

## WARSTWY FALOWODOWE Z POLIMETAKRYLANU METYLU I POLIIMIDU W PODZESPOŁACH Z FALĄ AKUSTYCZNĄ TYPU LOVE`A

Judyta Hechner<sup>1</sup>

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczące zastosowania falowodów z polimetakrylanu i poliimidu w podzespołach piezoelektrycznych z akustyczną falą Love`a. Porównano efekty falowodowe wywoływane tymi polimerami z najczęściej stosowanym falowodem z dwutlenku krzemu. Ocenę własności falowodowych badanych substancji prowadzono na różnych podłożach piezoelektrycznych, takich jak.: niobian litu o orientacji 41°YX, tantalitan litu o orientacji 36°YX i kwarc AT. Określono wpływ geometrii warstw falowodowych na parametry akustycznych fal generowanych w badanych podłożach piezoelektrycznych.

### 1.WSTĘP

Miniaturowe bioczuJNIKI z falą akustyczną, dające odpowiedź w czasie rzeczywistym, stały się aktualnie podmiotem zainteresowania wielu ośrodków badawczych na świecie.

Struktury przetwornikowe na podłożach piezoelektrycznych, w których wzbudzone są horyzontalne, przypowierzchniowe fale objętościowe i pseudopowierzchniowe mogą być wykorzystane w tego typu czujnikach pod warunkiem uzyskania tzw. efektu Love`a.

Efekt Love`a polega na koncentracji energii fal akustycznych przy powierzchni podłoża poprzez osadzenie na strukturze przetwornikowej dodatkowej warstwy falowodowej. W powszechnie stosowanych i prezentowanych w literaturze rozwiązaniach wykorzystuje się w roli falowodu warstwę dwutlenku krzemu (SiO<sub>2</sub>),

---

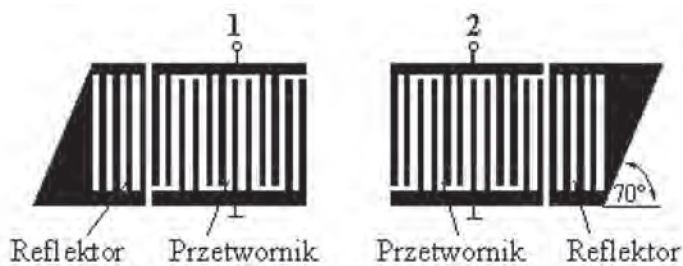
<sup>1</sup> Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa, e-mail: Judyta.Hechner@itme.edu.pl

osadzanego metodą rozpylania katodowego. W przypadku  $\text{SiO}_2$  optymalny efekt falowodowy uzyskuje się przy grubościach warstwy rzędu  $4 \mu\text{m}$  -  $6 \mu\text{m}$ . Taka grubość i hydrofilowość warstwy stwarzają szereg problemów technologicznych, szczególnie w procesie immobilizacji bioreceptorów na powierzchni podzespołu czujnikowego z  $\text{SiO}_2$ . W związku z intensyfikacją badań nad bioczujnikami z falą akustyczną pojawiły się nieliczne doniesienia literaturowe[1-2] dotyczące prób zastąpienia dwutlenku krzemu w funkcji falowodu innym materiałem. W artykule przedstawiono wyniki badań nad zastosowaniem polimetakrylanu metylu i poli-piromelitimidu (poliimidu) oraz porównano własności falowodowe omawianych związków z dwutlenkiem krzemu. Określono również wpływ rodzaju i geometrii falowodu na parametry akustycznych modów typu Love'a, generowanych w podłożu piezoelektrycznym .

## 2. METODYKA EKSPERYMENTALNA, STOSOWANE PODZESPOŁY I MATERIAŁY

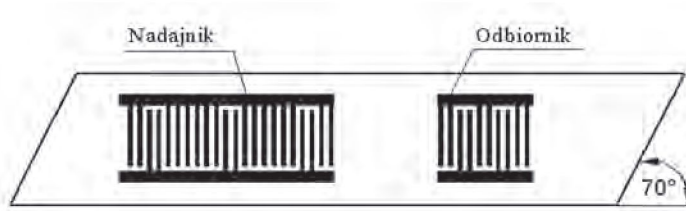
### 2.1. Stosowane podzespoły

Prace badawcze prowadzono na różnych podłożach piezoelektrycznych, takich jak: niobian litu o orientacji  $41^\circ\text{YX}$ , tantalian litu o orientacji  $36^\circ\text{YX}$  i kwarc AT, w celu możliwie najbardziej kompleksowej oceny własności falowodowych badanych substancji. W niobianie i tantalanie litu generowana jest fala pseudopowierzchniowa (AFPP), skrót angielski PSAW), natomiast w kwarcu horyzontalna, przypowierzchniowa fala objętościowa (skrót angielski – SSBW). Podstawowym elementem wszystkich stosowanych podzespołów były linie opóźniające. Konstrukcje linii na poszczególnych podłożach przedstawiono na Rys. 1-2. W Tab. 1 podano parametry struktur przetwornikowych, a na Rys. 3-5 pokazano uzyskane charakterystyki amplitudowo – częstotliwościowe.



Rys. 1. Struktura linii opóźniającej na kwarcu AT.

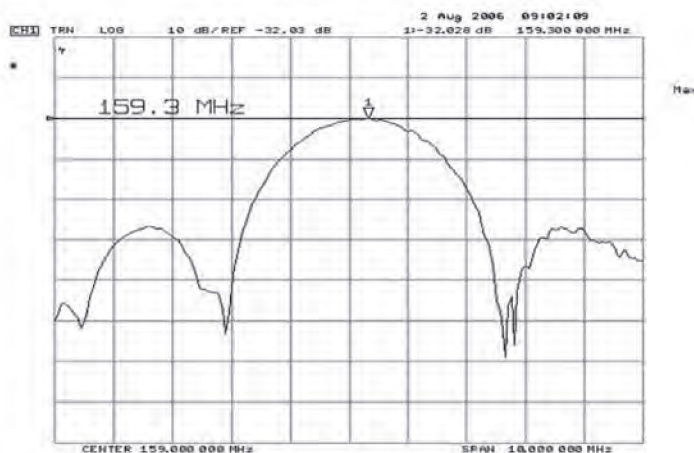
Fig. 1. Structure of the delay line on quartz AT.



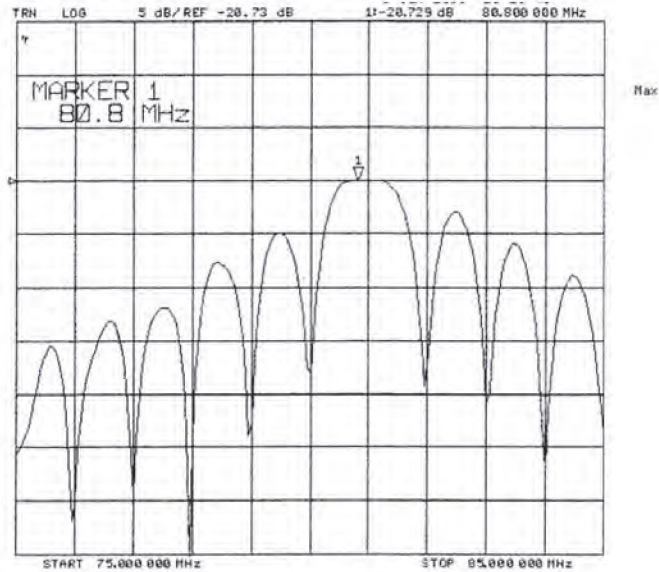
**Rys. 2.** Struktura linii opóźniającej na  $41^\circ\text{YX LiNbO}_3$  i  $36^\circ\text{YX LiTaO}_3$ .  
**Fig. 2.** Structure of the delay line on  $41^\circ\text{YX LiNbO}_3$  and  $36^\circ\text{YX LiTaO}_3$ ..

**Tabela 1.** Parametry struktur przetwornikowych.  
**Table 1.** The parameters of transducers.

Parametry	Kwarc AT	$41^\circ\text{YX LiNbO}_3$	$36^\circ\text{YX LiTaO}_3$
Liczba przetworników	2	2	2
Liczba elektrod w przetworniku nadawczym	254	294	294
Liczba elektrod w przetworniku odbiorczym	254	38	38
Szerokość elektrod	4 $\mu\text{m}$	6,93 $\mu\text{m}$	6,93 $\mu\text{m}$
Liczba reflektorów	2	--	--
Liczba elektrod w reflektorze	20	--	--
Częstotliwość- <b>f</b>	$\approx 160$ MHz	$\approx 80$ MHz	$\approx 75$ MHz
Tłumienność wtrącenia – <b>A</b>	$\approx 32$ dB	$\approx 22$ dB	$\approx 24,5$ dB
Długość fali - $\lambda$	32 $\mu\text{m}$	55,2 $\mu\text{m}$	55,2 $\mu\text{m}$

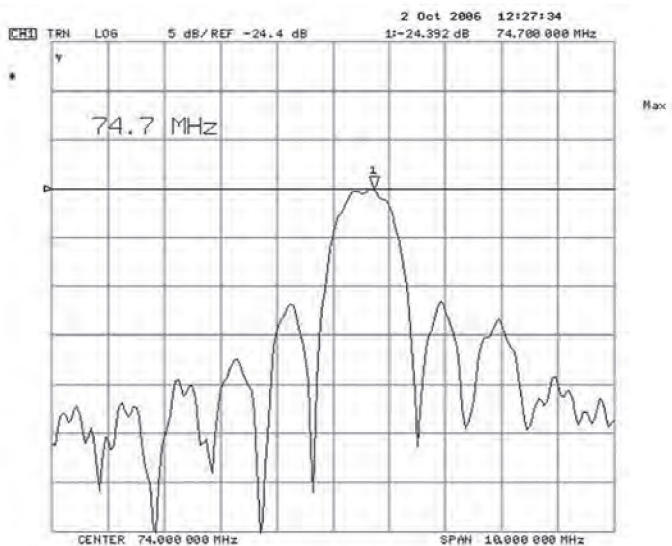


**Rys. 3.** Charakterystyka częstotliwościowo – amplitudowa linii opóźniającej z horyzontalną falą objętościową na kwarcu AT.  
**Fig. 3.** Amplitude response of SSBW delay line on quartz AT..



**Rys. 4.** Charakterystyka częstotliwościowo – amplitudowa linii opóźniającej z AFPP na  $41^{\circ}\text{YX LiNbO}_3$ .

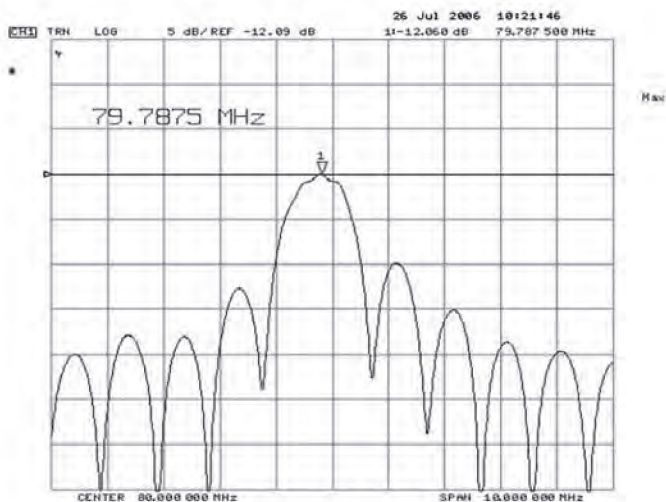
**Fig. 4.** Amplitude response of PSAW delay line on  $41^{\circ}\text{YX LiNbO}_3$ .



**Rys. 5.** Charakterystyka częstotliwościowo – amplitudowa linii opóźniającej z AFPP na  $36^{\circ}\text{YX LiTaO}_3$ .

**Fig. 5.** Amplitude response of PSAW delay line on  $36^{\circ}\text{YX LiTaO}_3$ .





**Rys. 6.** Charakterystyka amplitudowa linii opóźniającej z AFPP na  $41^{\circ}\text{YX LiNbO}_3$  z falowodem.

**Fig. 6.** Amplitude response of PSAW delay line on  $41^{\circ}\text{YX LiNbO}_3$  with guiding layer.

Sumaryczne straty energii fal akustycznych rozchodzących się w podłożu piezoelektrycznym dla każdej z prezentowanych struktur przetwornikowych są znaczne. Wskaźnikiem tych strat jest wartość tłumienności wtrącenia –  $A$  (Tab. 1, Rys. 3-5.). Osadzenie falowodu na strukturę przetwornikową linii opóźniającej wywołuje koncentrację energii fal przy powierzchni podłoża, co skutkuje znaczną redukcją wartości tłumienności wtrącenia. Przykładowa charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa linii opóźniającej na  $41^{\circ}\text{YXLiNbO}_3$  po osadzeniu falowodu pokazana jest na Rys. 6. Wartość tłumienności wtrącenia linii z warstwą falowodową wynosi  $A = 12,060$  dB i jest o ponad 8 dB mniejsza od tłumienności linii bez falowodu:  $A = 20,729$  dB (Rys. 4).

Montaż eksperymentalnej serii podzespołów: podłoże z naniesioną strukturą przetwornikową łączono z przepustem z niklowanej stali nierdzewnej. Wyprowadzenia kowarowe były selektywnie złożone. Substancją zespajającą przepust i podłoże piezoelektryczne była żywica epoksydowa. Pola kontaktowe linii opóźniającej łączono z wyprowadzeniami przepustów metodą ultrakompresji drutem AlSi (1%),  $\varphi - 25$   $\mu\text{m}$ .

## 2.2. Substancje wyjściowe warstw falowodowych

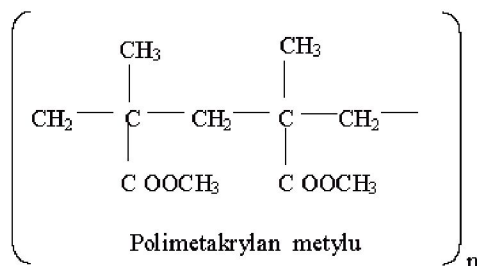
Funkcję falowodu mogą spełniać materiały w których prędkość propagacji fali jest mniejsza niż w podłożu [3]. Do badań wytypowano materiały powłokotwórcze (polimetakrylan metylu, polipiromelitimidy) w których prędkość fali akustycznej

jest niższa zarówno od prędkości w podłożu piezoelektrycznym jak i w warstwie SiO<sub>2</sub>. W Tab. 2 podano prędkości odpowiednich fal dla badanych podłoży i warstw pełniących rolę falowodowych.

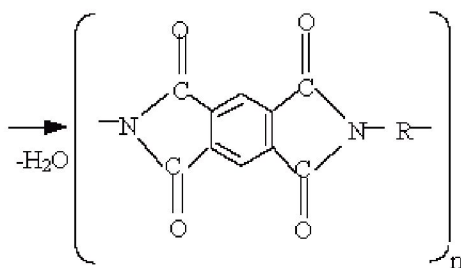
**Tabela 2.** Prędkości fal akustycznych dla badanych podłoży i warstw falowodowych.  
**Table 2.** The acoustic wave velocity in the in the studied piezoelectric substrates and waveguide layers.

Material	Prędkość fali akustycznej V [m/s]
Podłoże- kwarc AT	≈ 5099 [4]
Podłoże - 41°YX LiNbO <sub>3</sub>	≈ 4751 [4]
Podłoże - 36°YX LiTaO <sub>3</sub>	≈ 3544 [4]
Warstwa -SiO <sub>2</sub>	≈ 1944 [5]
Warstwa – poliimid	≈ 1270 [5]
Warstwa - polimetakrylan metylu	≈ 1100 [6]

Polimetakrylan metylu (PMMA) jest tworzywem szeroko znanym pod nazwą „szkło organiczne”. Monomerem polimetakrylanu metylu jest ester metylowy kwasu metakrylowego (metakrylan metylu).



Poliimidy – polipiromelitimidy należą do polikondensatów. Otrzymuje się je poprzez kondensację dwubezwodnika kwasu piromelitowego (czterokarboksylowego kwasu aromatycznego) z dwuaminami aromatycznymi. W wyniku reakcji tworzy się rozpuszczalny polikwas poliamidowy, a w podwyższonej temperaturze następuje zamknięcie pierścienia i powstaje nierozpuszczalny poliimid.



nierozpuszczalny poliimid

Do wytwarzania warstwy poliimidowej zastosowano produkt firmy HD Micro-System typ PI-2574. Poliimidy charakteryzują się wieloma unikalnymi właściwościami niespotykanymi u większości znanych polimerów, m.in. są bardzo odporne termicznie i chemicznie, nie reagują na działanie rozpuszczalników organicznych.

### Formowanie warstw falowodowych

Procesy osadzania falowodów prowadzono na zmontowanych uprzednio podzespołach, co determinowało warunki ich formowania.

Dwutlenek krzemu ( $\text{SiO}_2$ ) osadzano na powierzchni testowanych podłoży (kwarc, niobian litu, tantalit litu), metodą rozpylania katodowego przy mocy 350 W i szybkości narastania warstwy – 0,25  $\mu\text{m/h}$ .

Falowody organiczne nanoszono na podłoże metodą wirowania.

Proces formowania warstw polimetakrylanu metylu prowadzony był dwuetapowo. Wstępnie pokrywano podłoże warstwą polimetakrylanu z rozcieńzonego roztworu, w którym największy udział ma lotny rozpuszczalnik, zwiększający rozlewność, a następnie osadzano warstwę właściwą. Stosowany skład wyjściowych roztworów pokazano w Tab. 3. Powyższe roztwory nakładano na wirówce przy szybkości 5000 obrotów/min w czasie 60 s, utwardzono w temperaturze 170°C w czasie  $\approx$  4 h.

**Tabela 3.** Skład roztworów polimetakrylanu metylu.

**Table 3.** Composition of polymethylmethacrylate solutions.

Skład jakościowy	Roztwór wyjściowy warstwy buforowej zawartość składnika [%]	Roztwór wyjściowy warstwy właściwej zawartość składnika [%]
Polimetakrylan metylu	2,5	10
Octan butylu	58	16,89
Eter monobutyłowy glikolu etylenowego <i>cellosolve</i>	30,5	56,43

Skład jakościowy	Roztwór wyjściowy warstwy buforowej zawartość składnika [%]	Roztwór wyjściowy warstwy właściwej zawartość składnika [%]
Ksylen	9	16,68
Octan butylu - podstawowy rozpuszczalnik, eter monoetylowy glikolu etylenowego – rozcieńczalnik, ksylen - dodatek hydrofobowym		

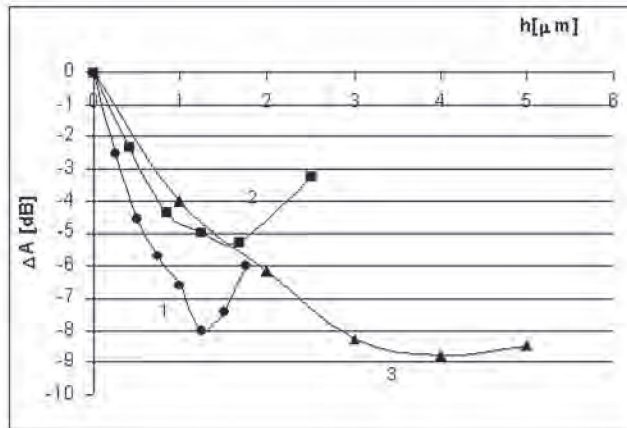
Warstwy poliimidowe formowano z 4% roztworu prekursora polipiromelitimidu w metylopirrolidonie.

Osadzanie falowodu poliimidowego na podłoża piezoelektryczne polegało na nałożeniu roztworu na całą pokrywającą powierzchnię na nieruchomej wirówce, następnie rozwirowywaniu z najmniejszym możliwym przyspieszeniem do 5000 obrotów/min. Czas wirowania przy maksymalnych obrotach - 30 s. Warstwy utwarzano w temperaturze 180°C przez 7 h.

### 3. WYNIKI

#### 3.1. Efekt falowodowy

Wpływ rodzaju i geometrii warstw, pełniących rolę falowodów, na parametry fali generowanej w badanych podłożach fali oceniano rejestrując wartość tłumienności wtrącenia oraz zmianę częstotliwości środkowej w funkcji grubości osadzanych powłok i wywieranego na podłożu obciążenia masowego. Różnica tłumienności wtrącenia linii opóźniających przed i po osadzeniu badanych warstw jest miarą efektu falowodowego wywołanego tymi warstwami. Wyniki przedstawiono na Rys. 7-9.

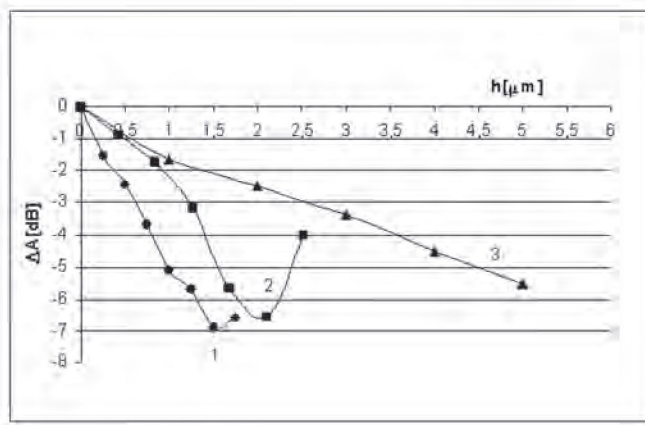


**Rys. 7.** Zmiany tłumienności wtrącenia ( $\Delta A$ ) linii opóźniającej na  $41^\circ\text{YX LiNbO}_3$  w funkcji grubości ( $h$ ) warstw falowodowych. Startowa tłumienność wtrącenia linii opóźniającej  $\approx 22$  dB; 1 (kółko)- polimetakrylan metylu; 2 (kwadrat)- poliimid; 3 (trójkąt)-  $\text{SiO}_2$ .

**Fig. 7.** Change of insertion loss ( $\Delta A$ ) against thickness ( $h$ ) of waveguide layer on  $41^\circ\text{YX LiNbO}_3$ . Initially insertion loss of delay line  $\approx 22$  dB; 1 (circle) – polymethylmethacrylate; 2 (square) - polyimide; 3 (triangle) -  $\text{SiO}_2$

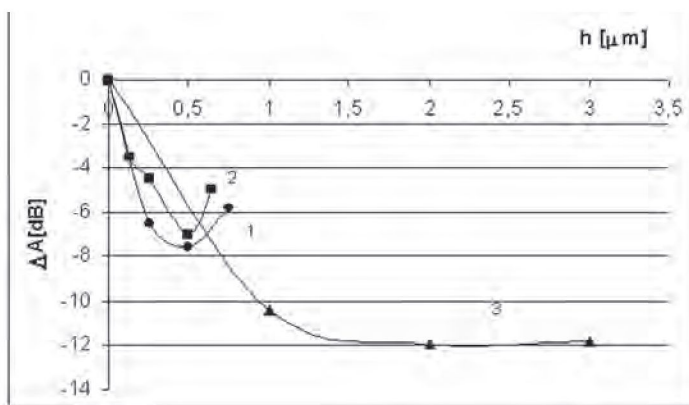
Najwyższy stopień koncentracji energii fali na  $41^\circ\text{YX LiNbO}_3$  uzyskano dla  $\approx 4 \mu\text{m}$  warstwy  $\text{SiO}_2$ . Dalszy wzrost grubości nie zmieniał już wartości tłumienności wtrącenia. Porównywalną redukcję tłumienności uzyskano dla warstwy polimetakrylanu metylu, ale przy prawie trzykrotnie mniejszej grubości (wytwarzanie  $4 \mu\text{m}$  warstw  $\text{SiO}_2$  metodą rozpylania katodowego trwa kilkanaście godzin). Charakter przebiegu krzywych  $\Delta A$  w funkcji grubości dla polimetakrylanu i poliimidu jest podobny. W obydwu przypadkach istnieje minimum, czyli grubość dla której efekt falowodowy jest maksymalny, a dalszy wzrost grubości skutkuje już wzrostem tłumienności wtrącenia. W obszarze grubości  $\leq 1,25 \mu\text{m}$  redukcja strat energii fali akustycznej jest największa dla warstw z polimetakrylanu metylu, a najmniejsza dla dwutlenku krzemu. Dla podłoży z  $36^\circ\text{YX LiTaO}_3$  (Rys. 8) porównywalny efekt falowodowy uzyskano dla polimetakrylanu metylu przy  $h - 1,5 \mu\text{m}$  i poliimidu przy  $h - 2 \mu\text{m}$ , natomiast w przypadku dwutlenku krzemu nawet przy warstwie o grubości  $5 \mu\text{m}$  nie osiągnięto obszaru nasycenia  $\Delta A$ . Standardowo stosowany falowód z dwutlenku krzemu zapewnia najlepszy efekt na podłożu kwarcowym (Rys. 9).





**Rys. 8.** Zmiany tłumienności wtrącenia ( $\Delta A$ ) linii opóźniającej na  $36^\circ\text{YX LiTaO}_3$  w funkcji grubości ( $h$ ) warstw falowodowych. Startowa tłumienność wtrącenia - 24,5 dB; 1 (kółko) - polimetakrylan metylu; 2 (kwadrat) - poliimid; 3 (trójkąt)-  $\text{SiO}_2$ .

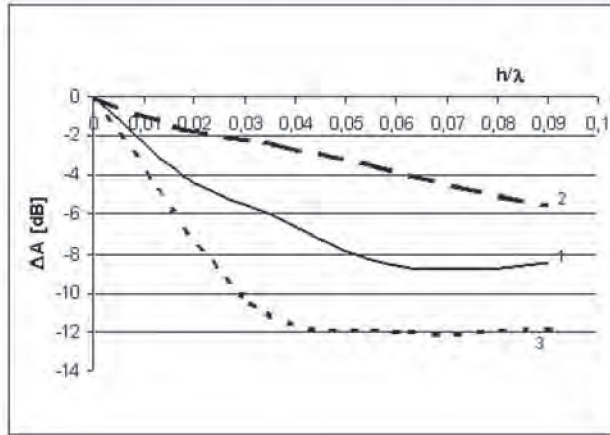
**Fig. 8.** Change of insertion loss ( $\Delta A$ ) against thickness ( $h$ ) of waveguide layer on  $41^\circ\text{YX LiNbO}_3$ . Initially insertion loss of delay line  $\approx 24,5$  dB; 1 (circle) – polymethylmethacrylate; 2 (square) - polyimide; 3 (triangle) -  $\text{SiO}_2$ .



**Rys. 9.** Zmiany tłumienności wtrącenia ( $\Delta A$ ) linii opóźniającej na **kwarcu AT** w funkcji grubości ( $h$ ) warstw falowodowych. Startowa tłumienność wtrącenia - 32 dB; 1 (kółko) - polimetakrylan metylu; 2 (kwadrat)- poliimid; 3 (trójkąt)-  $\text{SiO}_2$ .

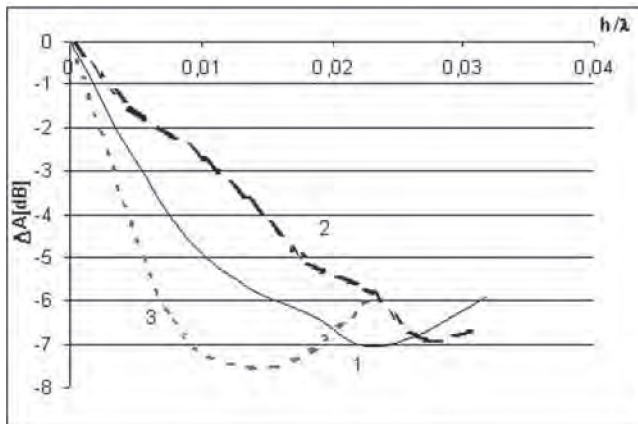
**Fig.9.** Change of insertion loss ( $\Delta A$ ) against thickness ( $h$ ) of waveguide layer on quartz AT. Initially insertion loss of delay line  $\approx 32$  dB; 1 (circle) – polymethylmethacrylate; 2 (square) - polyimide; 3 (triangle) -  $\text{SiO}_2$ .

Wpływ rodzaju podłoża piezoelektrycznego na uzyskiwany efekt falowodowy ilustrują wykresy (Rys. 10-12).



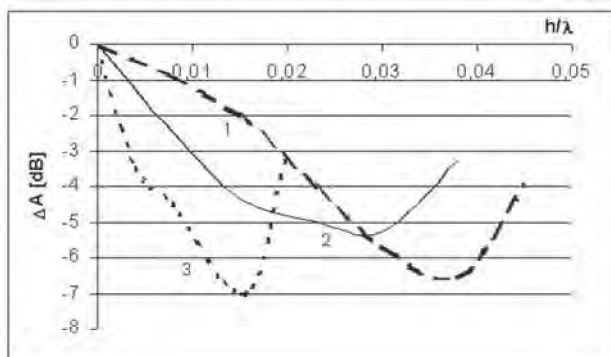
**Rys. 10.** Efekt falowodowy wywołany  $\text{SiO}_2$  w funkcji  $h/\lambda$  ( $\lambda$  - długość fali) dla badanych podłoży piezoelektrycznych; 1 (linia ciągła) -  $41^\circ\text{YX LiNbO}_3$ ; 2 (linia kreskowana) -  $36^\circ\text{YX LiTaO}_3$ ; 3 (linia kropkowana) - kwarc AT.

**Fig. 10.** Waveguide effect for the  $\text{SiO}_2$  layer versus  $h/\lambda$  ( $\lambda$ -wavelength) for the investigated piezoelectric substrates; 1. (solid line) -  $41^\circ\text{YX LiNbO}_3$ ; 2. (dashed line) -  $36^\circ\text{YX LiTaO}_3$ ; 3. (dotted line) - quartz AT.



**Rys. 11.** Efekt falowodowy wywołany **polimetakrylanem metylu** w funkcji  $h/\lambda$  dla badanych podłoży piezoelektrycznych; 1. (linia ciągła) -  $41^\circ\text{YX LiNbO}_3$ ; 2. (linia kreskowana) -  $36^\circ\text{YX LiTaO}_3$ ; 3. (linia kropkowana) - kwarc AT.

**Fig. 11.** Waveguide effect for the **polymethylmethacrylate** layer versus  $h/\lambda$  ( $\lambda$ -wavelength) for the investigated piezoelectric substrates; 1. (solid line) -  $41^\circ\text{YX LiNbO}_3$ ; 2. (dashed line) -  $36^\circ\text{YX LiTaO}_3$ ; 3. (dotted line) - quartz AT.

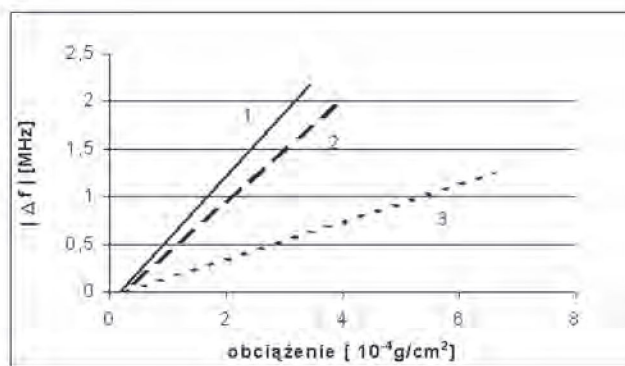


**Rys. 12.** Efekt falowodowy wywołany poliimidem w funkcji -  $h/\lambda$  dla badanych podłoży piezoelektrycznych; 1 (linia kreskowana) -  $36^\circ\text{YX LiTaO}_3$ ; 2 (linia ciągła) -  $41^\circ\text{YX LiNbO}_3$ ; 3 (linia kropkowana) - kwarc AT

**Fig. 12.** Waveguide effect for the polyimide layer versus  $h/\lambda$  ( $\lambda$ -wavelength) for the investigated piezoelectric substrates; 1 (solid line) -  $41^\circ\text{YX LiNbO}_3$ ; 2 (dashed line) -  $36^\circ\text{YX LiTaO}_3$ ; 3 (dotted line) - quartz AT.

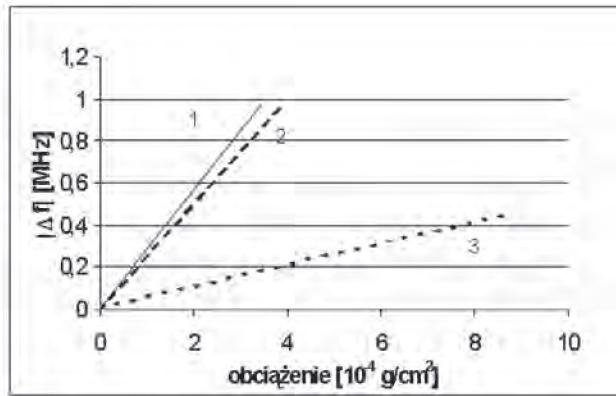
### 3.2. Efekt częstotliwościowy

Obciążanie masowe powierzchni linii opóźniającej przyczynia się do obniżenia prędkości fali akustycznej generowanej na tej powierzchni, w związku z czym wartość częstotliwości środkowej linii opóźniającej zmniejsza się. Rys. 13-15 przedstawiają zależność  $|\Delta f|$  od obciążenia masowego badanymi warstwami falowodowymi. Na osi rzędnych podana jest bezwzględna wartość zmian częstotliwości  $|\Delta f| = |f_x - f_0|$ , gdzie:  $f_x$  - częstotliwość środkowa linii po osadzeniu warstwy,  $f_0$  - częstotliwość środkowa linii z wolną ścieżką propagacji.



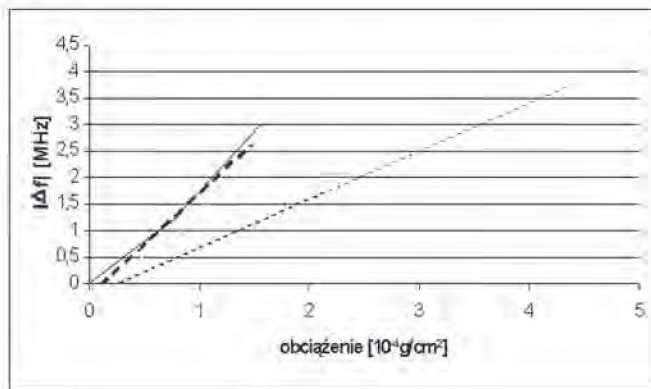
**Rys. 13.** Odpowiedź częstotliwościowa  $|\Delta f|$  linii opóźniającej na  $41^\circ\text{YX LiNbO}_3$ , wywołana obciążaniem powierzchni badanymi warstwami. Startowa częstotliwość środkowa -  $f_0 \approx 80$  MHz; 1 (linia ciągła) - polimetakrylanu metylu; 2 (linia kreskowana) - poliimid; 3 (linia kropkowana) -  $\text{SiO}_2$

**Fig. 13.** The influence of waveguide mass loading on delay line frequency response  $|\Delta f|$  for  $41^\circ\text{YX LiNbO}_3$ . Initially frequency of delay line -  $f_0 \approx 80$  MHz; 1 (solid line) - polymethylmethacrylate; 2 (dashed line) - polyimide; 3 (dotted line) -  $\text{SiO}_2$



**Rys. 14.** Odpowiedź częstotliwościowa  $|\Delta f|$  linii opóźniającej na  $36^\circ\text{YX LiTaO}_3$ , wywołana obciążaniem powierzchni badanymi warstwami. Startowa częstotliwość środkowa -  $f_0 \approx 75$  MHz: 1 (linia ciągła) - polimetakrylan metylu; 2 (linia kreskowana) - poliimid; 3 (linia kropkowana) -  $\text{SiO}_2$ .

**Fig. 14.** The influence of waveguide mass loading on delay line frequency response  $|\Delta f|$  for  $36^\circ\text{YX LiTaO}_3$ . Initially frequency of delay line -  $f_0 \approx 75$  MHz: 1 (solid line) - polymethylmethacrylate; 2. (dashed line) - polyimide; 3. (dotted line) -  $\text{SiO}_2$ .



**Rys. 15.** Odpowiedź częstotliwościowa  $|\Delta f|$  linii opóźniającej na **kwarcu AT**, wywołana obciążaniem powierzchni badanymi warstwami. Startowa częstotliwość środkowa -  $f_0 \approx 160$  MHz: 1 (linia ciągła) - polimetakrylan metylu; 2 (linia kreskowana) - poliimid; 3 (linia kropkowana) -  $\text{SiO}_2$ .

**Fig. 15.** The influence of waveguide mass loading on delay line frequency response  $|\Delta f|$  for quartz AT. Initially frequency of delay line -  $f_0 \approx 160$  MHz: 1 (solid line) - polymethylmethacrylate; 2 (dashed line) - polyimide; 3 (dotted line) -  $\text{SiO}_2$ .

Zależność zmian częstotliwości od obciążenia jest liniowa w całym badanym zakresie. Wyniki zilustrowane na rysunkach wykazały, że przy tym samym obciążeniu masowym odpowiedź częstotliwościowa jest inna i zależy od rodzaju warstwy. Największe zmiany częstotliwości wywołuje polimetakrylan metylu, nieznacznie mniejsze poliimid, a najmniejsze dwutlenek krzemu. Obciążenie o wartości  $10^{-4}$  g/cm<sup>2</sup> warstwą polimetakrylanu zmienia częstotliwość linii na 41<sup>o</sup>YX LiNbO<sub>3</sub> o 0, 69 MHz, a SiO<sub>2</sub> o 0,2 MHz, czyli ponad trzykrotnie mniej niż polimetakrylan.

#### 4. DYSKUSJA WYNIKÓW

Ogólny charakter obserwowanych zmian parametrów akustycznych fal typu Love'a w wyniku obciążania struktur przetwornikowych omawianymi warstwami jest podobny. Efekt falowodowy, czyli znaczącą redukcję strat propagacji obserwuje się dla każdej z testowanych warstw.

Uzyskane eksperymentalnie wyniki, dotyczące grubości badanych warstw falowodowych, przy których zarejestrowano maksymalną redukcję tłumienności wtrącenia, wartość tej redukcji oraz efekt częstotliwościowy zebrano w Tab. 4.

**Tabela nr 4.** Dane dotyczące badanych podłoży i grubości warstw przy których uzyskano optymalny efekt falowodowy.

**Table 4.** Data concerning investigated substrates and layers thickness which assure the best waveguide effect.

Podłoże piezoelektryczne	$c_m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$f_o$ [MHz]	Rodzaj warstwy falowodowej / $V_w$								
			PMMA /1100 m/s			Poliimid /1270 m/s			SiO <sub>2</sub> /1944 m/s		
			$h/\lambda$	$\Delta A/A_o$ [%]	$\Delta f/f_o$ [%]	$h/\lambda$	$\Delta A/A_o$ [%]	$\Delta f/f_o$ [%]	$h/\lambda$	$\Delta A/A_o$ [%]	$\Delta f/f_o$ [%]
36 <sup>o</sup> YX LiTaO <sub>3</sub>	≈ 4,1	75	0,027	29	0,64	0,036	27	0,35	0,09*	22	0,1
41 <sup>o</sup> YX LiNbO <sub>3</sub>	≈ 6,0	80	0,023	32	0,4	0,027	23	0,6	0,072	33	0,2
Kwarc AT	≈ 14,7	160	0,016	24	1,25	0,019	22	0,75	0,047	35	0,4

Objaśnienia do tabeli:

$V_w$  - prędkość fali akustycznej w warstwie; PMMA – polimetakrylan metylu;  $c_m$  – współczynnik sprzężenia mechanicznego dla danego podłoża piezoelektrycznego;  $f_o$  – częstotliwość środkowa linii opóźniającej na prezentowanym podłożu;  $h/\lambda$  -gdzie:  $h$  - grubość warstwy przy której uzyskano największą redukcję tłumienności,  $\lambda$  - długość fali akustycznej;  $\Delta A$  – zmiana tłumienności wtrącenia po osadzeniu warstwy falowodowej dla grubości przy której zarejestrowano największą redukcję tłumienności;  $A_o$  – początkowa tłumienność wtrącenia linii nie pokrytej;  $\Delta f$  - zmiana częstotliwości środkowej przy  $10^{-4}$ g/cm<sup>2</sup> obciążeniu warstwą falowodową; \* - w przypadku tantalanu litu nie uzyskano maksymalnej redukcji tłumienności dla falowodu SiO<sub>2</sub> do grubości 5 μm (w jednostkach  $h/\lambda$  - 0,09 ).



Efekt falowodowy jest tym większy im większa jest różnica pomiędzy prędkością fali akustycznej w podłożu i w warstwie. Teoretycznie optymalny efekt uzyskuje się dla grubości falowodu określonej poniższym wyrażeniem:  $h \approx V_w / 4f$  [5], gdzie:  $V_w$  – prędkość fali w warstwie,  $f$  – częstotliwość środkowa linii opóźniającej na danym podłożu piezoelektrycznym. Eksperymentalnie uzyskane wartości jakościowo pokrywają się z założeniami teoretycznymi. Konieczna do zapewnienia optymalnego efektu falowodowego grubość, dla każdej z omawianych warstw, była najmniejsza dla podłoża z kwarcu AT (Tab. 4). W przypadku kwarcu AT różnica prędkości fali akustycznej w podłożu i w poszczególnych falowodach jest największa (Tab. 2).

Porównując przebiegi krzywych  $\Delta A$  w funkcji grubości warstw na Rys. 7–12 stwierdza się, że dla małych  $h/\lambda$  np. rzędu 0,01 najwyższy stopień koncentracji energii fali uzyskuje się w przypadku warstw z polimetakrylanu metylu (najmniejsza prędkość fali), następnie z poliimidu, a najniższy dla dwutlenku krzemu, niezależnie od rodzaju podłoża piezoelektrycznego. Jednak w przypadku powłok polimerowych po zapewnieniu optymalnego, charakterystycznego dla danej substancji efektu falowodowego dalszy wzrost grubości przyczynia się do wzrostu tłumienia, czego nie zarejestrowano w przypadku  $\text{SiO}_2$  w całym badanym zakresie grubości. Zjawisko to związane jest z własnościami sprężysto-lepkociowymi warstw falowodowych. W Tab. 5 podano moduły sprężystości i gęstości omawianych warstw. Moduły sprężystości -  $E_w$  obliczono ze wzoru:  $V_w = (E_w / d_w)^{0,5}$  [5], gdzie  $d_w$  – gęstość warstwy wyznaczona doświadczalnie,  $V_w$  prędkość fali akustycznej w warstwie.

**Tabela 5.** Dane materiałowe warstw falowodowych.

**Table 5.** Material data of waveguide layers.

Materiał falowodowy	$d_w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$E_w$ [Gpa]
Dwutlenek krzemu ( $\text{SiO}_2$ )	2200	8,3134
Poliimid	1420	2,3
Polimetakrylan metylu	1180	1,43
<i>Objaśnienia do tabeli: <math>d_w</math> – gęstość warstwy; <math>E_w</math> – moduł sprężystości warstwy.</i>		

Im mniejszy jest moduł sprężystości tym przy mniejszej grubości warstwy ujawnia się oddziaływanie lepkościowe, hamując efekt falowodowy.

Analiza wykresów, opisujących zmianę częstotliwości w zależności od obciążenia (Rys. 13-15) wykazuje, że im mniejszy jest moduł sprężystości materiału tym większe są zmiany częstotliwości przy tym samym obciążeniu masowym.

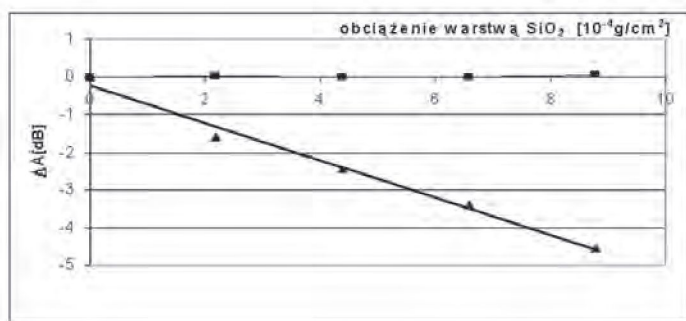
Największe zmiany w każdym przypadku zarejestrowano dla warstwy z polimetakrylanu metylu o module sprężystości  $E_w$  - 1,43 Gpa, nieznacznie mniejsze dla poliimidu, którego moduł  $E_w$  wynosi 2,3 Gpa i najmniejsze dla dwutlenku krzemu, którego moduł jest wyższy odpowiednio prawie 6 i 4 -krotnie od prezentowanych

polimerów. Różnica odpowiedzi jest więc wskaźnikiem oddziaływania lepkościowego.

Obciążenie masowe (Tab. 4) wywołuje największą zmianę odpowiedzi częstotliwościowej w przypadku kwarcu AT. Zmiana prędkości fali  $\Delta V/V_0$  w wyniku oddziaływania mechanicznego jest proporcjonalna do  $nc_m md$  [7], gdzie  $n$  - liczba molekuł na jednostkę objętości;  $m$  - masa molowa molekuł osadzonych;  $d$  - grubość warstwy; (czyli iloczyn  $nmd$  jest obciążeniem w gramach na jednostkę powierzchni); a  $C_m$  to współczynnik mechanicznego sprzężenia. Wartość  $C_m$  dla kwarcu jest ponad dwukrotnie wyższa niż dla niobianu litu i ponad trzykrotnie dla tantalanu litu (Tab. 4).

Im wyższa jest wartość współczynnika  $C_m$  tym większy jest efekt oddziaływania mechanicznego (masowego i lepkościowego) i tym wcześniej hamowane jest oddziaływanie falowodowe.

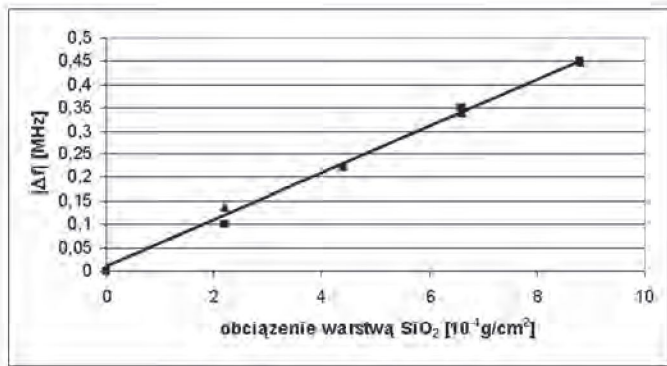
Rezultaty wykonanych badań sugerują, że czysto masowe efekty nie wpływają na wartość tłumienności wtrącenia, natomiast zmiana częstotliwości jest tylko funkcją masy w przypadku warstw o module sprężystości  $E_w \geq 8,3134$  Gpa (Tab. 5, przytoczona wartość dotyczy dwutlenku krzemu). Prawidłowość tą ilustrują dobrze Rys. 16-17.



**Rys. 16.** Zmiana tłumienności wtrącenia ( $\Delta A$ ) linii opóźniającej na  $36^{\circ}\text{YX LiTaO}_3$  w funkcji obciążenia warstwą  $\text{SiO}_2$ : 1 (kwadrat) – linia opóźniająca z warstwą metaliczną (Al); 2 (trójkąt) – struktura z wolną ścieżką propagacji.

**Fig. 16.** Change of insertion loss ( $\Delta A$ ) against mass loading of  $\text{SiO}_2$  layer on  $36^{\circ}\text{YX LiTaO}_3$ : 1 (square) – metallized line; 2 (triangle) – free line..

Na Rys. 16 porównano zmiany tłumienności wtrącenia ( $\Delta A$ ) w funkcji osadzonej masy na jednostkę powierzchni dla dwóch linii opóźniających na  $36^{\circ}\text{YX LiTaO}_3$  w trakcie formowania na ich powierzchni warstwy  $\text{SiO}_2$ . Jedna z linii przed procesem pokrywania miała wolną ścieżkę propagacji (startowa tłumienność – 24,5 dB), druga natomiast była metalizowana. Warstwa metalu (Al) zredukowała tłumienność wtrącenia linii, a uzyskany stopień koncentracji energii fali był optymalny (startowa



**Rys. 17.** Bezwzględna zmiana częstotliwości środkowej linii opóźniającej na  $36^{\circ}\text{YX LiTaO}_3$  w funkcji obciążenia warstwą  $\text{SiO}_2$ : znacznik trójkąt - struktura niemetalizowana; znacznik kwadrat - struktura metalizowana.

**Fig. 17.** Change frequency response  $|\Delta f|$  against mass loading of  $\text{SiO}_2$  layer on  $36^{\circ}\text{YX LiTaO}_3$ : 1 (square) – metallized line; 2 (triangle) – free line.

tłumienność – 14,5 dB). Oddziaływanie masowe w przypadku gdy efekt falowodowy jest już zapewniony nie zmienia tłumienności wtrącenia. Natomiast osadzanie  $\text{SiO}_2$  na linię z wolną ścieżką wywołuje efekt falowodowy, czyli zmniejszenie tłumienności wtrącenia. Zarejestrowane dla każdej z omawianych linii opóźniających zmiany częstotliwości były jednakowe (Rys. 17).

Reasumując, odpowiedź amplitudowa (zmiana tłumienności wtrącenia) podzespołów z akustyczną falą typu Love' jest tylko funkcją sprzężenia lepkościowego, gdy brak oddziaływań elektryczno - akustycznych, lub są one skompensowane. Natomiast odpowiedź częstotliwościowa jest efektem zarówno sprzężenia akustomasowego jak i akusto-lepkościowego. Natomiast odpowiedź częstotliwościowa jest efektem zarówno sprzężenia akustomasowego jak i akusto-lepkościowego. Zmiana częstotliwości jest wyłącznie wynikiem oddziaływania masowego w przypadku materiałów o module sprężystości  $E_w \geq 8,3134$  Gpa.

## 5. PODSUMOWANIE

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki potwierdziły możliwość wykorzystania proponowanych warstw w funkcji falowodu. Wybór odpowiedniego falowodu uwarunkowany jest wymaganiami docelowej aplikacji i rodzajem podłoża piezoelektrycznego. Przeprowadzone eksperymenty pozwoliły określić badane zależności w sposób ilościowy, dzięki czemu możliwe będzie bardziej precyzyjne projektowanie dalszych prac, ustalenie najkorzystniejszego zestawu: podłoże piezoelektryczne;

materiał falowodowy oraz koniecznej do uzyskania optymalnego efektu falowodowego grubości warstwy.

Zastosowanie omawianych polimerów w roli warstw falowodowych bardzo upraszcza cykl technologiczny otrzymywania podzespołów czujnikowych z modami Love'a.

W rozwiązaniach aplikacyjnych wykorzystujących mody Love'a w detekcji substancji chemicznych, przy odpowiedniej konstrukcji czujnika i kalibracji możliwa będzie selektywna rejestracja oddziaływań gęstościowych, czyli czysto masowych i efektów lepkościowych.

## LITERATURA

- [1] Jeuter D., Jose F., Wenzel M., Hossenlopp J., Cernose R.: Design of portable guided SH-SAW chemical sensor system for liquid environments. *Proceedings IEEE*, (2005), 59-67
- [2] Ren-Chuan Chang, Sheng-Yuan Chu, Cheng-Shong Hong, Yu-Ting Chuang: A study of Love wave devices in ZnO/quartz and ZnO/LiTaO<sub>3</sub> structures. *Thin Solid Films*, 498, (2006), 146-151
- [3] Newton M.I., Hale G., Martin F.: Experimental study of Love wave devices with thick guiding layers. *Sensors and Actuators. A*, 109, (2004), 180-185
- [4] Pereira da Cunha M.: High velocity pseudo surface waves (HVPSAW): further insight. *Proceedings IEEE Ultrasonics Symposium*, (1996), 97-105
- [5] Turton A., Bhattacharyya D., Wood D.: Love-mode surface acoustic wave liquid sensors using a polyimide waveguide layer. *Proceedings IEEE International Frequency Control Symposium*, (2004), 250-255
- [6] Gizeli E.: Study of the sensitivity of the acoustic waveguide sensor. *Anal.Chem.*, 72, (2000), 5967-5972
- [7] Ricco A.I., Martin S.J., Zipperian T.E.: Surface acoustic wave gas sensors based on film conductivity changes. *Sensors and Actuators*, 8, (1985), 319 -326

## SUMMARY

### POLYMETHYLMETHACRYLATE AND POLYIMIDE AS A WAVEGUIDE IN THE LOVE WAVE DEVICES

In this article the results of the investigations concerned of polymethylmethacrylate and polyimide application as a waveguide in the Love wave devices are presented.



The waveguide effects caused by above polymers and the mostly used  $\text{SiO}_2$  waveguide are compared. The estimation of the waveguide properties of the studied substances was carried out on the several, different piezoelectric substrates such as:  $41^\circ\text{YX LiNbO}_3$ ,  $36^\circ\text{YX LiTaO}_3$ , and quartz AT. The influence of the guiding layer geometry on the parameters of the acoustic waves, generated in the above piezoelectric substrates was examined.