przy czym jedna z nich ma postać szczeliny gazowej (4) z odstępnikami (5), pomiędzy którymi znajduje się warstwa o wyższym współczynniku sprężystości z powierzchniowym ładunkiem elektrycznym od strony szczeliny gazowej (4).
5. Przetwornik według zastrz. 1, **znamienny tym**, że stanowi przetwornik trójwarstwowy, który zawiera dwie warstwy dielektryka o wyższym współczynniku sprężystości, pomiędzy którymi znajduje się warstwa o niższym współczynniku sprężystości, a ładunek na przeciwnych powierzchniach wewnętrznych warstw (3) dielektryka o wyższym współczynniku sprężystości jest przeciwnego znaku.

## Rysunki

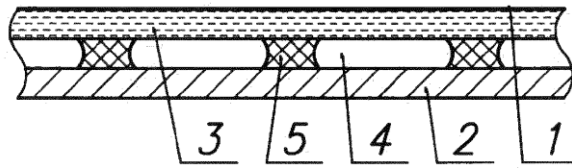


Fig. 1

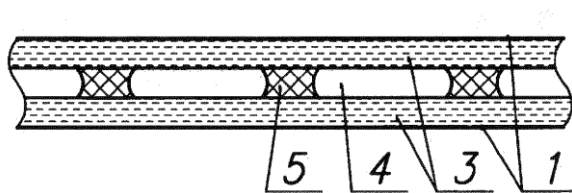


Fig. 2

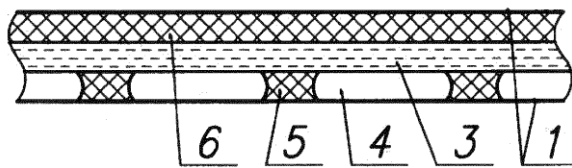


Fig. 3

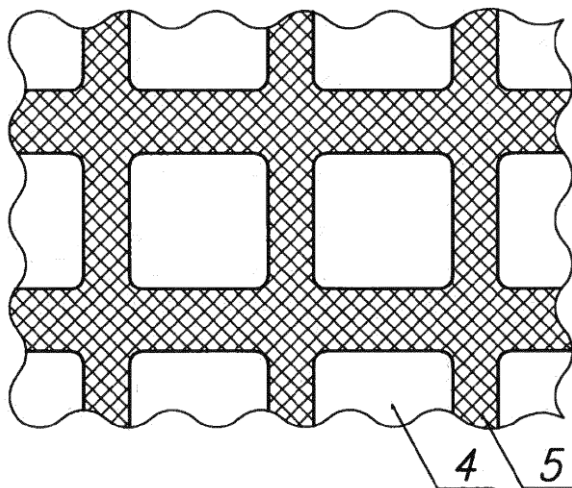


Fig. 4