

# TERMICZNA ZALEŻNOŚĆ PARAMETRÓW AKUSTYCZNEJ FALI POWIERZCHNIOWEJ W NIOBIANIE LITU O ORIENTACJACH YZ I 128°YX W ZAKRESIE OD 20°C DO 500°C

Ernest Brzozowski<sup>1)</sup>

Przedstawiono obliczenia temperaturowego współczynnika zmian częstotliwości (TWCz) akustycznych fal powierzchniowych (AFP) w niobianie litu ( $\text{LiNbO}_3$ ) w funkcji kąta cięcia kryształu. Przedstawiono wyniki pomiarów TWCz i tłumienia linii opóźniających z AFP w niobianie litu o orientacjach YZ i 128°YX w zakresie temperatur od 20°C do 500°C. Porównano wyniki obliczeń i pomiarów dla obu orientacji. Stwierdzono, że niobian litu 128°YX w porównaniu do YZ charakteryzują bardziej liniowe zmiany częstotliwości oraz mniejsze wahania tłumienia w funkcji temperatury, co może znaleźć zastosowanie w czujnikach temperatury.

## 1. WSTĘP

Spośród różnych metod pomiaru temperatury, potencjalnie dużą dokładność i rozdzielczość można uzyskać wykorzystując fale akustyczne wzbudzone w kryształach piezoelektrycznych [1]. Termicznie indukowane zmiany prędkości fali oraz rozszerzalność kryształu umożliwiają rejestrację temperatury w postaci zmian częstotliwości.

Z punktu widzenia zastosowań praktycznych, istotne jest, żeby temperaturowy współczynnik częstotliwości (TWCz) był możliwie duży i liniowy w funkcji temperatury. Jego wartość może być dobierana w pewnych granicach, poprzez wybór odpowiedniego materiału podłoża i orientacji fali akustycznej względem osi krystalograficznych. W przypadku akustycznych fal powierzchniowych (AFP)

---

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

największy TWCz w zakresie od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $160^{\circ}\text{C}$ , posiada kryształ niobianu litu ( $\text{LiNbO}_3$ ) o orientacji YZ [2]. Okazało się jednak, że jego duże zmiany występują w wysokich temperaturach [3]. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki teoretycznych i eksperymentalnych badań własności fal AFP w  $\text{LiNbO}_3$  o orientacjach YZ oraz  $128^{\circ}\text{YX}$ . Prezentowane obliczenia TWCz dotyczą zakresu od  $0^{\circ}\text{C}$  do  $110^{\circ}\text{C}$ , natomiast pomiary TWCz i tłumienia linii opóźniających z AFP zostały wykonane w zakresie temperatur od  $20^{\circ}\text{C}$  do  $500^{\circ}\text{C}$ .

## 2. OBLICZENIA

Opracowano program komputerowy obliczający TWCz akustycznych fal powierzchniowych w oparciu o przedstawione poniżej wyrażenia. Zależność czasu opóźnienia  $\tau$  fali akustycznej od temperatury  $T$  podłoża linii opóźniającej, schematycznie pokazanej na Rys. 1 wyraża wzór:

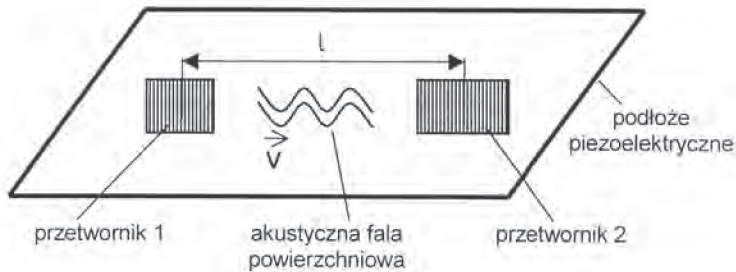
$$\tau(T) = \tau(T_0)[1 + a(T - T_0) + b(T - T_0)^2 + \dots + udT/dt] \quad (1)$$

gdzie:

$T_0$  – temperatura odniesienia,

$a, b$  – współczynniki czułości I-go i II-go rzędu,  $a = d\tau/dT$ ,  $b = d^2\tau/dT^2$ ,

$u$  – stała czasowa szybkości reakcji na skokową zmianę temperatury.



**Rys. 1.** Schemat linii opóźniającej.

**Fig. 1.** Schematic illustration of delay line.

Przesunięcie fazowe fali w linii schematycznie przedstawionej na Rys. 1 w temperaturze  $T_0$  wynosi:

$$\varphi = \omega\tau \quad (2)$$

gdzie pulsacja  $\omega = 2\pi f$ , natomiast czas opóźnienia  $\tau$  jest funkcją prędkości  $v$  fali powierzchniowej i długości drogi  $l$ , którą fala pokonuje między środkami przetworników:

$$\tau = \frac{l}{v} \quad (3)$$

Po podstawieniu wzoru (3) do wzoru (2) uzyskuje się:

$$\phi = 2\pi f \cdot \frac{l}{v} \quad (4)$$

Temperatura podłoża wpływa na czas opóźnienia  $\tau$  poprzez zmianę prędkości fali  $v$  oraz drogi  $l$ . W celu utrzymania stałego przesunięcia fazowego  $\phi$ , zgodnie ze wzorem (4), należy zmieniać częstotliwość fali.

Temperaturowy współczynnik zmian częstotliwości jest określony jako:

$$TWCz = \left( \frac{1}{f_0} \frac{\partial f}{\partial T} \right)_{\phi=const} \quad (5)$$

Z zależności (1, 4, 5) wyprowadzany jest wzór:

$$TWCz = \frac{l}{v_0} \frac{v_T - v_0}{T - T_0} - \lambda_T \quad (6)$$

gdzie:

$T_0$  – temperatura odniesienia,

$T$  – temperatura podłoża,

$v_0$  – prędkość fali w temperaturze odniesienia,

$v_T$  – prędkość fali w temperaturze  $T$ ,

$\lambda_T$  – współczynnik rozszerzalności podłoża [4].

Do obliczeń  $v_0$  i  $v_T$  wykorzystano algorytm opisany w [5-6]. Prędkości  $v_0$  obliczono wykorzystując stałe materiałowe  $c_{ijkl}^E$ ,  $e_{ijk}$ ,  $\varepsilon_{ik}^S$ ,  $\rho$  [7]. Aby obliczyć  $v_T$  wyznaczono wartości stałych materiałowych w temperaturach  $T$  (0 i 110 °C) przy założeniu liniowej zależności termicznej:

$$\begin{aligned} c_{ijkl}^E(T) &= c_{ijkl}^E(T_0) \cdot [1 + Tc_{ijkl}^E \cdot (T - T_0)] \\ e_{ijk}(T) &= e_{ijk}(T_0) \cdot [1 + Te_{ijk} \cdot (T - T_0)] \\ \varepsilon_{ik}^S(T) &= \varepsilon_{ik}^S(T_0) \cdot [1 + T\varepsilon_{ik}^S \cdot (T - T_0)] \\ \rho(T) &= \rho(T_0) / [1 + (\lambda_{11} + \lambda_{22} + \lambda_{33}) \cdot (T - T_0)], \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie:

indeksy  $i, j, k, l$  przyjmują wartości od 1 do 3  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ ,

$c_{ijkl}^E$  – stałe sztywności mechanicznej przy zerowym polu elektrycznym [ $\text{N/m}^2$ ],

$Tc_{ijkl}^E$  – temperaturowe współczynniki stałych  $c_{ijkl}^E$

$e_{ijk}$  – stałe sztywności piezoelektrycznej [ $\text{C/m}^2$ ],

$Te_{ijk}$  – temperaturowe współczynniki stałych  $e_{ijk}$

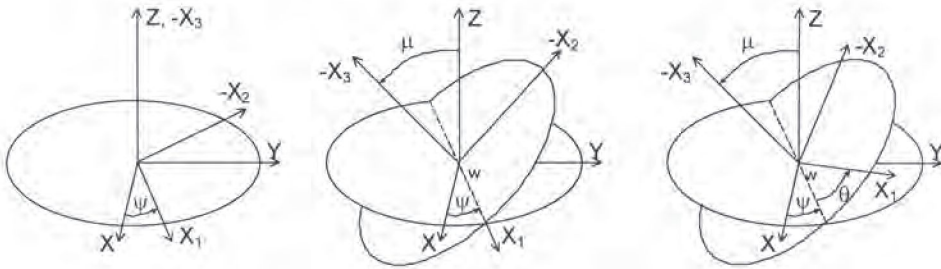
$\varepsilon_{ik}^S$  – stałe przenikalności elektrycznej przy zerowym odkształceniu [F/m],

$T\varepsilon_{ik}^S$  – temperaturowe współczynniki stałych  $\varepsilon_{ik}^S$ ,

$\rho$  – gęstość podłoża [kg/m<sup>3</sup>],

$\lambda_{ij}$  – stałe rozszerzalności liniowej podłoża [8].

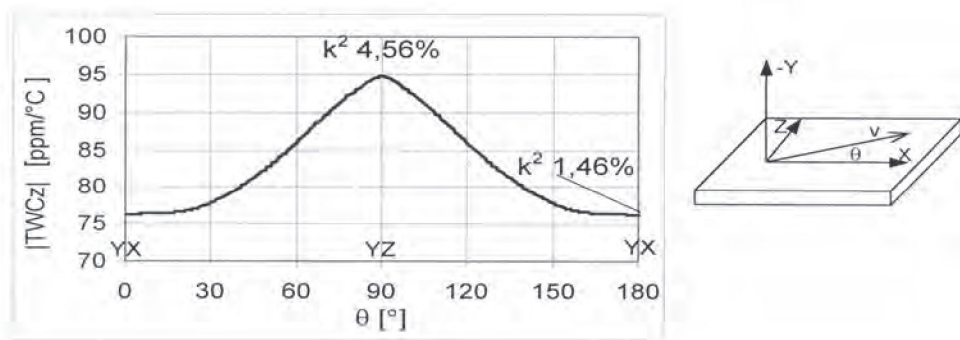
Podczas obliczeń kierunek i płaszczyzna propagacji fali były określane za pomocą kątów Eulera:  $\psi$ ,  $\mu$ ,  $\theta$  (Rys. 2), które służą do opisu położenia układu odniesienia związanego falą ( $X_1, X_2, X_3$ ) względem układu odniesienia związanego osiami krytalograficznymi ( $X, Y, Z$ ). Kąty Eulera wykorzystywane są również do orientacji płytek kryształów z AFP [5, 9].



**Rys. 2.** Definicja kątów Eulera.

**Fig. 2.** Euler's angles definition.

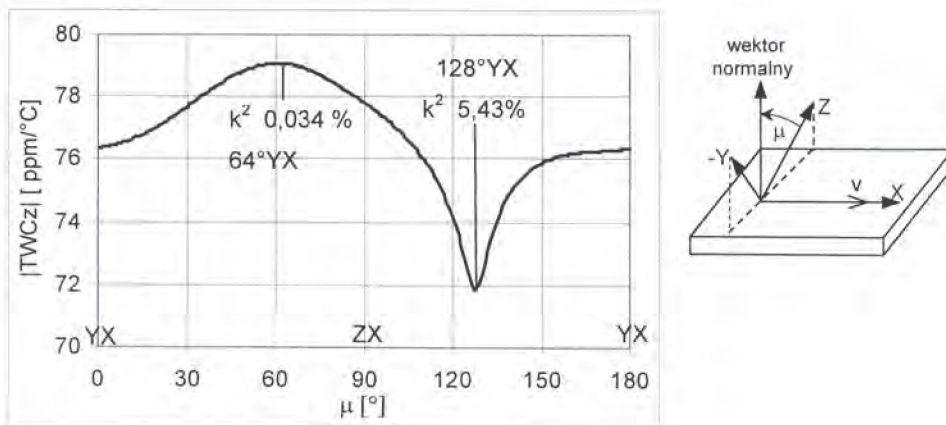
Przecięcie płaszczyzn  $XY$  i  $X_1X_2$  wyznacza linię węzłów  $w$ . Kąt  $\psi$  jest zawarty między osią  $X$  a linią węzłów  $w$ , kąt  $\mu$  jest zawarty między osią  $Z$  a osią  $-X_3$ , kąt  $\theta$  jest zawarty między linią węzłów  $w$  a osią  $X_1$ . W przypadku gdy  $\mu = 0$  lub  $\mu = \pi$  przyjmujemy, że linia węzłów  $w$  pokrywa się z osią  $X_1$ .



**Rys. 3.** Temperaturowy współczynnik częstotliwości (TWCz) w płaszczyźnie cięcia Y w funkcji kąta  $\theta$ .

**Fig. 3.** Temperature coefficient of frequency (TCF) in Y cut plate versus angle  $\theta$ .

Wykonano dwie serie obliczeń TWCz: w funkcji kąta propagacji ( $\theta$ ) w płaszczyźnie cięcia Y (Rys. 3) oraz w funkcji kąta obrotu ( $\mu$ ) cięcia Y-obrotowego (Rys. 4).



**Rys. 4.** Temperaturowy współczynnik częstotliwości (TWCz) w funkcji kąta obrotu  $\mu$  cięcia Y-obrotowego.

**Fig. 4.** Temperature coefficient of frequency versus angle  $\mu$  of rotated Y cut.

W płaszczyźnie Y (Rys. 3), w zależności od kąta propagacji  $\theta$  wartość modułu TWCz waha się w granicach od 75 ppm/°C do 95 ppm/°C. Potencjalnie najlepsza orientacja do zastosowania w pomiarach temperatury, czyli orientacja o największym  $|TWCz|$ , to YZ ( $0^\circ, 90^\circ, \theta = 90^\circ$ ). W funkcji kąta obrotu  $\mu$  (Rys. 4)  $|TWCz|$  waha się w granicach od 71,9 ppm/°C do 79 ppm/°C. Przebieg jest niesymetryczny w badanym zakresie kątów. Z tej serii, do pomiarów temperaturowych należałoby wybrać orientację  $64^\circ YX$ , jednakże współczynnik sprzężenia elektromechanicznego  $k^2$  wynosi tylko 0,034% co zmniejszyłoby czułość. Wybrano więc orientację  $128^\circ YX$  charakteryzującą się dużym  $k^2 = 5,4\%$  oraz  $|TWCz|$  wynoszącym 72 ppm/°C.

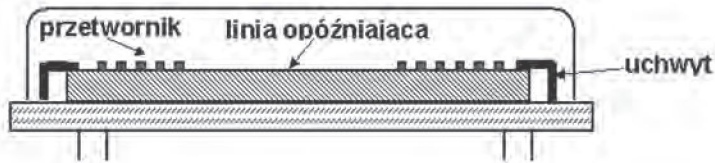
Podsumowując, do eksperymentów wybrano dwa podłoża:  $128^\circ YX$  i w celach porównawczych YZ [3].

### 3. POMIARY

Do badań eksperymentalnych zastosowano linię opóźniającą DL 701 z aluminiowymi elektrodami przetworników [10]. Linię zmontowano w obudowie PCZ-24 (Kazel) przy pomocy metalowych uchwytów w sposób eliminujący naprężenia mechaniczne i ładunki gromadzące się przy zmianach temperatury (Rys. 5). Badane podzespoły rozgrzewano do wymaganej temperatury w piecu N20/HR (Nabertherm)

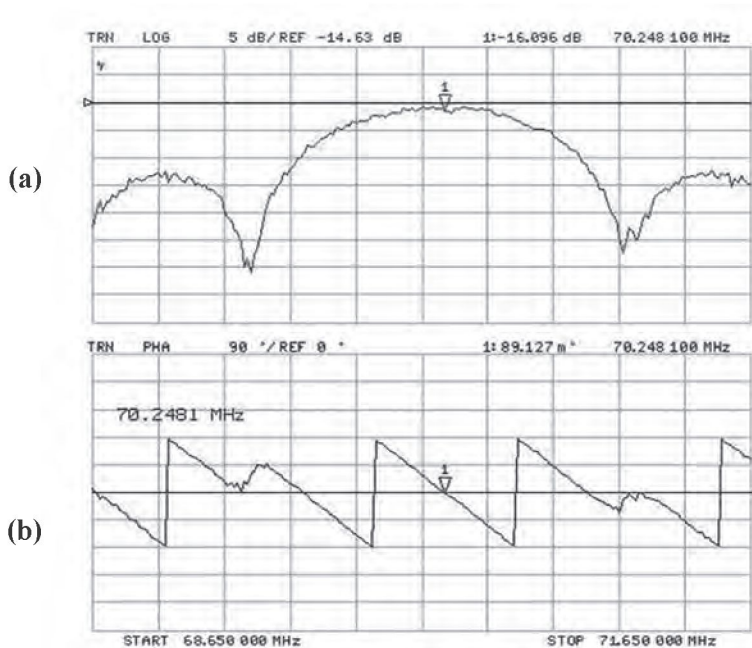


sterowanym przez mikroprocesor połączony z termoparą i grzałkami elektrycznymi. Do badania charakterystyk linii opóźniających użyto analizatora sieci HP 8752A.



**Rys. 5.** Ilustracja linii opóźniającej w obudowie.  
**Fig. 5.** Schematic illustration of delay line in package.

Przykładową charakterystykę amplitudową i fazową linii na  $\text{LiNbO}_3$  o orientacji  $128^\circ\text{YX}$  przedstawiono na Rys. 6. Przy wzroście temperatury kryształu następuje przesunięcie charakterystyk, bez zmiany kształtu, w kierunku mniejszych częstotliwości. Wartość przesunięcia charakterystyki fazowej jest określona przez wzór (5).

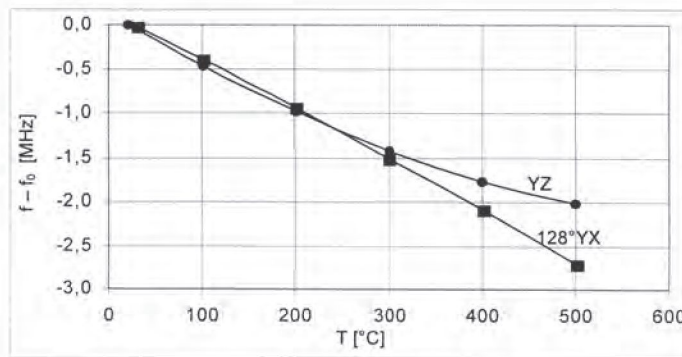


**Rys. 6.** Charakterystyka amplitudowa (a) i fazowa (b) linii opóźniającej DL 701 na  $\text{LiNbO}_3$  o orientacji  $128^\circ\text{YX}$ .

**Fig. 6.** Amplitude (a) and phase (b) characteristic of delay line DL 701 on  $128^\circ\text{YX}$   $\text{LiNbO}_3$ .

Aby zbadać właściwości linii pod kątem pracy w układzie generacyjnym, częstotliwość  $f$  i tłumienie  $A$  mierzono w punkcie  $\varphi = 0^\circ$  położonym w okolicy maksimum transmisji (Rys. 6).

Wartości  $f_0$  i  $A_0$  w temperaturze  $20^\circ\text{C}$  wyniosły odpowiednio  $70,2\text{MHz}$  i  $16,1\text{dB}$  dla orientacji  $128^\circ\text{YX}$ , oraz  $61,9\text{MHz}$  i  $17,1\text{dB}$  dla orientacji  $\text{YZ}$ . Dokładności określenia częstotliwości i temperatury wynosiły odpowiednio  $\pm 100\text{Hz}$  i  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Skalowanie układu pomiarowego wykonano umieszczając zamiast linii opóźniającej element o tłumieniu zerowym. Pomiary przeprowadzono w zakresie do  $500^\circ\text{C}$ . Ograniczenie maksymalnej temperatury pracy  $\text{LiNbO}_3$  wynika z dekompozycji tego kryształu, która powoli zaczyna się w  $300^\circ\text{C}$ , a przyspiesza powyżej  $500^\circ\text{C}$  [11].



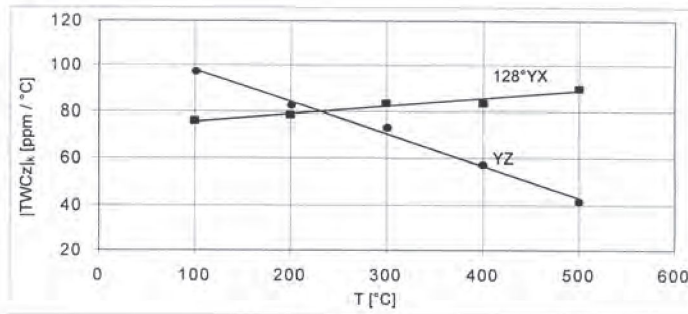
**Rys. 7.** Zmiany częstotliwości  $f|_{\varphi=0^\circ}$  w funkcji temperatury linii opóźniającej.

**Fig. 7.** Changes of frequency  $f|_{\varphi=0^\circ}$  versus delay line temperature.

Na Rys. 7 przedstawiono zmiany częstotliwości w funkcji temperatury. W przypadku orientacji  $\text{YZ}$  częstotliwość malała wyraźnie nieliniowo, co pokrywa się z danymi zamieszczonymi w [3]. W przypadku orientacji  $128^\circ\text{YX}$  zmiany częstotliwości przebiegają bardziej liniowo. W celu określenia czy  $|TWCz|$  zmienia się w funkcji temperatury wykreślono zależność:  $|TWCz|_k = (1/f_{k-1}) \cdot (f_k - f_{k-1}) / (T_k - T_{k-1})$ , gdzie  $k = 1, 2, \dots, 5$ , a  $T_{k=0} = 20^\circ\text{C}$  (Rys. 8).

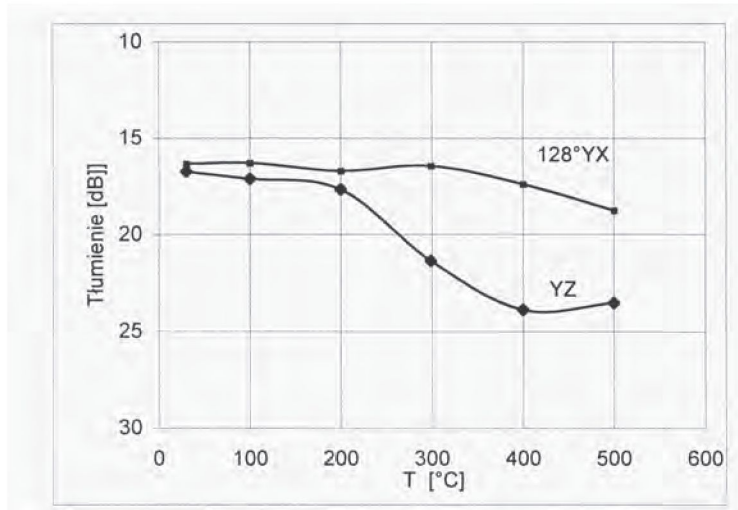
Moduł  $TWCz$  dla obydwu orientacji nie jest stały w funkcji temperatury. Dla orientacji  $\text{YZ}$  maleje w granicach od  $97\text{ ppm}/^\circ\text{C}$  do  $41\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ , natomiast dla orientacji  $128^\circ\text{YX}$  czterokrotnie wolniej wzrasta: od  $75\text{ ppm}/^\circ\text{C}$  do  $89\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ .

W badanym zakresie temperatur tłumienności wtrącenia linii dla orientacji  $128^\circ\text{YX}$  i  $\text{YZ}$ , przedstawione na Rys. 9, zmieniają się odpowiednio o  $2\text{dB}$  i  $7\text{dB}$ . Zmiany tłumienia dla orientacji dla orientacji  $128^\circ\text{YX}$  są na tyle małe, że nie stanowią przeszkody w wykorzystaniu tego podzespołu w układzie generacyjnym.



Rys. 8. Temperaturowy współczynnik częstotliwości |TWCz| w funkcji temperatury.

Fig. 8. Temperature coefficient of frequency dependence of |TCF| changes.



Rys. 9. Zmiany tłumienności wtrącenia w funkcji temperatury.

Fig. 9. Temperature dependence of insertion loss changes.

#### 4. WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań AFP wynika, że z punktu widzenia zastosowań w czujnikach temperatury, niobian litu o orientacji 128°YX jest lepszy w porównaniu do orientacji YZ zarówno pod względem liniowości zmian częstotliwości jak i ze względu na małe zmiany tłumienia w zakresie temperatur od 20°C do 500°C.

Rozbieżności między obliczonymi a zmierzonymi wartościami TWCz są rzędu 3 ppm/°C (4%) i wynikają z błędów pomiarowych.



## LITERATURA

- [1] Hoummady H., Hauden D.: Acoustic wave thermal sensitivity: temperature sensors and temperature compensation in microsensors, *Sensors and Actuators A*, 44 (1994) 177
- [2] Neumeister J., Thum R., Lüder E.: A SAW delay-line oscillator as a high-resolution temperature sensor, *Sensors and Actuators A21-A23* (1990) 670
- [3] Hornsteiner J., Born E., Fischerauer G., Richa E.: Surface acoustic wave sensors for high-temperature applications, *IEEE International Frequency Control Symposium* (1998) 615
- [4] Nye J.F.: Własności fizyczne kryształów, PWN 1962, 38
- [5] Campbell J., Jones W.: A method for estimating optimal crystal cuts and propagation directions for excitation of piezoelectric surface waves, *Trans. on Sonics and Ultrason.*, 15, 4 (1968) 209
- [6] Soluch W., Łysakowska M.: Obliczenia i pomiary parametrów akustycznych fal powierzchniowych w niobianie litu o orientacji 128°YX. *Elektronika*, 41, 3 (2000) 18
- [7] Smith R.T., Welsh F.S.: Temperature dependence of the elastic, piezoelectric, and dielectric constants of lithium tantalate and lithium niobate, *J. Appl. Phys.*, 42, 6 (1971) 2219
- [8] Kim Y., Smith R.: Thermal expansion of lithium niobate single crystals, *J. Appl. Phys.*, 40, 11 (1969) 4637
- [9] Poradnik inżyniera, WNT, Warszawa 1971, 375
- [10] Soluch W.: Design of SAW delay lines for sensors, *Sensors and Actuators A*, 67 (1998) 60
- [11] Hauser R., Reindl L., Biniash J.: High-temperature stability of LiNbO<sub>3</sub> based SAW devices, *IEEE Ultrasonics Symposium*, (2003) 192

## SUMMARY

### TEMPERATURE DEPENDENCE OF SURFACE ACOUSTIC WAVE PARAMETERS IN YZ AND 128°YX ORIENTED LITHIUM NIOBATE IN TEMPERATURE RANGE FROM 20°C TO 500°C.

Results of calculations of temperature coefficient of frequency (TCF) of surface acoustic wave (SAW) in lithium niobate as a function of crystal cut angle are presented. Results of measurements of TCF and attenuation in SAW delay line on YZ and 128°YX lithium niobate substrate are presented as a function of temperature change in the range from 20°C to 500°C. The comparison of orientations YZ and 128°YX shows that the second one is characterised by better frequency change linearity and lower attenuation variation with temperature. The 128°YX lithium niobate substrate is potentially applicable in temperature sensors.