

Ryszard KACPRZYK¹, Agnieszka PLEBAN-OKOPNA¹

Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii. Politechnika Wrocławska,
50-370 Wrocław, Wyb. Wyspiańskiego 27 (1)

Zależność współczynnika piezoelektrycznego d_{33} od ciśnienia dla niejednorodnych polimerowych struktur warstwowych

Streszczenie: W pracy przedstawiono model opisujący zależność współczynnika piezoelektrycznego $d_{33}(p)$ od przyłożonego ciśnienia p dla niejednorodnych struktur warstwowych. Wcześniejsze badania wykazały, że charakter zmian $d_{33}(p)$ dla struktur tego typu może być określony zależnością współczynnika sprężystości warstwy miękkiej od obciążenia $Y_1(p)$. Przedstawiony model dotyczy struktury zawierającej warstwę elastyczną w postaci włókniny, dla której zależność współczynnika sprężystości może być opisana modelem odkształcania włókien. Analiza modelu wskazuje, że zależność $d_{33}(p)$ można opisać funkcją potęgową typu $d_{33}(p)=Ap^n$. Potęgowy charakter zależności $d_{33}(p)$, z wartością $-0.20 < n < -0.12$ potwierdzono doświadczalnie.

Słowa kluczowe: zjawisko piezoelektryczne, dielektryki niejednorodne

Wstęp

Wyróżnia się kilka mechanizmów opisujących efekt piezoelektryczny możliwy do wystąpienia w dielektrykach stałych [1]. Jednym z mechanizmów jest wytworzenie niejednorodnych odkształceń w dielektryku z ładunkiem przestrzennym [1-3]. W przypadku dielektrycznych struktur niejednorodnych efekt piezoelektryczny może być związany z przestrzenną niejednorodnością odkształcenia, będącą wynikiem niejednorodnych właściwości mechanicznych materiału. W przypadku struktury trójwarstwowej, zawierającej warstwę dielektryków o przenikalnościach elektrycznych względnych ϵ_1 , ϵ_2 , grubościach x_1 , x_2 , współczynnikach sprężystości Y_1 , Y_2 oraz ładunku o gęstości powierzchniowej q_s , wartość współczynnika piezoelektrycznego d_{33} określa zależność [3]:

$$(1) \quad d_{33} = \frac{2q_s \epsilon_1 \epsilon_2 x_2 x_1}{(\epsilon_1 x_2 + \epsilon_2 x_1)^2} \left(\frac{1}{Y_1} - \frac{1}{Y_2} \right)$$

W przypadku, kiedy współczynniki sprężystości oraz grubości warstw spełniają warunki, odpowiednio:

$$(2) \quad Y_1 \ll Y_2$$

$$(3) \quad x_1 \gg x_2$$

analiza zależności (1) wskazuje, że wartość oraz zależność współczynnika d_{33} od ciśnienia stałego p określona jest właściwościami mechanicznymi warstwy elastycznej, (wykonanej z materiału o współczynniku sprężystości Y_1). W takim przypadku wartość d_{33} określa zależność:

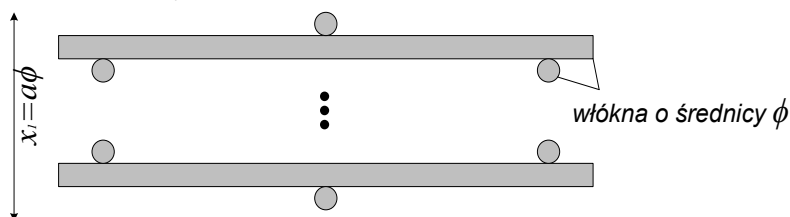
$$(4) \quad d_{33} \cong \frac{2q_s \varepsilon_1 x_2}{\varepsilon_2 x_1} \frac{1}{Y_1}$$

Zależność $d_{33}(p)$ dla struktury warstwowej określona jest wpływem ciśnienia p na wszystkie czynniki wchodzące w skład zależności (4).

Warstwę elastyczną o współczynniku Y_1 można zrealizować w postaci dielektrycznej warstwy spienionej [2] lub włóknistej [3]. Warstwa elastyczna może być wprowadzona jako element składowy struktury, np. w postaci włókniny. Wyrażenie (4) wskazuje, że zależność $Y_1(p)$ będzie w istotny sposób określać zależność $d_{33}(p)$.

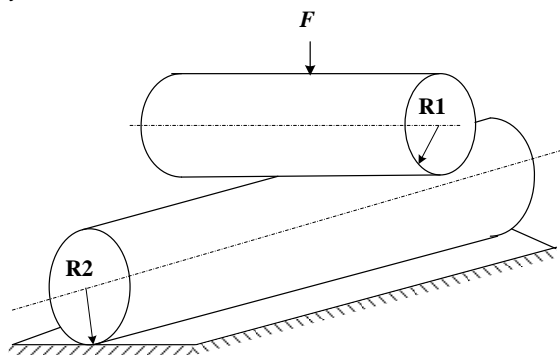
Model włókniny

W modelu włókniny zakłada się, że siła F działająca na powierzchnię włókniny S prowadzi do ściskania włókien o znanym przekroju, wykonanych z polimeru o określonej wartości współczynnika sprężystości. Dla uproszczenia obliczeń przyjęto regularne rozmieszczenie włókien w warstwie włókniny. Model zawiera a warstw włókien o przekroju kołowym i średnicy ϕ , rozmieszczonych w przestrzeni w sposób regularny, jak przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Model włókniny z regularnym ułożeniem włókien, x_1 - grubość próbki, a - liczba warstw, ϕ - średnica włókna.

Pod wpływem nacisku włókna w strukturze jak na rys. 1, ulegają ugięciu oraz odkształceniu w miejscach styku. Można pokazać [5] że w przypadku sprężystego ugięcia włókien wartość zastępczego współczynnika sprężystości Y_1 dla warstwy elastycznej (włókniny) nie zależy od ciśnienia. Odkształcenie włókien w miejscu ich styku, występujące podczas ściskania struktury, można zamodelować za pomocą walców, których osie symetrii przesunięte są wobec siebie o kąt $\pi/2$. Model przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Model ściskania włókien w formie walców o osiach wzajemnie prostopadłych.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

Przyjmując dodatkowe założenia [4]:

- układ walec-walec stanowią elementy jednorodne, izotropowe, liniowo sprężyste;
- powierzchnie elementów w otoczeniu styku są gładkie, o regularnej krzywiznie (walec-walec/płaska półprzeźreń);
- średnice obu włókien są takie same i równe ϕ ;
- na włókna działa siła F równa co do wartości sile działającej na powierzchni elementarnego oczka o powierzchni $S=d^2$, wyrażona za pomocą ciśnienia o średniej wartości p :

$$(5) \quad F = pd^2$$

gdzie d – wartość średnia odległości pomiędzy włóknami w warstwie, wyznaczona z zależności:

$$(6) \quad d = \frac{\rho_p \phi \pi x_{10}}{4g_w} = \frac{\phi \pi}{4W_{p0}}$$

gdzie g_w - jest gramaturą włókniny [kg/m²] o grubości początkowej x_{10} , z włóknami wykonanymi z materiału (polimeru) o masie właściwej ρ_p [kg/m³], W_{p0} – jest wagowym, bezwymiarowym, udziałem polimeru we włókninie w stanie bez obciążenia, spełniającym zależność:

$$(7) \quad W_{p0} \leq 1$$

Zmianę grubości włókna $\Delta\phi$ dla układu włókien przedstawionego na rys. 2. można opisać zależnością [4]:

$$(8) \quad \Delta\phi = \left(\frac{9}{2}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{1}{\phi}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{(1-\nu_p^2)pd^2}{Y_p}\right)^{\frac{2}{3}} \cong 1,2\phi \left(\frac{(1-\nu_p^2)}{W_{p0}^2 Y_p}\right)^{\frac{2}{3}} p^{\frac{2}{3}}$$

Jeżeli odkształcenie ma charakter sprężyste można, w oparciu o prawo Hooke'a, określić wartość modułu Younga dla warstwy miękkiej Y_1 , korzystając z zależności:

$$(9) \quad Y_1 = \frac{\phi}{\Delta\phi} p \cong \frac{(W_{p0}^2 Y_p)^{\frac{2}{3}} p^{\frac{1}{3}}}{1,2(1-\nu_p^2)^{\frac{2}{3}}}$$

Podstawiając zależność (9) do (4) otrzymuje się:

$$(10) \quad d_{33} \cong \frac{2,4q_s \varepsilon_1 x_2}{\varepsilon_2 x_1} \frac{(1-\nu_p^2)^{\frac{2}{3}}}{(W_{p0}^2 Y_p)^{\frac{2}{3}} p^{\frac{1}{3}}} = Ap^{\frac{1}{3}}$$

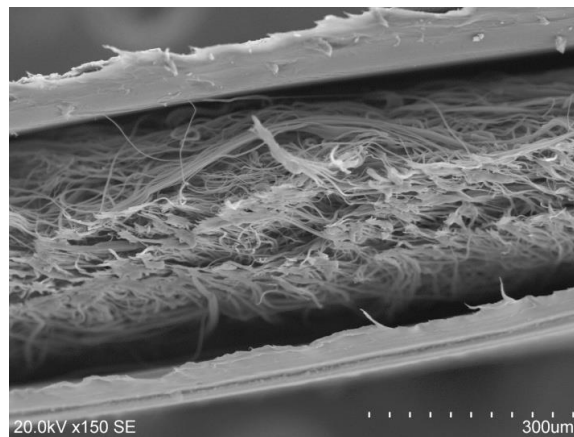
gdzie:

$$(11) \quad A \cong \frac{2,4q_s \varepsilon_1 x_2}{\varepsilon_2 x_1} \frac{(1 - \nu_p^2)^{\frac{2}{3}}}{(W_{p0}^2 Y_p)^{\frac{2}{3}}}$$

Zależność (10) wskazuje na potęgową zależność współczynnika d_{33} od przyłożonego do struktury stałego ciśnienia p , z wykładnikiem $n = -1/3$.

Próbki

Badania współczynnika piezoelektrycznego wykonano na próbkach trójwarstwowej struktury typu „sandwich, zawierającej warstwę elastyczną wykonaną z polipropylenowej włókniny pneumo-termicznej, umieszczonej pomiędzy dwoma warstwami folii polipropylenowej o grubości $x_2 = 26 \mu\text{m}$ każda. Całość poddawano zgrzewaniu termicznemu, z gęstością 13 punktów/cm². Całkowita grubość struktury była równa $760 \pm 20 \mu\text{m}$. Przekrój struktury przedstawiono na rys. 3. Próbki struktur zostały zaopatrzone w elektrody kołowe, umieszczone koncentrycznie po obu ich stronach. Elektrody o średnicy 18 mm wykonano z grafitu koloidalnego. Próbki z naniesionymi elektrodami poddawano procesowi formowania – aktywacji w stałym polu elektrycznym. Formowanie prowadzono w temperaturze pokojowej, przy napięciu formowania $U_f = 5,5 \text{ kV}$.



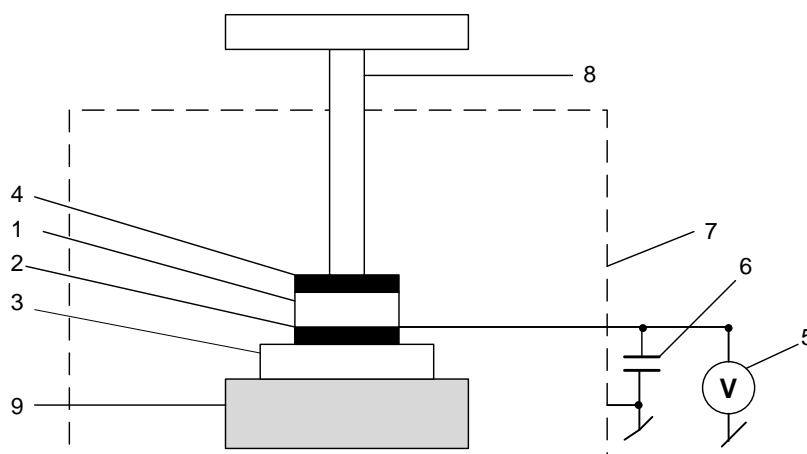
Rys. 3. Przekrój struktury folia (PP)-włóknina (PP)-folia (PP) w obszarze pomiędzy zgrzeinami.

Pomiary współczynnika piezoelektrycznego d_{33}

Pomiary współczynnika piezoelektrycznego d_{33} wykonano metodą statyczną [3], przy wykorzystaniu stanowiska jak na rys. 4. Próbkę badanej struktury (1) była umieszczona pomiędzy elektrodą stałą, pomiarową (2) o powierzchni $S_E = 250 \text{ mm}^2$, umieszczoną na izolatorze (3) oraz uziemioną elektrodą przesuwaną (4). Do pomiaru napięcia zastosowano elektrometr (5) typu RFT-6302 z dołączonym kondensatorem wzorcowym (6), co zapewniało uzyskanie całkowitej pojemności układu $C_T = 1.57 \text{ nF}$. Układ elektrod z próbką zamknięto w uziemionej klatce Faraday'a (7). Nacisk przykładano i zmieniano za pomocą odważników umieszczanych na szalce (8), połączonej mechanicznie z elektrodą (4). Nacisk kontrolowano za pomocą wagi kwarcowej (9) typu KERN ENB 5.2 KI. Wartość współczynnika d_{33} wyznaczano z zależności:

$$(12) \quad d_{33}(p) \cong S_E C_T \frac{\Delta U(p)}{\Delta p}$$

gdzie $U(p)$ – jest napięciem mierzonym na całkowitej pojemności C_T będącej sumą pojemności próbki oraz pojemności układu pomiarowego, $\Delta U(p)$ – zmianą wartości napięcia $U(p)$ na skutek wzrostu ciśnienia o wartość Δp , S_E - powierzchnią elektrody pomiarowej poddanej działaniu ciśnienia p .



Rys. 4. Układ do pomiaru współczynnika piezoelektrycznego metodą statyczną. (Opis w tekście)

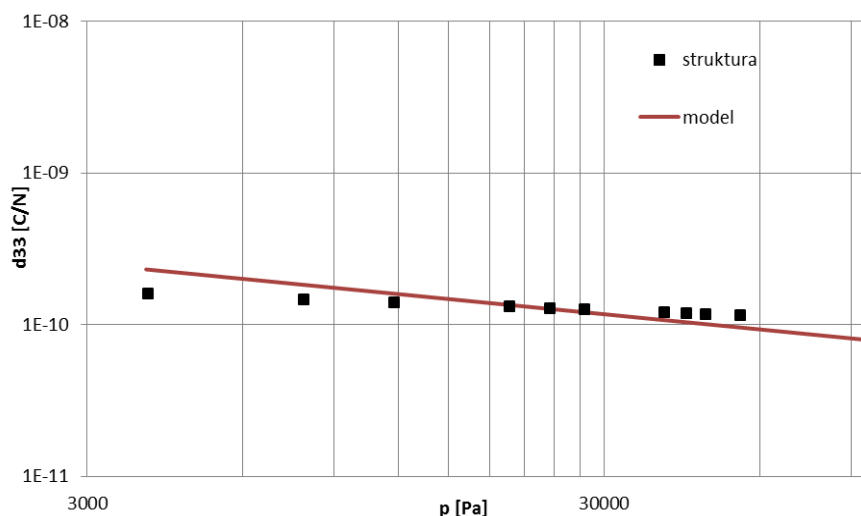
Wyniki pomiarów

Wyniki pomiarów współczynnika piezoelektrycznego d_{33} dla struktury trójwarstwowej zawierającej warstwę elastyczną wykonaną z polipropylenu przedstawiono na rys. 4. Wyniki pomiarów wykazały potęgową zależność $d_{33}(p)$ o wykładniku $n = -0.16 \pm 0.04$.

Podsumowanie

Wyniki rozważań oraz pomiarów pozwalają na sformułowanie następujących wniosków i spostrzeżeń:

- przedstawiony model teoretyczny prowadzi do potęgowego charakteru zależności $d_{33}(p)$, z wykładnikiem $n = -0.33$;
- badania doświadczalne potwierdziły potęgowy charakter zależności $d_{33}(p)$, przy czym wartość wykładnika n była mniejsza od otrzymanej dla modelu i mieściła się w granicach $-0.20 < n < -0.12$;
- powyższe zależności otrzymano dla struktur o różnych wartościach parametru W_p ;
- w opisanym modelu przyjęto grubość x_1 oraz względną przenikalność elektryczną ϵ_1 warstwy elastycznej jako niezależne od ciśnienia p . Niższe wartości wykładnika n wyznaczone dla wyników badań doświadczalnych mogą wynikać z zależności od



Rys. 5. Zależność $d_{33}(p)$ dla struktury i modelu z parametrem $W_{p0}=0,089$.

ciśnienia obu wymienionych wielkości (wzrost ε_1 oraz zmniejszenie się x_1 ze wzrostem ciśnienia p);

- zaproponowany model, opracowany dla uporządkowanej i regularnej struktury, zbudowanej z włókien o określonej średnicy i długości, wydaje się prawidłowo opisywać zależność $d_{33}(p)$ również dla struktur rzeczywistych, z chaotycznym układem włókien oraz z rozkładem ich średnic.

Podziękowanie

Praca została wykonana w ramach badań statutowych, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Warszawa. Autorzy pragną podziękować firmie Filter Service Sp. z o.o, w szczególności Panu Prezesowi, dr. Jackowi Krzyżanowskiemu, za wykonanie i udostępnienie struktur polimerowych.

Literatura

1. Wada Y., Hayakawa R., *Piezoelectricity and Pyroelectricity of Polymers*, Jap. Journ. of Appl. Phys., 15 (1976), No. 11, 2041
2. Sessler G.M., Hillenbrand J. *Electromechanical Response of Cellular Electret Films*. Proc. 10th Int. Symp. on Electrets, 22- 24, Sept. 1999, Delphi, Greece, 261-264
3. Kacprzyk R., Kisiel A., *Piezo-electric properties of polypropylene laminates with a non-woven layer*, J. Electrostatics 71 (2013) 400-402
4. Negrea A., Predoi M. V., *The elastic contact of a sphere with an elastic Half-space, a comparison between analytical and finite elements solutions*, U.P.B. Sci. Bull., Series A, Vol. 74, Iss. 4, 2012, ISSN 1223-7027
5. Pleban-Okopna A., *Rozprawa Doktorska* – w przygotowaniu

Autorzy: prof. dr hab. inż. Ryszard Kacprzyk, e-mail: ryszard.kacprzyk@pwr.edu.pl;
mgr inż. Agnieszka Pleban-Okopna, e-mail: agnieszka.okopna@pwr.edu.pl; Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii. Politechnika Wroclawska, Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław