

Aleksander OFILSKI
Tadeusz PUSTELNY
Marian URBAŃCZYK

MATERIAŁY DLA AKUSTOELEKTRONIKI

Streszczenie. Praca zawiera przegląd materiałów piezoelektrycznych, przydatnych w zastosowaniach akustyki mikrofalowej.

1. WSTĘP

Obserwowany w ostatnim dziesięcioleciu szybki rozwój akustyki mikrofalowej wywołuje konieczność skoordynowanego rozwoju urządzeń z badaniami nad właściwościami i technologiami wytwarzania materiałów.

Dla analizy i projektowania układów i urządzeń wykorzystujących efekt propagacji powierzchniowej fali Rayleigha konieczna jest znajomość podstawowych parametrów ośrodka piezoelektrycznego. Efektywność, szerokość pasma przenoszonych częstotliwości, oporność elektryczna przetwornika wynikają z geometrycznej struktury przetworników oraz fizycznych właściwości ośrodka falowego [1-4]. Podstawowymi parametrami ośrodka falowodowego są:

- 1) prędkość rozchodzenia się fali powierzchniowej po swobodnej i metalizowanej powierzchni kryształu piezoelektrycznego,
- 2) kąt między kierunkami prędkości fazowej i grupowej,
- 3) współczynnik sprzężenia elektromechanicznego,
- 4) współczynnik tłumienia fali,
- 5) zmiany temperaturowe parametrów materiału,
- 6) współczynniki charakteryzujące nieliniowe właściwości kryształu,
- 7) współczynniki piezoelektryczne.

Wymienione czynniki wynikają ze struktury kryształu, z jego właściwości sprężystych i elektrycznych. O przydatności danego materiału decyduje konkretnie przeznaczenie układu, choć ogólnie można stwierdzić, że materiały na przyrządy akustoelektryczne powinny charakteryzować się jak najmniej stratami, możliwie dużym współczynnikiem sprzężenia elektromechanicznego, małymi zmianami temperaturowymi parametrów.

W dalszej części pracy przeprowadzono porównanie materiałów z punktu widzenia przydatności w układach mikroelektroniki.

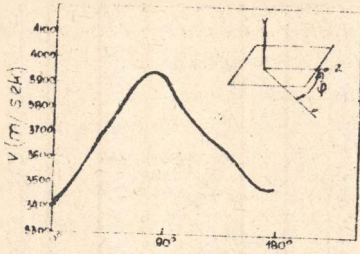
2. PORÓWNANIE MATERIAŁÓW Z PUNKTU WIDZENIA PRZYDATNOŚCI W AKUSTOELEKTRONICE

2.1. Prędkość propagacji

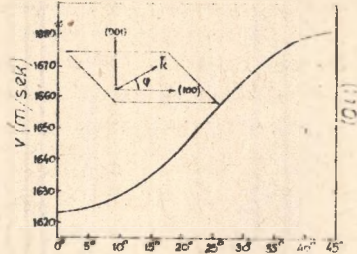
Parametrem mającym zasadnicze znaczenie przy projektowaniu układów na falach powierzchniowych jest prędkość propagacji [5]. Wymiary geometryczne i prędkość propagacji decydują o częstotliwości rezonansowej oraz charakterystyce fazowej i czasowej. W pewnych urządzeniach właśnie prędkość propagacji określa zastosowanie takich czy innych materiałów. W liniach opóźniających, o wymaganym dużym opóźnieniu czasowym sygnału, stosuje się podłoża o małej prędkości propagacji. W układach wysokoczęstotliwościowych dobiera się podłoża o dużej prędkości, ponieważ częstotliwość rezonansowa jest proporcjonalna do prędkości [3]. Ze względu na ważność problemu zrobiono zestawienie prędkości propagacji fali powierzchniowej dla różnych materiałów [5, 6, 7, 8]. W ciałach anizotropowych prędkość fazowa sprężystej fali powierzchniowej zależy od jej kierunku rozchodzenia się (rys. 1) [6, 7].

Tabela 1

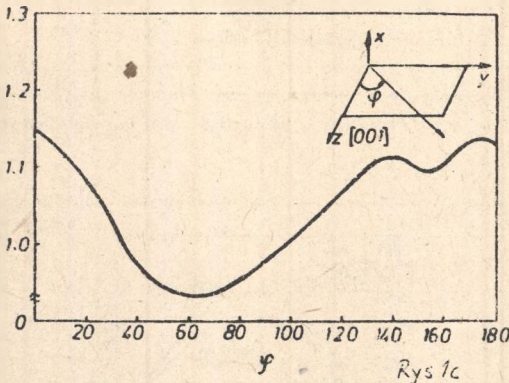
Materiał	Cięcie	Kierunek propagacji	Prędkość m/s
$\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$	001	100	1623,2
	001	110	1680,7
	111	110	1708
	110	001	1624,4
	110	112	1723,5
	110	111	1806,7
	111	121	1788,3
LiNbO_3	Y	Z	3488
	Y + 41,5°	X	4000
	Z	X	3798
	X	Z	3483
LiTaO_3	Z	Y	3329
	Y	Z	3230
	Y + 22°	X	3302
Kwarc	Y	X	3159
	ST	X	3158
	Z	X	3281
GaAs	110	001	2822
	210	111	2621
	111	110	2428
	001	100	2719
$\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$	Y	Z	3177
CdS	Z	101	1700
ZnO	Z	X	2615
TiO_2	Z	X	4807
Ceramika PZT4	P		2210



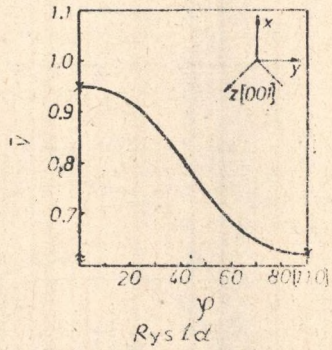
Rys 1a



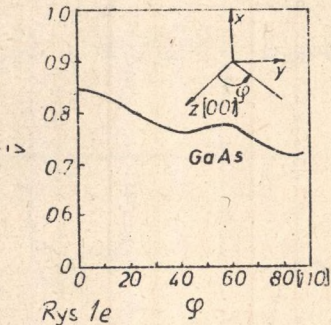
Rys 1b



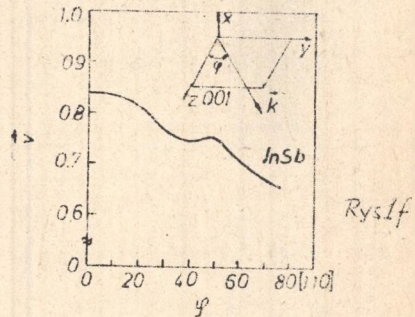
Rys 1c



Rys 1d



Rys 1e



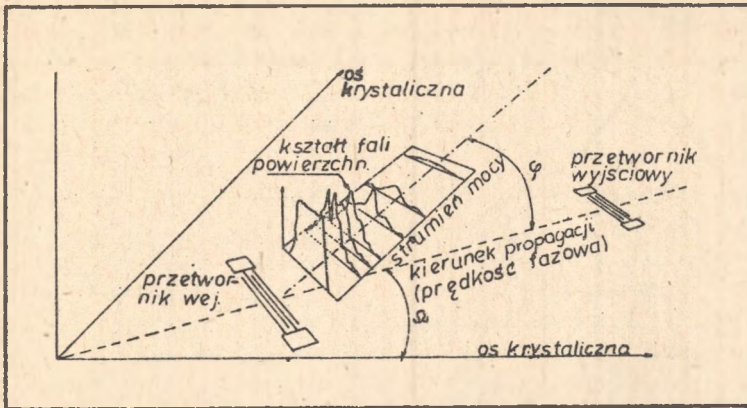
Rys 1f

Rys. 1. Prędkość F.P w zależności od kierunku dla:

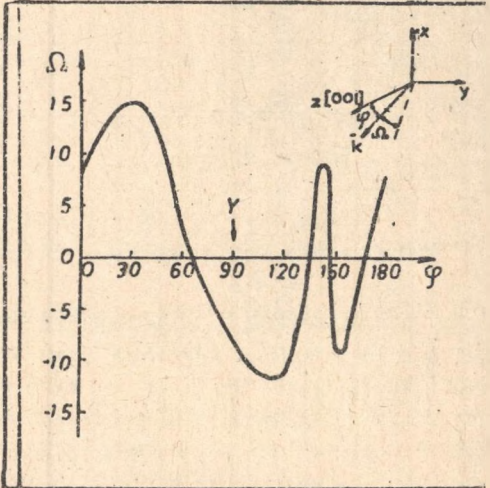
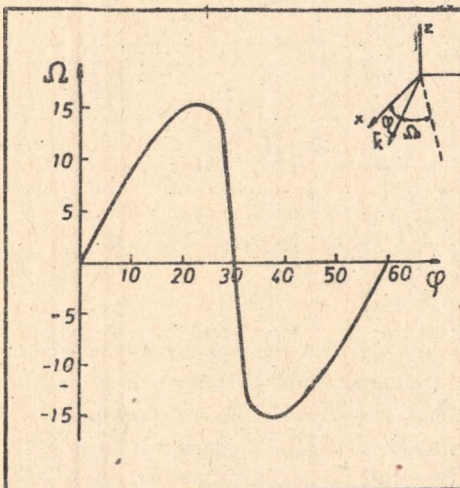
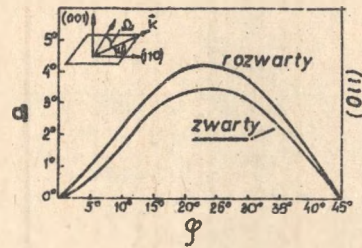
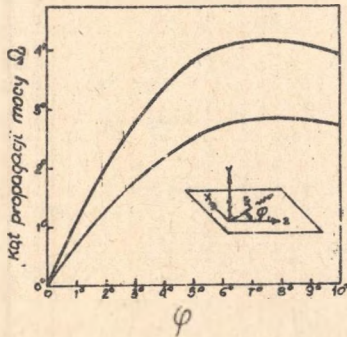
- a) LiNbO_3 , b) $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, c) SiO_2 , d) TiO_2 , e) GaAs , f) InSb

2.2. Anizotropowość prędkości propagacji

Tylko dla pewnych wybranych kierunków w kryształach kierunek rozchodzenia się fali jest równoległy do kierunku rozchodzenia się energii (rys.2, 3). Dla zbudowania układów na falach powierzchniowych należy znać nie tylko prędkość fali, ale i kąty między prędkościami fazową i grupową. Różnica ta może wpływać na zakłócenia charakterystyki częstotliwościowej układu i spowodować znaczne zwiększenie strat energetycznych [1]. Dlatego należy wybierać takie kierunki, dla których prędkość fazowa i grupowa się



Rys. 2. Propagacja F.P. Rayleigha na powierzchni ośrodka anizotropowego



Rys. 3. Kąt między prędkością fazową i grupową dla:
 a) LiNbO_3 , b) $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, c) SiO_2

równoległe. Dla kierunków tych nie występuje dyspersja fali, prędkość propagacji jest niezależna od częstotliwości. Wybór takiego kierunku ważny jest również dlatego, że przy projektowaniu można stosować z dobrą dokładnością aproksymację izotropową właściwości kryształu, co w sposób zasadniczy ułatwia rachunki.

W tabeli 2 przedstawiono wartości kąta dyspersji dla kilku materiałów piezoelektrycznych.

Tabela 2

Materiał	Cięcie	Propagacja	Ω [deg]	$\frac{\partial \Omega}{\partial \varphi}$
LiNbO ₃	Y	Z	0	-1,083
	Y + 41°	X	0	-0,445
	Z	X	0	+0,192
	X	Z	-1,726	-0,610
LiTaO ₃	Z	Y	0	-1,243
	Y	Z	0	-0,211
	Y + 22°	X	0	+0,764
LiGeO ₃	Z	Y	0	-1,342
	Y + 22°	X	0	+0,902
	Y	Z	0	-0,313
Bi ₁₂ GeO ₂₀	001	110	0	-0,304
	111	110	0	+0,366
	110	001	0	+0,236
Bi ₁₂ SiO ₂₀	001			
SiO ₂	Y	X	0	0,653
	ST	X	0	0,378
GaAs	110	X	0	-0,537
	211	111	0	-2,58
Ba ₂ NbNbO ₁₅	Y	Z	0	+0,071

2.3. Współczynnik sprzężenia elektromechanicznego

Z punktu widzenia przydatności materiału piezoelektrycznego do przetwarzania energii mechanicznej w elektryczną, ważną rolę odgrywa współczynnik sprzężenia elektromechanicznego, który definiuje się w następujący sposób:

$$k = \sqrt{\frac{p^2}{p_m \cdot p_e}}$$

gdzie:

- P_p - gęstość energii piezoelektrycznej,
- P_m - gęstość energii mechanicznej,
- P_e - gęstość energii elektrycznej.

Dla materiałów anizotropowych wyrażenie to jest złożoną funkcją stałych sprężystych. Dlatego dla piezoelektryków obliczenie tego współczynnika sprawia dużą trudność. Jego wartość zależy również od kierunku propagującej się w kryształach fali. Jak pokazano w pracy [7] maksymalna wartość współczynnika sprzężenia elektromechanicznego fali powierzchniowej wynosi

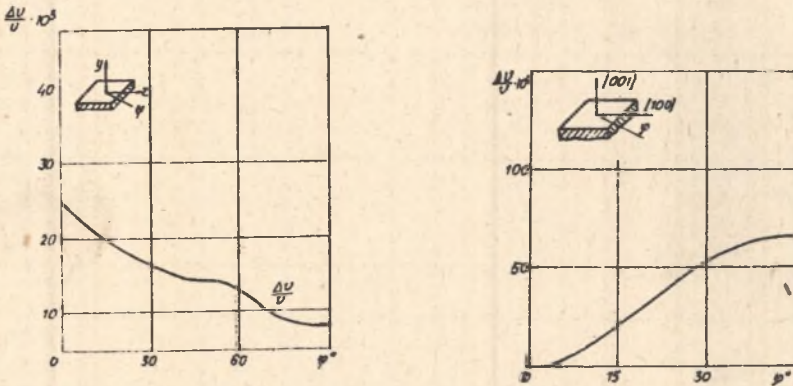
$$k_{\max} = \sqrt{\frac{2\Delta v}{v_0}}$$

gdzie:

$$\Delta v = v_0' - v,$$

v_0' - prędkość propagacji fali po powierzchni swobodnej,

v - prędkość po powierzchni metalizowanej.



Rys. 4. $\frac{\Delta v}{v_0}$ w funkcji kąta propagacji dla:
a) NiNbO_3 , b) $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$

Optymalne dla generacji fali są takie cięcia kryształu i kierunki propagacji, dla których wyrażenie $\frac{\Delta v}{v_0}$ jest maksymalne. Wpływ kierunku na wyrażenie $\frac{\Delta v}{v_0}$ przedstawiono na rys. 4 i w tabeli 3. Warunkiem uzyskania optymalnej efektywności przetwarzania akustycznych fal powierzchniowych w szerokim zakresie częstotliwości jest równość dobroci akustycznej i elektrycznej: $Q_a = Q_e$. Dla każdego materiału piezoelektrycznego istnieje optymalna liczba par elektrod $N_0 = \sqrt{\frac{\pi}{4k}}$. Szerokość pasma wynosi wtedy:

$$\frac{\Delta f}{f_{\text{rez}}} = \frac{1}{N_0}$$

Tabela 3

Materiał	Cięcie	Kierunek propagacji	$\frac{\Delta v}{v_0}$ [%]
$\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$	001	110	0,683
	111	110	0,820
	110	001	0,368
	110	112	0,748
	110	111	0,461
	111	121	0,254
LiNbO_3	Y	Z	2,41
	Y+41°	X	2,77
	Z	X	0,26
	X	Z	2,52
LiTaO_3	Z	Y	0,59
	Y	Z	0,33
	Y+22°	X	0,27
LiIO_3	Z	X	2,80
$\text{Ba}_{12}\text{NaNbO}_{16}$	Y	Z	0,05
GaAs	110	X	0,008
	211	111	0,012
Kwarc	Y	X	0,090
	St	X	0,058
	Y+20°	X	0,120
CdS	C_6		0,31
ZnO	C_6		0,50
PZT-4	P		2,15

Tabela 4

Materiał	Cięcie	Propagacja	k	N_0	$\frac{\Delta f}{f_{\text{rez}}}$ [%]	T_0 [$\mu\text{s}/\text{cm}$]	$T_0 \cdot \frac{\Delta f}{f_{\text{rez}}}$ [$\mu\text{s}/\text{cm}$]
1	2	3	4	5	6	7	8
LiNbO_3	Y	X	0,2195	4	24	2,88	0,69
	Y+42°	X	0,235	4	24	2,5	0,60
	Z	X	0,072	14	7	2,65	0,19
	X	Z	0,2235	4	24	2,88	0,69
$\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$	001	110	0,12	8,5	12,5	5,94	0,72
	111	110	0,128	8	12,5	5,9	0,74
	110	001	0,086	12	8,5	6,4	0,55
Kwarc	Y	X	0,043	18	5,6	3,14	0,17
	ST, Y-20°	X	0,036	22	4,6	3,18	0,15

cd. tabeli 4

1	2	3	4	5	6	7	8
ZnO		C ₆	0,1	8	12	3,74	0,45
CdS		C ₆	0,08	12	9	5,82	0,52
GaAs	001	110	0,026	35	3	4,1	0,12
Ceramika PZT-4		P	0,207	4	23	4,55	1,04

W tabeli 4 podano, dla podstawowych materiałów, współczynnik sprzężenia, optymalną ilość elektrod N_0 , szerokość pasma, czas opóźnienia T_0 oraz współczynnik charakteryzujący tzw pojemność informacyjną danego piezoelektryka.

2.4. Współczynnik tłumienia fali

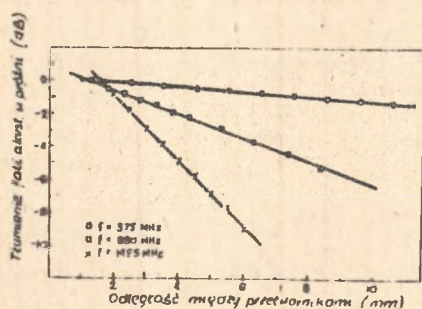
Innym z parametrów układu na falach powierzchniowych, jest współczynnik przetwarzania lub jego odpowiednik logarytmiczny, tzw. straty wnoszone.

Głównymi źródłami strat są [8, 9, 10]:

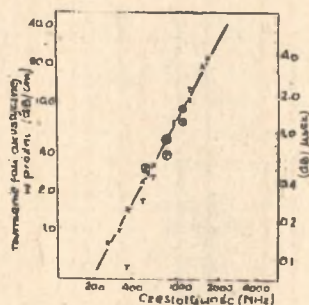
- tłumienie sygnału akustycznego w procesie propagacji,
- straty dyfrakcji,
- dwukierunkowość promieniowania przetwornika,
- straty wynikające z elektrycznego niedopasowania impedancji przetwornika i układów wejściowych oraz tłumienie w układach dopasowujących.

Z punktu widzenia przydatności materiału istotne są straty powatające w procesie propagacji oraz straty dyfrakcji. Ogólnie rzecz biorąc, niskimi stratami charakteryzują się materiały o: małej gęstości, wysokiej temperaturze Debaye'a, małej prędkości propagacji, wysokim stopniu izotropii właściwości sprężystych oraz małej przewodności elektrycznej. Można oczekiwać, że doskonale uformowany kryształ będzie wykazywał najniższe tłumienie ultradźwięków. Ze wzrostem uporządkowania rośnie jednak jego przewodnictwo cieplne, co powoduje wzrost tłumienia. Wykazano doświadczalnie, że wprowadzenie kontrolowanego nieuporządkowania jonów w pewnych kryształach zmniejsza tłumienie w temperaturze pokojowej.

Tłumienie fali na defektach powierzchni może być istotne gdy defekty te mają rozmiary rzędu długości fali Rayleigha. Dla optycznie wypolerowanych kryształów nie ma ono istotniejszego znaczenia, aż do częstotliwości kilkuset MHz. W temperaturach pokojowych zależność tłumienia od częstotliwości jest liniowa (rys. 5 i 6). Rozpraszanie energii na defektach sieci krystalicznej jest małe dla płaszczyzn akustycznej izotropowości w kryształach. Inaczej sprawa przedstawia się dla ceramiek piezoelektrycznych. Ziarzysta struktura ceramiki powoduje, że począwszy od częstotliwości kilkudziesięciu MHz tłumienie jest tak duże, że uniemożliwia wykorzystanie jej jako podłoża. Na tłumienie fali powierzchniowej ma wpływ również ciśnienie



Rys. 5. Tłumienie F.P. w $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ o cięciu 001 i kierunku propagacji 110



Rys. 6. Tłumienie w F.P. $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ o cięciu 111 i kierunku propagacji 110

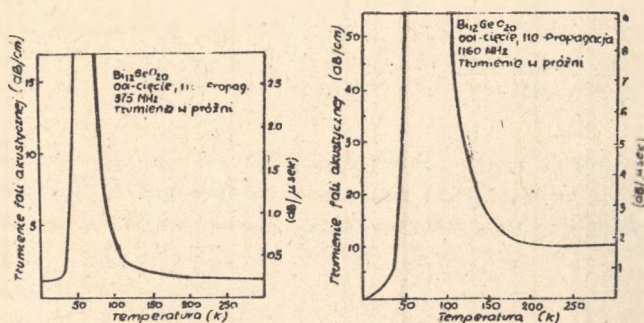
nie wywierane na powierzchnię piezoelektryka przez ośrodek zewnętrzny, np. powietrze. Tłumienie fali powierzchniowej w próżni i w powietrzu przedstawia tabela 5 [7, 10]. Pomiarzy były przeprowadzone przy częstotliwości 1 GHz.

Tabela 5

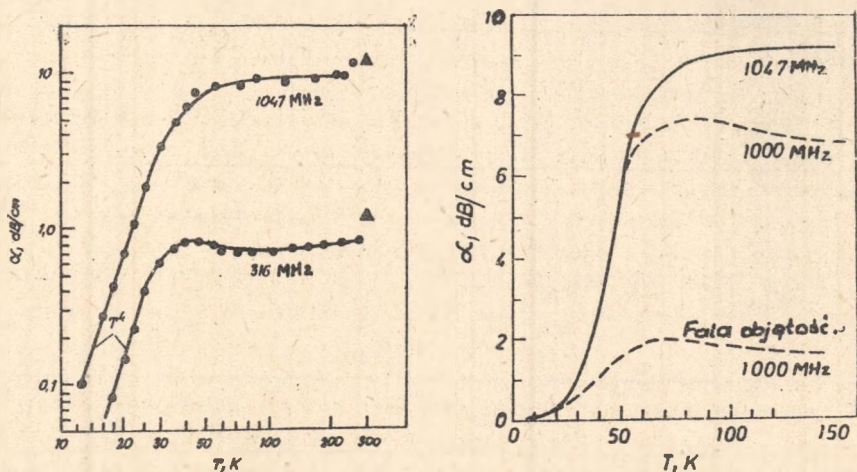
Material	Cięcie	Propagacja	Tłumienie w próżni [dB/μs]	Tłumienie w powietrzu [dB/μs]
LiNbO_3	Y	Z	0,88	1,07
	Y+41°	X	0,75	1,05
	Z	X	0,69	0,93
	X	Z	-	-
LiTaO_3	Z	Y	0,77	1,00
	Y	Z	0,94	1,14
	Y+22°	X	-	-
$\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$	001	110	1,45	1,64
	111	110	1,45	1,64
	110	001	-	-
SiO_2	Y	X	2,15	2,60
	ST	X	2,62	3,09
GaAs	110	X	3,82	4,22
	211	111	3,35	3,62
$\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$	Y	Z	-	3,7

2.5. Zmiany temperaturowe własności

Współczesne układy elektroniczne wymagają dużej stabilności temperaturowej parametrów. Dla układów i urządzeń opartych na falach powierzchniowych należy uwzględnić wpływ temperatury na współczynnik tłumienia oraz na zmiany wymiarów liniowych podłoża falowego. Pomiarzy eksperymentalne wykazały, że dla temperatur wyższych (pokojowych), tłumienie praktycznie jest stałe, niezmiennie z temperaturą. Bardzo silnie zmienia się w zakresie temperatur niskich (kilkadziesiąt $^{\circ}\text{K}$) rys. 7, 8, [8].



Rys. 7. Zmiany tłumienia z temperaturą dla $\text{Bi}_{12}\text{Ge}_{20}$ o cięciu 001 i propagacji 110 dla różnej częstotliwości F.P.



Rys. 8. Zmiany tłumienia F.P. z temperaturą dla kwarcu
a) cięcie Y, propagacja X, b) cięcie X, propagacja Y

Charakter pracy układów na falach powierzchniowych narzuca ostre wymagania stałości (niezmienności) wymiarów. Zmiany wymiarów liniowych falowodu prowadzą do zmian częstotliwości rezonansowej, czasu opóźnienia i

fazy przebiegu. Jest to problem niezwykle ważny, szczególnie dla układów wysokoczęstotliwościowych, kiedy długości fali akustycznej są małe. Przy doborze materiału podłoża piezoelektrycznego, cięcia i kierunku propagacji, koniecznym więc jest uwzględnienie dylatacji temperaturowej (tabela 6).

Tabela 6

Materiał	Cięcie	Kierunek propagacji	$\alpha_T = \frac{1}{T} \frac{dT}{dT} \times 10^8$ [$\frac{1}{\text{deg}}$]
LiNbO ₃	Y	Z	85
	Y+42°	X	96
	Z	X	77
	X	Z	93
LiTaO ₃	Z	Y	69
	Y	Z	35
Bi ₁₂ GeO ₂₀	100	001	-115
	110	001	-140
	110	111	-137
Kwarc	Y	X	-24
	ST	X	0
CdS	X	Y	170
	Y	X	220

Kryształ kwarcu jest, spośród kryształów zbadanych, jedynym materiałem, w którym istnieje takie cięcie, że temperaturowy współczynnik opóźnienia fali α_T w zakresie temperatur pokojowych jest równy zero.

Temperatura ma również wpływ na przewodność elektryczną, stałe dielektryczne, stałe sprężyste i stałe piezoelektryczne.

3. PODSUMOWANIE

Dalszy rozwój akustyki mikrofalowej jest ściśle uzależniony od rozwoju inżynierii materiałowej i technologii stosowanych materiałów, gdyż właściwości fizyczne materiału podłoża falowodowego mają decydujący wpływ na parametry użytkowe przyrządów akustoelektronicznych.

LITERATURA

- [1] Nye L.: Fizyczne właściwości kryształów w ujęciu tensorowym. PWN, Warszawa.
- [2] Smith W.R., et al.: Analysis of interdigital surface wave transducers by use of an equivalent circuit model. IEEE Trans. 1969, t. MTT-17, s. 856.
- [3] Tancrell R.H., Holland M.G.: Acoustic surface wave filters. Proceedings of the IEEE, 59 3, 1971.
- [4] White R.M.: Surface elastic wave propagation and amplification. IEEE Trans. Electron. Dev. 1967, v. ED-14, No 4.
- [5] Campbell J.J., Jones W.R.: Method for estimating optimal crystal cuts and propagation directions. IEEE Trans. Son. 1968, v. SU-15, No 4.
- [6] Solie L.P.: Piezoelectric waves on layered substrates. J. Appl. Phys. v. 44, No 2, Febr. 1973.
- [7] Szaso T.L., Slobodnik A.J.: The Effect of Diffraction on the Design of Acoustic Surface Wave Devices. IEEE Trans. v. SU-20, No 3, July 1973.
- [8] Slobodnik A.J., et al.: Acoustic surface wave loss mechanismus on $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ at microwave Frequencies. J. Appl. Phys. v.43, No 8, 1972.
- [9] Van Dalen P., Creebe C.: Energy considerations on the propagation and the generation of acoustic surface waves in piezoelectric media. Philips. Res. Reports. 1972, v. 27.
- [10] Schmidt R., Voltmer F.: Piezoelectric surface waves in anisotropic layered media. IEEE Trans. MTT-17, 11, 1969.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АКУСТОЭЛЕКТРОНИКИ

Резюме

Работа рассматривает пьезоэлектрические материалы применяемые в микроволновой акустике.

MATERIALS FOR ACOUSTIC ELECTRONICS

Summary

This work contains a survey of piezoelectric materials useful in the application of microwave acoustics.