

Andrzej KRZESIŃSKI

TECHNOLOGIA CIENKICH WARSTW ZnO DLA ZASTOSOWAŃ
W AKUSTOELEKTRONICE I OPTOELEKTRONICE

Streszczenie. W pracy przedstawiono technologię cienkich warstw ZnO pozwalającą na otrzymywanie warstw stekstrowanych w kierunku [001] lub [100]. Oprócz badań krystalograficznych przeprowadzono także szereg pomiarów określających inne własności warstw ZnO, takie jak: współczynniki sprężenia elektromechanicznego czy tłumienność światła laserowego ($\lambda = 6328\text{Å}$).

1. WSTĘP

Akustoelektronika, a inaczej piezoelektronika jest działem elektroniki zajmującym się podzespołami i układami, w których jest wykorzystywany efekt piezoelektryczny. Typowe podzespoły piezoelektryczne, takie jak: przetworniki, rezonatory, filtry i generatory są obecnie szeroko stosowane w urządzeniach elektronicznych. Optoelektronika rozwijała się wraz z optyką światłowodową, która stworzyła możliwości realizacji łączności przy użyciu światłowodów z wykorzystaniem światła laserowego. Użycie światłowodów do przesyłania informacji wywołało zapotrzebowanie na elementy pozwalające przetworzyć sygnały elektryczne na świetlne, a tym samym nakładające informację na wiązkę laserową. Elementami stanowiącymi podstawowe podzespoły linii światłowodowych są modulatory światła, deflektory, sprzęgacze i izolatory. W tych elementach podstawowe znaczenie mają materiały piezoelektryczne o dobrych własnościach optycznych. Elementy piezoelektryczne i optoelektryczne mogą być budowane w oparciu o monokryształy piezoelektryczne, których cena, a także koszt precyzyjnej obróbki są wysokie. Ostatnio coraz częściej płytki monokrystaliczne zastępuje się silnie stekstrowanymi warstwami polikrystalicznymi. Zdecydowanie najlepszymi są w tych zastosowaniach cienkie warstwy ZnO. Podstawową własnością ZnO wykorzystywaną w akusto- i optoelektronice jest piezoelektryczność, z którą związana jest generacja fal sprężystych. Równania (1) i (2) przedstawiają tensorowy zapis prostego i odwrotnego efektu piezoelektrycznego:

$$P_i = d_{ijk} T_{jk}, \quad (1)$$

$$S_{jk} = d_{ijk} E_i. \quad (2)$$

gdzie:

- P_i - składowe wektora polaryzacji elektrycznej,
- E_i - składowe wektora natężenia pola elektrycznego,
- T_{jk} - składowe tensora naprężeń,
- S_{jk} - składowe tensora odkształceń,
- d_{ijk} - składowe tensora modułów piezoelektrycznych.

W postaci macierzowej równania te przyjmują postać (3) i (4) [1]:

$$P_i = d_{ij} T_j, \quad (3)$$

$$S_j = d_{ij} E_i. \quad (4)$$

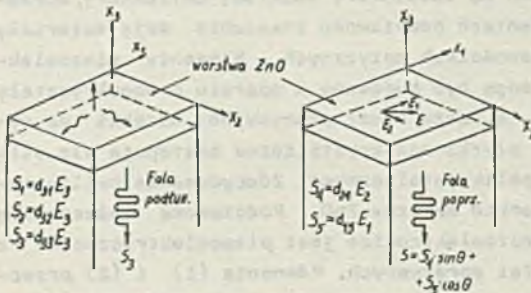
Uwzględniając symetrię kryształu ZnO (kryształ klasy 6 mm) uzyskuje się kolejną redukcję liczb niezależnych zmiennych, a macierz modułów piezoelektrycznych ma postać (5):

$$d_{ij} = \begin{vmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & d_{15} & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & d_{24} & \cdot \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & \cdot & \cdot & \cdot \end{vmatrix} \quad (5)$$

ZnO jest bardzo wygodnym materiałem, ponieważ istnieją tylko trzy niezależne moduły piezoelektryczne, tj. moduły p dłuźne $d_{31} = d_{32}$, d_{33} oraz moduły poprzeczne $d_{24} = d_{15}$. Wynika stąd że pole elektryczne przyłożone wzdłuż osi C (x_3) i związane z modułem d_{33} wywołuje podłużne odkształcenie S_3 , jak pokazuje rys. 1a [2]. Ponadto odkształcenia podłużne S_1 i S_2 powstają w powięzieniu z modułami d_{31} i d_{32} przez pole E_3 . Fale poprzeczne mogą być wzbudzone w monokryształe ZnO przez pole $E_{||}$, co ilustruje rys. 1b.

Z powyższych rozważań wynika, że warstwa silnie steksturowana w kierunku [001] pozwala na efektywną generację fal podłużnych, a w kierunku [100] - poprzecznych.

Z powyższych rozważań wynika, że warstwa silnie steksturowana w kierunku [001] pozwala na efektywną generację fal podłużnych, a w kierunku [100] - poprzecznych.



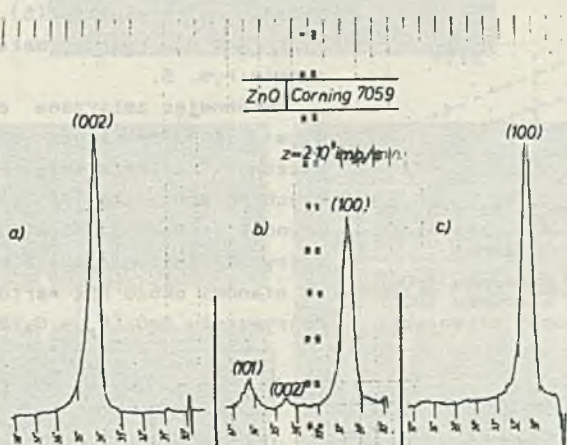
Rys. 1. Generacja fal sprężystych w warstwach ZnO

a) fal podłużnych, b) fal poprzecznych

2. EKSPERYMENT

Warstwy ZnO otrzymywano metodą rozpylania w polu wysokiej częstotliwości przy użyciu urządzenia wykonanego z napyłarki Na-501 oraz generatora w.c.z. o mocy 1 kW i częstotliwości 27,12 MHz. Z punktu widzenia zastosowań w akusto- i optoelektronice najbardziej inte-

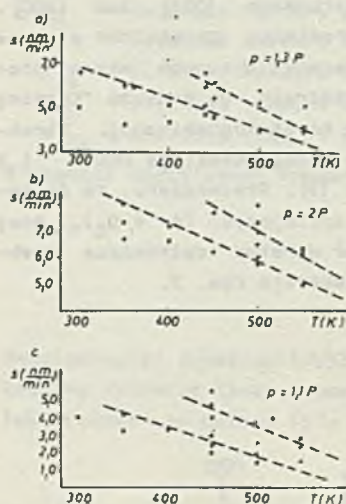
resujące się warstwy silnie stekstrowane w kierunkach $[001]$ lub $[100]$. W związku z tym badania skoncentrowano na określeniu parametrów procesu rozpylenia umożliwiających uzyskanie takich warstw. Wykonano szereg procesów rozpylenia warstw ZnO przy różnych parametrach na podłożu "Corning 7059", otrzymując warstwy o różnej strukturze krystalograficznej. Strukturę warstw określano za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego DRON 1,5 stosując uproszczoną metodę figur biegunowych [3]. Stwierdzono, że dobierając odpowiednie wartości ciśnienia gazów rozpylających ($Ar + O_2$), mocy rozpylenia i temperatury podłoża można uzyskać warstwy całkowicie stekstrowane w kierunkach $[001]$ lub $[100]$, co ilustruje rys. 2.



Rys. 2. Rentgenogramy warstw ZnO otrzymanych przy różnych parametrach procesu rozpylenia

- a) $p = 1,3$ P, $T = 450$ K, $P = 150$ W, b) $p = 1,3$ P, $T = 450$ K, $P = 200$ W
c) $p = 1,3$ P, $T = 450$ K, $P = 250$ W

W doborze odpowiednich parametrów korzystano z makroskopowej teorii kondensacji cienkich warstw w zastosowaniu do ZnO [4]. Ilościowe określenie zależności tekstury warstw ZnO od tych parametrów okazało się niemożliwe. Dopiero wprowadzenie kolejnego parametru jakim jest szybkość kondensacji pozwoliło na dość ściśle powiązanie orientacji warstw ZnO z tą wielkością [5]. Zależność orientacji $[001]$ i $[100]$ od szybkości kondensacji, temperatury podłoża i ciśnienia gazów rozpylających przedstawia rys. 3. Po uzyskaniu warstw o odpowiednich własnościach strukturalnych zmierzono ich współczynniki sprzężenia elektromechanicznego. W tym celu wykonano przetworniki piezoelektryczne z ZnO na prętach monokrystalicznych Al_2O_3 , BGO, YAG i innych [6]. Generację fal sprężystych w zakresie 0,4-2,4 GHz sprawdzono w układzie mikrofalowym, którego schemat blokowy przedstawia rys. 4.

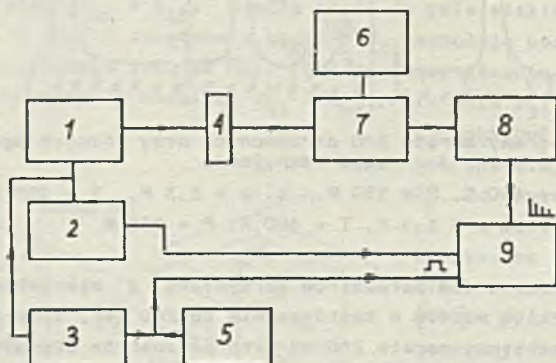


Rys. 3. Orientacja warstw ZnO w zależności od parametrów procesu rozpylania

- orientacja w kierunku [100]
- orientacja w kierunku [001]
- x brak wyróżnionej orientacji

Generator sygnałowy w.cz. (1) modulowany jest impulsami prostokątnymi o czasie trwania 0,3-1 μ s i czasie powtarzania 250 μ s z generatora modulującego (6). Sygnał w.cz. o częstotliwości f_B podawany jest na linię opóźniającą (2), z której przez sprzęgacz kierunkowy (3), do którego doprowadzony jest impuls z generatora heterodynowego (7) o częstotliwości $f_B \pm 30$ MHz, dostaje się na diodę mieszającą wzmacniacza (30 MHz), a następnie na oscyloskop (5). Uzyskane oscylogramy dla różnych materiałów przedstawia rys. 5.

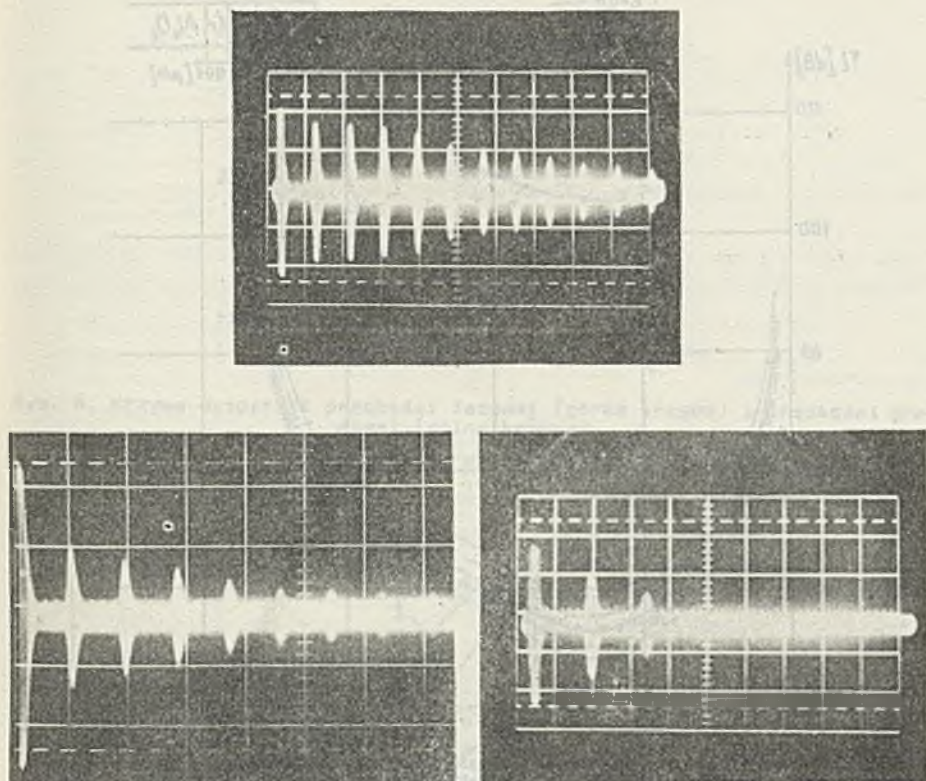
Porównując zmierzone charakterystyki tłumienia z teoretycznymi (rys. 6), obliczonymi na podstawie układów zastępczych przetwornika [7], określono współczynnik sprzężenia elektromechanicznego, który dla fal podłużnych wynosił $k_t = 0,24$, co stanowi około 85% wartości k_t dla monokryształu ZnO ($k_t = 0,28$).



Rys. 4. Układ mikrofalowy do generacji fal sprężystych w zakresie 0,4 - 2,4 GHz

- 1 - generator sygnałowy G4-76A, G4-50, 2 - generator modulujący G5-15, 3 - generator impulsów prostokątnych PGP-4, 4 - rezonator z próbka, 5 - częstotlicznierz, 6 - generator heterodynowy G4-76A, G4-50, 7 - dioda mieszająca, 8 - wzmacniacz, 9 - oscyloskop

Wytworzono także przetworniki do generacji fal powierzchniowych, a następnie w układzie mikrofalowym (rys. 7) zmierzono charakterystyki dyspersji prędkości fazowej i grupowej akustycznej fali Rayleigha (rys. 8). Natomiast na rys. 9 przedstawiono zależność efektywnego współczynnika sprzężenia elektromechanicznego k_{ef} od znormalizowanej grubości warstwy kh, gdzie $k = 2\pi/\lambda$ jest wektorem falowym a h - grubością warstwy ZnO.

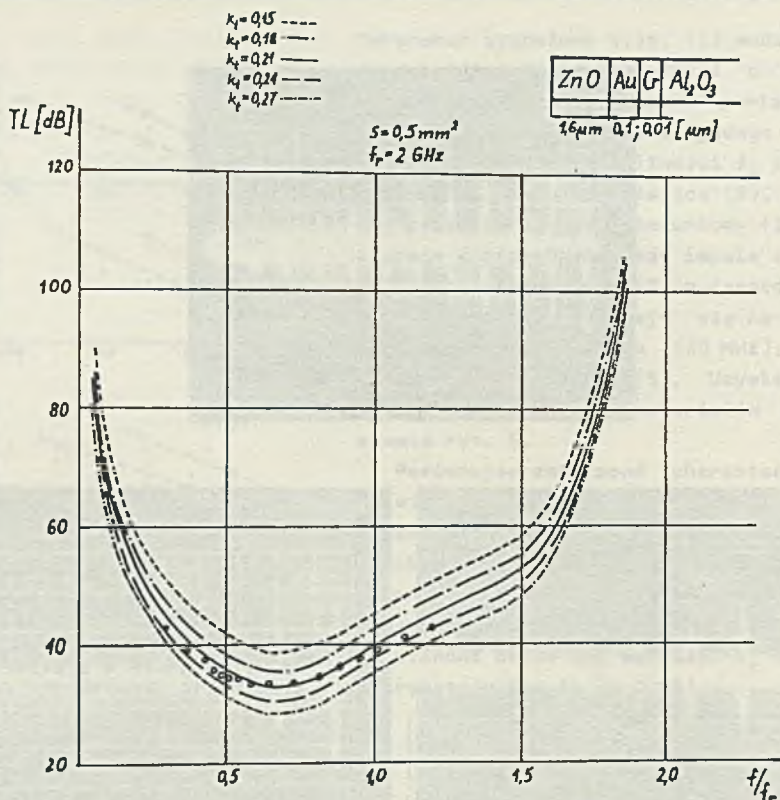


Rys. 5. Oscylogramy echoimpulsów fal podłużnych uzyskanych przy częstotliwości 1 GHz w różnych materiałach

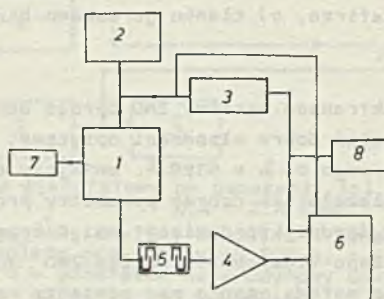
a) rubinie, b) szafirze, c) tlenku germanowo-bizmutowym

Dla zastosowań w optoelektronice warstwy ZnO oprócz dobrych własności piezoelektrycznych powinny mieć dobre własności optyczne, tj. współczynnik tłumienia światła laserowego o $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ mniejszy od 20 dB/cm. Aby uzyskać taką tłumienność należało tak dobrać parametry procesu rozpylenia, aby uzyskać jak najmniejszy średni kąt dewiacji osi „C” kryształitów [7]. Przy kącie dewiacji 5° uzyskano tłumienność warstw ZnO mniejszą od 10 dB/cm. Tłumienność określano metodą opartą na pomiarze natężenia światła rozproszonego wzdłuż światłowodu, wykorzystując układ przedstawiony na rys. 10.

Wiele konstrukcji podzespołów optoelektronicznych wymaga sprzężenia światłowodów warstwowych z ZnO ze światłowodami dyfuzyjnymi. W związku z tym przeprowadzono próby takich sprzężeń w różnych układach. Pozytywna wy-

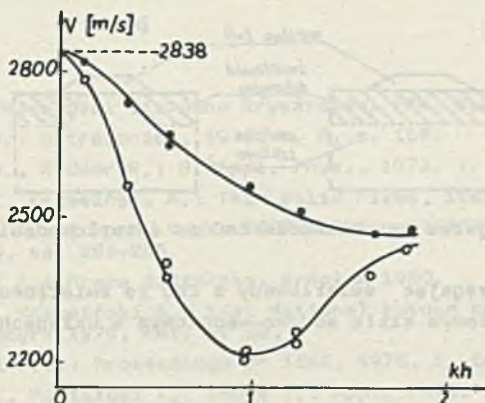


Rys. 6. Zmierzone i teoretyczne charakterystyki tłumienia przetworników ZnO



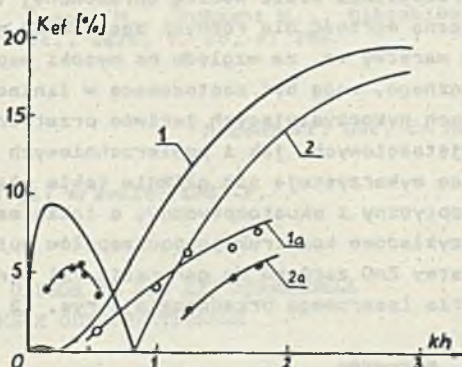
Rys. 7. Układ mikrofalowy do pomiaru prędkości akustycznej fali powierzchniowej

1 - generator fali ciągłej, 2 - generator impulsowy, 3 - generator impulsów prostokątnych, 4 - układ wzmacniający, 5 - badana próbka, 6 - oscyloskop, 7 - licznik częstotliwości, 8 - licznik okresu czasu

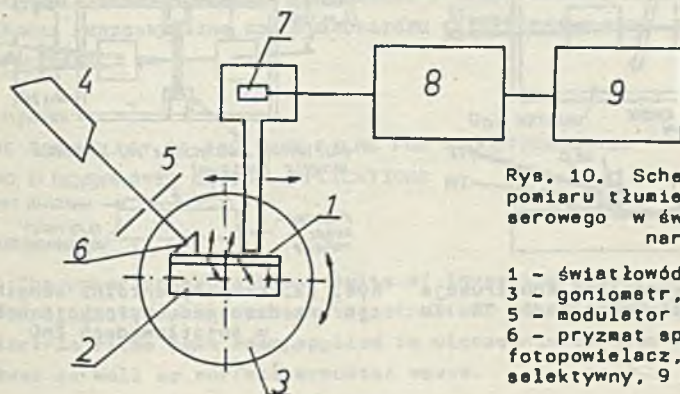


Rys. 8. Krzywe dyspersji prędkości fazowej (górna krzywa) i prędkości grupowej (dolna krzywa)

$$k = 2\pi/\lambda, \quad h - \text{grubość warstwy ZnO}$$

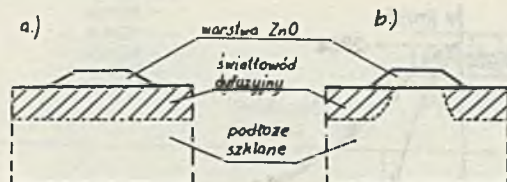


Rys. 9. Zależność efektywnego współczynnika sprzężenia elektromechanicznego k_{ef} od znormalizowanej grubości warstwy kh



Rys. 10. Schemat układu do pomiaru tłumienia światła laserowego w światłowodach płaskich

- 1 - światłowod, 2 - podłoże, 3 - goniometr, 4 - laser He-Ne, 5 - modulator mechaniczny, 6 - pryzmat sprzęgający, 7 - fotopowielacz, 8 - wzmacniacz selektywny, 9 - rejestrator XY



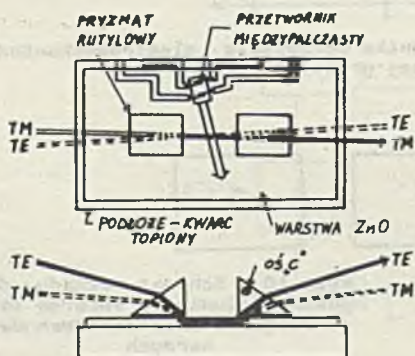
Rys. 11. Sprzęgacze światłowodów ZnO za światłowodami dyfuzyjnymi

niki uzyskano sprzęgając światłowody z ZnO ze światłowodami dyfuzyjnymi wykonanymi w podłożowym szkło sodowo-wapniowym w układach jak na rys. 11.

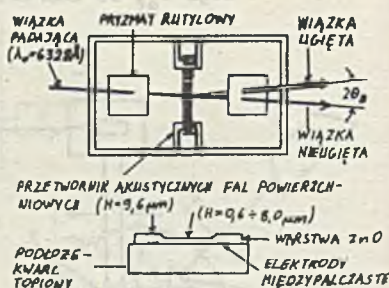
3. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań własności cienkich warstw ZnO, wytworzonych metodą rozpylania w.c.z. według opracowanej technologii, można stwierdzić ich znaczną wartość dla różnych zastosowań w nauce i technice. W piezoelektronice warstwy te, ze względu na wysoki współczynnik sprzężenia elektromechanicznego, mogą być zastosowane w liniach opóźniających, rezonatorach i filtrach wykorzystujących zarówno przetworniki piezoelektryczne ZnO fal objętościowych, jak i powierzchniowych [8, 9, 10].

W optoelektronice wykorzystuje się głównie takie własności warstw ZnO, jak: efekt elektrooptyczny i akustooptyczny, a także małą tłumienność światła laserowego. Przykładowe konstrukcje podzespołów optoelektronicznych wykorzystujących warstwy ZnO zarówno do generacji fal sprężyetych, jak i do propagacji światła laserowego przedstawiają rys. 12 i 13.



Rys. 12. Eksperymentalna konstrukcja urządzenia do konwersji modów TE i TM



Rys. 13. Eksperymentalna konstrukcja urządzenia do dyfrakcji Bragga w światłowodach ZnO

LITERATURA

- [1] Nye J.F.: Własności fizyczne kryształów. PWN, Warszawa 1962.
- [2] de Klerk J.: Ultrasonica, 1970, t. 8, s. 159.
- [3] Lehman H.W., Widmer R.: J. Appl. Phys., 1973, t. 44, s. 3868.
- [4] Kończak S., Krzeziński A.: Thin solid Films, 1981, t. 85, s. 276.
- [5] Krzeziński A.: I Konf. Nauk. TECHNOLOGIA ELEKTRONOWA, Wrocław-Karpacz, 1980, ss. 283-285.
- [6] Krzeziński A.: Praca doktorska. Wrocław 1980.
- [7] Kończak S., Krzeziński A.: 1-st National Autumn on Physics of Thin Films. Szczyrk 1979, Mat. s. 58.
- [8] Hickernell F.S.: Proceedings of IEEE, 1976, t. 64, s. 631.
- [9] Arimoto Y., Morizumi T., Yeuda T.: Appl. Phys. Lett., 1977, t. 31, s. 63.
- [10] Nakagawa Y.: Appl. Phys. Lett., 1977, t. 31, s. 56.
- [11] Sasaki H., Kushibiki J., Chubachi N.: Appl. Phys. Lett., 1974, t. 25, s. 476.
- [12] Kushibiki J., Sasaki H., Chubachi N., Mikošiba M., Shibayama K.: Appl. Phys. Lett., 1975, t. 26, s. 362.

Recenzent: Doc. dr hab. Sławomir Kańczak

Wpłynęło do Redakcji: wrzesień 1983 r.

ТЕХНОЛОГИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК ИЗ ZnO ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЙ
В АКУСТОЭЛЕКТРОНИКЕ И ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ

Р е з ю м е

В статье представлено некоторые свойства пьезоэлектрических пленок ZnO, полученных методом ионного распыления в полне большой частоты. С этих пленок оделано гипрозвуковые преобразователи акустических волн и акустооптические устройства.

THE TECHNOLOGY OF ZnO THIN FILMS FOR ACOUSTOELECTRIC
AND ELECTROOPTIC DEVICE APPLICATIONS

S u m m a r y

The paper presents the results of investigations of the effect of technological parameters on the structure of thin ZnO films. ZnO piezoelectric films have been applied to ultrasonic devices for bulk acoustic waves as well as surface acoustic waves.