

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

Ernest Brzozowski¹⁾

Przedstawiono obliczenia temperaturowego współczynnika zmian częstotliwości (TWCz) akustycznych fal powierzchniowych (AFP) w niobianie litu (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)

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

największy TWCz w zakresie od -40°C do 160°C , posiada kryształ niobianu litu (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 LiNbO_3 o orientacjach YZ oraz 128°YX . Prezentowane obliczenia TWCz dotyczą zakresu od 0°C do 110°C , natomiast pomiary TWCz i tłumienia linii opóźniających z AFP zostały wykonane w zakresie temperatur od 20°C do 500°C .

2. OBLICZENIA

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

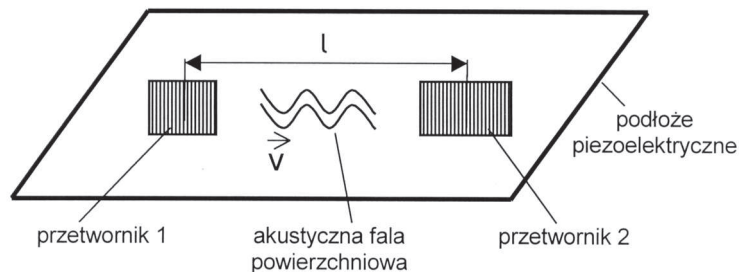
$$\tau(T) = \tau(T_0)[1 + a(T - T_0) + b(T - T_0)^2 + \dots + udT/dt] \quad (1)$$

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 τ jest funkcją prędkości v fali powierzchniowej i długości drogi l , którą fala pokonuje między środkami przetworników:

E. Brzozowski

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

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 τ poprzez zmianę prędkości fali v oraz drogi l . W celu utrzymania stałego przesunięcia fazowego ϕ , 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 ,

λ_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} , ε_{ik}^S , ρ [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 [N/m^2],

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

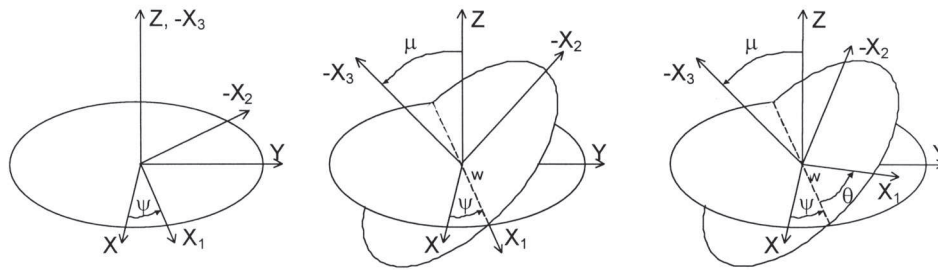
e_{ijk} – stałe sztywności piezoelektrycznej [C/m^2],

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

Termiczna zależność parametrów akustycznej fali powierzchniowej...

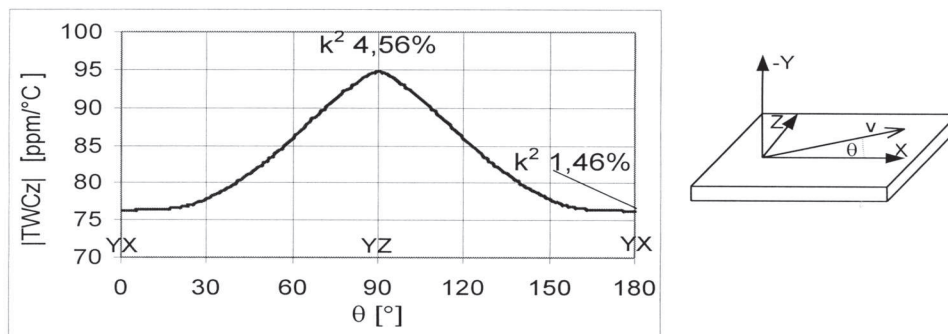
ε_{ik}^S – stałe przenikalności elektrycznej przy zerowym odkształceniu [F/m],
 $T\varepsilon_{ik}^S$ – temperaturowe współczynniki stałych ε_{ik}^S ,
 ρ – gęstość podłoża [kg/m³],
 λ_{ij} – stałe rozszerzalności liniowej podłoża [8].

Podczas obliczeń kierunek i płaszczyzna propagacji fali były określane za pomocą kątów Eulera: ψ , μ , θ (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.

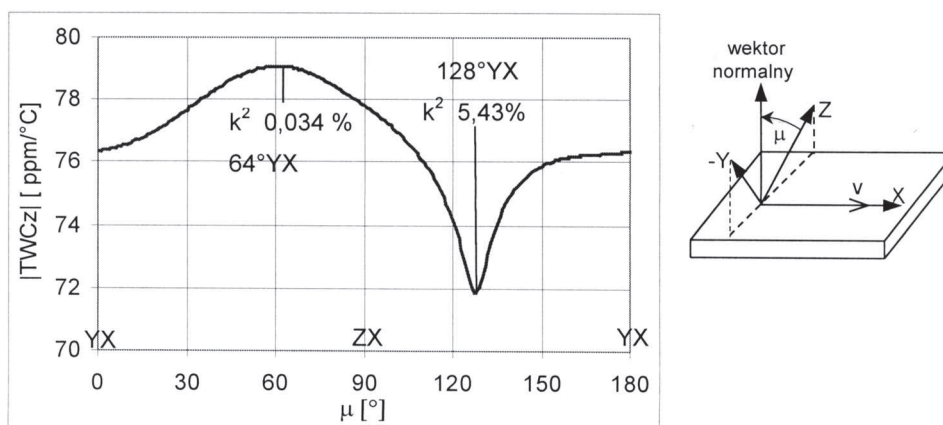
Przecięcie płaszczyzn XY i X_1X_2 wyznacza linię węzłów w . Kąt ψ jest zawarty między osią X a linią węzłów w , kąt μ jest zawarty między osią Z a osią $-X_3$, kąt θ jest zawarty między linią węzłów w a osią X_1 . W przypadku gdy $\mu = 0$ lub $\mu = \pi$ przyjmujemy, że linia węzłów w pokrywa się z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



Rys. 3. Temperaturowy współczynnik częstotliwości (TWCz) w płaszczyźnie cięcia Y w funkcji kąta θ .
Fig. 3. Temperature coefficient of frequency (TCF) in Y cut plate versus angle θ .

E. Brzozowski

Wykonano dwie serie obliczeń TWCz: w funkcji kąta propagacji (θ) w płaszczyźnie cięcia Y (Rys. 3) oraz w funkcji kąta obrotu (μ) cięcia Y-obrotowego (Rys. 4).



Rys. 4. Temperaturowy współczynnik częstotliwości (TWCz) w funkcji kąta obrotu μ cięcia Y-obrotowego.

Fig. 4. Temperature coefficient of frequency versus angle μ of rotated Y cut.

W płaszczyźnie Y (Rys. 3), w zależności od kąta propagacji θ 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 μ (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.

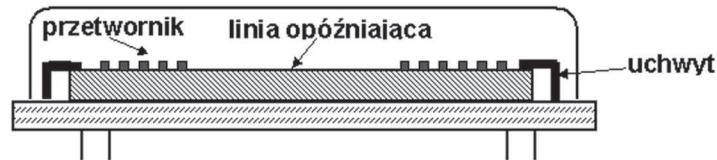
Podsumowując, do eksperymentów wybrano dwa podłoża: $128^\circ YX$ i w celach porównawczych YZ [3].

3. POMIARY

Do badań eksperymentalnych zastosowano linię opóźniającą DL 701 z aluminiowymi elektrodami przetworników [10]. Linię zamontowano 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)

Termiczna zależność parametrów akustycznej fali powierzchniowej...

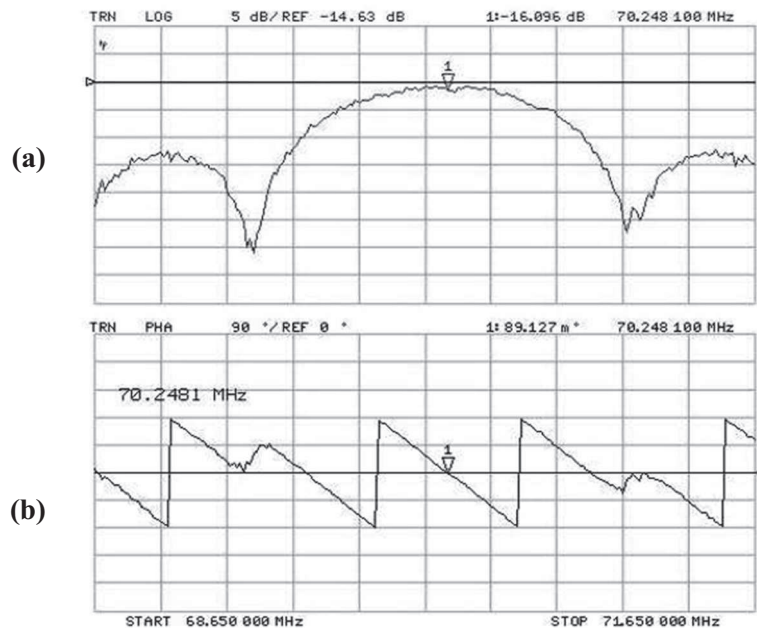
sterowanym przez mikroprocesor połączony z termoparą i grzałkami elektrycznymi. Do badania charakterystyk linii opóźniających użyto analizatora sieci HP 8752A.



Rys. 5. Ilustracja linii opóźniającej w obudowie.

Fig. 5. Schematic illustration of delay line in package.

Przykładową charakterystykę amplitudową i fazową linii na LiNbO_3 o orientacji 128°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).

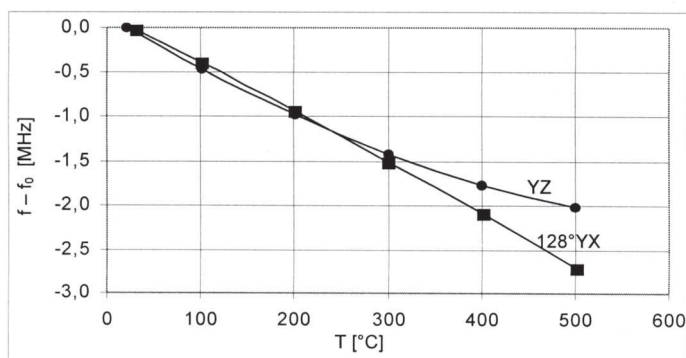


Rys. 6. Charakterystyka amplitudowa (a) i fazowa (b) linii opóźniającej DL 701 na LiNbO_3 o orientacji 128°YX .

Fig. 6. Amplitude (a) and phase (b) characteristic of delay line DL 701 on 128°YX 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°C wyniosły odpowiednio $70,2\text{MHz}$ i $16,1\text{dB}$ dla orientacji 128°YX , oraz $61,9\text{MHz}$ i $17,1\text{dB}$ dla orientacji YZ . Dokładności określenia częstotliwości i temperatury wyniosły 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°C . Ograniczenie maksymalnej temperatury pracy LiNbO_3 wynika z dekompozycji tego kryształu, która powoli zaczyna się w 300°C , a przyspiesza powyżej 500°C [11].



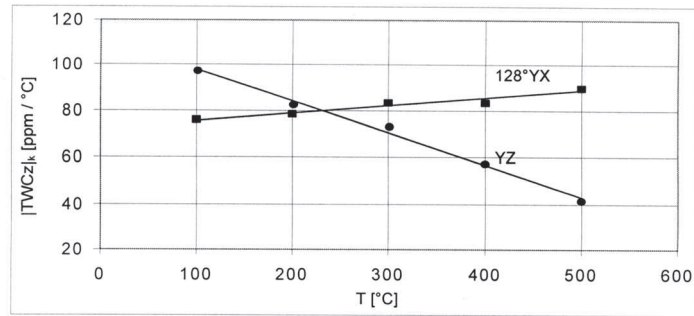
Rys. 7. Zmiany częstotliwości $f|_{\varphi=0^\circ}$ w funkcji temperatury linii opóźniającej.
Fig. 7. Changes of frequency $f|_{\varphi=0^\circ}$ versus delay line temperature.

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

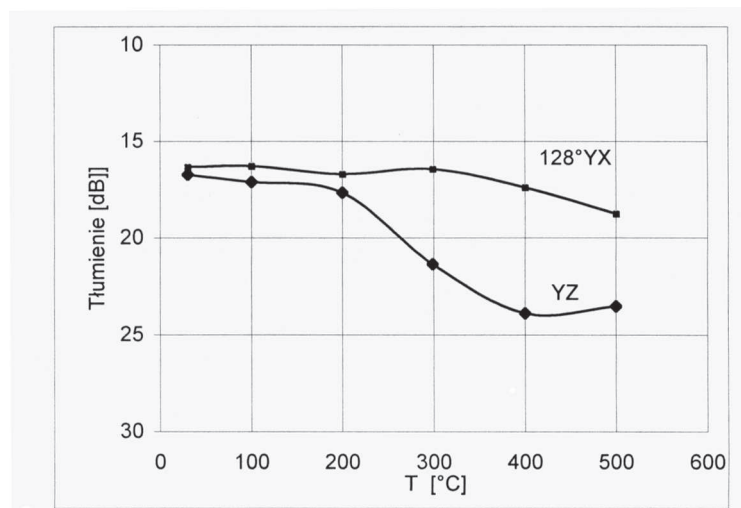
Moduł TWCz dla obydwu orientacji nie jest stały w funkcji temperatury. Dla orientacji YZ maleje w granicach od $97\text{ppm}/^\circ\text{C}$ do $41\text{ppm}/^\circ\text{C}$, natomiast dla orientacji 128°YX czterokrotnie wolniej wzrasta: od $75\text{ppm}/^\circ\text{C}$ do $89\text{ppm}/^\circ\text{C}$.

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

Termiczna zależność parametrów akustycznej fali powierzchniowej...



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 $128^\circ YX$ 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 $20^\circ C$ do $500^\circ C$.

Rozbieżności między obliczonymi a zmierzonymi wartościami $TWCz$ są rzędu $3 \text{ ppm}/^\circ C$ (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 LiNbO₃ 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.