

INSTYTUT TECHNOLOGII ELEKTRONOWEJ

POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

PREPRINTY

Raport nr 46

ODDZIAŁYWANIE AKUSTOOPTYCZNE
W ŚWIATŁOWODACH PLANARNYCH
Z PIĘCIOTLENKU TANTALU NA PODŁOŻACH
Z UTLENIONEGO KRZEMU

Praca doktorska

Sergiusz Patela

Promotor:

Prof.dr hab. Aleksander OPILSKI

WROCŁAW 1984

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP	1
2. Cel pracy	3
3. Tekst pracy	3
4. AKAUSTOPTYCZNE PLANARNE MODULATORY ŚWIATŁA - PRZEBIEG LITERATURY	4
5. TEORETYCZNE PODSTAWY PLANARNEGO ODDZIAŁYWANIA AKAUSTOPTYCZNEGO	13
6.1. Planarne oddziaływanie akustooptyczne w struktu- rze warstwowej	13
6.2. Planarne oddziaływanie akustooptyczne typu Bragga w związku fazowe	25
6.3. Planarne oddziaływanie akustooptyczne typu Bragga - efektywność oddziaływania	43
6.4. Propagacja światła w światłowodach planarnych	48
6.5. Generacja i propagacja akustycznej fali powierz- chniowej w strukturach warstwowych	51
6.5.1. Generacja i propagacja fali powierzchniowej w strukturach warstwowych	51
6.5.2. Propagacja fali powierzchniowej w struktu- rach warstwowych	59
7. TECHNOLOGIA WYKONANIA	66
7.1. Technologia wykonania	66
7.2. Technologia wykonania	66
7.2.1. Technologia wykonania	66
7.2.2. Technologia wykonania	66
7.3. Otrzymywanie z silnika akustooptycznego	66

Serdecznie dziękuję

Promotorowi, Prof.dr hab. Aleksandrowi OPILSKIEMU
za opiekę naukową.

Wyrażam też podziękowanie

Prof.dr hab.inż. Benedyktowi LICZNERSKIEMU
za opiekę i pomoc.

Bardzo dziękuję wszystkim Kolegom, którzy przyczy-
nili się do powstania tej pracy, a w szczególności
Janowi KĄDZIELI i Jackowi RADOJEWSKIEMU

SPIS TREŚCI

	str.
1. WSTĘP	1
C e l p r a c y	3
T e z a p r a c y	3
2. AKUSTOOPTYCZNE PLANARNE MODULATORY ŚWIATŁA - PRZEGLĄD LITERATURY	4
3. TEORETYCZNE PODSTAWY PLANARNEGO ODDZIAŁYWANIA AKUSTOOPTYCZNEGO	13
3.1. Planarne oddziaływanie akustooptyczne w struktu- rze warstwowej	13
3.2. Planarne oddziaływanie akustooptyczne typu Bragga - związki fazowe	15
3.3. Planarne oddziaływanie akustooptyczne typu Bragga - efektywność oddziaływania	23
3.4. Propagacja światła w światłowodach planarnych ..	28
3.5. Generacja i propagacja akustycznej fali powierz- chniowej w strukturach warstwowych	31
3.5.1. Generacja akustycznej fali powierzchniowej w strukturach warstwowych	31
3.5.2. Propagacja akustycznej fali powierzchniowej w strukturach warstwowych	39
4. TECHNOLOGIA PLANARNEGO MODULATORA ŚWIATŁA	46
4.1. Technologia światłowodów planarnych - przegląd literatury	46
4.2. Otrzymywanie i własności światłowodów z Ta_2O_5 na podłożu z utlenionego krzemu	55
4.2.1. Technologia nanoszenia światłowodów z Ta_2O_5 ..	55
4.2.2. Własności światłowodów z Ta_2O_5 wytwarzanych me- todą reaktywnego rozpylania w.c.z.	61
4.3. Otrzymywanie i własności światłowodów ZnO na po- dłożu z utlenionego krzemu	63

	str.
4.3.1. Technologia nanoszenia światłowodów z ZnO	63
4.3.2. Własności otrzymanych warstw ZnO	70
4.4. Technologia przygotowania podłoży z utlenionego krzemu pod światłowody z Ta ₂ O ₅ i ZnO	71
4.5. Technologia wykonania przetwornika akustycznej fali powierzchniowej	72
5. ANALIZA ODDZIAŁYWANIA AKUSTOOPTYCZNEGO W ŚWIATŁOWO- DACH PLANARNYCH Z Ta ₂ O ₅ i ZnO NA PODŁOŻACH Z UTLE- NIONEGO KRZEMU	73
5.1. Analiza efektywności oddziaływania akustooptycz- nego w światłowodach planarnych z ZnO	76
5.2. Analiza efektywności oddziaływania akustooptycz- nego w światłowodach planarnych z Ta ₂ O ₅	84
5.2.1. Własności sprężyste i rozkład deformacji w Ta ₂ O ₅	84
5.2.2. Rozkład deformacji w światłowodach z Ta ₂ O ₅	91
5.2.3. Analiza efektywności oddziaływania akustooptycz- nego w światłowodach planarnych z Ta ₂ O ₅	94
5.3. Związki fazowe i zależności dyspersyjne w świat- łowodach z ZnO	98
5.4. Związki fazowe i zależności dyspersyjne w świat- łowodach z Ta ₂ O ₅	103
6. BADANIE ODDZIAŁYWANIA AKUSTOOPTYCZNEGO W ŚWIATŁOWO- DACH Z Ta ₂ O ₅ i ZnO	107
6.1. Opis struktury modulatora	107
6.2. Badanie propagacji akustycznej fali powierzchni- wej	111
6.2.1. Opis układu pomiarowego	111
6.2.2. Pomiar długości akustycznej fali powierzchniowej	114
6.2.2.1. Prędkość akustycznej fali powierzchniowej ..	114
6.2.3. Pomiar mocy akustycznej fali powierzchniowej .	114
6.2.3.1. Analiza oddziaływania światła z akustyczną falą powierzchniową przy odbiciu od struktury warstwowej	116

	str.
6.2.3.2. Pomiar odkształcenia powierzchni i mocy akustycznej fali powierzchniowej	120
6.3. Badanie oddziaływania akustooptycznego i parametrów optycznych modulatora	123
6.3.1. Opis układu pomiarowego	123
6.3.2. Pomiar współczynników załamania i grubości światłowodów	123
6.3.3. Pomiar efektywności oddziaływania akustooptycznego	125
6.4. Pomiar charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej przetwornika akustycznej fali powierzchniowej	129
6.5. Pomiar współczynnika sprzężenia elektromechanicznego warstwy ZnO	129
7. PODSUMOWANIE	130
8. WNIOSKI	132
9. LITERATURA	134

1. WSTĘP

Od momentu wynalezienia w 1947 roku tranzystora rozwój elektroniki zmierzał w kierunku zwiększenia jego niezawodności i zmniejszenia wymiarów, a z chwilą wprowadzenia układów zintegrowanych - w kierunku zwiększenia gęstości upakowania elementów. Współczesne układy scalone charakteryzują się dużą niezawodnością i gęstością upakowania elementów, małym poborem mocy i niską ceną.

Podobnych efektów można się spodziewać po zastosowaniu techniki integracji do układów optycznych. Coraz niższy koszt i wyższa jakość włókien światłowodowych sprawiły, że zaczynają one dziś wypierać klasyczne linie telekomunikacyjne wszędzie tam, gdzie niezbędna jest duża przepustowość i szybkość przesyłania informacji.

Fala świetlna może być wykorzystana nie tylko do przesyłania, lecz również do przetwarzania informacji w tak zwanych komputerach optycznych. O ile jednak zastosowanie praktyczne światłowodów włóknistych w telekomunikacji nie budzi już dziś żadnych wątpliwości, o tyle komputery optyczne nie wyszły do dziś z fazy badań laboratoryjnych. Podstawową przyczyną takiego stanu rzeczy jest ich wysoki koszt, ciężar i wymagania dotyczące stabilności i dokładności wykonania elementów. Wykonanie elementów optycznych w postaci planarnej na jednym podłożu poprzez zmniejszenie kosztów, wymiarów i zwiększenie niezawodności i wytrzymałości mechanicznej procesorów optycznych wpłynie niewątpliwie na zwiększenie ich atrakcyjności. W telekomunikacji optycznej układy optyki zintegrowanej mogą być zastosowane do bezpośredniej obróbki sygnału świetlnego bez wstępnego przetwa-

rzania na sygnał elektryczny. W chwili obecnej, po piętnastu latach rozwoju optyki zintegrowanej, wykazano, że możliwa jest realizacja niemal wszystkich elementów optycznych w wersji planarnej. Wykonano również pierwsze modele urządzeń takich jak analizator widma, przetworniki cyfra-analog lub analog-cyfra, przełączniki i multipleksery dla telekomunikacji światłowodowej.

Większość układów optyki zintegrowanej wykonuje się dziś na podłożach z niobianu litu. Trudno jednak przypuszczać, aby wszystkie spośród ogromnej liczby optycznych układów scalonych dały się optymalnie zrealizować w tym jednym materiale.

Szczególnie interesująca wydaje się być możliwość wykonania elementów optyki zintegrowanej na podłożach krzemowych stosowanych w elektronice półprzewodnikowej. Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość szerokiego korzystania z doskonale dziś opanowanej technologii, a w przyszłości możliwość integracji na jednym podłożu układów optycznych i elektronicznych.

Centralnym elementem zintegrowanych procesorów optycznych typu analizatora widma jest modulator akustooptyczny. W przypadku realizacji struktury modulatora na podłożu krzemowym lub innym niepiezoelektrycznym, jako światłowodu i ośrodka akustooptycznego można użyć dowolnego materiału o współczynniku załamania większym od współczynnika załamania podłoża i małych stratach optycznych. Spośród licznej grupy światłowodów planarnych, w których wykonano modulatory akustooptyczne, na szczególną uwagę zasługują dwa: światłowod z tlenku cynku $/\text{ZnO}/$ i światłowod z pięciotlenku tantalu $/\text{Ta}_2\text{O}_5/$. Pierwszy - ponieważ umożliwia wykonanie w jednej warstwie przetwornika akustycznej fali powierzchniowej i światłowodu, drugi ze względu na największą -

wśród cytowanych w literaturze - efektywność oddziaływania akustooptycznego. Zintegrowane modulatory akustooptyczne w światłowodach ZnO są dziś dobrze opisane w literaturze [1, 2, 3]. Jeżeli chodzi o światłowody z pięciotlenku tantalu, to jak dotąd potwierdzono eksperymentalnie możliwość wykonania w nich modulatora akustooptycznego i stwierdzono dużą efektywność oddziaływania dla modów TM [4, 5]. Brak jest natomiast analizy efektywności oddziaływania w strukturze i dokładnego opisu technologii wykonania i własności modulatora.

C e l p r a c y :

1. Opracować technologię i wykonać planarny modulator akustooptyczny w światłowodzie z pięciotlenku tantalu na podłożu z utlenionego krzemu.

2. Przeanalizować oddziaływanie akustooptyczne i opisać własności modulatora wykonanego w strukturze $Ta_2O_5/SiO_2/Si$, wyjaśnić przyczynę różnicy efektywności oddziaływania dla modów TE i TM i obliczyć współczynniki elastooptyczne Ta_2O_5 .

T e z a p r a c y

Techniki typowe dla mikroelektroniki półprzewodnikowej umożliwiają realizację zintegrowanego modulatora akustooptycznego na podłożu krzemowym w układzie wielowarstwowym (światłowod Ta_2O_5 - przetwornik fali powierzchniowej ZnO - SiO_2 - Si), służącego do budowy zintegrowanych procesorów optycznych.

2. AKUSTOOPTYCZNE PLANARNE MODULATORY ŚWIATŁA - PRZEGLĄD LITERATURY

Effektem akustooptycznym nazywamy zjawisko oddziaływania fali akustycznej z falą świetlną. W roku 1921 Brillouin teoretycznie wykazał [6], że wiązka światła, przechodząc przez ciecz, w której rozchodzi się fala akustyczna, ulega dyfrakcji, podobnie jak na siatce dyfrakcyjnej. W roku 1932 przewidywania Brillouina eksperymentalnie potwierdzili Debye i Sears [7] i niezależnie od nich Lucas i Bicuard [8]. Z chwilą wykonania w drugiej połowie lat sześćdziesiątych pierwszych światłowodów planarnych pojawiła się możliwość zrealizowania oddziaływania akustooptycznego w nowej konfiguracji: pomiędzy falą świetlną prowadzoną w światłowodzie i akustyczną falą powierzchniową. Oddziaływanie w takiej konfiguracji będziemy nazywać planarnym oddziaływaniem akustooptycznym. Pierwszy planarny modulator akustooptyczny wykonał w 1970 roku Kuhn i in. [9].

Ze względu na konstrukcję, można wyróżnić cztery podstawowe konfiguracje planarnego modulatora akustooptycznego:

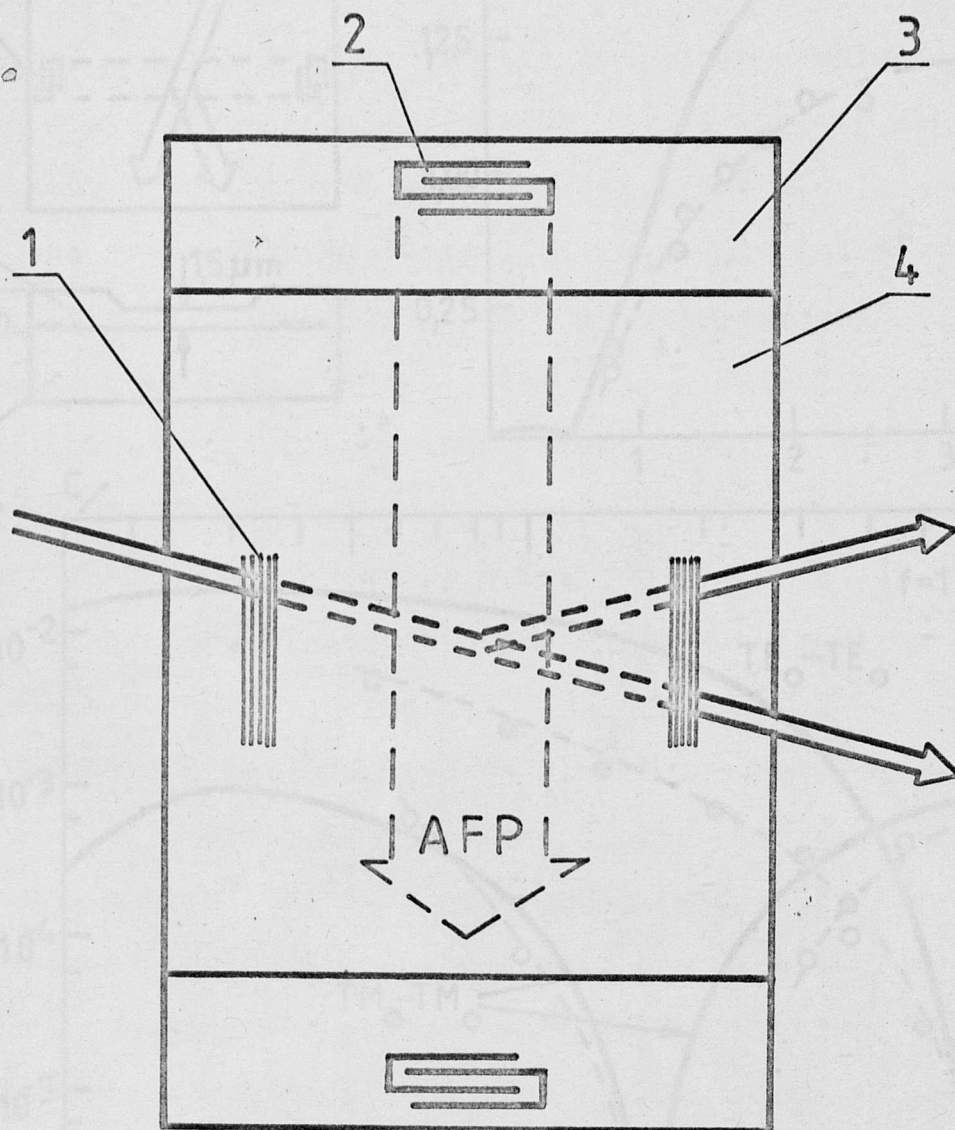
1. Amorficzna warstwa światłowodowa na podłożu piezoelektrycznym.
2. Piezoelektryczna warstwa światłowodowa na podłożu niepiezoelektrycznym.
3. Światłowod wykonany w podłożu piezoelektrycznym.
4. Amorficzna warstwa światłowodowa na podłożu niepiezoelektrycznym i dodatkowo naniesiona warstwa piezoelektryczna do generacji akustycznej fali powierzchniowej.

Na rysunku 2.1. przedstawiono schemat modulatora wykonanego przez Kuhna i in. [9]. Dyfrakcja Bragga zachodziła w świat-

łowodzie szklanym naniesionym na podłożu kwarcowym, fala akustyczna była generowana za pomocą przetworników międzypalczastych. Przy mocy akustycznej $P_a = 0,18 \text{ W}$ efektywność dyfrakcji wynosiła 66%. Podobną konfigurację modulatora zastosowano w pracach [10-13]. Na podłożu z kwarcu wykonano światłowody szklane [9, 15], TeO_2 [11], Ta_2O_5 [12, 13]. Zaletą krystalicznego kwarcu, jako materiału na podłoża, jest jego mały współczynnik załamania $/n_o = 1,546, n_e = 1,555/$. Podłoże o małym współczynniku załamania daje dużą dowolność przy wyborze materiału światłowodu. Wadą kwarcu jest mały współczynnik sprzężenia elektromechanicznego dla fali powierzchniowej $/k^2 = 0,22\%$ dla cięcia Y i propagacji Z/.

Planarny modulator akustooptyczny na podłożu z niobianu litu $/k^2 = 5,04\%$ dla cięcia Y i propagacji Z/ wykonano stosując światłowody o współczynniku załamania większym od 2,2 : $\text{ZnS}, \text{As}_2\text{S}_3$ [16]. Stosowano również warstwy szklane nanoszone na metalową warstwę pośrednią [15].

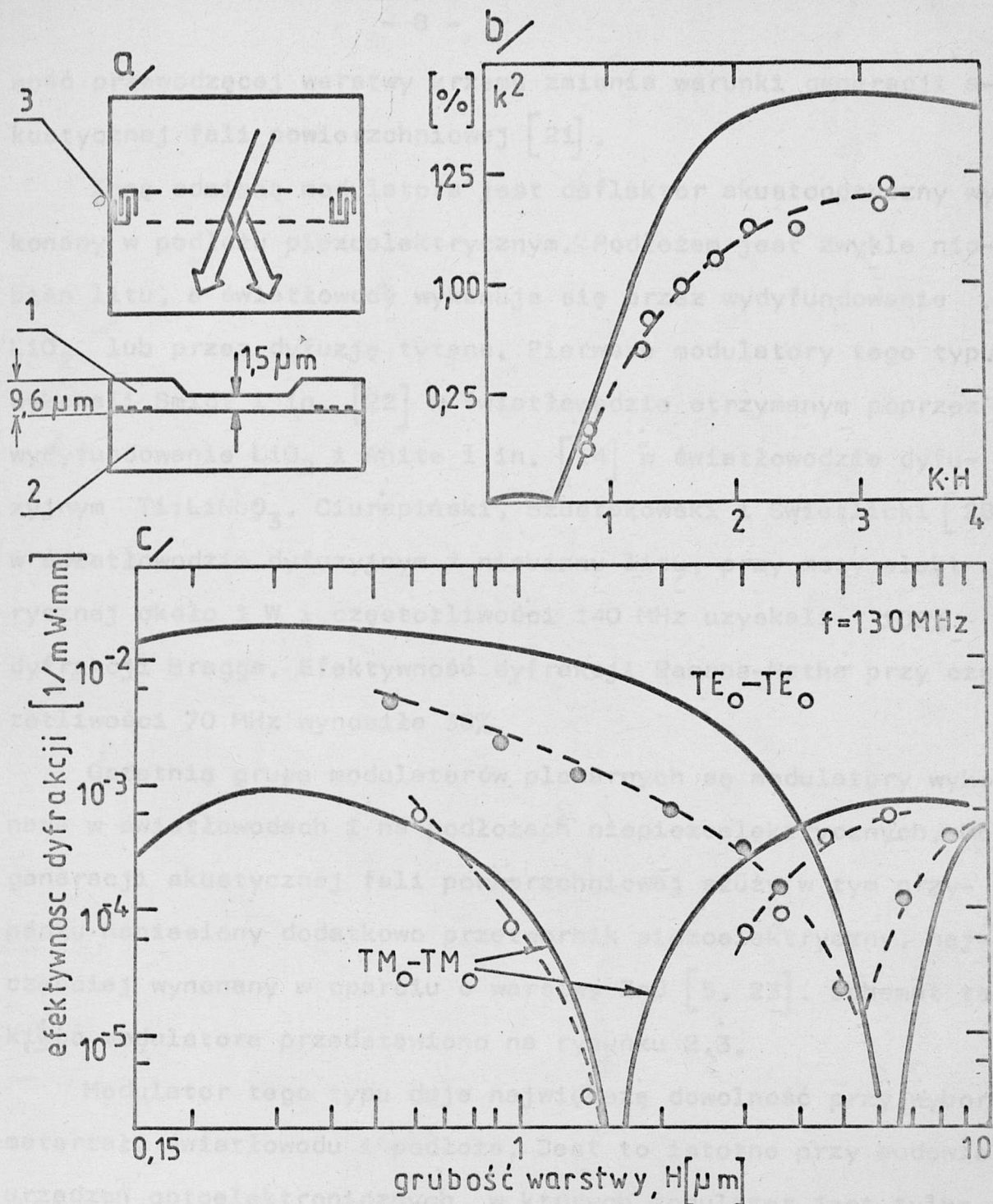
Modulator akustooptyczny można również wykonać na podłożu niepiezoelektrycznym, jeżeli materiał światłowodu jest piezoelektrykiem. Światłowody piezoelektryczne wykonuje się głównie z tlenku cynku [1, 5, 17-20]. Jako podłoża stosuje się topiony kwarc, szkło, utleniony krzem. Chubachi i Sasaki [2] przeprowadzili szczegółową analizę modulatorów akustooptycznych z tlenku cynku, wykonanych na podłożach z topionego kwarcu. Na rysunku 2.2. przedstawiono schemat modulatora z tlenku cynku oraz wykresy przedstawiające efektywność generacji akustycznej fali powierzchniowej i efektywność oddziaływania akustooptycznego w funkcji grubości warstwy ZnO . Podobne modulatory wykonano na podłożach z utlenionego krzemu [5]. W tym przypadku obec-



Rys. 2.1. Schemat planarnego modulatora akustooptycznego [9].

Dyfrakcja Bragga zachodzi w światłowodzie szklanym naniesionym na podłożu kwarcowym. Akustyczna fala jest wzbudzana w podłożu za pomocą przetworników międzypalczastych.

1 - sprzęgacz siatkowy, 2 - przetwornik międzypalczasty, 3 - podłoże z krystalicznego kwarcu, 4 - warstwa szklana



Rys. 2.2. Schemat i charakterystyki planarnego modulatora akustooptycznego wykonanego w światłowodzie ZnO [1].
 a - schemat modulatora, b - efektywność generacji akustycznej fali powierzchniowej w funkcji grubości warstwy [18], c - efektywność oddziaływania akustooptycznego w funkcji grubości światłowodu [17].
 1 - warstwa ZnO, 2 - podłoże z topionego kwarcu, 3 - przetwornik międzypalczasty. Na wykresach linią ciągłą zaznaczono przebiegi wyliczone teoretycznie, linią przerywaną aproksymowano wyniki pomiarów

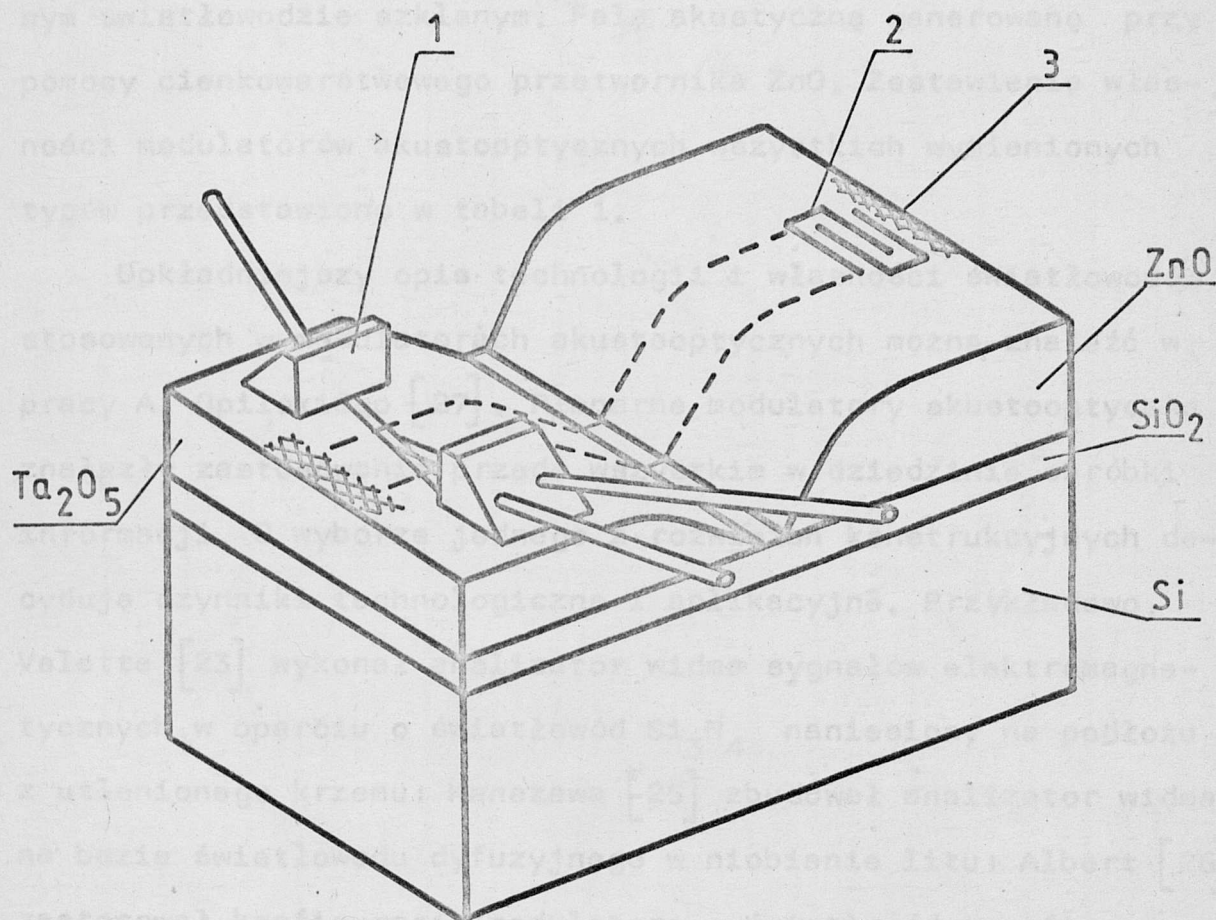
ność przewodzącej warstwy krzemu zmienia warunki generacji akustycznej fali powierzchniowej [21].

Inną odmianą modulatora jest deflektor akustooptyczny wykonany w podłożu piezoelektrycznym. Podłożem jest zwykle niobian litu, a światłowodowy wykonuje się przez wydyfundowanie LiO_2 lub przez dyfuzję tytanu. Pierwsze modulatory tego typu wykonali Smidt i in. [22] w światłowodzie otrzymanym poprzez wydyfundowanie LiO_2 i White i in. [14] w światłowodzie dyfuzyjnym Ti:LiNbO_3 . Ciurapiński, Szustakowski i Świetlicki [28] w światłowodzie dyfuzyjnym z niobianu litu, przy mocy elektrycznej około 1 W i częstotliwości 140 MHz uzyskali 100% dyfrakcji Bragga. Efektywność dyfrakcji Ramana-Natha przy częstotliwości 70 MHz wynosiła 38%.

Ostatnią grupą modulatorów planarnych są modulatory wykonane w światłowodach i na podłożach niepiezoelektrycznych. Do generacji akustycznej fali powierzchniowej służy w tym przypadku naniesiony dodatkowo przetwornik piezoelektryczny, najczęściej wykonany w oparciu o warstwę ZnO [5, 23]. Schemat takiego modulatora przedstawiono na rysunku 2.3.

Modulator tego typu daje największą dowolność przy wyborze materiału światłowodu i podłoża. Jest to istotne przy budowie urządzeń optoelektronicznych, w których modulator jest tylko jednym z elementów. Inne składniki układu nakładają wtedy własne ograniczenia konstrukcyjne i materiałowe.

Najczęściej stosowanym podłożem jest krzem [5, 23]. Można również stosować topiony kwarc, szkło, szafir. Podstawowe materiały na warstwy światłowodowe planarnych modulatorów akustooptycznych to: pięciotlenek tantalum, azotek krzemu, szkło Corning, tlenek cynku [5]. ZnO wymieniono tu dlatego, że warstwa



Rys. 2.3. Schemat planarnego modulatora akustooptycznego na podłożu z utlenionego krzemu. Na jednym podłożu wykonano światłowód z Ta_2O_5 i przetwornik piezoelektryczny ZnO .

- 1 - sprzęgacz pryzmatyczny,
- 2 - przetwornik międzypalczasty,
- 3 - warstwa tłumiąca.

na przetworniki akustycznej fali powierzchniowej i warstwa światłowodowa mogą różnić się pod względem grubości [1, 17]. Kondo i in. [24] wykonał deflektor akustooptyczny w dyfuzyjnym światłowodzie szklanym. Falę akustyczną generowano przy pomocy cienkowarstwowego przetwornika ZnO. Zestawienie własności modulatorów akustooptycznych wszystkich wymienionych typów przedstawiono w tabeli 1.

Dokładniejszy opis technologii i własności światłowodów stosowanych w modulatorach akustooptycznych można znaleźć w pracy A. Opilskiego [27]. Planarne modulatory akustooptyczne znalazły zastosowanie przede wszystkim w dziedzinie obróbki informacji. O wyborze jednego z rozwiązań konstrukcyjnych decydują czynniki technologiczne i aplikacyjne. Przykładowo, Valette [23] wykonał analizator widma sygnałów elektromagnetycznych w oparciu o światłowod Si_3N_4 naniesiony na podłożu z utlenionego krzemu; Kanazawa [25] zbudował analizator widma na bazie światłowodu dyfuzyjnego w niobianie litu; Albert [26] zastosował konfigurację modulatora - światłowod amorficzny na podłożu piezoelektrycznym do wykonania bistabilnego przełącznika akustooptycznego.

Przedstawione przykłady dokumentują tezę, że nie można mówić o najlepszej, czy dominującej strukturze w dziedzinie zintegrowanych modulatorów akustooptycznych. Dopiero cały zestaw przedstawionych struktur pozwala na optymalne wykorzystanie możliwości, jakie w dziedzinie obróbki sygnałów daje optyka zintegrowana.

TABELA 2.1. Podstawowe własności planarnych modulatorów akustooptycznych

Podłoże		Światłowód		λ	f/Λ	$M_2 \times 10^{-15}$	Efektywność dyfrakcji	Moc fali akustycznej	Uwagi	Lit.
Materiał	n_s	Materiał	n_f							
1	2	3	4	nm	MHz/ μm	s^3/kg	%	mW	10	11

1. Amorficzna warstwa światłowodowa na podłożu piezoelektrycznym

- kwarc	1,55	szkło Corning	1,73	632,8	191/16	8,11	66	180	B	9
- kwarc	1,55	polistyren	1,582		86		5		K O	10
LiNbO_3 -metal	-	szkło Corning	1,73	632,8	320		55		K, TE_1 - TE_3	15
- kwarc	1,55	TeO_2	2,00				55 10 1	4,8 W mocy elektr.	B, TM_0 TE_0 TE_0 - TM_0	11
LiNbO_3	2,2	As_2S_3		1153					B	16
- kwarc	1,55	Ta_2O_5	1,86	632,8	290/10	14,8 1,7	93 18	175	B, TM_0 TE_0	12
- kwarc	1,55	Ta_2O_5		632,8	264/12	TM 10x TE			B	13

2. Piezoelektryczna warstwa światłowodowa na podłożu niepiezoelektrycznym

topiony kwarc	1,46	ZnO	2	632,8	130/20	6,33	90	100	B	17
SiO_2 -Si	1,46	ZnO	1,99	632,8	200/19,5	5,7	7	10	B, TE_0	5
SiO_2 -Si	1,46	ZnO	2,02	632,8	209/20	1,54	5	18	B, TE_0	x

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----

3. Światłowod wykonany w podłożu piezoelektrycznym

LiNbO_3	2,2	$\text{LiNbO}_3: \text{Ti}$		632,8	290/12	15,4	100	120	B	14
LiNbO_3	2,2	$\text{LiNbO}_3 \text{ LiO}_2$		632,8	78/	15	100	250	R-N	22
GaAs		GaAs		1060	200/15		100	75	B	37

4. Amorficzna warstwa światłowodowa na podłożu niepiezoelektrycznym

$\text{SiO}_2\text{-Si}$	1,46	Si_3N_4	2,019	632,8	200/26	4,2 3,7	4 3,5	10	B, TE_0 B, TM_0	5
$\text{SiO}_2\text{-Si}$	1,46	Ta_2O_5	2,152	632,8	200/18	24,5	30	10	B, TM_0	5
$\text{SiO}_2\text{-Si}$	1,46	szkło Corning - 7059	1,589	632,8	200/20	1,6	2	10	B, TM_0	5
szkło sodowe	1,5	wymiana jon. Ag		632,8	56/		70	2W mocy elektrycz	R-N	24
$\text{SiO}_2\text{-Si}$	1,46	Ta_2O_5	2,101	632,8	176/21	19	23	8	B, TM_1	xx

- B - dyfrakcja Bragga
 R-N - dyfrakcja Ramana-Natha
 KO - oddziaływanie kolinearne z odsprzęganiem światła ze światłowodu
 n_f, n_s - współczynniki załamania światłowodu i podłoża odpowiednio
 λ - długość fali światła w próżni
 f/Λ - częstotliwość fali akustycznej/ długość fali akustycznej
 M_2 - współczynnik jakości akustooptycznej światłowodu
 x - próbka nr 21
 xx - próbka nr 15/1

3. TEORETYCZNE PODSTAWY PLANARNEGO ODDZIAŁYWANIA AKUSTOOPTYCZNEGO

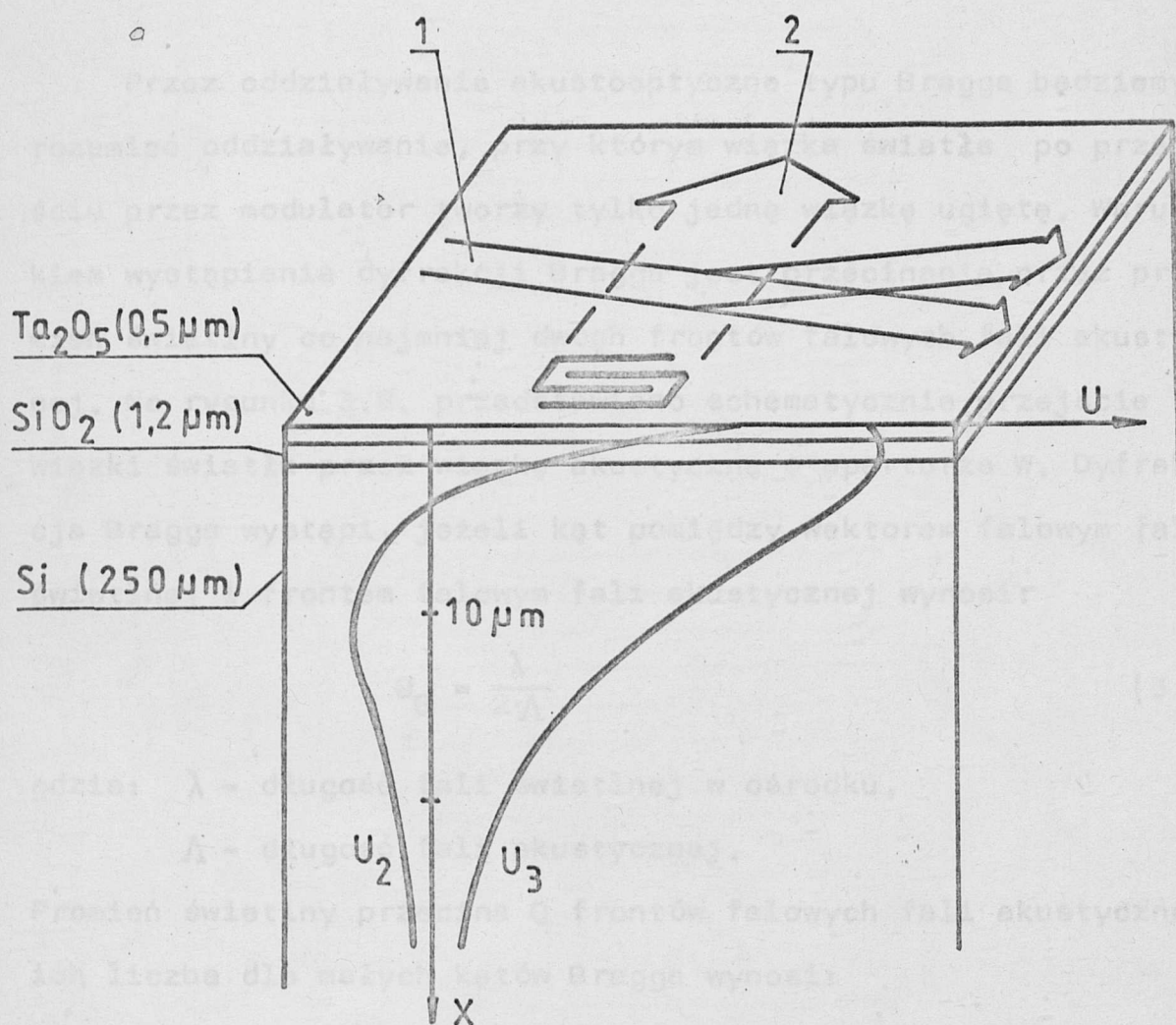
3.1. Planarne oddziaływanie akustooptyczne w strukturze warstwowej

Planarne oddziaływanie akustooptyczne /POA/ jest to oddziaływanie zachodzące pomiędzy falą świetlną rozchodzącą się w światłowodzie i akustyczną falą powierzchniową. Zachodzi ono poprzez wywołane falą sprężystą lokalne zmiany współczynnika załamania ośrodka, w którym rozchodzi się światło. Efektem POA może być:

- zmiana kierunku wiązki światła [9],
- zmiana numeru i polaryzacji modu [15, 29],
- odsprzęganie światła ze światłowodu [30, 31].

Z punktu widzenia zastosowań w zintegrowanych urządzeniach obróbki sygnałów [32] najistotniejszy jest pierwszy przypadek, tzn. planarny deflektor akustooptyczny. Przeanalizujemy przypadek braggowskiego ugięcia wiązki światła rozchodzącej się w światłowodzie planarnym.

Teoretyczną analizę zagadnienia POA przedstawiono w pracach [3, 29, 31, 33]. Interpretacja otrzymanych wyników wymagała złożonych obliczeń numerycznych. Analizę teoretyczną i obliczenia można uprościć uwzględniając parametry układów realizowanych w praktyce. W tym rozdziale zajmiemy się strukturą typu: światłowod planarny o grubości znacznie mniejszej od długości fali akustycznej na podłożu z utlenionego krzemu. Schemat analizowanego układu przedstawiono na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Schemat struktury analizowanego modulatora akustooptycznego. Na rysunku porównano grubość światłowodu z głębokością wnikania akustycznej fali powierzchniowej. Wykres przedstawia rozkłady amplitudy odkształcenia normalnego $/U_3/$ i stycznego $/U_2/$ akustycznej fali powierzchniowej.

3.2. Planarne oddziaływanie akustooptyczne typu Bragga - związki fazowe

Przez oddziaływanie akustooptyczne typu Bragga będziemy rozumieć oddziaływanie, przy którym wiązka światła po przejściu przez modulator tworzy tylko jedną wiązkę ugiętą. Warunkiem wystąpienia dyfrakcji Bragga jest przecinanie przez promień świetlny co najmniej dwóch frontów falowych fali akustycznej. Na rysunku 3.2. przedstawiono schematycznie przejście wiązki światła przez wiązkę akustyczną o aperturze W . Dyfrakcja Bragga wystąpi, jeżeli kąt pomiędzy wektorem falowym fali świetlnej i frontem falowym fali akustycznej wynosi:

$$\theta_B = \frac{\lambda}{2 \cdot \Lambda} \quad (3.1)$$

gdzie: λ - długość fali świetlnej w ośrodku,

Λ - długość fali akustycznej.

Promień świetlny przecina Q frontów falowych fali akustycznej, ich liczba dla małych kątów Bragga wynosi:

$$Q = W \cdot \theta_B / \Lambda \quad (3.2)$$

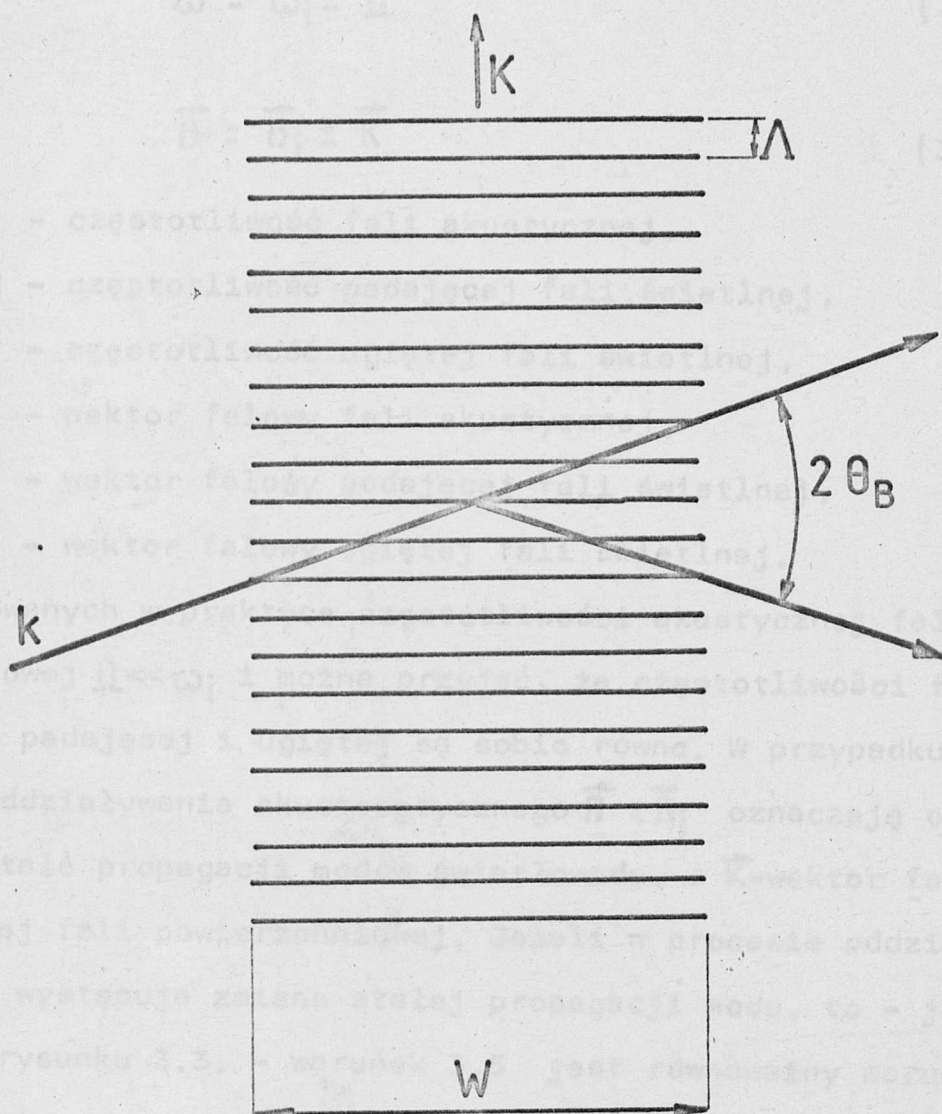
gdzie: W - apertura wiązki akustycznej.

Podstawiając (2.1) do (2.2) otrzymujemy warunek wystąpienia dyfrakcji Bragga:

$$Q = \frac{W \cdot \lambda}{2 \cdot \Lambda^2} > 1 \quad (3.3)$$

Wielkość Q nosi nazwę parametru dyfrakcji.

W procesie oddziaływania fali świetlnej z falą akustyczną muszą być spełnione związki fazowe:



Rys. 3.2. Schemat modulatora akustooptycznego do wyznaczenia parametru dyfrakcji Q . Promień świetlny przecina więcej niż jeden front falowy fali akustycznej i może wystąpić dyfrakcja Bragga.

- k - wektor falowy fali świetlnej,
- K - wektor falowy fali akustycznej,
- Λ - długość fali akustycznej,
- W - apertura wiązki akustycznej,
- θ_B - kąt Bragga.

$$\omega = \omega_i \pm \Omega \quad (3.4)$$

$$\vec{\beta} = \vec{\beta}_i \pm \vec{K} \quad (3.5)$$

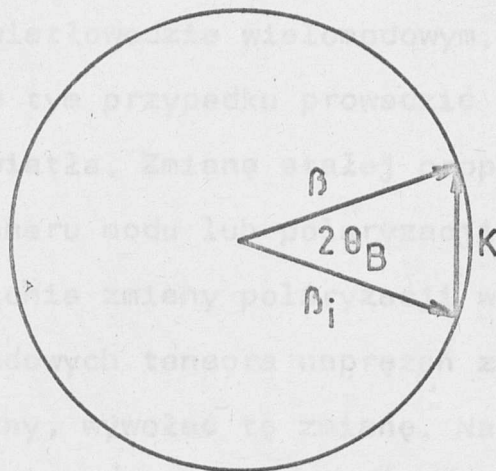
gdzie: Ω - częstotliwość fali akustycznej,
 ω_i - częstotliwość padającej fali świetlnej,
 ω - częstotliwość ugiętej fali świetlnej,
 K - wektor falowy fali akustycznej,
 β_i - wektor falowy padającej fali świetlnej,
 β - wektor falowy ugiętej fali świetlnej.

Dla stosowanych w praktyce częstotliwości akustycznej fali powierzchniowej $\Omega \ll \omega_i$ i można przyjąć, że częstotliwości fali świetlnej padającej i ugiętej są sobie równe. W przypadku płannego oddziaływania akustooptycznego $\vec{\beta}$ i $\vec{\beta}_i$ oznaczają odpowiednie stałe propagacji modów światłowodu, a $\vec{K}$ -wektor falowy akustycznej fali powierzchniowej. Jeżeli w procesie oddziaływania nie występuje zmiana stałej propagacji modu, to - jak wynika z rysunku 3.3. - warunek 3.5 jest równoważny warunkowi:

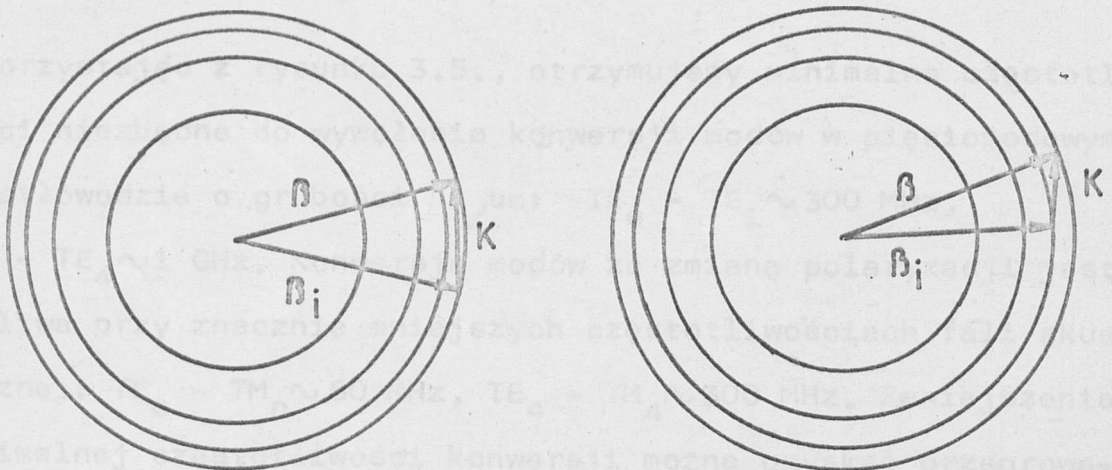
$$\sin \theta_B = \frac{\lambda_0}{2 \cdot \Lambda \cdot N_{ef}} \quad (3.6)$$

gdzie: λ_0 - długość fali świetlnej w próżni,
 Λ - długość fali akustycznej fali powierzchniowej,
 N_{ef} - efektywny współczynnik załamania danego modu światłowodu.

Wzór 3.6 i rysunek 3.3. odpowiadają dyfrakcji zachodzącej bez zmiany numeru i polaryzacji modu w światłowodzie izotropowym lub w światłowodzie anizotropowym z osią optyczną skierowaną prostopadle do powierzchni.



Rys. 3.3. Schemat dyfrakcji Bragga w światłowodzie jednomodowym bez zmiany stałej propagacji wiązki światła

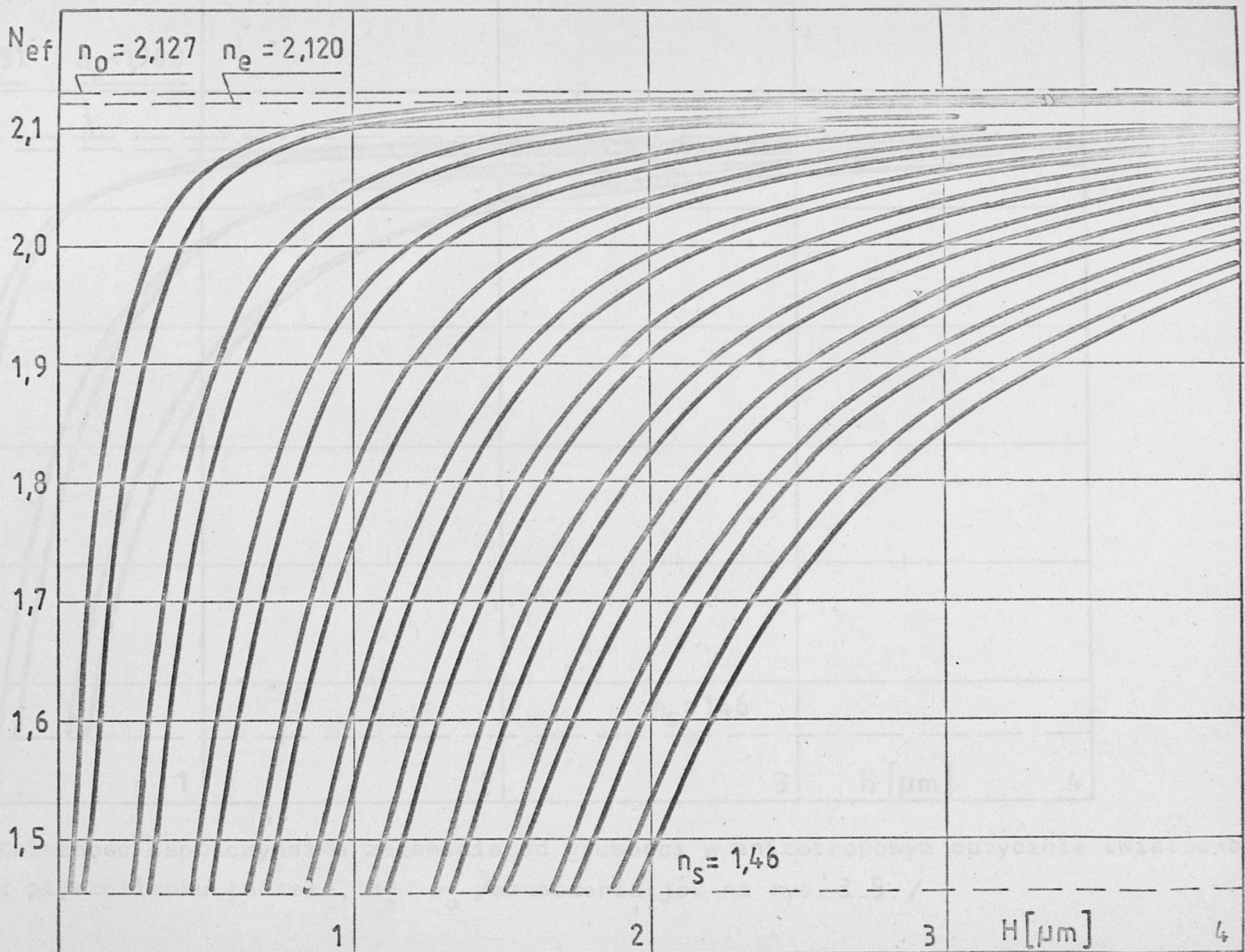


Rys. 3.4. Schemat oddziaływania akustooptycznego w światłowodzie wielomodowym. Okręgi odpowiadają stałym propagacji różnych modów światłowodu. Z lewej strony przedstawiono oddziaływanie bez zmiany numeru modu. Z prawej strony oddziaływanie jest związane ze zwiększeniem stałej propagacji, czyli występuje obniżenie numeru modu.

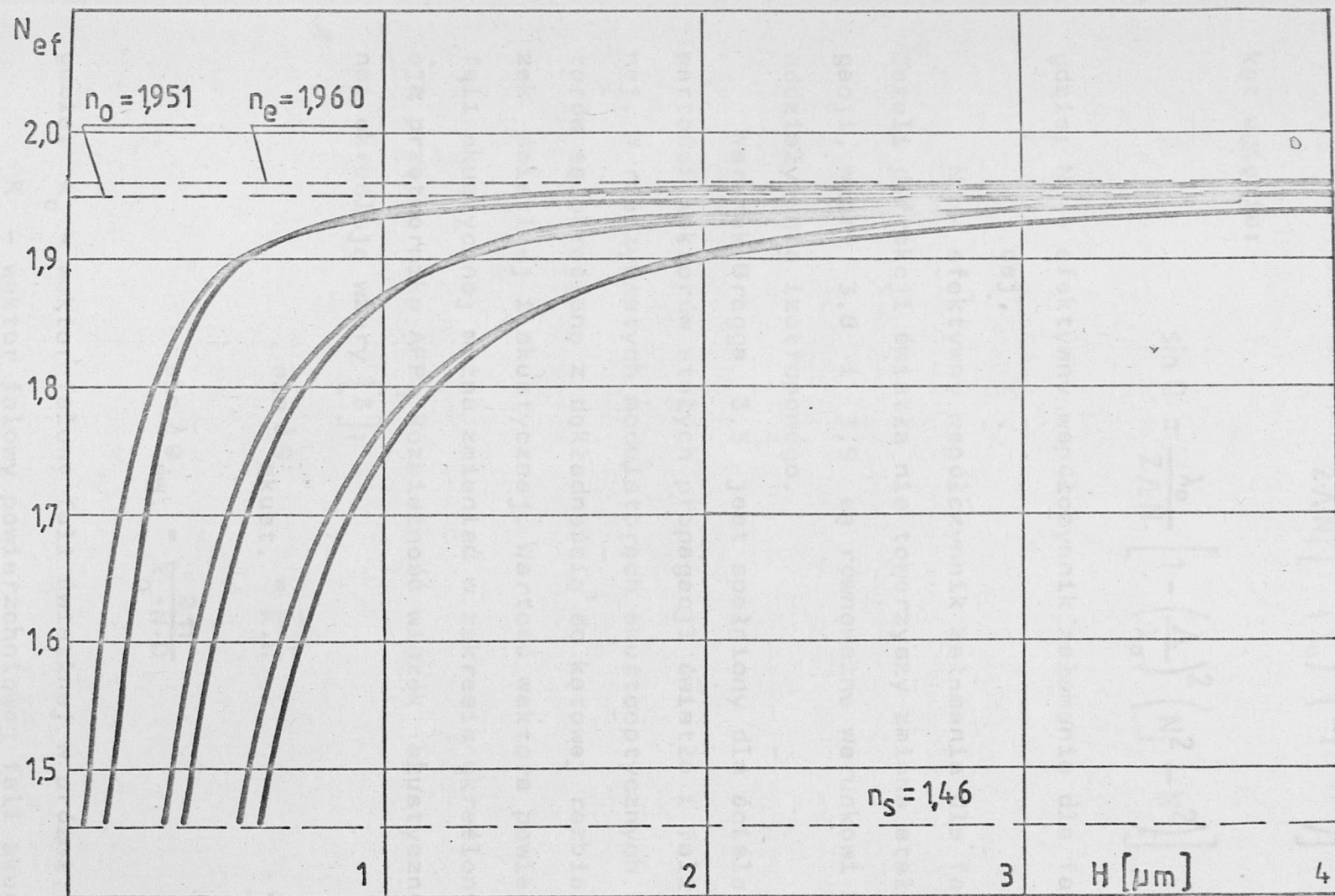
Na rysunku 3.4. przedstawiono schemat oddziaływania akustooptycznego w światłowodzie wielomodowym. Oddziaływanie akustooptyczne może w tym przypadku prowadzić do zmiany stałej propagacji wiązki światła. Zmiana stałej propagacji może być związana ze zmianą numeru modu lub polaryzacji światła. Dodatkowym warunkiem wystąpienia zmiany polaryzacji wiązki światła jest występowanie składowych tensora naprężeń zdolnych, poprzez efekt elastooptyczny, wywołać tę zmianę. Na rysunku 3.5. przedstawiono zależność efektywnego współczynnika załamania modów od grubości światłowodów. Przyjmując, że minimalna wartość wektora falowego fali akustycznej niezbędna do zmiany modu światłowodu wynosi /rys.3.4./:

$$K = \Delta\beta = \beta_i - \beta \quad (3.7)$$

i korzystając z rysunku 3.5., otrzymujemy minimalne częstotliwości niezbędne do wywołania konwersji modów w pięciomodowym światłowodzie o grubości $1\mu\text{m}$: $\text{TE}_0 - \text{TE}_1 \sim 300 \text{ MHz}$, $\text{TE}_3 - \text{TE}_4 \sim 1 \text{ GHz}$. Konwersja modów ze zmianą polaryzacji jest możliwa przy znacznie mniejszych częstotliwościach fali akustycznej: $\text{TE}_0 - \text{TM}_0 \sim 60 \text{ MHz}$, $\text{TE}_4 - \text{TM}_4 \sim 300 \text{ MHz}$. Zmniejszenie minimalnej częstotliwości konwersji można uzyskać przeprowadzając oddziaływanie w światłowodzie anizotropowym. Na rysunku 3.6. przedstawiono wykres modowy światłowodu anizotropowego z Ta_2O_5 . Jak widać z rysunku w światłowodzie anizotropowym możliwa jest zmiana polaryzacji modu bez zmiany wartości stałej propagacji. Oddziaływanie Bragga, przy którym zachodzi zmiana stałej propagacji lub polaryzacji, nazywamy oddziaływaniem anizotropowym. Kąty Bragga w przypadku oddziaływania anizotropowego są określone następującymi wzorami:



Rys. 3.5. Zależność efektywnego współczynnika załamania od grubości w światłowodzie z pięcioletniku tantalum, n_0, n_e - zwyczajny i nadzwyczajny współczynnik załamania światłowodów, n_s - współczynnik załamania podłoża.



Rys. 3.6. Zależność współczynnika załamania od grubości w anizotropowym optycznym światłowodzie z pięciotlenku tantalu, n_e n_o /oznaczenia jak na rys. 3.5. /

kąt padania:

$$\sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2 \cdot \Lambda \cdot N_i} \left[1 + \left(\frac{\Lambda}{\lambda_0} \right)^2 (N_i^2 - N^2) \right] \quad (3.8)$$

kąt ugięcia:

$$\sin \theta = \frac{\lambda_0}{2 \Lambda N} \left[1 - \left(\frac{\Lambda}{\lambda_0} \right)^2 (N_i^2 - N^2) \right] \quad (3.9)$$

gdzie: N_i - efektywny współczynnik załamania dla fali padającej,

N - efektywny współczynnik załamania dla fali ugiętej.
Jeżeli dyfrakcji światła nie towarzyszy zmiana stałej propagacji, wzory 3.8 i 3.9 są równoważne warunkowi Bragga dla oddziaływania izotropowego.

Warunek Bragga 3.5 jest spełniony dla ściśle określonych wartości wektorów stałych propagacji światła i fali akustycznej. W rzeczywistych modulatorach akustooptycznych kierunki wektorów są określone z dokładnością do kątowej rozbieżności wiązek świetlnej i akustycznej. Wartość wektora powierzchniowej fali akustycznej można zmieniać w zakresie określonym konstrukcją przetwornika AFP. Rozbieżność wiązek akustycznej i świetlnej określają wzory [3]:

$$\sin \delta \theta_{\text{akust.}} = \frac{2 \pi}{K \cdot W} \quad (3.10)$$

$$\sin \delta \theta_{\text{św.}} = \frac{2 \pi}{k_0 \cdot N \cdot D} \quad (3.11)$$

gdzie: k_0 - wektor falowy fali świetlnej w próżni,

K - wektor falowy powierzchniowej fali akustycznej,

W - apertura przetwornika akustycznej fali powierzchniowej,

D - apertura wiązki świetlnej.

W wykonanym modulatorze rozbieżność wiązki akustycznej wynosiła około $0,4^\circ$ i była o 3 rzędy większa od rozbieżności wiązki świetlnej. Zazwyczaj w planarnych modulatorach akustooptycznych rozbieżność wiązki świetlnej można pominąć.

3.3. Planarne oddziaływanie akustooptyczne typu Bragga - efektywność oddziaływania

Przez efektywność oddziaływania akustooptycznego typu Bragga będziemy rozumieć stosunek natężenia światła w wiązce ugiętej do natężenia światła w wiązce zerowej przed doprowadzeniem sygnału do przetwornika akustycznej fali powierzchniowej. Efektywność oddziaływania dla planarnego oddziaływania akustooptycznego można obliczyć stosując metodę funkcji Greena [29, 31] lub metodę modów sprzężonych [2,3,33]. Przeanalizujemy oddziaływanie w strukturze: światłowod planarny z pięcioletniku tantalum na podłożu z utlenionego krzemu posługując się drugą metodą.

Wektory pola elektrycznego fali świetlnej padającej i ugiętej oraz tensor deformacji sprężystych ośrodka opisują wzory:

wektor pola elektrycznego padającej fali świetlnej:

$$e_{Ii} = A_{Ii}(x') E_{Ii}(z) \exp[j(\beta_I x' - \omega_I t)] \quad (3.12)$$

wektor pola elektrycznego ugiętej fali świetlnej:

$$e_{Bi} = A_{Bi}(x'') E_{Bi}(z) \exp[j(\beta_B x'' - \omega_B t)] \quad (3.13)$$

tensor deformacji ośrodka /w zapisie macierzowym/:

$$S_i = A_{Si}(y) S_i(z) \exp[j(Ky - \Omega t)] \quad (3.14)$$

gdzie: β_I, β_B - stałe propagacji fali padającej i ugiętej,

K - wektor falowy akustycznej fali powierzchniowej,

ω_I, ω_B - częstotliwość fali świetlnej padającej i ugiętej,

A_{Ii}, A_{Bi}, A_{Si} - amplitudy składowych wektorów fali świetlnej padającej i ugiętej i tensora deformacji,

E_{Ii}, E_{Bi}, S_i - funkcje opisujące przestrzenny rozkład odpowiednich składowych wektorów fali świetlnej i tensora deformacji.

Na rysunku 3.7. przedstawiono zastosowany układ współrzędnych.

Deformacje wywołane przez rozchodzącą się w obszarze oddziaływania akustyczną falę powierzchniową są źródłem lokalnych zmian przenikalności elektrycznej ośrodka. Zmiany te są określone wzorem:

$$\Delta \epsilon_{il} = -\epsilon_{ij} P_{jkmn} S_{mn} \epsilon_{kl} \quad (3.15)$$

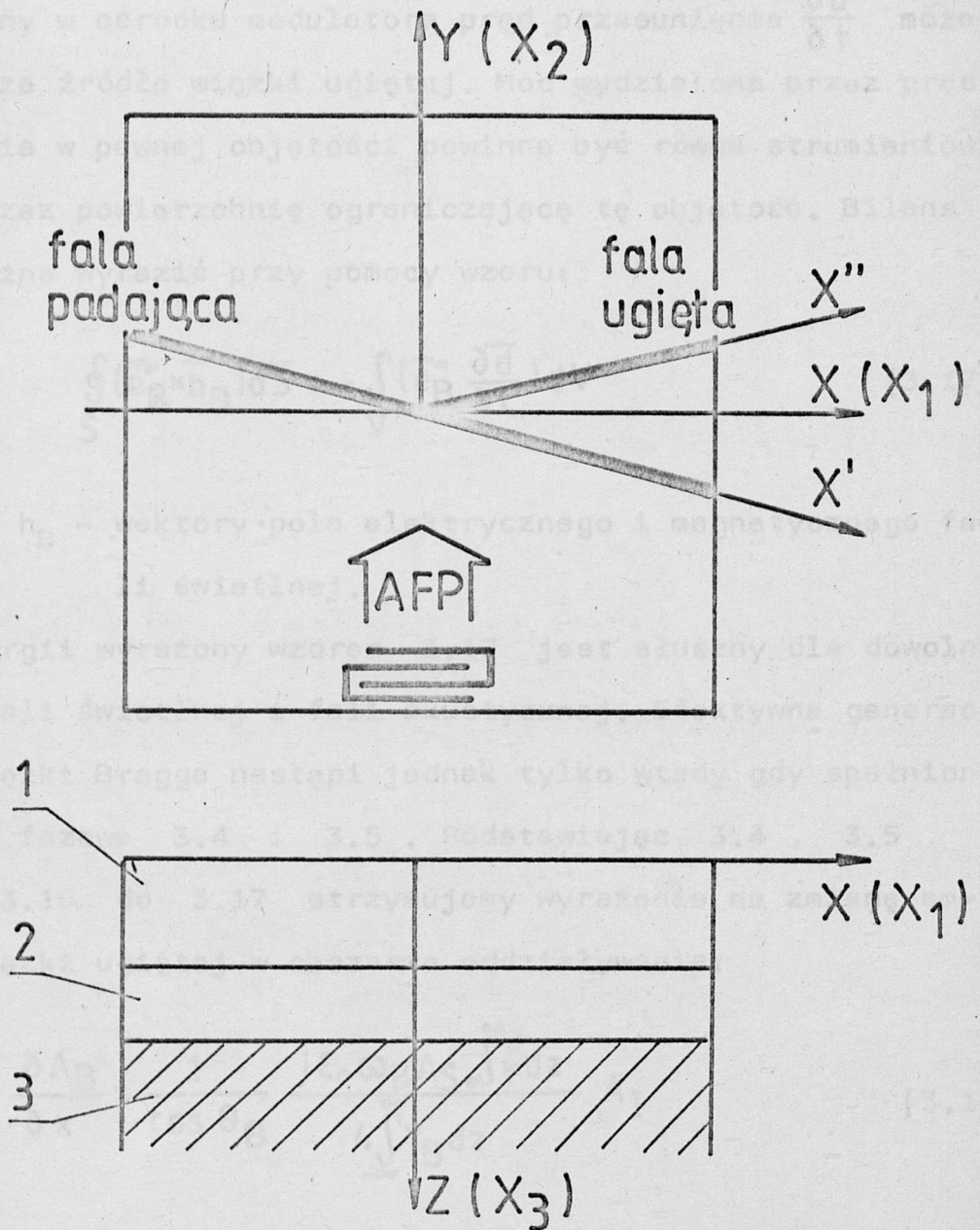
gdzie: ϵ_{ij} - składowa tensora przenikalności elektrycznej ośrodka,

P_{ijklmn} - składowa tensora współczynników elastooptycznych,

S_{ij} - składowa tensora deformacji.

Zmiany przenikalności $\Delta \epsilon$ wywołują pojawienie się nowych składowych wektora indukcji elektrycznej, zgodnie ze wzorem:

$$d_i = \epsilon_0 \Delta \epsilon_{ij} e_{ji} \quad (3.16)$$



Rys. 3.7. Układ współrzędnych stosowany do analizy efektywności oddziaływania akustooptycznego i schemat analizowanej struktury.

- 1 - światłowod planarny Ta_2O_5 ,
- 2 - warstwa pośrednia SiO_2 ,
- 3 - podłoże krzemowe.

W nawiasach przedstawiono oznaczenia osi stosowane w opisie tensorowym w niniejszej pracy.

Wyindukowany w ośrodku modulatora prąd przesunięcia $\frac{\partial \vec{d}}{\partial t}$ możemy uważać za źródło wiązki ugiętej. Moc wydzielona przez prąd przesunięcia w pewnej objętości powinna być równa strumieniowi energii przez powierzchnię ograniczającą tę objętość. Bilans energii można wyrazić przy pomocy wzoru:

$$\oint_S (\vec{e}_B \times \vec{h}_B) d\vec{S} = - \int_V (\vec{e}_B \frac{\partial \vec{d}}{\partial t}) dV \quad (3.17)$$

gdzie: e_B, h_B - wektory pola elektrycznego i magnetycznego fali świetlnej.

Bilans energii wyrażony wzorem 3.17 jest słuszny dla dowolnie wybranej fali świetlnej i fali akustycznej. Efektywna generacja ugiętej wiązki Bragga nastąpi jednak tylko wtedy gdy spełnione są związki fazowe 3.4 i 3.5. Podstawiając 3.4, 3.5, 3.12 - 3.16 do 3.17 otrzymujemy wyrażenie na zmianę amplitudy wiązki ugiętej w obszarze oddziaływania:

$$\frac{\partial A_B}{\partial x} = \frac{1}{\cos \theta_B} \frac{j \epsilon_0 \omega_B A_S \int_{-\infty}^{\infty} \psi dz}{4 \int_{-\infty}^{\infty} Y_B dz} A_I \quad (3.18)$$

W podobny sposób możemy otrzymać zmianę amplitudy światła w wiązce padającej:

$$\frac{\partial A_I}{\partial x} = \frac{1}{\cos \theta_I} \frac{-j \epsilon_0 \omega_I A_S^* \int_{-\infty}^{\infty} \psi^* dz}{4 \int_{-\infty}^{\infty} Y_I dz} A_B \quad (3.19)$$

Przestrzenne rozkłady mocy fali świetlnej w wiązce padającej i ugiętej, oznaczone odpowiednio Y_I i Y_B , definiujemy następująco:

$$(\vec{e}_I \times \vec{h}_I) \cdot \vec{n} = \frac{1}{2} Y_I A_I A_I^* \quad (3.20)$$

$$(\vec{e}_B \times \vec{h}_B) \cdot \vec{n} = \frac{1}{2} Y_B A_B A_B^* \quad (3.21)$$

gdzie: $\vec{n}$ - wektor jednostkowy w kierunku przepływu mocy fali świetlnej,

Ψ - funkcja opisująca pokrywanie się fali akustycznej i fali świetlnej.

$$\Psi = E_{Bi}^* \epsilon_{ik} (p_{klab} \epsilon_{ab}) \epsilon_{lj} E_{lj} \quad (3.22)$$

Przyjmując $x = 0$ za początek obszaru oddziaływania otrzymujemy następujące warunki brzegowe:

$$A_B|_{x=0} = 0 \quad A_I|_{x=0} = 0 \quad (3.23)$$

Z równań 3.18 , 3.19 przy warunkach brzegowych 3.23 otrzymujemy wzór na efektywność oddziaływania [2]:

$$\eta = \sin^2 \sqrt{\eta_0} \quad (3.24)$$

gdzie:

$$\eta_0 = \frac{\pi^2}{2 \lambda_0^2} \frac{W P_S}{\cos \theta_I \cos \theta_B} \frac{\epsilon_0 \left| \int_0^\infty \Psi dz \right|^2}{\int_0^\infty Y_S dz \int_{-\infty}^\infty Y_I dz \int_{-\infty}^\infty Y_D dz} \quad (3.25)$$

Funkcje rozkładu mocy akustycznej Y_S definiuje wzór:

$$P_S = \frac{1}{2} W A_S A_S^* \int Y_S dz \quad (3.25)$$

gdzie: P_s - moc całkowita akustycznej fali powierzchniowej.

Wyrażenie 3.24 przedstawia efektywność dyfrakcji w przypadku ogólnym. Dla małych efektywności oddziaływania można przyjąć, że:

$$\eta = \eta_0 \quad (3.26)$$

3.4. Propagacja światła w światłowodach planarnych

Światłowodem planarnym albo płaskim nazywamy warstwę o współczynniku załamania większym od współczynnika załamania podłoża i o grubości porównywalnej z długością fali światła prowadzonego w warstwie. Promień świetlny rozchodzi się w światłowodzie ulegając kolejno całkowitym wewnętrznym odbiciom na granicach warstwy. Ponieważ przy całkowitym wewnętrznym odbiciu faza fali świetlnej ulega zmianie zależnie od kąta padania światła, w światłowodzie ustala się dyskretny zbiór kątów, pod którymi może rozchodzić się światło. Rozwiązując równanie falowe dla struktury światłowodu planarnego otrzymuje się równanie modowe opisujące propagację fali świetlnej [D 4]:

$$qH - \varphi_S^E - \varphi_C^E = m\pi \quad \text{dla modów TE} \quad (3.27)$$

$$qH - \varphi_S^M - \varphi_C^M = m\pi \quad \text{dla modów TM} \quad (3.28)$$

Rozkłady amplitudy pola elektrycznego modów światłowodu opisują następujące wzory:

$$E_y = E_f \cos(qz - \varphi_E^S) \quad \text{dla modów TE} \quad (3.29)$$

$$E_z = \frac{\beta}{\omega \epsilon \epsilon_0} H_f \cos(qz - \varphi_S^M) \quad \text{dla modów TM} \quad (3.30)$$

$$E_x = \frac{j}{\omega \epsilon \epsilon_0} q H \sin(qz - \varphi_S^M)$$

gdzie: E_f, H_f - amplitudy składowej elektrycznej i magnetycznej modów światłowodów

$$q^2 = (n_f^2 - N^2) k_0^2 \quad (3.31)$$

$$\tan \varphi_S^E = \frac{N^2 - n_s^2}{n_f^2 - N^2} \quad (3.32)$$

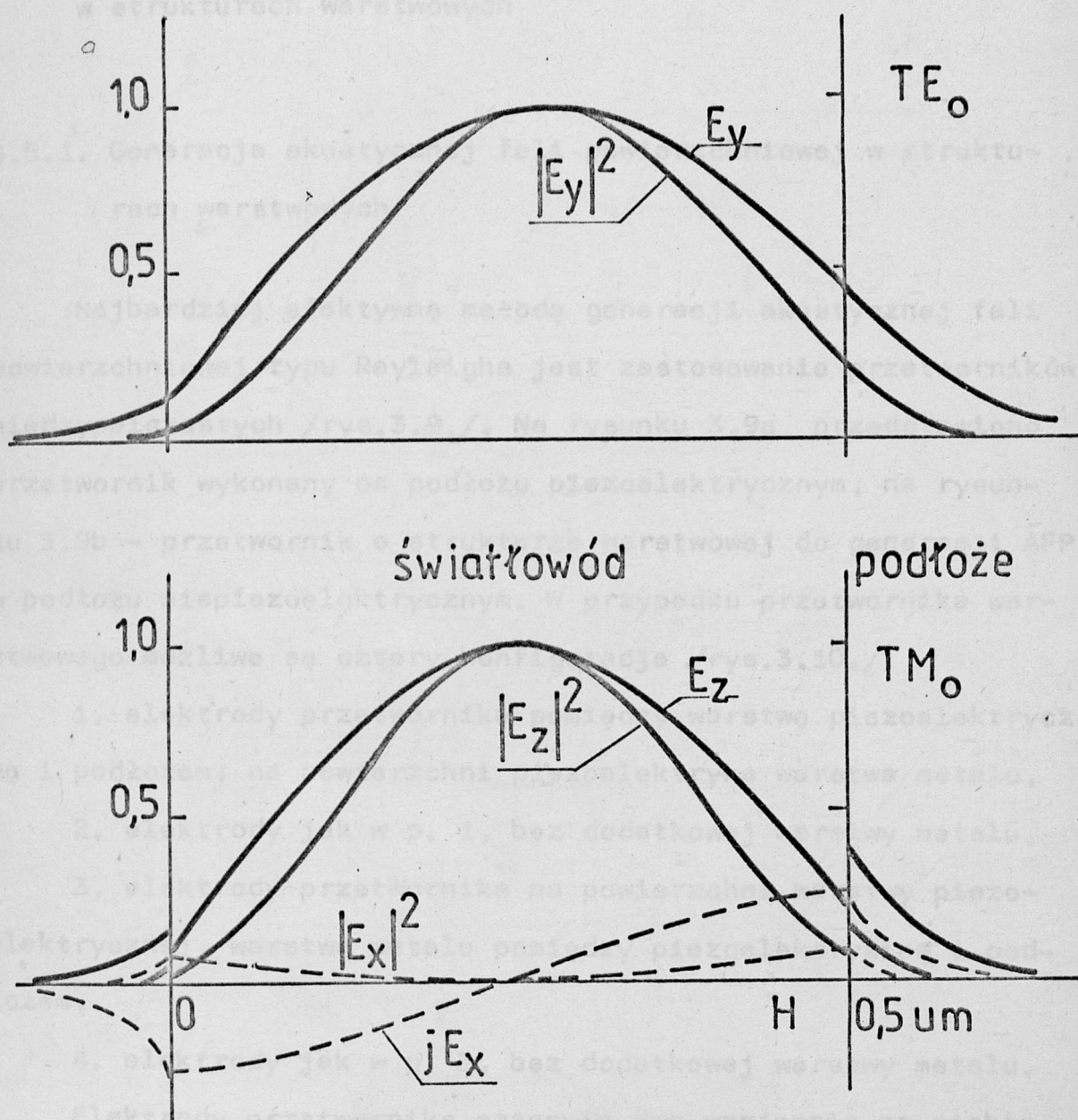
$$\tan \varphi_S^M = \frac{n_f^2}{n_s^2} \frac{N^2 - n_s^2}{n_f^2 - N^2} \quad (3.33)$$

n_f - współczynnik załamania warstwy światłowodowej,

n_s - współczynnik załamania podłoża,

N - efektywny współczynnik załamania.

Na zewnątrz światłowodów amplituda fali świetlnej zanika eksponencjalnie. Na rysunku 3.8. przedstawiono amplitudy i natężenia światła dla modów TE_0 i TM_0 w światłowodach płaskich z pięciotlenku tantalu o różnej grubości, wykonanych na podłożach z topionego kwarcu.



Rys. 3.8. Rozkład amplitudy pola elektrycznego i natężenia fali świetlnej w światłowodzie z Ta_2O_5 o grubości $0.5 \mu m$ na podłożu z topionego kwarcu

3.5. Generacja i propagacja akustycznej fali powierzchniowej w strukturach warstwowych

3.5.1. Generacja akustycznej fali powierzchniowej w strukturach warstwowych

Najbardziej efektywną metodą generacji akustycznej fali powierzchniowej typu Rayleigha jest zastosowanie przetworników międzypalczastych /rys.3.9./. Na rysunku 3.9a przedstawiono przetwornik wykonany na podłożu piezoelektrycznym, na rysunku 3.9b - przetwornik o strukturze warstwowej do generacji AFP w podłożu niepiezoelektrycznym. W przypadku przetwornika warstwowego możliwe są cztery konfiguracje /rys.3.10./:

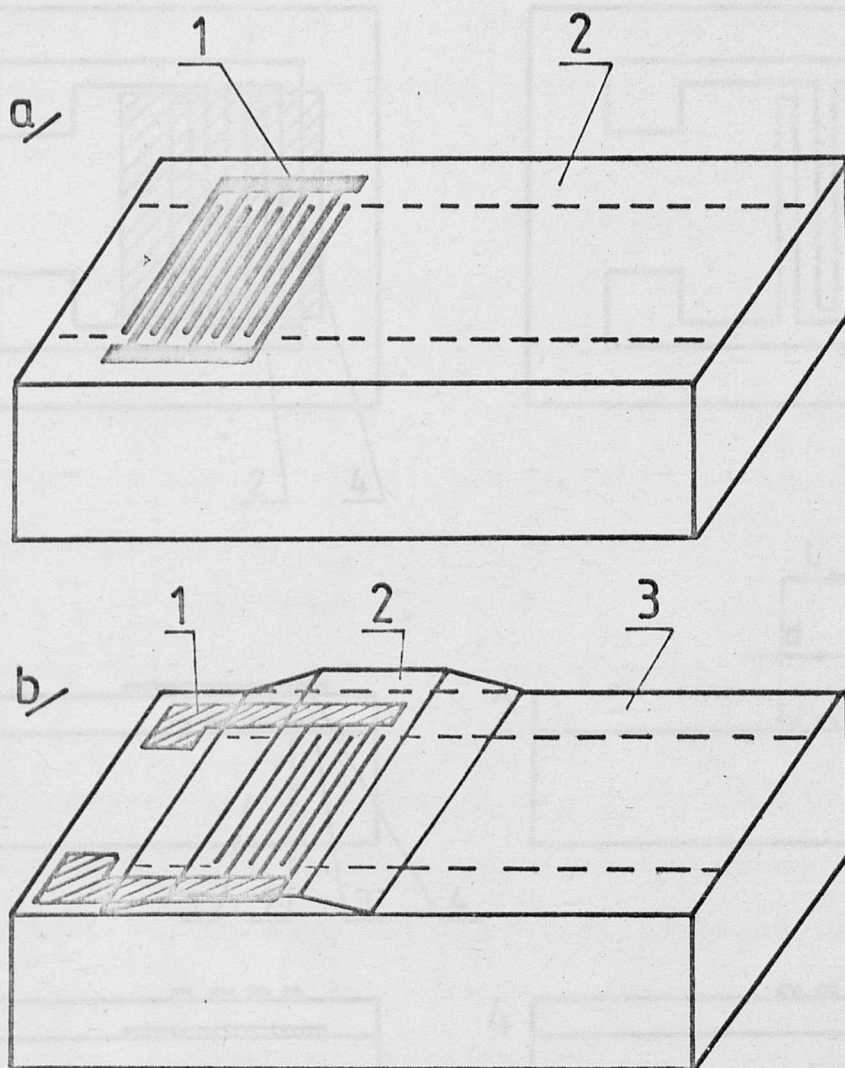
1. elektrody przetwornika pomiędzy warstwą piezoelektryczną i podłożem; na powierzchni piezoelektryka warstwa metalu,
2. elektrody jak w p. 1, bez dodatkowej warstwy metalu,
3. elektrody przetwornika na powierzchni warstwy piezoelektrycznej, warstwa metalu pomiędzy piezoelektrykiem i podłożem,
4. elektrody jak w p. 3, bez dodatkowej warstwy metalu.

Elektrody przetwornika stanowią dwa wzajemnie na siebie zachodzące zespoły metalowych elektrod. Napięcie przyłożone do elektrod wytwarza periodycznie zmieniające się wzdłuż przetwornika pole elektryczne. Jeżeli do elektrod przykładamy napięcie harmoniczne o częstotliwości f_0 spełniające warunek:

$$f_0 = v / L \quad (3.34)$$

gdzie: v - prędkość fazowa AFP,

L - stała przetwornika,



Rys. 3.9. Przetworniki akustycznej fali powierzchniowej.

a/ przetwornik międzypalczasty naniesiony na podłożu piezoelektrycznym,

1 - elektrody przetwornika,

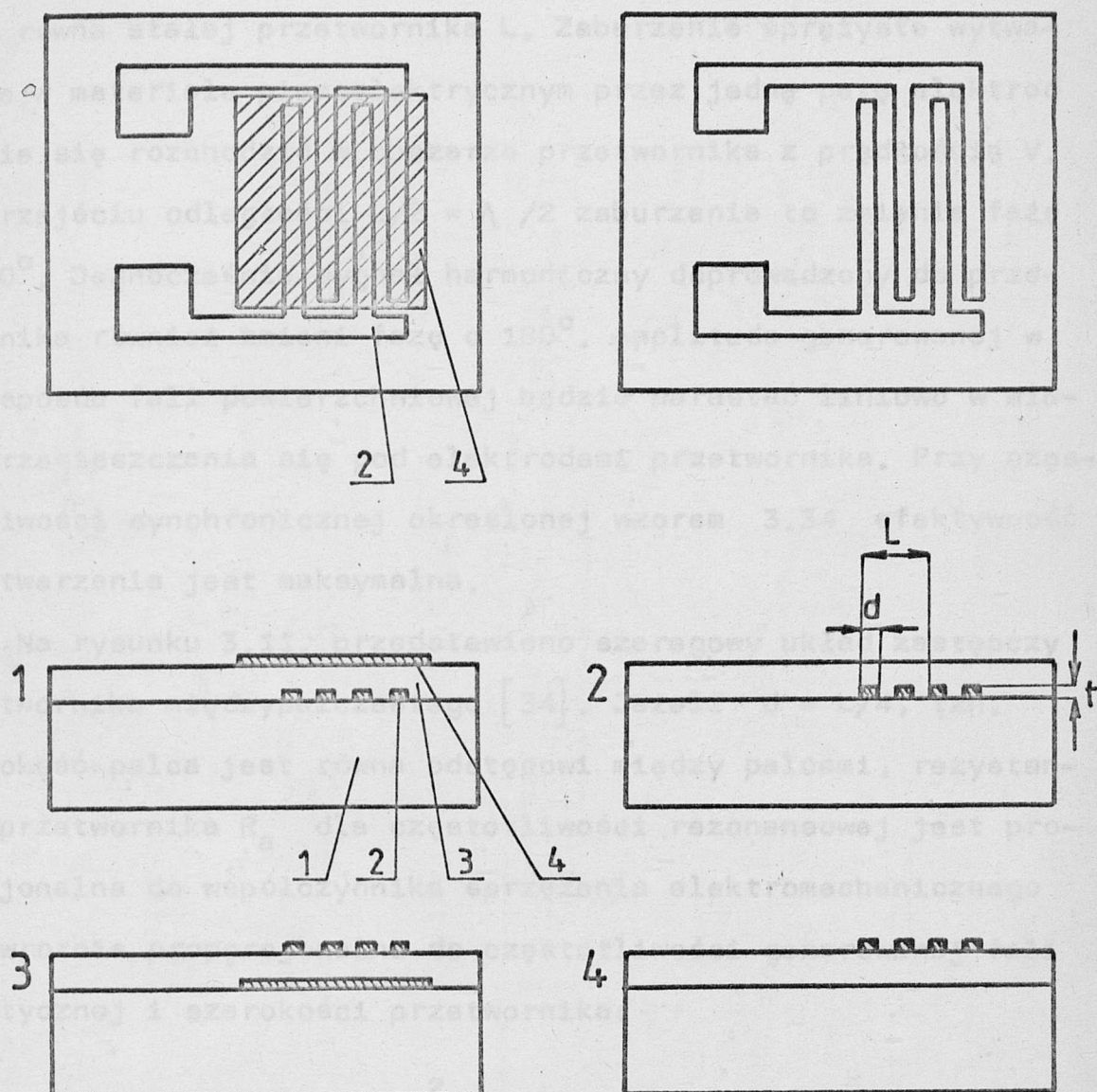
2 - podłoże piezoelektryczne,

b/ przetwornik międzypalczasty na podłożu niepiezoelektrycznym,

1 - elektrody przetwornika,

2 - warstwa piezoelektryczna,

3 - podłoże niepiezoelektryczne.



Rys. 3.10. Cztery konfiguracje warstwowego przetwornika akustycznej fali powierzchniowej;

1 - podłoże niepiezoelektryczne,

2 - elektrody przetwornika,

3 - warstwa piezoelektryczna,

4 - cienka warstwa metalu;

L - stała przetwornika,

d - szerokość elektrody równa odległości między elektrodami,

t - grubość elektrody.

to długość fali akustycznej (Λ) generowanej przez przetwornik jest równa stałej przetwornika L . Zaburzenie sprężyste wytwarzane w materiale piezoelektrycznym przez jedną parę elektrod będzie się rozchodzić w obszarze przetwornika z prędkością V . Po przejściu odległości $L/2 = \Lambda/2$ zaburzenie to zmienia fazę o 180° . Jednocześnie sygnał harmoniczny doprowadzony do przetwornika również zmieni fazę o 180° . Amplituda generowanej w ten sposób fali powierzchniowej będzie narastać liniowo w miarę przemieszczania się pod elektrodami przetwornika. Przy częstotliwości synchronicznej określonej wzorem 3.34 efektywność przetwarzania jest maksymalna.

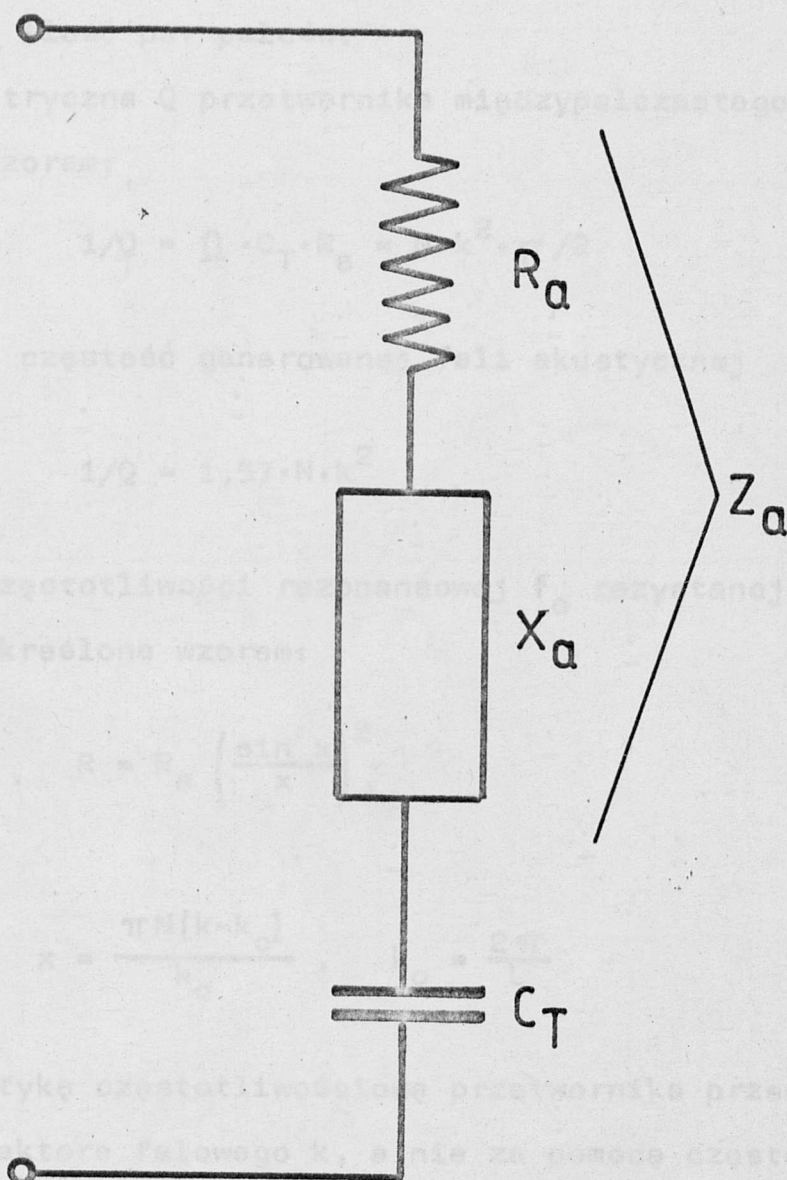
Na rysunku 3.11. przedstawiono szeregowy układ zastępczy przetwornika międzypalczastego [34]. Jeżeli $d = L/4$, tzn. szerokość palca jest równa odstępowi między palcami, rezystancja przetwornika R_a dla częstotliwości rezonansowej jest proporcjonalna do współczynnika sprzężenia elektromechanicznego i odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości generowanej fali akustycznej i szerokości przetwornika:

$$R_a \sim \frac{k^2}{f_0 \cdot W} \quad (3.35)$$

gdzie: k^2 - współczynnik sprzężenia elektromechanicznego,

W - apertura przetwornika.

Stała proporcjonalności jest określona przez grubość warstwy piezoelektrycznej, stałą przetwornika i przenikalność elektryczną podłoża i warstwy. Pojemność przetwornika jest proporcjonalna do ilości par palców i szerokości przetwornika, ze stałą proporcjonalności w przybliżeniu równą odwrotności stałej ze wzoru 3.35 i wynosi:



Rys. 3.11. Układ zastępczy przetwornika międzypalczastego;

R_a - rezystancja,

X_a - reaktancja,

Z_a - impedancja przetwornika,

C_T - pojemność struktury przetwornika międzypalczastego.

$$C_T \sim N \cdot W \quad (3.36)$$

gdzie: N - ilość par palców.

Dobroć elektryczna Q przetwornika międzypalczastego jest więc określona wzorem:

$$1/Q = \Omega \cdot C_T \cdot R_a = N \cdot k^2 \cdot \pi / 2 \quad (3.37)$$

gdzie: Ω - częstość generowanej fali akustycznej

lub:

$$1/Q = 1,57 \cdot N \cdot k^2 \quad (3.38)$$

W pobliżu częstotliwości rezonansowej f_0 rezystancja przetwornika jest określona wzorem:

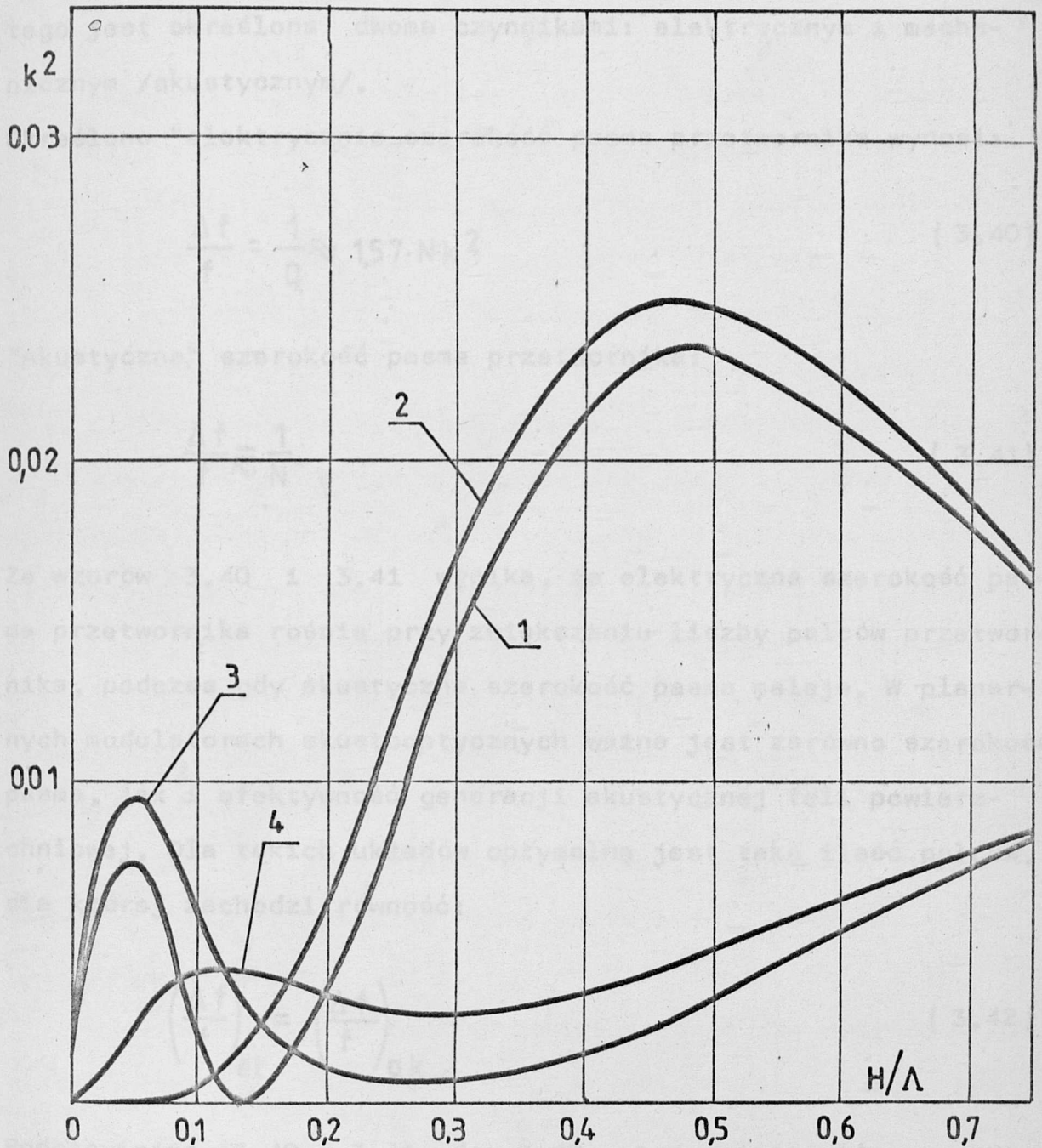
$$R = R_a \left(\frac{\sin x}{x} \right)^2 \quad (3.39)$$

gdzie:

$$x = \frac{\pi N (k - k_0)}{k_0}, \quad k_0 = \frac{2\pi}{L}$$

Charakterystykę częstotliwościową przetwornika przedstawiono za pomocą wektora falowego k , a nie za pomocą częstotliwości f . Jest to istotna różnica w przypadku przetworników warstwowych charakteryzujących się znaczną dyspersją prędkości, np. struktury: tlenek cynku na podłożu krzemowym.

Szczegółową analizę teoretyczną warstwowych przetworników AFP przeprowadzono w pracy [34]. Między innymi określono tam zależność podstawowych parametrów przetworników akustycznej fali powierzchniowej od grubości warstwy piezoelektrycznej. Na rysunku 3.12. przedstawiono zależność współczynnika sprzężenia elektromechanicznego od grubości warstwy piezoelektrycz-



Rys. 3.12. Zależność współczynnika sprzężenia elektromechanicznego od grubości warstwy ZnO na podłożu krzemowym. Numery przy krzywych oznaczają konfiguracje przetwornika przedstawione na rys. 3.10.

nej ZnO na podłożu krzemowym. Ze wzorów 3.38 i 3.39 widać, że szerokość pasma częstotliwości przetwornika międzypalczas- tego jest określona dwoma czynnikami: elektrycznym i mecha- nicznym /akustycznym/.

Określona "elektrycznie" szerokość pasma przetwornika wynosi:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{Q} \approx 1,57 \cdot N \cdot k^2 \quad (3.40)$$

"Akustyczna" szerokość pasma przetwornika:

$$\frac{\Delta f}{f} \approx \frac{1}{N} \quad (3.41)$$

Ze wzorów 3.40 i 3.41 wynika, że elektryczna szerokość pas- ma przetwornika rośnie przy zwiększaniu liczby palców przetwor- nika, podczas gdy akustyczna szerokość pasma maleje. W planar- nych modulatorach akustooptycznych ważna jest zarówno szerokość pasma, jak i efektywność generacji akustycznej fali powierz- chniowej. Dla takich układów optymalną jest taka ilość palców, dla której zachodzi równość:

$$\left(\frac{\Delta f}{f} \right)_{el} = \left(\frac{\Delta f}{f} \right)_{ak} \quad (3.42)$$

Podstawiając 3.40, 3.41 do 3.42 otrzymujemy wzór na opty- malną ilość par palców przetwornika:

$$N_{opt} = (0,64/k^2)^{1/2} \quad (3.43)$$

3.5.2. Propagacja akustycznej fali powierzchniowej w strukturach warstwowych

Akustooptyczne modulatory planarne budowane są w oparciu o struktury warstwowe. W najprostszym przypadku będzie to struktura światłowod - podłoże. W przypadku światłowodów dyfuzyjnych z niobianu litu wpływ warstwy światłowodowej na propagację akustycznej fali powierzchniowej można pominąć [3]. Z najprostszym przypadkiem rozchodzenia się fali akustycznej mamy do czynienia jeżeli fala płaska rozchodzi się w nieskończonym ośrodku amorficznym. Biorąc pod uwagę kierunek drgań /polaryzację/cząstek ośrodka w stosunku do kierunku wektora falowego możemy wyróżnić dwa rodzaje fal - podłużne i poprzeczne. Każdą falę rozchodzącą się w rzeczywistym ośrodku można uważać za złożenie tych dwóch fal. Rozpatrując ośrodek skończony należy uwzględnić warunki brzegowe dla wielkości mechanicznych i elektrycznych.

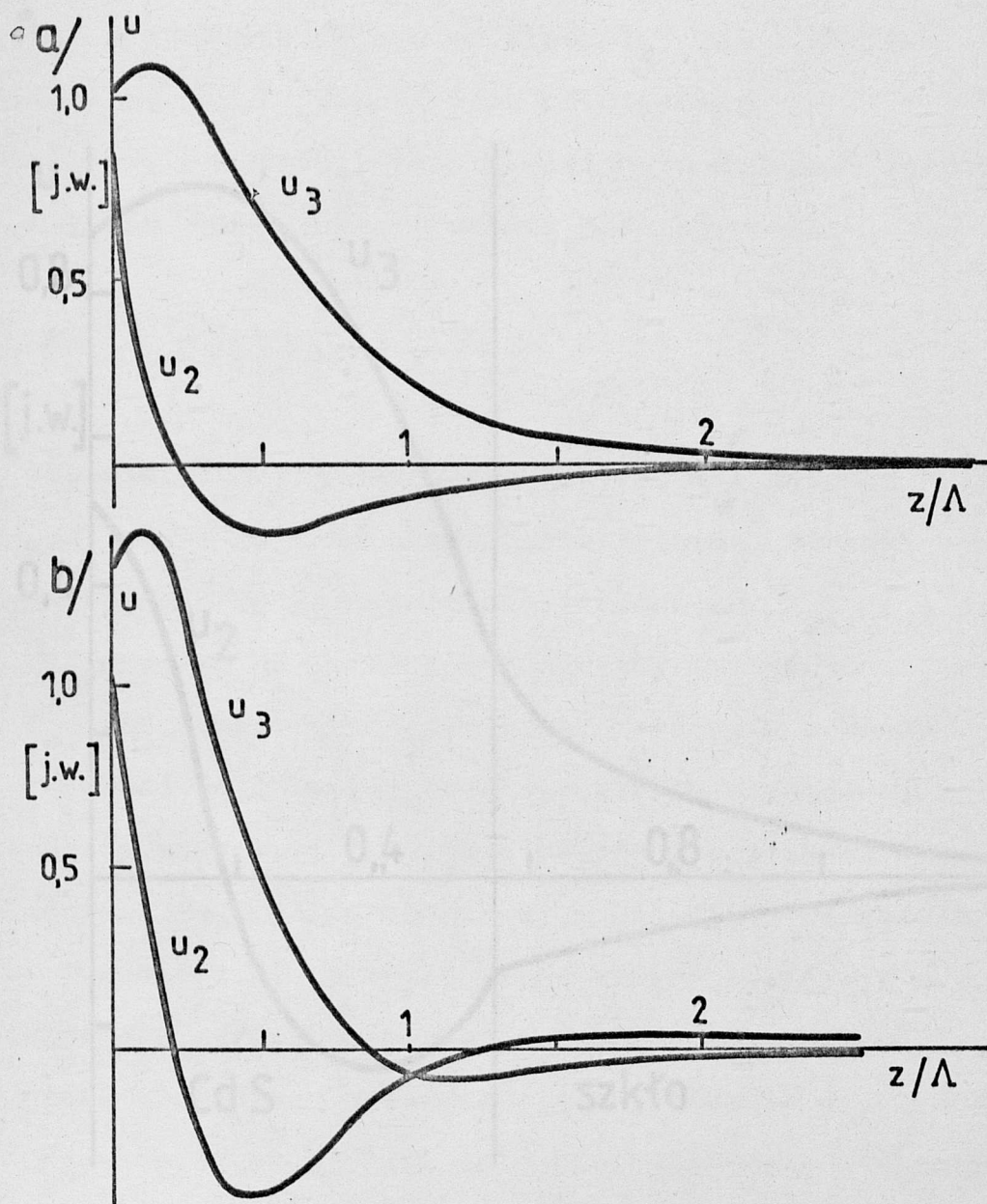
W zależności od wymiarów i własności fizycznych struktury mogą się w niej rozchodzić różne rodzaje fal: fala Rayleigha, Gulyaeva-Bleusteina, Love'a, Lamba, Stownlee, Sezawa i in.

W optoelektronice zintegrowanej stosuje się wyłącznie powierzchniowe fale Rayleigha. Fala Rayleigha jest to fala rozchodząca się przy powierzchni ośrodka i zawierająca dwie składowe odkształcenia przesunięte w fazie o 90° . W ośrodku amorficznym obie składowe leżą w płaszczyźnie wyznaczonej przez wektor falowy i normalną do powierzchni. Każda ze składowych zanika w głąb ośrodka w inny sposób. Na głębokości około $0,2 \Lambda$ / Λ - długość fali akustycznej/ składowa podłużna zmienia znak.

Na głębokości około 2λ amplituda fali zanika do zera. Przesunięcie w fazie składowych odkształcenia oznacza, że cząsteczki poruszają się po elipsach. Na rysunku 3.13a przedstawiono względny rozkład składowych odkształcenia w ośrodku amorficznym. W takim ośrodku prędkość fali i rozkład odkształceń nie zależą od częstotliwości i kierunku rozchodzenia się fali akustycznej. Jeżeli fala rozchodzi się na powierzchni kryształu, jej prędkość zależy od płaszczyzny i kierunku propagacji. Wyjątkiem jest propagacja akustycznej fali powierzchniowej po powierzchni prostopadłej do osi krystalograficznej szóstego rzędu. W kryształach amplituda odkształceń nie zanika monotonicznie lecz oscylacyjnie /rys. 3.13b/. Cząsteczki ośrodka dalej poruszają się po torach eliptycznych, ale elipsy mogą być pochylone w stosunku do normalnej, ponadto w kryształach kierunek strumienia energii może nie pokrywać się z kierunkiem wektora falowego.

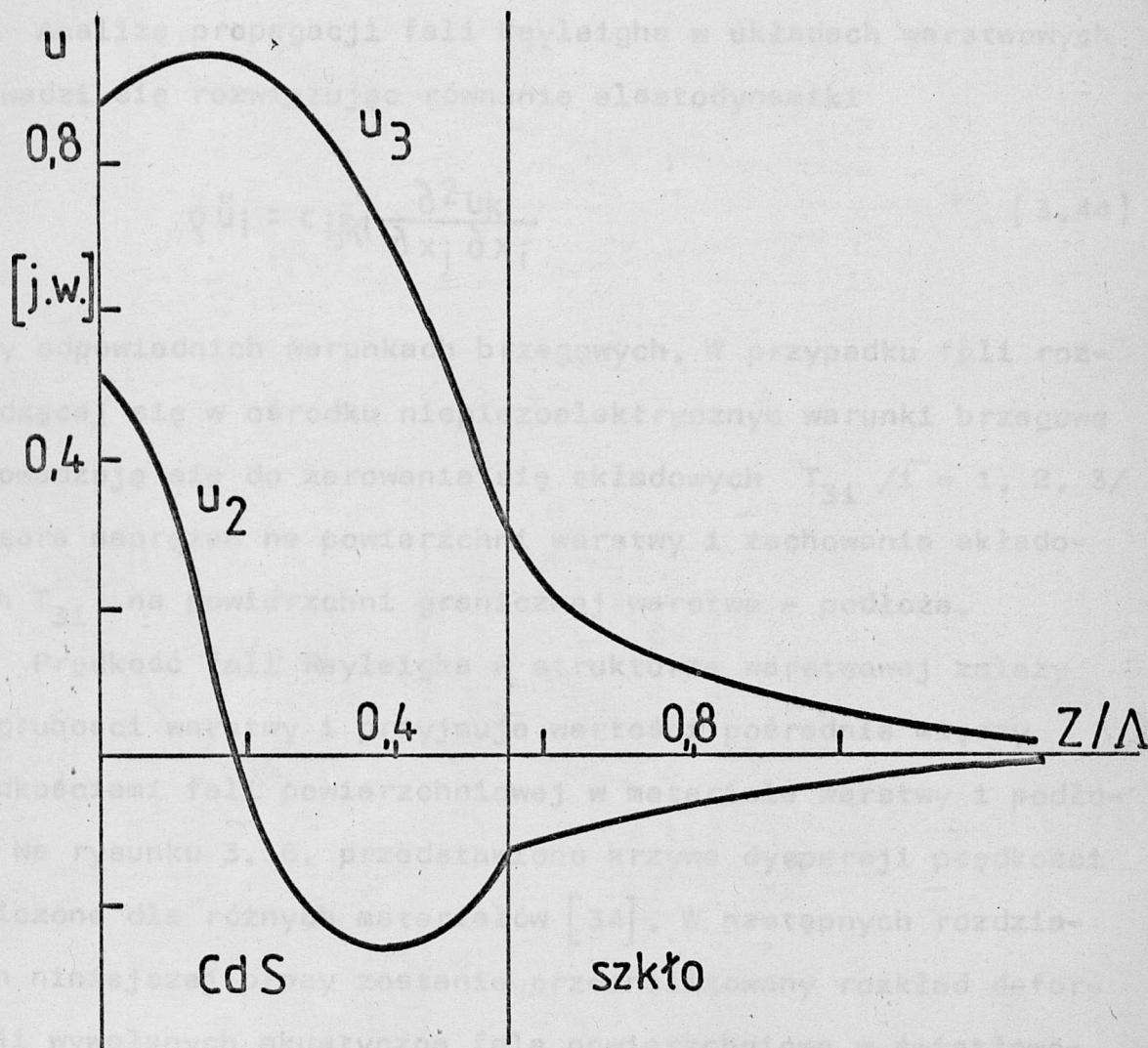
Fala Rayleigha może rozchodzić się również po powierzchni pokrytej cienką warstwą innego materiału. Na rysunku 3.14. przedstawiono rozkład odkształceń fali rozchodzącej się w układzie szkło - CdS [3]. Porównując rys. 3.13. i 3.14. widzimy, że powierzchnia pokryta cienką warstwą prowadzi falę Rayleigha podobnie jak powierzchnia bez warstwy. Podstawowa różnica polega na innej szybkości zaniku składowych odkształcenia w warstwie i podłożu i zmianie szybkości fali Rayleigha.

Zmiana współczynnika załamania wywołana efektem elastooptycznym jest proporcjonalna do deformacji ośrodka. Efektywność planarnego oddziaływania akustooptycznego jest określona przez rozkład deformacji sprężystych światłowodu.



Rys. 3.13. Rozkłady amplitudy normalnej u_3 i stycznej u_2 składowych odkształceń powierzchniowej fali Rayleigha dla topionego kwarcu /a/ i dla krzemu /b/ [35]

u_3 - składowa normalna,
 Λ - długość fali składowej



Rys. 3.14. Rozkład amplitudy odkształceń powierzchniowej fali Rayleigha w strukturze warstwowej CdS na szkło [3].
 u_2 - składowa styczna odkształcenia,
 u_3 - składowa normalna,
 Λ - długość fali akustycznej

Na rysunku 3.15. przedstawiono rozkłady deformacji w strukturze ZnO - topiony kwarc [2]. Jak widać z rysunków rozkład deformacji w warstwie zależy od stosunku H/Λ , gdzie H - grubość warstwy, a Λ długość fali akustycznej.

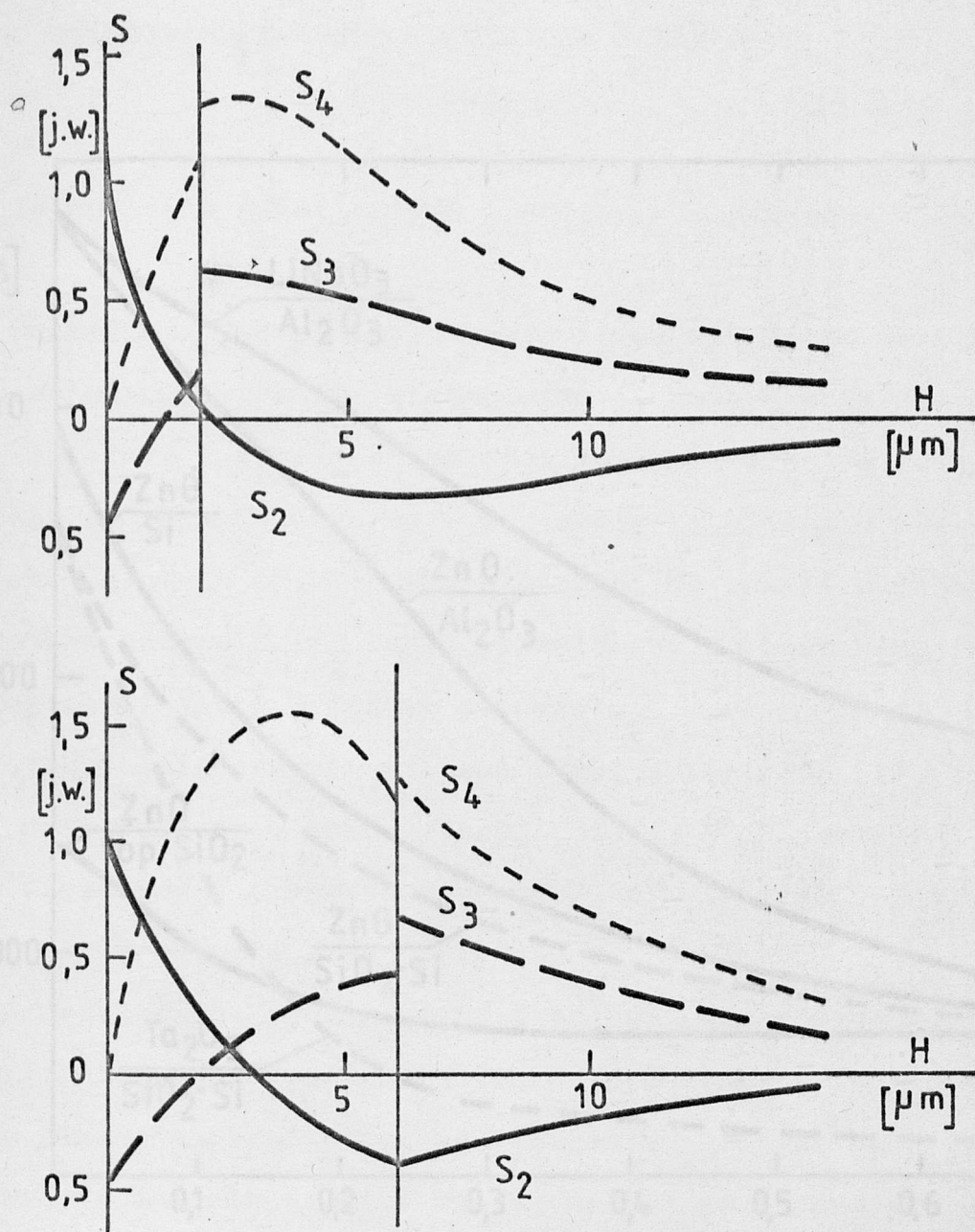
Analizę propagacji fali Rayleigha w układach warstwowych prowadzi się rozwiązując równanie elastodynamiki

$$\rho \ddot{u}_i = c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l} \quad (3.44)$$

przy odpowiednich warunkach brzegowych. W przypadku fali rozchodzącej się w ośrodku niepiezoelektrycznym warunki brzegowe sprowadzają się do zerowania się składowych $T_{3i} / i = 1, 2, 3$ tensora naprężeń na powierzchni warstwy i zachowania składowych T_{3i} na powierzchni granicznej warstwa - podłoże.

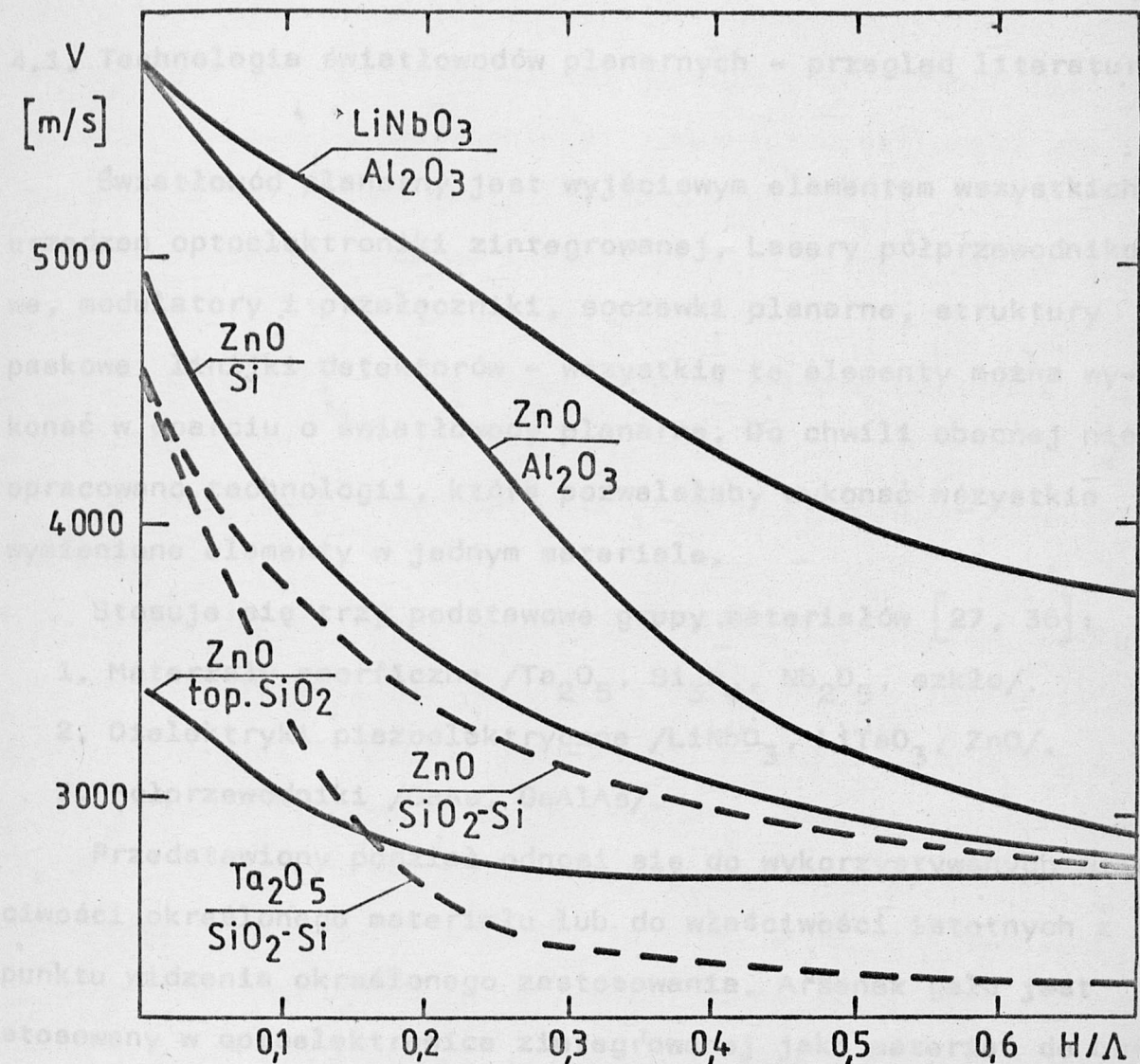
Prędkość fali Rayleigha w strukturze warstwowej zależy od grubości warstwy i przyjmuje wartości pośrednie między prędkościami fali powierzchniowej w materiale warstwy i podłoża. Na rysunku 3.16. przedstawiono krzywe dyspersji prędkości wyliczone dla różnych materiałów [34]. W następnych rozdziałach niniejszej pracy zostanie przeanalizowany rozkład deformacji wywołanych akustyczną falą powierzchniową w światłowodach z pięciotlenku tantalu.

Rys. 3.15. Rozkład składowych tensora deformacji wywołanych falą Rayleigha rozchodzącą się w strukturze warstwowej ZnO - topiony kwarc dla częstotliwości 200 MHz i dwóch różnych grubości warstwy [2].
 S_1, S_2, S_3 - składowe tensora deformacji w zapisie macierzowym dla układu współrzędnych z rys. 3.7.



Rys. 3.15. Rozkład składowych tensora deformacji wywołanych falą Rayleigha rozchodzącą się w strukturze warstwowej ZnO - topiony kwarc dla częstotliwości 200 MHz i dwóch różnych grubości warstwy [2].

S_1, S_2, S_4 - składowe tensora deformacji w zapisie macierzowym dla układu współrzędnych z rys. 3.7.



Rys. 3.16. Zależność prędkości fazowej fali Rayleigha w funkcji grubości warstwy dla różnych materiałów warstwy i podłoża.

Linia przerywaną zaznaczono wyniki otrzymane w niniejszej pracy dla warstw ZnO i Ta_2O_5 na podłożu z utlenionego krzemu /1,2 μm SiO_2 /

4. TECHNOLOGIA PLANARNEGO MODULATORA ŚWIATŁA

4.1. Technologia światłowodów planarnych - przegląd literatury

Światłowod planarny jest wyjściowym elementem wszystkich urządzeń optoelektroniki zintegrowanej. Lasery półprzewodnikowe, modulatory i przełączniki, soczewki planarne, struktury paskowe, linijki detektorów - wszystkie te elementy można wykonać w oparciu o światłowody planarne. Do chwili obecnej nie opracowano technologii, która pozwalałaby wykonać wszystkie wymienione elementy w jednym materiale.

Stosuje się trzy podstawowe grupy materiałów [27, 36]:

1. Materiały amorficzne / Ta_2O_5 , Si_3N_4 , Nb_2O_5 , szkło/.
2. Dielektryki piezoelektryczne / LiNbO_3 , LiTaO_3 , ZnO /.
3. Półprzewodniki /GaAs, GaAlAs/.

Przedstawiony podział odnosi się do wykorzystywanych właściwości określonego materiału lub do właściwości istotnych z punktu widzenia określonego zastosowania. Arsenek galu jest stosowany w optoelektronice zintegrowanej jako materiał do budowy źródeł światła - laserów półprzewodnikowych, nie wykorzystuje się jego właściwości piezoelektrycznych. Tlenek cynku znalazł zastosowanie w modulatorach akustooptycznych oraz jako materiał na przetwornik akustycznej fali powierzchniowej, z tego powodu - chociaż jest półprzewodnikiem - został umieszczony w drugiej grupie. Podobnie postępowano przy klasyfikacji innych materiałów. Pominęto w klasyfikacji materiały magnetoptyczne.

W chwili obecnej zainteresowanie światłowodami magnetoptycznymi wyraźnie zmalało.

Poniżej przedstawiono technologię wytwarzania światłowodów pierwszej i drugiej grupy. Światłowodów półprzewodnikowe występują w optyce zintegrowanej głównie jako element laserów półprzewodnikowych. Omówienie struktur optoelektroniki zintegrowanej w GaAs można znaleźć w pracy [36].

Światłowodów planarne można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

1. Struktury monolityczne ze światłowodem wykonanym w materiale podłoża.
2. Struktury heterogeniczne ze światłowodem naniesionym na podłoże.

W obu przypadkach współczynnik załamania warstwy tworzącej światłowod musi być większy od współczynnika załamania podłoża. Dodatkowo materiały światłowodu i podłoża powinny być przejrzyste w stosowanym zakresie widma. Obecnie większość struktur optyki zintegrowanej badana jest przy wykorzystaniu światła lasera He-Ne o długości fali 632,8 nm. W przyszłości w zintegrowanych układach optycznych planuje się zastosowanie laserów półprzewodnikowych emitujących falę o długości 800-900 nm. W przypadku stosowania układów optoelektroniki zintegrowanej w telekomunikacji światłowodowej należy liczyć się z koniecznością pracy w podczerwieni /800 - 1500 nm/. Można przyjąć, że materiały podłoża i światłowodu powinny być przejrzyste w zakresie 600 - 1500 nm. Spośród dużej liczby materiałów spełniających powyższe wymagania jako najczęściej stosowane można wymienić:

1. Światłowodowy dyfuzyjne w niobianie litu oraz światłowodowy dyfuzyjne szklane.

2. Światłowodowy planarne wykonane z Ta_2O_5 , Nb_2O_5 , Si_3N_4 , szkła, ZnO.

W tabeli 4.1. przedstawiono liczbę publikacji, jakie ukazywały się na temat tych światłowodów w ciągu ostatnich pięciu lat.

Tabela 4.1. Zestawienie podstawowych materiałów stosowanych w optyce zintegrowanej w latach 1978-1983
/źródło: Physics Abstracts/

Materiał	Liczba publikacji w latach 1978-1983
$LiNbO_3$ - światłowodowy dyfuzyjne	315
szkło - światłowodowy dyfuzyjne	26
szkło - światłowodowy planarne	8
ZnO - światłowodowy planarne	10
Ta_2O_5 - światłowodowy planarne	9
Nb_2O_5 - światłowodowy planarne	5
Si_3N_4 - światłowodowy planarne	4
inne	21

Światłowodowy planarne można wytwarzać następującymi metodami [36]:

- rozpylanie jonowe,
- polimeryzacja,
- epitaksja,
- CVD,
- nanoszenie cieczy na wirujące podłoże,
- utlenianie termiczne naniesionych warstw.

W optoelektronice zintegrowanej nie stosuje się parowania do nanoszenia warstw światłowodowych. Struktura warstw parowanych sprawia, że tłumienie dla światła rozchodzącego się w płaszczyźnie warstwy jest zwykle większe od 10 dB/cm [38]. Rodzaj technologii stosowanej do nanoszenia warstwy zależy od materiału światłowodu. Podstawową metodą nanoszenia warstw światłowodowych jest rozpylanie jonowe [5, 39-41].

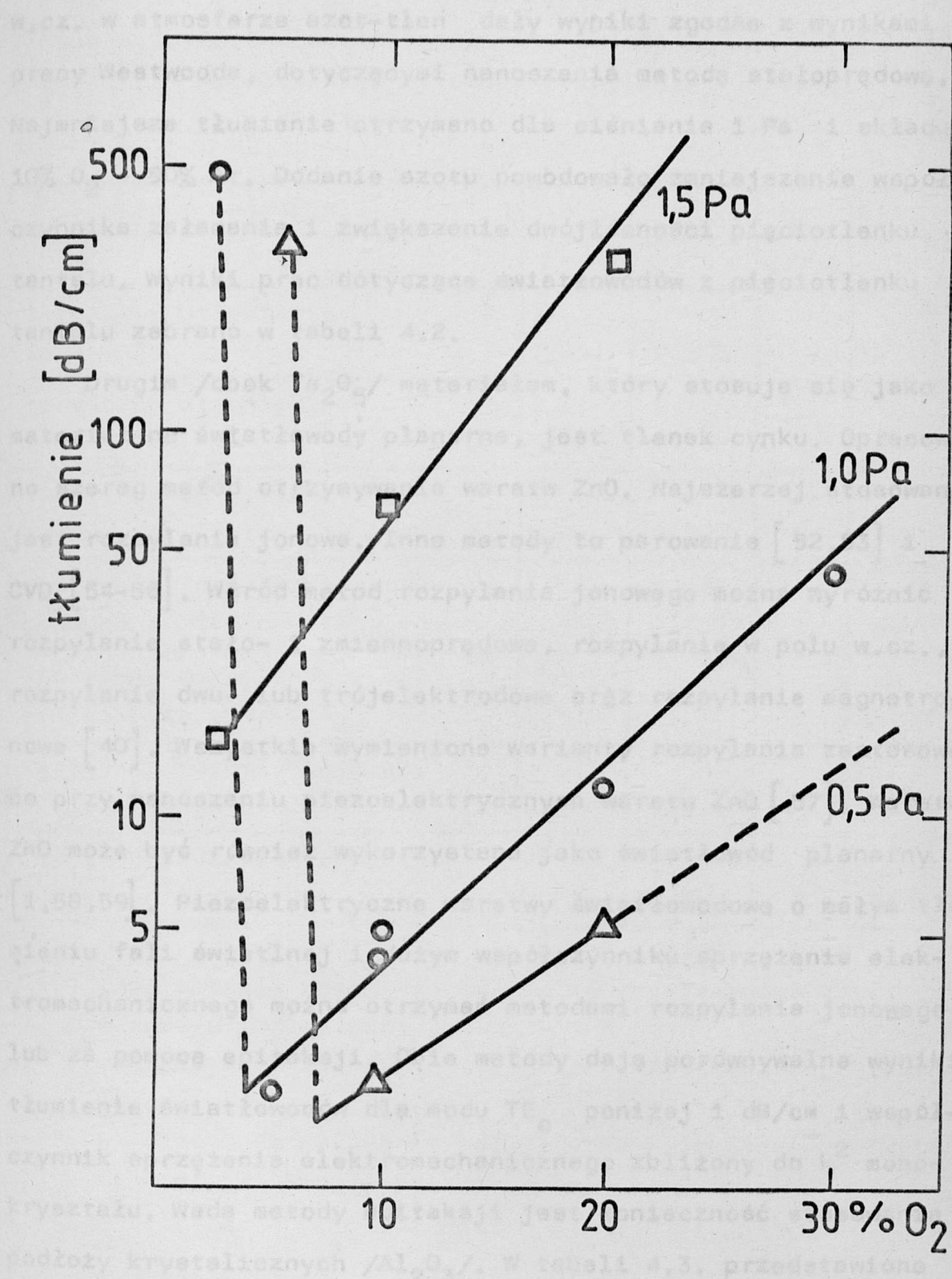
Jony gazu, bombardując target, powodują odrywanie cząstek materiału, który następnie osadza się na podłożu. Materiał naniesionej warstwy zazwyczaj różni się pod względem składu i współczynnika załamania od materiału targetu. W szczególnym przypadku, jeżeli rozpylanie prowadzone jest w atmosferze utleniającej, stosując target metalowy, otrzymuje się światłowody tlenkowe: ZnO [39], Ta_2O_5 [42], Nb_2O_5 [43]. Odmianą tej metody jest utlenianie termiczne warstw metalicznych /tantal/ otrzymanych metodą rozpylania jonowego [44]. Własności optyczne światłowodów wytwarzanych metodami rozpylania jonowego zależą głównie od ciśnienia w komorze próżniowej, składu atmosfery rozpylającej, temperatury podłoża.

Pierwszy światłowod z pięciotlenku tantalu opisano w roku 1971 [38, 45]. Warstwę Ta_2O_5 otrzymano rozpylając tantal w atmosferze argonu i utleniając go w temperaturze 500° C. Warstwy nanoszono na podłoże szklane. Otrzymany światłowod miał tłumienie 0,9 dB/cm. Ingrey [44] wykonał światłowod z termicznie utlenionego tantalu, nanosząc warstwy tantalowe w mieszaninie Ar-N_2 . Stwierdzono wpływ azotu na współczynnik załamania, dwójkomność i tłumienie światłowodu. Wadą metody utleniania termicznego jest jej dwuetapowość: 1 - naniesienie warstwy metalu, 2 - utlenianie. Zaletą metody jest łatwość wykonania w

warstwie metalicznej struktur optoelektroniki zintegrowanej, np. światłowodów paskowych [45]. Szczegółowe badania nad światłowodami Ta_2O_5 nanoszonymi metodą rozpylania reaktywnego wykonał Westwood i in. [42,44,46-49]. Stwierdzono, że własności światłowodu zależą od ciśnienia i składu gazów podkloszowych, szybkości przepływu gazów, temperatury podłoża, odległości i kąta położenia podłoża względem targetu. Badano również wpływ parametrów rozpylania na gęstość i własności elektryczne nanoszonych warstw. Warstwy nanoszono rozpylając reaktywnie tantal metodą stałoprądową w atmosferze $Ar-O_2$ lub N_2-O_2 . Stwierdzono, że azot zmniejsza współczynnik załamania, gęstość i przenikalność elektryczną Ta_2O_5 , dodanie azotu powoduje również wystąpienie dwójłomności optycznej pięciotlenku tantalu.

Przeprowadzono również próby wykonania światłowodów poprzez anodyzację warstw tantalu. Próby te zakończyły się niepowodzeniem [44].

Paulson i in. [50] badał wpływ parametrów rozpylania na tłumienie światłowodów Ta_2O_5 nanoszonych metodą rozpylania w.cz. w mieszaninie argon-tlen. Stwierdzono, że straty światłowodu zależą od składu atmosfery podkloszowej, całkowitego ciśnienia i szybkości przepływu gazów, temperatury i polaryzacji podłoża. Rozpylając tantal w mieszaninie 10% O_2 i 90% Ar przy ciśnieniu 0,5 Pa otrzymano światłowodory o stratach poniżej 1 dB/cm. Ponadto stwierdzono, że zwiększenie temperatury podłoża i szybkości przepływu gazów zwiększa tłumienie światłowodów. Na rysunku 4.1. przedstawiono wpływ składu atmosfery podkloszowej i ciśnienia na tłumienie światłowodu [50]. Wpływ azotu na światłowodory nanoszone metodą reaktywnego rozpylania w.cz przedstawiono w pracy [51]. Badania światłowodów rozpylanych metodą



Rys. 4.1. Wpływ ciśnienia i składu atmosfery reaktywnej na tłumienie światłowodu Ta₂O₅ napyłanego reaktywnie w atmosferze argon-tlen [50].

w.cz. w atmosferze azot-tlen dały wyniki zgodne z wynikami pracy Westwooda, dotyczącymi nanoszenia metodą stałoprądową. Najmniejsze tłumienie otrzymano dla ciśnienia 1 Pa i składu 10% O₂ - 90% Ar. Dodanie azotu powodowało zmniejszenie współczynnika załamania i zwiększenie dwójłomności pięciotlenku tantalu. Wyniki prac dotyczące światłowodów z pięciotlenku tantalu zebrano w tabeli 4.2.

Drugim /obok Ta₂O₅/ materiałem, który stosuje się jako materiał na światłowodory planarne, jest tlenek cynku. Opracowano szereg metod otrzymywania warstw ZnO. Najszerzej stosowane jest rozpylanie jonowe. Inne metody to parowanie [52,53] i CVD [54-56]. Wśród metod rozpylania jonowego można wyróżnić rozpylanie stało- i zmiennoprądowe, rozpylanie w polu w.cz., rozpylanie dwu- lub trójelektrodowe oraz rozpylanie magnetro- nowe [40]. Wszystkie wymienione warianty rozpylania zastosowano przy nanoszeniu piezoelektrycznych warstw ZnO [57]. Warstwa ZnO może być również wykorzystana jako światłowod planarny [1,58,59]. Piezoelektryczne warstwy światłowodowe o małym tłumieniu fali świetlnej i dużym współczynniku sprzężenia elektromechanicznego można otrzymać metodami rozpylania jonowego lub za pomocą epitaksji. Obie metody dają porównywalne wyniki: tłumienie światłowodów dla modu TE₀ poniżej 1 dB/cm i współczynnik sprzężenia elektromechanicznego zbliżony do k² monokryształu. Wadą metody epitaksji jest konieczność stosowania podłoży krystalicznych /Al₂O₃/. W tabeli 4.3. przedstawiono własności warstw ZnO otrzymanych różnymi metodami rozpylania jonowego [57]. Metodami rozpylania jonowego można ponadto otrzymać małostratne światłowodory szklane [39] i światłowodory z tlenku niobu [43].

Tabela 4.2. Zestawienie właściwości światłowodów z Ta_2O_5 wytwarzanych metodami rozpylania jonowego, $\lambda = 632,8 \text{ nm}$

Metoda nanoszenia	n_o	n_e	α	Lit.
			dB/cm	
termiczne utlenianie warstw Ta	2,214	2,205	0,9	38,45
termiczne utlenianie warstw TaN *	2,21- -1,19	2,21- -1,82	3	44
reaktywne rozpylanie stałoprądowe w mieszaninie $Ar-O_2$ **	2,20	2,12	1	42
reaktywne rozpylanie stałoprądowe w mieszaninie N_2-O_2 ***	2,083- -1,850	2,083- -1,877	1	46
reaktywne rozpylanie w.cz. w mieszaninie $Ar-O_2$	2,152		2	5,50
reaktywne rozpylanie w.cz. w mieszaninie $Ar-O_2$	2,118	2,111	2	51
reaktywne rozpylanie w.cz. w mieszaninie N_2-O_2	1,950	1,973	2	51

* - współczynnik załamania maleje ze zwiększeniem zawartości azotu w warstwie

** - współczynnik załamania maleje przy zwiększaniu ciśnienia, $\lambda = 488 \text{ nm}$

*** - współczynnik załamania maleje przy zwiększaniu zawartości azotu w atmosferze reaktywnej

Najlepsze warstwy otrzymano przy zastosowaniu metody niskociśniskowej - otrzymano światłowodów o tłumieniu poniżej 0,3 dB/cm. W warstwach wykonanych metodą plazmową nie otrzymano propagacji światła.

Przedstawione materiały, tzn. Ta_2O_5 , ZnO , szkło, Si_3N_4 i Nb_2O_5 można uznać za podstawowe w technologii urządzeń typu

Tabela 4.3. Porównanie właściwości światłowodów ZnO nanoszonych przy pomocy różnych wariantów metody rozpylania jonowego [57]

Nazwa metody rozpylania	chropowatość powierzchni	współczynnik załamania		tłumienie
		n_o	n_e	
	nm			dB/cm
dwuelektrodowe stałoprądowe	100	1,973	1,978	5 - 10
dwuelektrodowe w.cz.	50	1,974	1,978	4 - 8
trójelektrodowe stałoprądowe	10	1,985	2,002	1 - 2
magnetronowe	10	1,993	2,018	2 - 3

Inną metodą umożliwiającą otrzymywanie małostratnych światłowodów planarnych jest chemiczne osadzanie z fazy gazowej /CVD/. Metodą tą nanosi się głównie światłowody z azotku krzemu [60] i tlenku cynku [54-56]. Światłowody ZnO są obecnie nanoszone głównie metodami rozpylania jonowego. Jeżeli chodzi o azotek krzemu, to sprawdzono przydatność trzech wariantów metody CVD do nanoszenia warstw światłowodowych [60]:

- plazmowe CVD,
- CVD przy ciśnieniu atmosferycznym,
- niskociśnieniowe CVD.

Najlepsze warstwy otrzymano przy zastosowaniu metody niskociśnieniowej - otrzymano światłowody o tłumieniu poniżej 0,1 dB/cm. W warstwach wykonanych metodą plazmową nie otrzymano propagacji światła.

Przedstawione materiały, tzn. Ta_2O_5 , ZnO, szkło, Si_3N_4 i Nb_2O_5 można uznać za podstawowe w technologii urządzeń typu

planarnego analizatora widma o strukturze warstwowej [4,5,23] . Zestawienie innych materiałów i technologii można znaleźć w pracach [39,41] .

Na zakończenie tego przeglądu literatury należy podkreślić, że podstawowym materiałem optoelektroniki zintegrowanej jest obecnie niobian litu ze strukturą światłowodową wykonaną poprzez dyfuzję tytanu [22] . Jeżeli za kryterium przyjąć liczbę publikacji na temat zrealizowanych elementów, to można stwierdzić, że:

1/ w zakresie urządzeń optyki zintegrowanej, takich jak przełączniki, modulatory elektrooptyczne, sprzęgacze kierunkowe itp., niobian litu jest materiałem podstawowym [61] ,

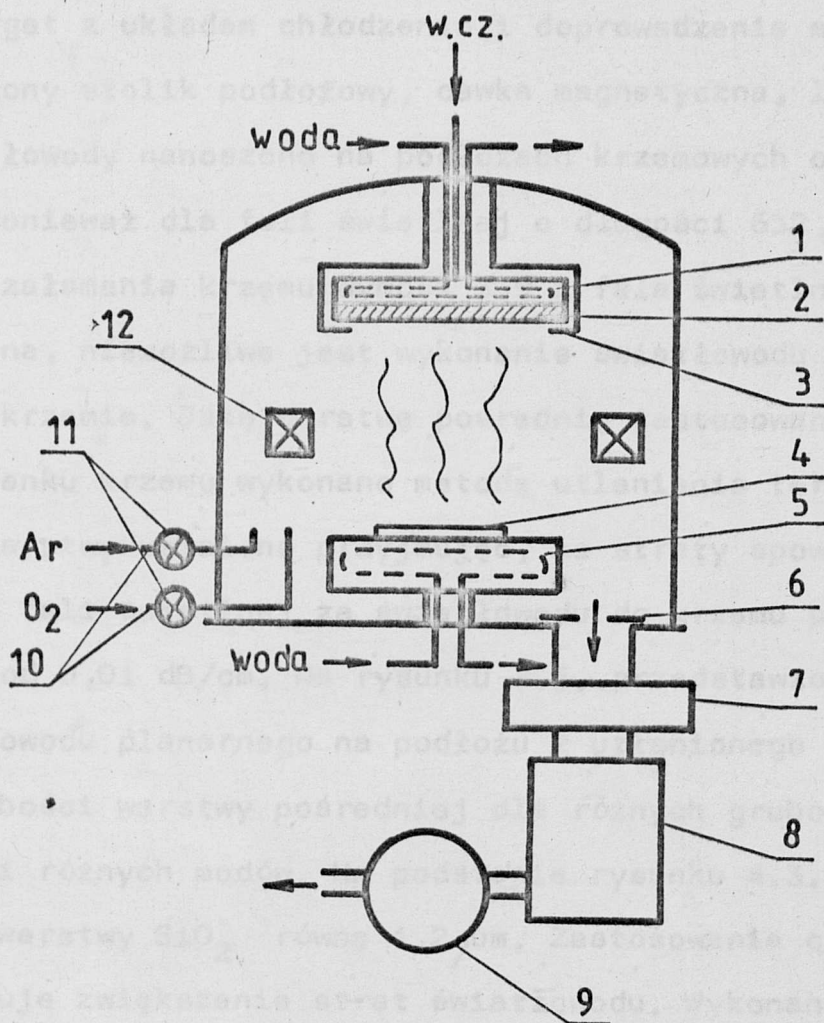
2/ w zakresie urządzeń typu planarnego akustooptycznego analizatora widma istnieją rozwiązania oparte o światłowody warstwowe [23] i rozwiązania oparte o światłowody dyfuzyjne w niobianie litu [25] .

Parametry obu rozwiązań są porównywalne.

4.2. Otrzymywanie i własności światłowodów z Ta_2O_5 na podłożu z utlenionego krzemu

4.2.1. Technologia nanoszenia światłowodów z Ta_2O_5

Światłowody z pięciotlenku tantalu wykonano metodą reaktywnego rozpylania w polu wysokiej częstotliwości [40,51] . Na rysunku 4.2. przedstawiono schemat stanowiska do nanoszenia światłowodów. W skład stanowiska wchodzi: zasilacz mocy w.c.z. /13,56 MHz, 120 W/, napyłarka próżniowa z olejowym układem

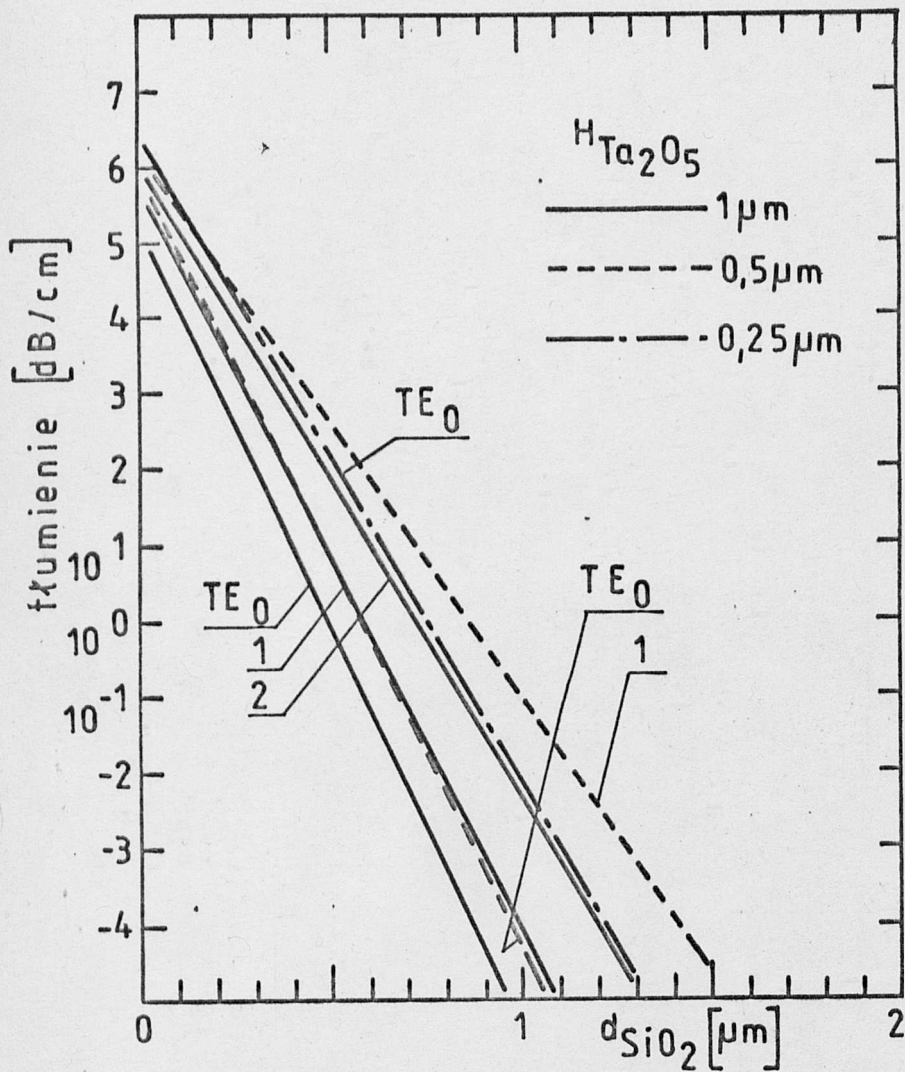


Rys. 4.2. Schemat układu do nanoszenia światłowodów z Ta₂O₅ metodą reaktywnego napyłania w.c.z.

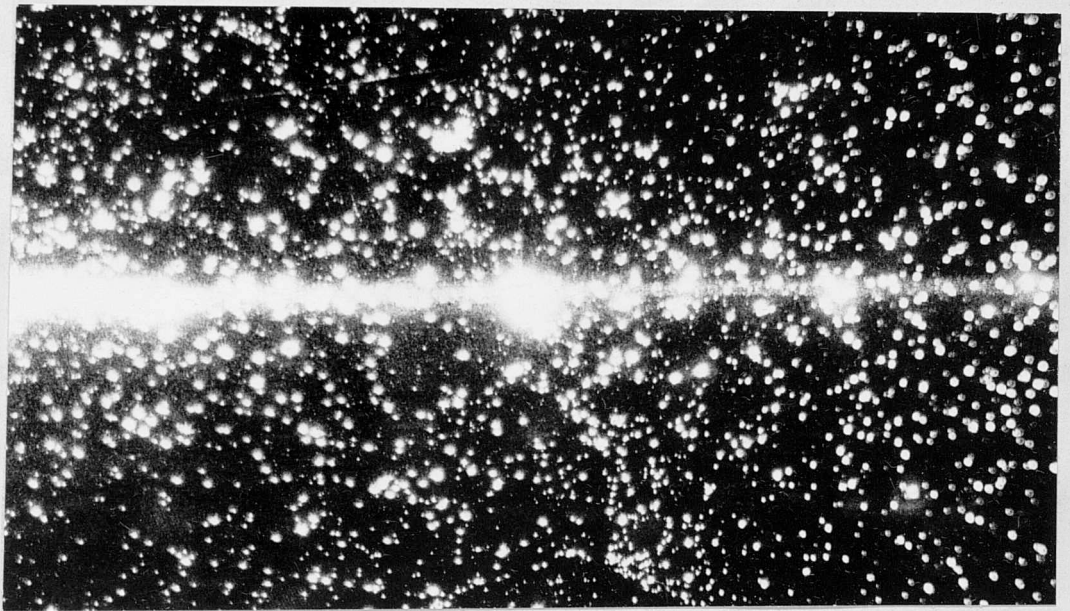
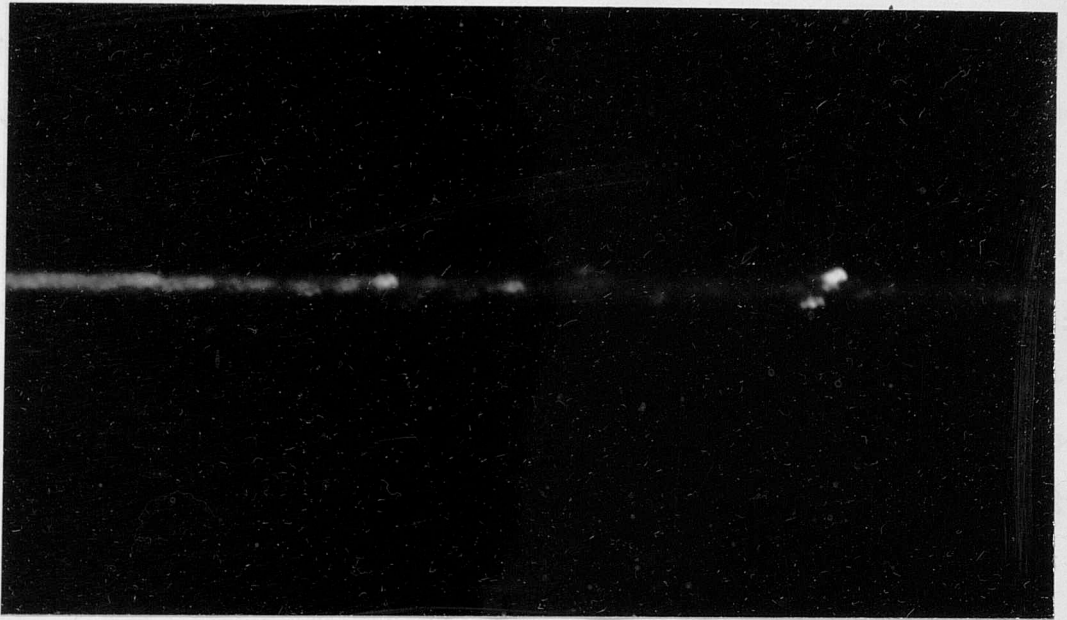
- 1 - chłodzony wodą uchwyt targetu z układem doprowadzenia mocy w.c.z.,
- 2 - target tantalowy,
- 3 - osłona targetu,
- 4 - podłoże,
- 5 - chłodzony wodą stół podłożowy,
- 6 - przesłona dławiąca,
- 7 - wymrażarka,
- 8 - pompa dyfuzyjna,
- 9 - pompa obrotowa,
- 10 - linie gazowe,
- 11 - zawory dozujące,
- 12 - cewka magnetyczna.

pompowym, target z układem chłodzenia i doprowadzenia mocy w.cz., chłodzony stolik podłożowy, cewka magnetyczna, linia gazowa. Światłowody nanoszono na podłożach krzemowych o średnicy 38 mm. Ponieważ dla fali świetlnej o długości 632,8 nm współczynnik załamania krzemu wynosi 3,9 i fala świetlna jest silnie tłumiona, niemożliwe jest wykonanie światłowodu bezpośrednio na krzemie. Jako warstwę pośrednią zastosowano SiO_2 . Warstwę dwutlenku krzemu wykonano metodą utleniania termicznego. Grubość warstwy ustalono przyjmując, że straty spowodowane odprężaniem fali świetlnej ze światłowodu do krzemu powinny być mniejsze od 0,01 dB/cm. Na rysunku 4.3. przedstawiono tłumienie światłowodu planarnego na podłożu z utlenionego krzemu w funkcji grubości warstwy pośredniej dla różnych grubości światłowodów i różnych modów. Na podstawie rysunku 4.3. przyjęto grubość warstwy SiO_2 równą $1,2\text{ }\mu\text{m}$. Zastosowanie cieńszej warstwy powoduje zwiększenie strat światłowodu. Wykonanie grubszej warstwy SiO_2 wymaga długich czasów utleniania, ponadto w grubszych warstwach następują początki krystalizacji SiO_2 , co wywołuje dodatkowe straty na skutek rozpraszania światła na granicach ziaren. Bezpośrednio po utlenianiu płytki krzemowe umieszczano w napylarce. Dopuszczalne było przetrzymywanie płytek przez tydzień w eksykatorze z osuszaczem. W światłowodach wykonanych na płytkach przechowywanych dłużej lub w światłowodach przechowywanych w innych pojemnikach silnie zwiększały się straty wywołane rozpraszaniem światła.

Sposób przygotowania i jakość stosowanych podłoży miały zasadniczy wpływ na jakość otrzymanych światłowodów. Na rysunku 4.4. przedstawiono fotografię wiązki światła rozchodzącej się w światłowodzie naniesionym na płytce bezpośrednio po utle-



Rys. 4.3. Wpływ grubości warstwy pośredniej SiO_2 na tłumienie światłowodu z pięcioletku tantalum naniesionego na podłoże z utlenionego krzemu. Tłumienie to jest spowodowane odsprzęganiem fali świetlnej ze światłowodu do krzemu.



Rys. 4.4. Wpływ czasu przechowywania podłoża na jakość wykonanego światłowodu
a/ propagacja wiązki światła w światłowodzie wykonanym bezpośrednio po utlenianiu krzemu
b/ propagacja światła w światłowodzie wykonanym miesiąc po utlenianiu, podłoże przechowywano w ekeykatorze z osuszaczem.

nianiu, i w światłowodzie wykonanym 4 tygodnie po utlenianiu. Jak widać długotrwałe przechowywanie podłoży zwiększa rozpraszanie światła w warstwie. W rozdziale 4.4 szczegółowo opisano proces przygotowania podłoży pod światłowody planarne Ta_2O_5 i ZnO . Zarówno mycie jak utlenianie krzemu są procesami opracowanymi w ITE Politechniki Wrocławskiej dla potrzeb technologii półprzewodnikowej. Utlenione płytki krzemowe umieszczano w napyłarce. Światłowod z pięciotlenku tantalu do badania oddziaływania akustooptycznego nanoszono na połowie płytki. Na drugiej połowie, maskowanej w czasie procesu maską mechaniczną, nanoszono następnie warstwę ZnO i wykonywano przetworniki międzypalczaste.

Proces nanoszenia światłowodów Ta_2O_5 przebiegał następująco:

1. Umieszczenie podłoża na stoliku podłożowym
2. Odpompowanie klosza pompą obrotową do ciśnienia 7 Pa - 5 min.
3. Pompowanie pompą dyfuzyjną do ciśnienia 5×10^{-4} Pa, w czasie pompowania wygrzewanie klosza - 1,5 h
4. Zamknięcie przesłony dławiącej, włączenie chłodzenia klosza i elementów podkloszowych
5. Dozowanie gazów: tlen - 0,2 Pa, argon - 2,7 Pa
6. Włączenie generatora w.cz. /13,56 MHz/, zapalenie wyładowania w.cz. i ustalenie napięcia stałego nabudowującego się na targecie /450 V/
7. Nanoszenie warstwy pięciotlenku tantalu, prędkość nanoszenia 4 nm/min.
8. Wyłączenie generatora, wygrzanie klosza i elementów podkloszowych

9. Zapowietrzenie klosza i wyjęcie światłowodu

Nanoszenie światłowodów prowadzono w obecności pola magnetycznego, przy prądzie cewki 3 A. Odległość target - podłoże wynosiła 45 mm. Przesłonegę dławiacą stosowano w celu poprawienia warunków pracy pompy dyfuzyjnej w zakresie stosowanych ciśnień roboczych.

4.2.2. Własności światłowodów z Ta_2O_5 wytwarzanych metodą reaktywnego rozpylania w.cz.

Warstwy pięciotlenku tantalum wykonane metodą reaktywnego rozpylania w.cz. tak jak to przedstawiono w poprzednim rozdziale, miały gładką powierzchnię i strukturę amorficzną.

Na rys. 4.5a przedstawiono zdjęcie krawędzi płytki ze światłowodem z Ta_2O_5 na podłożu z utlenionego krzemu. Zdjęcie wykonano przy pomocy mikroskopu skaningowego. Na rys. 4.5b przedstawiono zdjęcie powierzchni światłowodu. Strukturę warstw badano metodami dyfrakcji rentgenowskiej i elektronowej. Nie stwierdzono obecności kryształitów. Na tej podstawie przyjęto, że światłowody z Ta_2O_5 mają strukturę amorficzną. Światłowody nanoszono na podłoża o temperaturze 20°C. Zwiększenie temperatury podłoża powodowało wzrost tłumienia światłowodu. W warstwach nanoszonych na podłoża o temperaturze powyżej 100°C nie udało się uzyskać propagacji światła.

Współczynnik załamania i grubość światłowodu mierzono przy pomocy sprzęgacza pryzmatycznego [36]. Dane dotyczące współczynnika załamania i grubości światłowodów zebrano w tabeli 6.3 w rozdziale 6. Tłumienie światłowodów mierzono przy pomocy dwóch sprzęgaczy pryzmatycznych. Najlepsze światłowody

miały tłumienie 2 dB/cm.

4.3. Otrzymywanie i własności światłowodów ZnO na podłożu z utlenionego krzemu

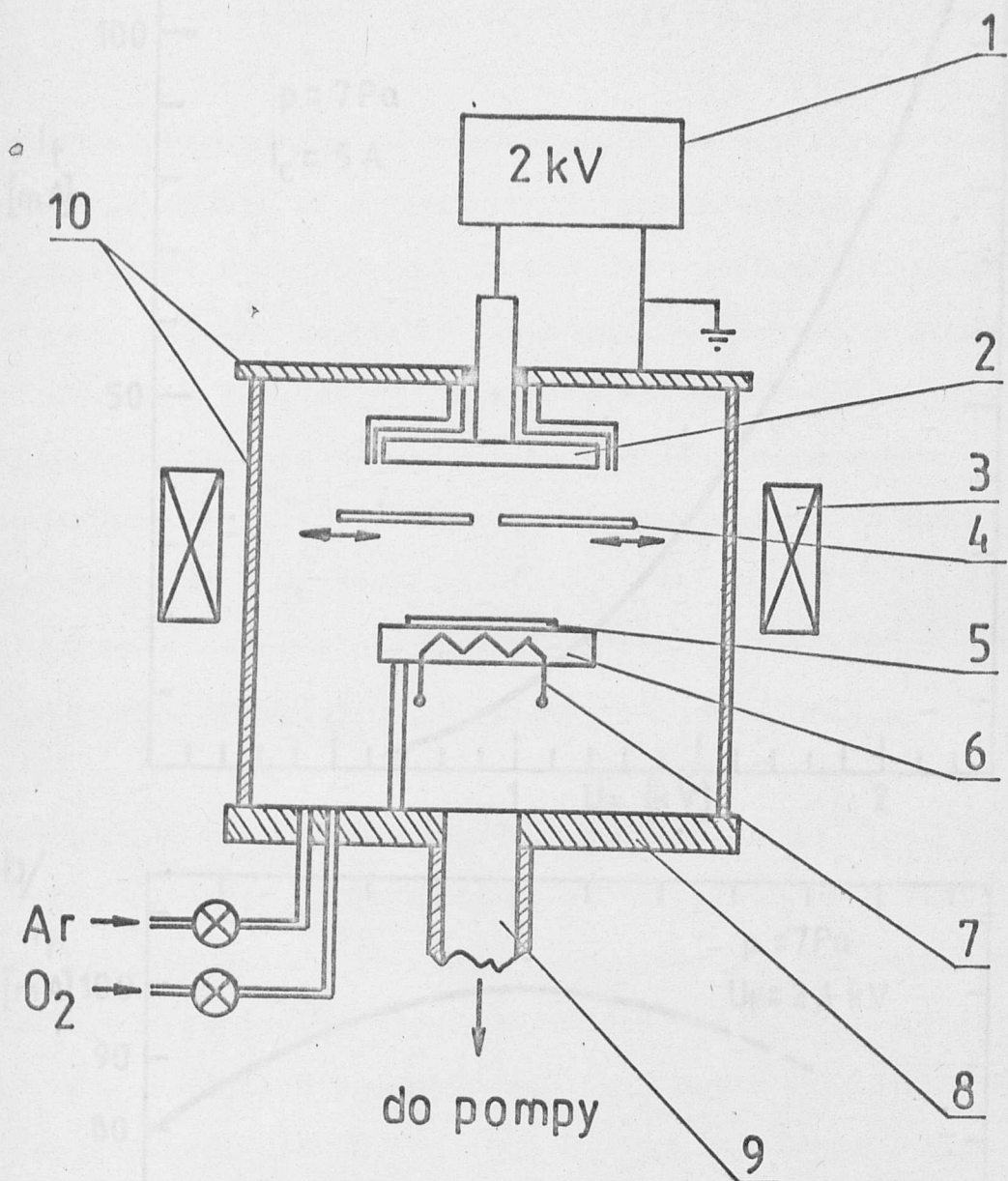
4.3.1. Technologia nanoszenia światłowodów ZnO

Światłowodowy z tlenku cynku wykonano metodą reaktywnego rozpylania stałoprądowego. Na rys. 4.6 przedstawiono schemat stanowiska w którym nanoszono światłowodowy. Jest to stanowisko wykonane w ITE Politechniki Wrocławskiej [62] w oparciu o stanowisko pompowe SP-800 P produkcji ZDAP w Bolesławcu.

W skład stanowiska wchodzi: stanowisko pompowe z olejową pompą dyfuzyjną, szklany klosz, zasilacz wysokiego napięcia, target z układem chłodzenia, grzany radiacyjnie stolik podłożowy, cewka magnetyczna, linia gazowa. Na rys. 4.7 przedstawiono charakterystyki wyładowania jarzeniowego. Rys. 4.7a przedstawia zależność prądu wyładowania od napięcia targetu dla izolowanego stolika podłożowego. Na rys. 4.7b przedstawiono zależność prądu targetu od prądu cewki, dla napięcia targetu 2 kV. Na podstawie wykresu 4.7b przyjęto prąd cewki równy 5 A. Dalsze zwiększanie prądu powodowało niewielki wzrost prądu targetu i szybkości nanoszenia.

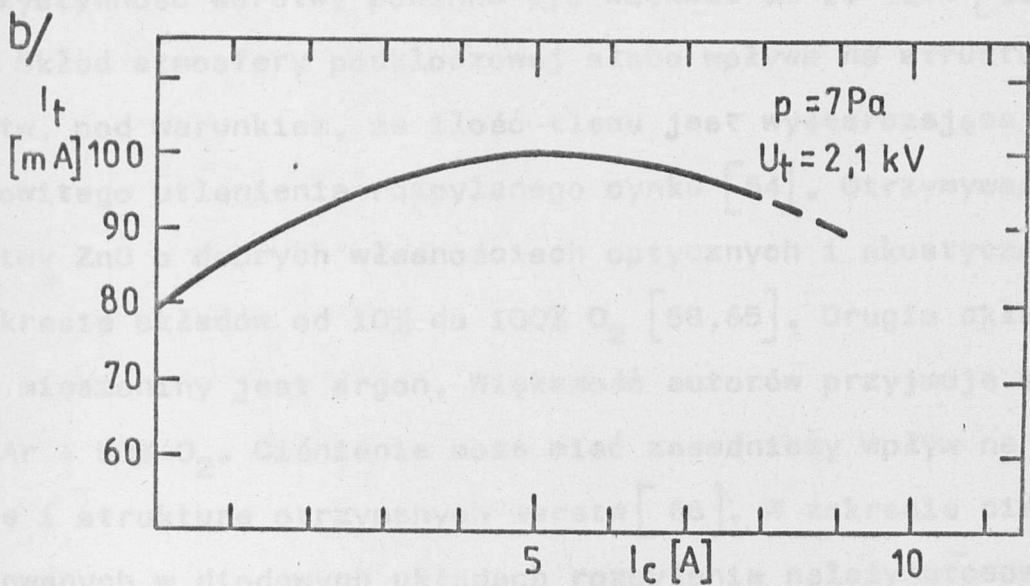
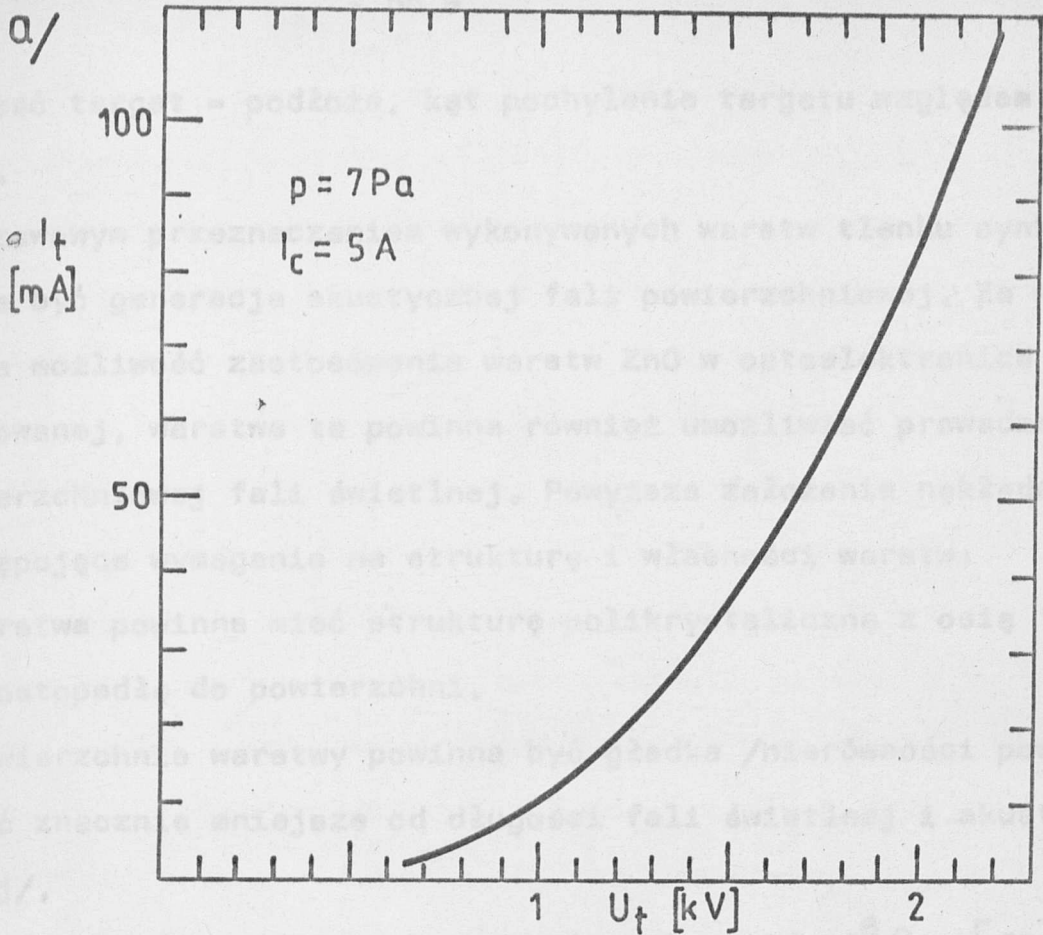
Jako podłoża stosowano utlenione płytki krzemowe o średnicy 38 mm. Sposób przygotowania podłoża przedstawiono w rozdz. 4.4.

Jakość i struktura warstw nanoszonych metodą reaktywnego rozpylania jonowego jest określona przez następujące parametry [57]: skład atmosfery podkloszowej, ciśnienie, temperatura podłoża, gęstość mocy wyładowania, napięcie wyładowania, od-



Rys. 4.6. Schemat stanowiska do reaktywnego nanoszenia światłowodów ZnO metodą reaktywnego napyłania stałoprądowego

- 1 - zasilacz wysokiego napięcia, 2 - target,
- 3 - cewka magnetyczna, 4 - przesłona, 5 - podłoże,
- 6 - stolik podłożowy, 7 - grzejnik radiacyjny,
- 8 - podstawa, 9 - wlot pompy, 10 - obudowa



Rys. 4.7. a/ zależność prądu targetu I_t od napięcia targetu U_t
b/ zależność prądu targetu od prądu cewki

ległość target - podłoże, kąt pochylenia targetu względem podłoża.

Podstawowym przeznaczeniem wykonywanych warstw tlenku cynku miała być generacja akustycznej fali powierzchniowej. Ze względu na możliwość zastosowania warstw ZnO w optoelektronice zintegrowanej, warstwa ta powinna również umożliwiać prowadzenie powierzchniowej fali świetlnej. Powyższe założenia nakładają następujące wymagania na strukturę i własności warstw:

- warstwa powinna mieć strukturę polikrystaliczną z osią "c" prostopadłą do powierzchni,
- powierzchnia warstwy powinna być gładka /nierówności powinny być znacznie mniejsze od długości fali świetlnej i akustycznej/.
- rezystywność warstwy powinna być większa od $10^6 \Omega \text{cm}$ [63].

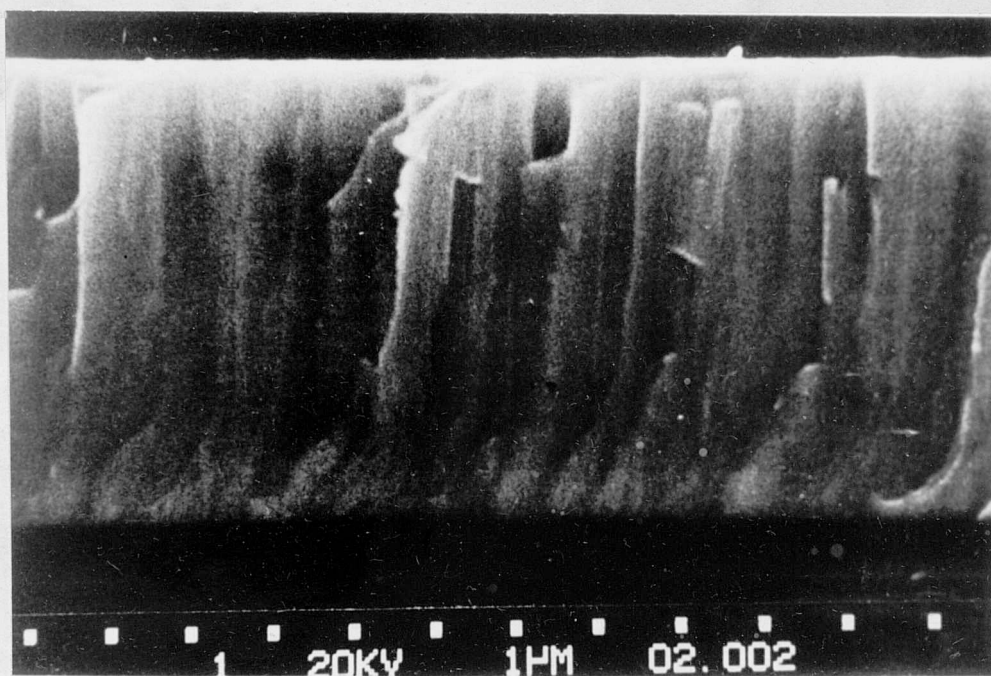
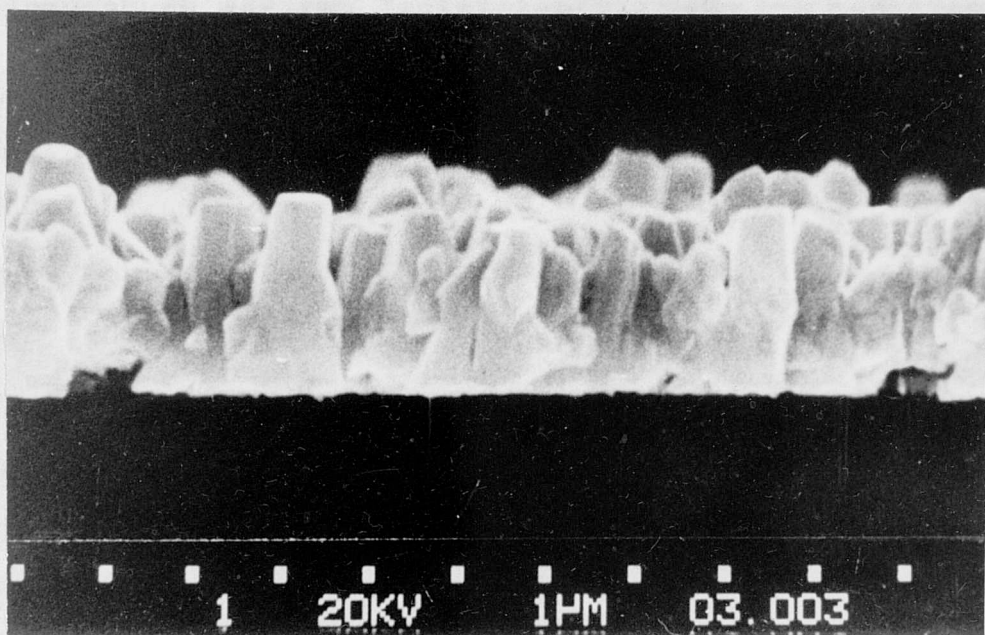
Skład atmosfery podkloszowej słabo wpływa na strukturę warstw, pod warunkiem, że ilość tlenu jest wystarczająca do całkowitego utlenienia rozpylanego cynku [64]. Otrzymywano warstwy ZnO o dobrych własnościach optycznych i akustycznych w zakresie składów od 10% do 100% O_2 [58,65]. Drugim składnikiem mieszaniny jest argon. Większość autorów przyjmuje skład 50% Ar + 50% O_2 . Ciśnienie może mieć zasadniczy wpływ na orientację i strukturę otrzymanych warstw [66]. W zakresie ciśnień stosowanych w diodowych układach rozpylania należy stosować ciśnienie najniższe z możliwych. Jednym z warunków otrzymania stekstrowanych warstw ZnO jest nanoszenie z dobrze ukierunkowanego strumienia cząstek, a ukierunkowanie wiązki jest tym lepsze im niższe jest ciśnienie. Stwierdzenie to dotyczy wyłącznie układów rozpylania dwuelektrodowego. W innych układach,

umożliwiających pracę przy ciśnieniach poniżej 0,1 Pa obniżenie ciśnienia może prowadzić do zmiany orientacji osi krystalograficznej z prostopadłej na równoległą do powierzchni [66]. Wzrost temperatury w zakresie 20 - 400°C powoduje poprawę własności optycznych warstw [57]. W wysokich temperaturach tworzy się warstwa o zwartej, kolumnowej strukturze ziaren i gładkiej powierzchni. Warstwy takie charakteryzują się małym tłumieniem fali świetlnej i akustycznej fali powierzchniowej. Zwiększenie szybkości nanoszenia tlenku cynku z reguły sprzyja powstawaniu dobrze stekstrowanych warstw [57]. Ponieważ zwiększenie mocy wyładowania jest równoznaczne ze zwiększeniem szybkości nanoszenia, rozpylanie należy prowadzić przy maksymalnej mocy wyładowania. Ograniczeniem jest w tym przypadku dogrzewanie warstwy przez prąd wyładowania. W oparciu o przedstawioną powyżej analizę przyjęto następujące parametry nanoszenia warstw tlenku cynku:

- atmosfera podkloszowa: 50% Ar + 50% O₂
- ciśnienie całkowite: 6,7 Pa
- temperatura podłoża: 320°C

Dodatkowo stwierdzono, że naniesienie cienkiej warstwy pośredniej radykalnie poprawia jakość otrzymanych warstw. Grubość warstwy pośredniej wynosiła ok. 8 nm i była nanoszona z prędkością 0,8 nm/min. Szybkość nanoszenia warstwy zasadniczej wynosiła 50 nm/min. Na rys. 4.8 przedstawiono zdjęcia dwóch warstw nanoszonych w podobnych warunkach. Pierwsze zdjęcie przedstawia warstwę nanoszoną bez warstwy pośredniej, drugie - warstwę naniesioną na warstwę pośrednią o grubości 8 nm. Widoczna jest radykalna poprawa jakości otrzymanych warstw.

Zmiany podanych wyżej parametrów powodowały pogorszenie



Rys. 4.8. Zdjęcie warstwy ZnO otrzymanej metodą rozpylania jonowego

- a/ szybkość nanoszenia 50 nm/min, temperatura podłoża 320°C, warstwa naniesiona bezpośrednio na podłoże SiO₂
- b/ szybkość nanoszenia 50 nm/min, temperatura podłoża 320°C, warstwa naniesiona na warstwę pośrednią o grubości 8 nm nanoszoną z prędkością 0,8 nm/min

jakości otrzymanych warstw. Zmniejszenie szybkości nanoszenia powodowało pogorszenie się własności piezoelektrycznych warstwy. Zwiększenie szybkości nanoszenia poprzez zwiększenie mocy wyładowania dawało warstwy matowe. Przyczyną było zbyt silne dogrzewanie warstwy.

Proces nanoszenia warstw ZnO przebiegał następująco:

1. Umieszczenie utlenionej płytki krzemowej na stoliku podłożowym
2. Odpompowanie klosza pompą obrotową do ciśnienia 6,7 Pa, 2 min
3. Pompowanie za pomocą pompy dyfuzyjnej do ciśnienia 10^{-3} Pa - 0,5 h. W czasie pompowania rozgrzewano stolik podłożowy do temperatury 300°C
4. Zamknięcie przesłony dławiącej i dozowanie gazów:
tlen - 3,3 Pa, argon - 6,7 Pa
5. Czyszczenie targetu, 15 min, $U_{\text{targ.}} = 2$ kV, $I_{\text{targ.}} = 100$ mA
podłoże zasłonięte przesłoną
6. Otwarcie przesłony
7. Nanoszenie warstwy pośredniej ZnO, 10 min, $U_{\text{targ.}} = 800$ V,
 $I_{\text{targ.}} = 3$ mA, szybkość nanoszenia ok. 0,8 nm/min
8. Nanoszenie warstwy zasadniczej $U_{\text{targ.}} = 2$ kV,
 $I_{\text{targ.}} = 100$ mA, szybkość nanoszenia 50 nm/min
9. Wyłączenie zasilacza wysokiego napięcia, chłodzenie podłoża - 1 h lub dłużej
10. Zamknięcie zaworów dozujących, zapowietrzenie klosza i wyjęcie światłowodu.

W trakcie procesu warstwa była umieszczona na izolowanym stoliku podłożowym. W przypadku umieszczenia warstwy na uzziemionym lub polaryzowanym stoliku podłożowym występowały powie-

rzchniowe przebicia warstwa - podłoże. Przebicia te niszczyły krawędź warstwy.

4.3.2. Własności otrzymanych warstw ZnO

Określono własności warstw pozwalające ocenić jakość opracowanej technologii oraz przydatność otrzymanych warstw dla optoelektroniki zintegrowanej.

Przeprowadzono obserwacje powierzchni i krawędzi wykonanych warstw przy pomocy mikroskopu skaningowego. Stwierdzono, że wykonane warstwy mają gładką powierzchnię i zwartą kolumnową strukturę ziaren /rys. 4.8b/. Przeprowadzone badania rentgenowskie warstwy wskazują, że jest to warstwa stekstrowana, o osi "c" prostopadłej do powierzchni. Metodą sprzęgacza pryzmatycznego zmierzono współczynniki załamania, grubość i tłumienie wykonanych światłowodów. W najlepszych światłowodach tłumienie dla modu TE_0 wynosiło 3 dB/cm. Wyniki pomiarów współczynnika załamania i grubości zebrano w tabeli 6.4 w rozdziale 6. Współczynnik sprzężenia elektromechanicznego otrzymanych warstw wynosił około 85% wartości k^2 dla monokryształu.

Na podstawie pomiarów oporności struktury przetwornika międzypalczystego oszacowano oporność warstwy. Wynosiła ona $10^7 \Omega \text{ cm}$. Wygrzanie warstwy przez 5 h w temperaturze 500°C w atmosferze tlenu zwiększało oporność warstwy o rząd.

4.4. Technologia przygotowania podłoży z utlenionego krzemu pod światłowodowy z Ta_2O_5 i ZnO

Podłoże - płytki krzemowa o orientacji 111, średnicy 38 mm i grubości 0,25 mm. Płytki krzemowe były polerowane metodami stosowanymi w technologii półprzewodnikowej. Gładkość powierzchni była lepsza niż 10 nm.

Technologia mycia podłoży krzemowych:

1. Przecieranie płytki tamponem zwilżonym w trójchloroetylenie
2. Mycie w trójchloroetylenie w temperaturze 50°C w płuczce ultradźwiękowej /PU/
3. Mycie w acetonie, 30°C /PU/
4. Płukanie w wodzie dejonizowanej
5. Płukanie kaskadowe w wodzie dejonizowanej 3 x 1 min, PU
6. Gotowanie w stężonym H_2SO_4 , 85°C , 10 min, PU
7. Płukanie jak w p. 4.5
8. Trawienie w HF rozcieńczonym 1:15, 1 min.
9. Płukanie jak w p. 4.5
10. Gotowanie w HNO_3 , 85°C , 10 min
11. Płukanie jak w p. 4.5
12. Trawienie w HF rozcieńczonym 1:15, 1 min.
13. Płukanie jak w p. 4.5
14. Płukanie w wodzie dejonizowanej w obiegu zamkniętym do osiągnięcia rezystancji powyżej $12 \text{ M}\Omega\text{cm}$, 20°C
15. Suszenie płytek na wirówce w strumieniu osuszonego i odpylonego azotu.

Technologia utleniania podłoży krzemowych:

1. Umieszczenie płytek w kasie kwarcowej

2. Wprowadzenie płytek w kasecie do rury technologicznej w strumieniu azotu, temp. 1150°C
3. Dogrzanie płytek do temperatury utleniania,
4. Utlenianie w atmosferze pary wodnej otrzymanej ze spalania wodoru w tlenie, $2,6 \text{ h} = 1,2 \mu\text{m SiO}_2$
5. Wyrzanie w azocie przez 10 min
6. Wyciągnięcie utlenionych podłoży z rury.

4.5. Technologia wykonania przetwornika akustycznej fali powierzchniowej

Przetwornik akustycznej fali powierzchniowej składał się z dwóch części: - piezoelektrycznej warstwy ZnO
- aluminiowych elektrod przetwornika międzypalczastego.

Technologia wytwarzania warstw piezoelektrycznych była taka sama jak technologia światłowodów ZnO .

Przetwornik międzypalczasty wykonano metodą fotolitografii. Elektrody przetwornika międzypalczastego miały 20 par palców, szerokość palca była równa odległości między palcami i wynosiła $5 \mu\text{m}$.

5. ANALIZA EFEKTYWNOŚCI ODDZIAŁYWANIA W ŚWIATŁOWODACH PLANARNYCH Z Ta_2O_5 I ZnO NA PODŁOŻACH Z UTLENIONEGO KRZEMU

W rozdziale tym przeprowadzimy szczegółową analizę oddziały-
wania akustooptycznego typu Bragga w światłowodach planarnych.
Jak pokazano w rozdziale 3.3 efektywność planarnego oddziaływa-
nia akustooptycznego można wyrazić następującym wzorem:

$$\eta = \sin^2(\sqrt{\eta_0}) \quad (5.1.)$$

gdzie:

$$\eta_0 = \pi^2 \frac{\epsilon_0}{2 \lambda_0^2} \frac{W \cdot P_S}{\cos \theta_I \cos \theta_B} \frac{\left| \int_0^\infty \psi dz \right|^2}{\int_{-\infty}^\infty Y_S dz \int_{-\infty}^\infty Y_I dz \int_{-\infty}^\infty Y_B dz} \quad (5.1a.)$$

Zależność efektywności oddziaływania od grubości światłowodu
jest określona czynnikiem:

$$\left| \int_0^\infty \psi dz \right|^2 \quad (5.2.)$$

gdzie:

$$\psi = \vec{E}_B \cdot \epsilon \cdot (p : S) \cdot \epsilon \cdot \vec{E}_I$$

- E_B - wektor pola elektrycznego ugiętej fali świetlnej
- E_I - wektor pola elektrycznego padającej fali świetlnej
- ϵ - tensor przenikalności elektrycznej ośrodka
- p - tensor współczynników elastooptycznych

lub po rozpisaniu na składowe:

$$\psi = E_{Bi} \epsilon_{ik} (p_{klab} S_{ab}) \epsilon_{lj} E_{Ij} \quad (5.3.)$$

Będziemy zakładać, że oddziaływanie zachodzi w układzie współrzędnych przedstawionych na rys. 3.7. Ponieważ w wykonywanych modulatorach kąt Bragga nie przekracza zwykle 1° , w analizie będziemy pomijać składowe E_x wektora elektrycznego fali świetlnej. Korzystając z powyższego założenia możemy propagację fali świetlnej i akustycznej rozpatrywać w jednym układzie - XYZ. Postać tensorów ξ i p zależy od struktury krystalograficznej warstwy światłowodowej. Z przeprowadzonych badań strukturalnych wynika, że warstwa Ta_2O_5 ma strukturę amorficzną. Z drugiej strony pomiary optyczne wykazują występowanie w warstwach anizotropii optycznej. Wielkość i wartość tej anizotropii zależy od technologii nanoszenia światłowodów.

Poniżej przedstawiono tensory ξ i p warstwy amorficznej /grupa symetrii $\infty\infty m$ / i warstwy anizotropowej /grupa symetrii ∞/mm dla Ta_2O_5 i 6 mm dla ZnO/ grupa symetrii

$$\begin{array}{cc} \infty\infty m & \infty/mm, 6mm \\ \text{tensor przenikalności elektrycznej:} & \\ \left| \begin{array}{ccc} \xi_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{11} \end{array} \right| & , \quad \left| \begin{array}{ccc} \xi_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{33} \end{array} \right| \end{array} \quad (5.4.)$$

$$\begin{array}{cc} \text{tensor współczynników elastooptycznych:} & \\ \left| \begin{array}{ccc} p_{11} & p_{12} & p_{12} \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} \\ & & p_{44} \\ & & p_{44} \\ & & p_{44} \end{array} \right| & , \quad \left| \begin{array}{ccc} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{12} & p_{11} & p_{13} \\ p_{31} & p_{31} & p_{33} \\ & & p_{44} \\ & & p_{44} \\ & & p_{66} \end{array} \right| \end{array} \quad (5.5.)$$

gdzie:

$$p_{44} = \frac{1}{2} / p_{11} - p_{12} / , \quad p_{66} = \frac{1}{2} / p_{11} - p_{12} /$$

W wybranym układzie współrzędnych będą występowały trzy niezerowe składowe tensora deformacji: S_2 , S_3 , S_4 . Uwzględniając ten fakt i podstawiając 5.4 i 5.5 do 5.3 otrzymujemy następujące wyrażenia dla różnych typów oddziaływania:

$$TE_n - TE_n \quad \psi = E_2^2 \epsilon_1^2 (p_{11} S_2 + p_{12} S_3) \quad \infty \infty m \quad (5.6.)$$

$$\psi = E_2^2 \epsilon_1^2 (p_{11} S_2 + p_{13} S_3) \quad \infty / mm \quad (5.6a.)$$

$$TM_n - TM_n \quad \psi = E_3^2 \epsilon_1^2 (p_{12} S_2 + p_{11} S_3) \quad \infty \infty m \quad (5.7.)$$

$$\psi = E_3^2 \epsilon_3^2 (p_{31} S_2 + p_{33} S_3) \quad \infty / mm \quad (5.7a.)$$

$$TM_n - TE_n \quad \psi = E_{I3} E_{B2} \epsilon_1^2 p_{44} S_4 \quad \infty \infty m \quad (5.8.)$$

$$\psi = E_{I3} E_{B2} \epsilon_1 \epsilon_3 p_{44} S_4 \quad \infty / mm \quad (5.8a.)$$

We wzorach 8 i 8a pominięto składową E_1 wektora pola elektrycznego fali świetlnej.

Celem prowadzonej w tym rozdziale analizy jest udzielenie odpowiedzi na trzy pytania:

- Jak efektywność oddziaływania akustooptycznego zależy od grubości warstwy?
- Czym jest spowodowana duża efektywność oddziaływania dla modów TM?
- Dlaczego efektywność oddziaływania dla modów TE jest bliska zeru?

Ponieważ odpowiedzi na wszystkie pytania można uzyskać bez od-

woływania się do anizotropowej struktury warstw światłowodowych w dalszej analizie przyjmujemy, że warstwy są amorficzne.

We wzorach 5.6, 5.7 i 5.8, wartości składowych wektora pola elektrycznego i tensora deformacji są funkcją współrzędnej Z .

Rozkład składowej $E_1(z)$ jest funkcją typu $\cos(z)$ i dla danego modu jego postać nie zależy od grubości światłowodu.

Przykładowe rozkłady deformacji w światłowodzie przedstawiono na rys. 3.14., 3.15. Rozkład deformacji w światłowodzie zależy silnie od grubości warstwy. W szczególności po przekroczeniu pewnej grubości, składowa deformacji będzie zmieniać znak w warstwie światłowodowej, co może zmniejszać efektywność oddziaływania.

Inne czynniki wpływające na efektywność oddziaływania, to wzrost efektywnego współczynnika załamania i mocy akustycznej zgromadzonej w warstwie światłowodowej ze zwiększaniem się grubości światłowodu. Zmiana efektywnego współczynnika załamania powoduje zmianę efektywności proporcjonalną do N_{ef}^6 . Moc akustyczna zgromadzona w warstwie jest w przybliżeniu proporcjonalna do stosunku h/Λ . W podobny sposób zmienia się efektywność oddziaływania przypadająca na jednostkę mocy akustycznej.

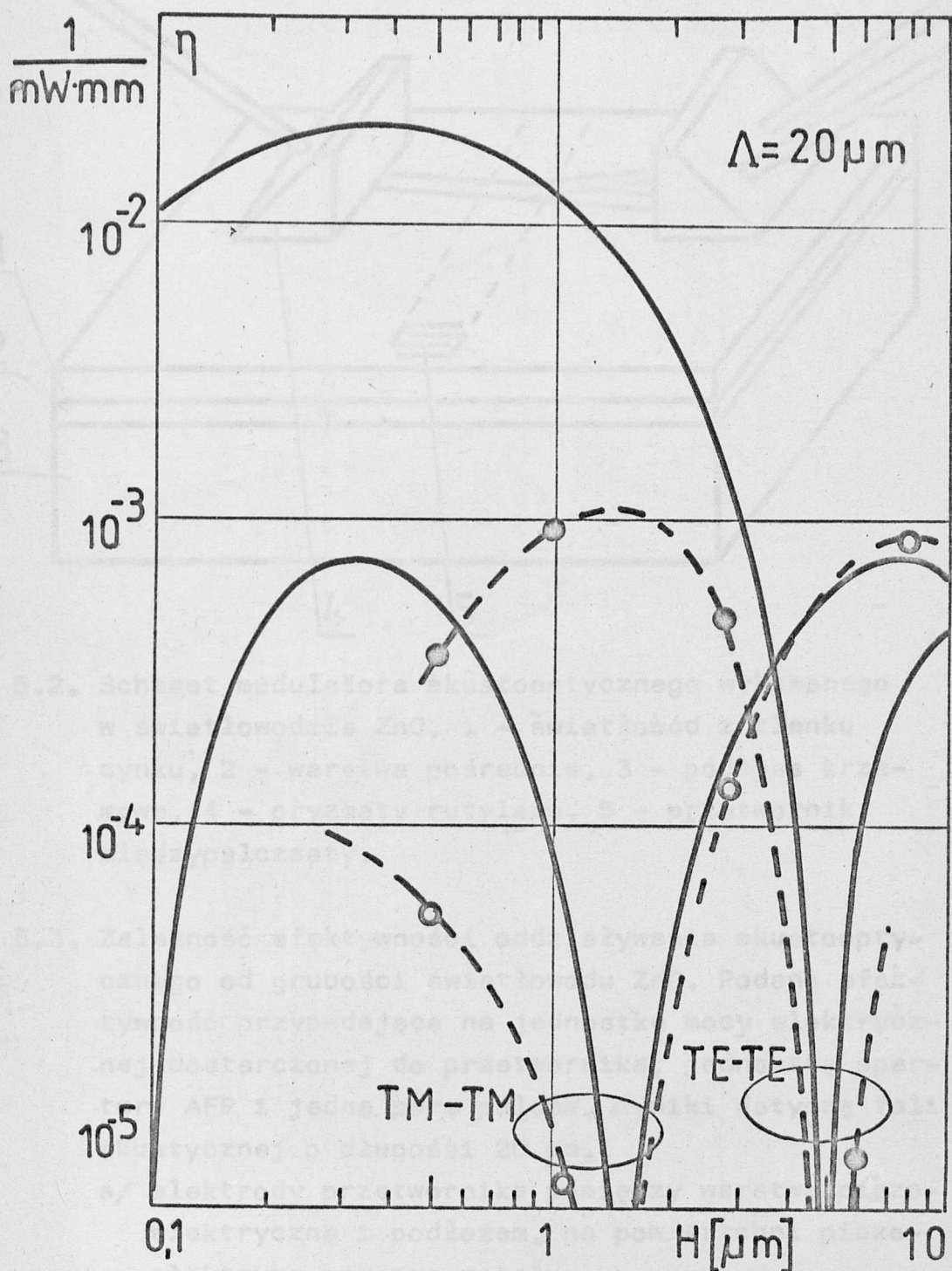
5.1. Analiza efektywności oddziaływania akustooptycznego w światłowodach planarnych z ZnO

Efektywność oddziaływania w światłowodach planarnych opisuje wzór 5.1. Analizę efektywności oddziaływania w światłowodach z tlenku cynku na podłożu z topionego kwarcu przeprowadzili Chubachi i Sasaki [2]. Na rys. 2.2 przedstawiono otrzymaną przez nich teoretyczną zależność efektywności oddziaływania od

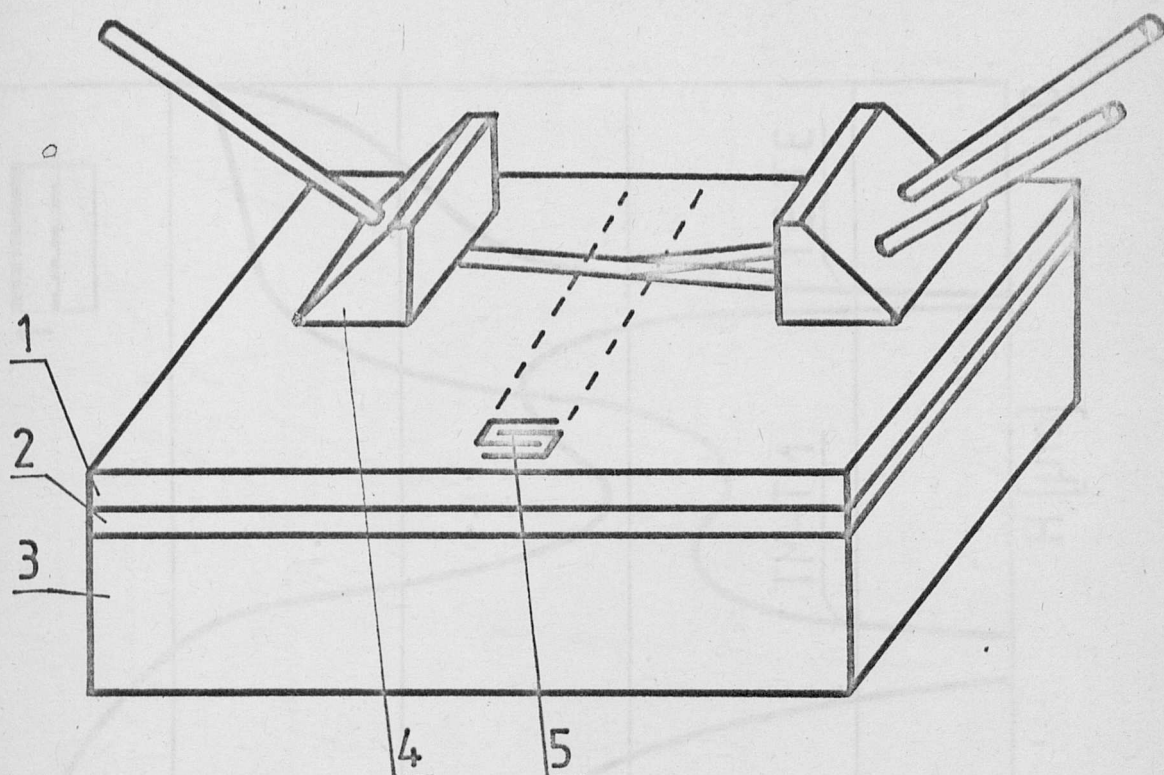
grubości światłowodu oraz wyniki pomiarów wykonanych przez nich struktur. Na rys. 5.1 przedstawiono wyniki pomiarów efektywności oddziaływania akustooptycznego w strukturach ZnO na utlenionym krzemie wykonanych przez autora niniejszej pracy. Wyniki te zestawiono z przebiegami teoretycznymi otrzymanymi we wspomnianej wyżej pracy [2]. W obu przypadkach, to znaczy dla struktur modulatora na podłożu z topionego kwarcu i dla otrzymanych przez nas struktur na podłożach SiO_2/Si , otrzymano dobrą zgodność jakościową teorii i eksperymentu, oraz podobne rozbieżności ilościowe. Wynika stąd, że efektywność oddziaływania jest w głównej mierze określona materiałem światłowodu, podłoże ma znaczenie drugorzędne. Schemat wykonanego modulatora przedstawiono na rys. 5.2.

Warstwa tlenku cynku w opisywanym modulatorze spełnia dwa zadania: 1 - warstwa piezoelektryczna w przetworniku AFP,

2 - światłowód planarny i ośrodek modulatora akustooptycznego. Autorzy znanych z literatury rozwiązań [1,2,5] wykonywali warstwę ZnO o różnej grubości w obszarze przetwornika AFP i w obszarze oddziaływania. W dostępnej literaturze brak jak dotąd analizy efektywności oddziaływania w warstwach ZnO o jednolitej grubości. Wykorzystując przedstawione wcześniej rezultaty prac dotyczące efektywności generacji AFP [34] i efektywności oddziaływania akustooptycznego w warstwach ZnO, obliczono zależność efektywności oddziaływania w jednorodnych warstwach ZnO. Na rys. 5.3 przedstawiono zależność efektywności oddziaływania akustooptycznego od grubości warstwy ZnO, przypadającą na jednostkę doprowadzonej do przetwornika mocy elektrycznej i na jednostkę apertury przetwornika AFP. Kolejne wykresy dotyczą struktur przetwornika przedstawionych na rys. 3.10.

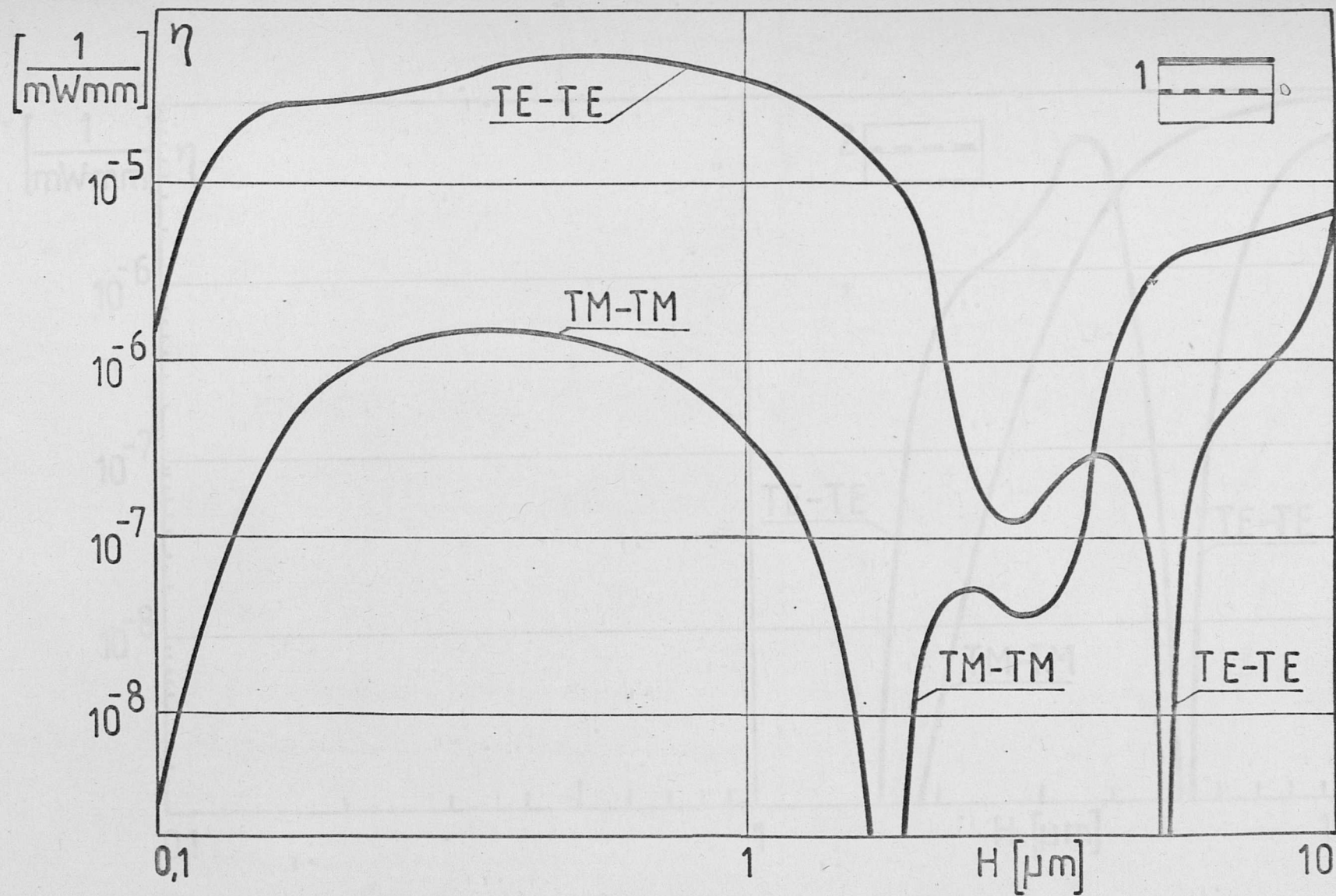


Rys. 5.1. Zależność efektywności oddziaływania akustooptycznego w światłowodach z tlenku cynku naniesionych na podłożu z utlenionego krzemu. Wyniki przeprowadzonych przez autora pomiarów efektywności zestawiono z przebiegami teoretycznymi /linie ciągłe/ obliczonymi w pracy [2]

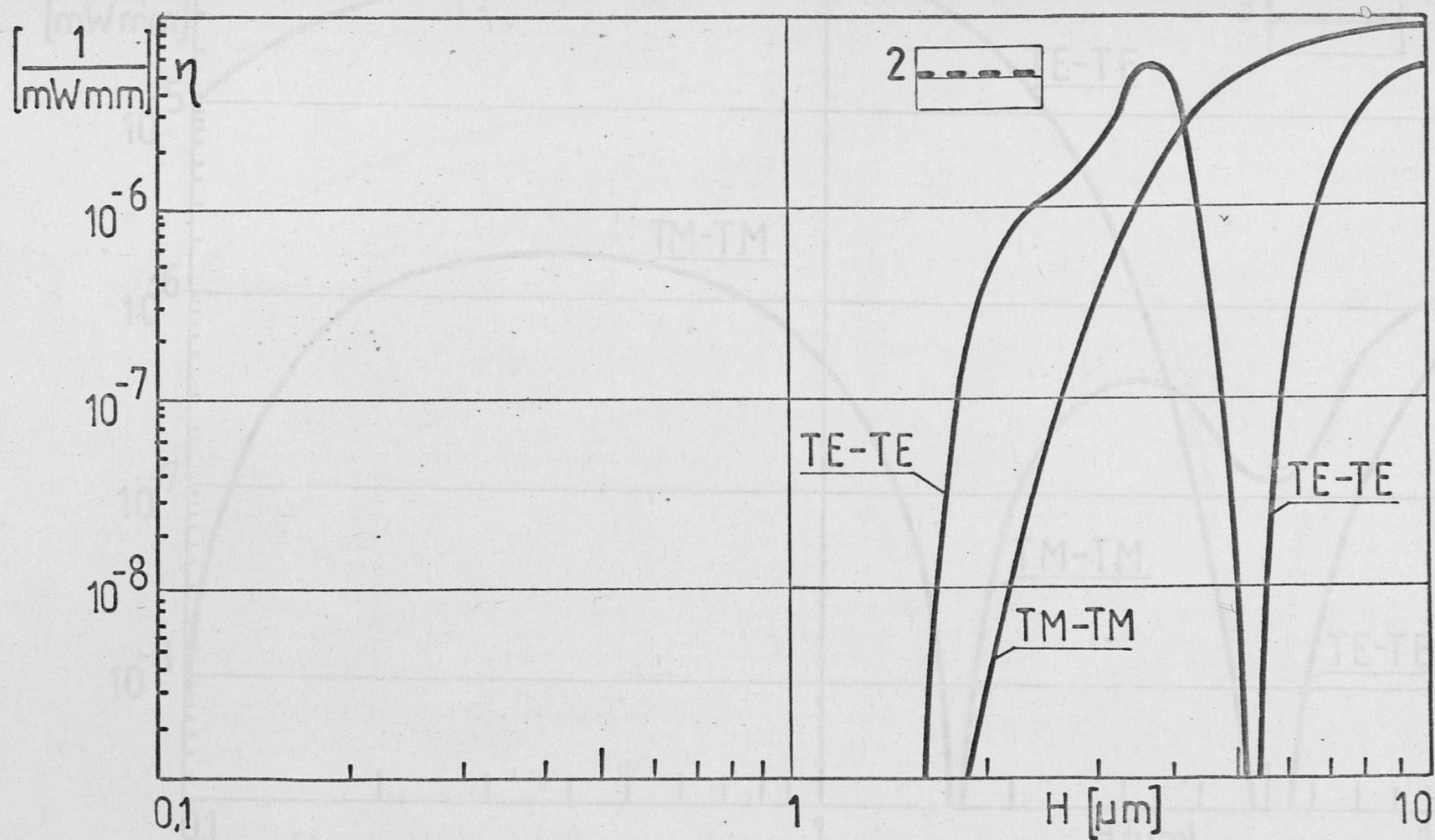


Rys. 5.2. Schemat modulatora akustooptycznego wykonanego w światłowodzie ZnO, 1 - światłowod z tlenku cynku, 2 - warstwa pośrednia, 3 - podłoże krzemowe, 4 - pryzmaty rutowe, 5 - przetwornik międzypalczasty.

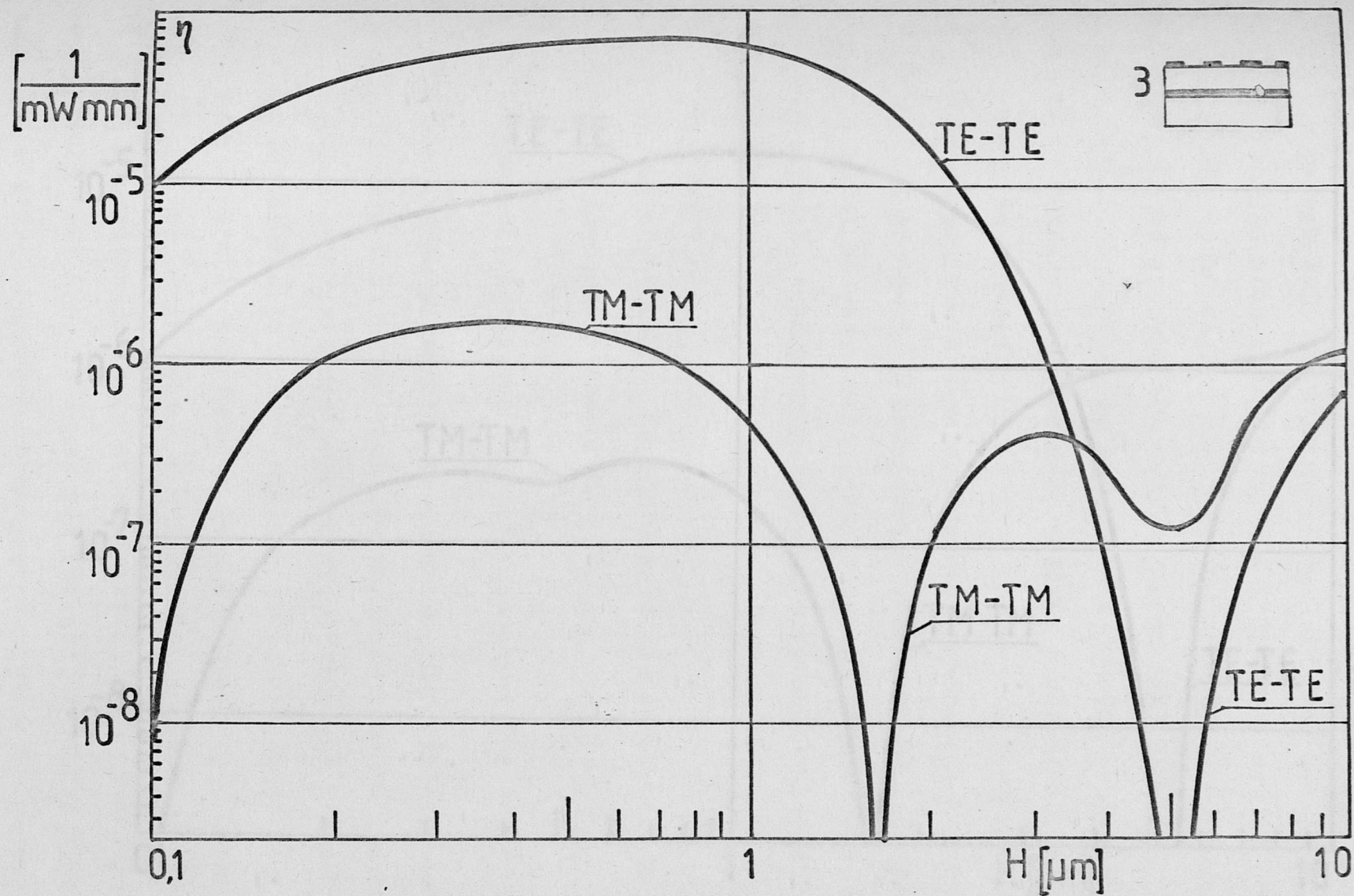
- Rys. 5.3. Zależność efektywności oddziaływania akustooptycznego od grubości światłowodu ZnO. Podano efektywność przypadającą na jednostkę mocy elektrycznej dostarczonej do przetwornika, jednostkę aper-tury AFP i jedną parę palców. Wyniki dotyczą fali akustycznej o długości 20 μm .
- a/ elektrody przetwornika pomiędzy warstwą piezo-elektryczną i podłożem, na powierzchni piezo-elektryka warstwa metalu,
 - b/ elektrody jak na rys. a., bez warstwy metalu,
 - c/ elektrody przetwornika na powierzchni warstwy piezoelektrycznej, warstwa metalu pomiędzy piezoelektrykiem i podłożem, warstwę metalu można zastąpić podłożem krzemowym o małej rezystywności.
 - d/ elektrody jak na rys. c., bez dodatkowej warstwy metalu.



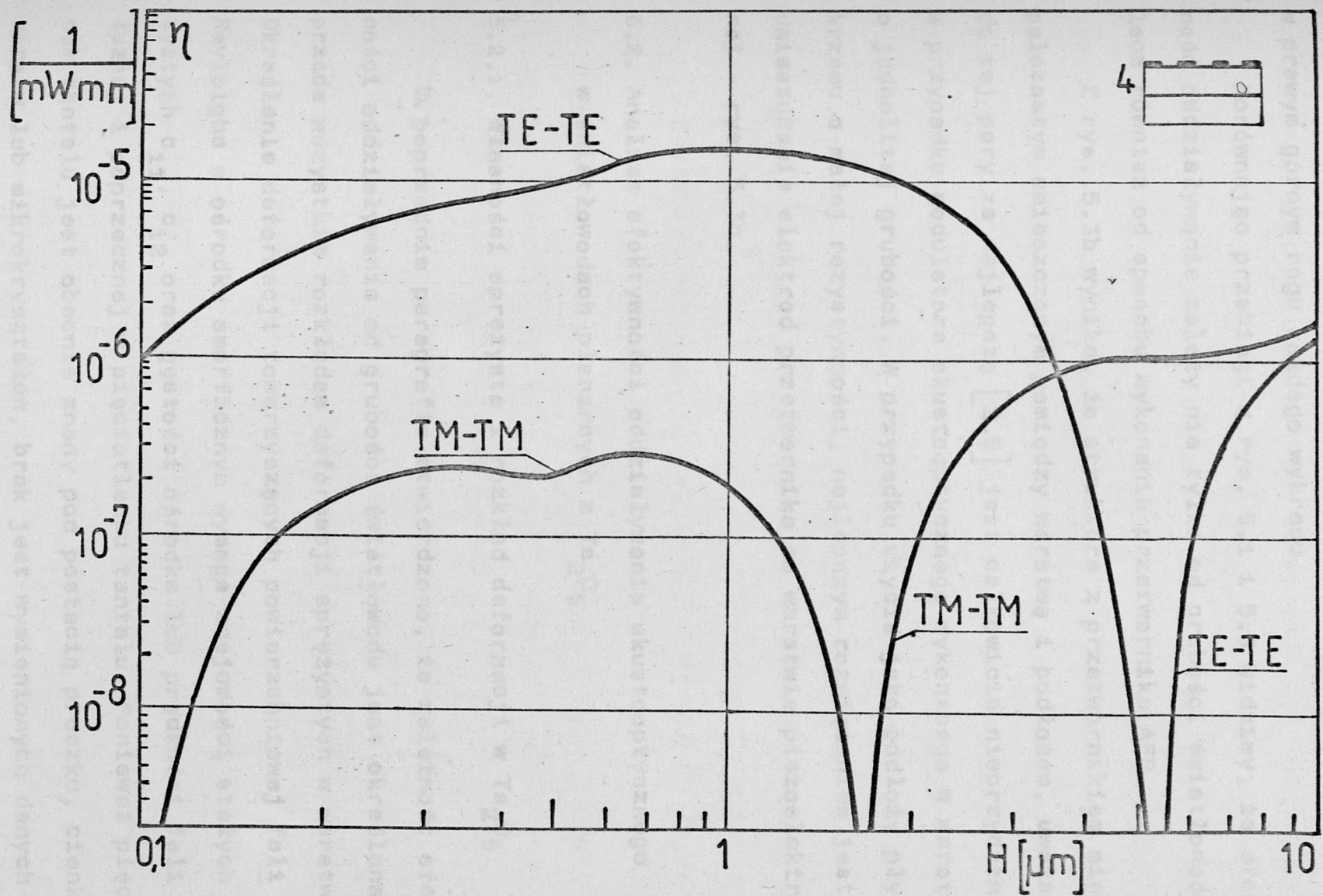
Rys. 5.3a.



Rys. 5.3b.



Rys. 5.3c.



Rys. 5.3d.

Uproszczony schemat odpowiedniego przetwornika znajduje się w prawym górnym rogu każdego wykresu.

Porównując przebiegi z rys. 5.1 i 5.3 widzimy, że efektywność oddziaływania zależy nie tylko od grubości światłowodu, lecz również od sposobu wykonania przetwornika AFP.

Z rys. 5.3b wynika, że struktura z przetwornikiem międzypalczastym umieszczonym pomiędzy warstwą i podłożem, uważana do tej pory za najlepszą [2,5] jest całkowicie nieprzydatna w przypadku modulatora akustooptycznego wykonanego w warstwie o jednolitej grubości. W przypadku użycia jako podłoża płytek krzemu o małej rezystywności, najlepszym rozwiązaniem jest umieszczenie elektrod przetwornika na warstwie piezoelektrycznej - rys. 5.3c.

5.2. Analiza efektywności oddziaływania akustooptycznego w światłowodach planarnych z Ta_2O_5

5.2.1. Własności sprężyste i rozkład deformacji w Ta_2O_5

W poprzednim paragrafie stwierdzono, że zależność efektywności oddziaływania od grubości światłowodu jest określona przede wszystkim rozkładem deformacji sprężystych w warstwie. Określenie deformacji towarzyszących powierzchniowej fali Rayleigha w ośrodku amorficznym wymaga znajomości stałych sprężystych c_{11} , c_{12} oraz gęstości ośrodka lub prędkości fali podłużnej i poprzecznej w pięciotlenku tantalu. Ponieważ pięciotlenek tantalu jest obecnie znany pod postacią proszku, cienkich warstw lub mikrokryształów, brak jest wymienionych danych w literaturze.

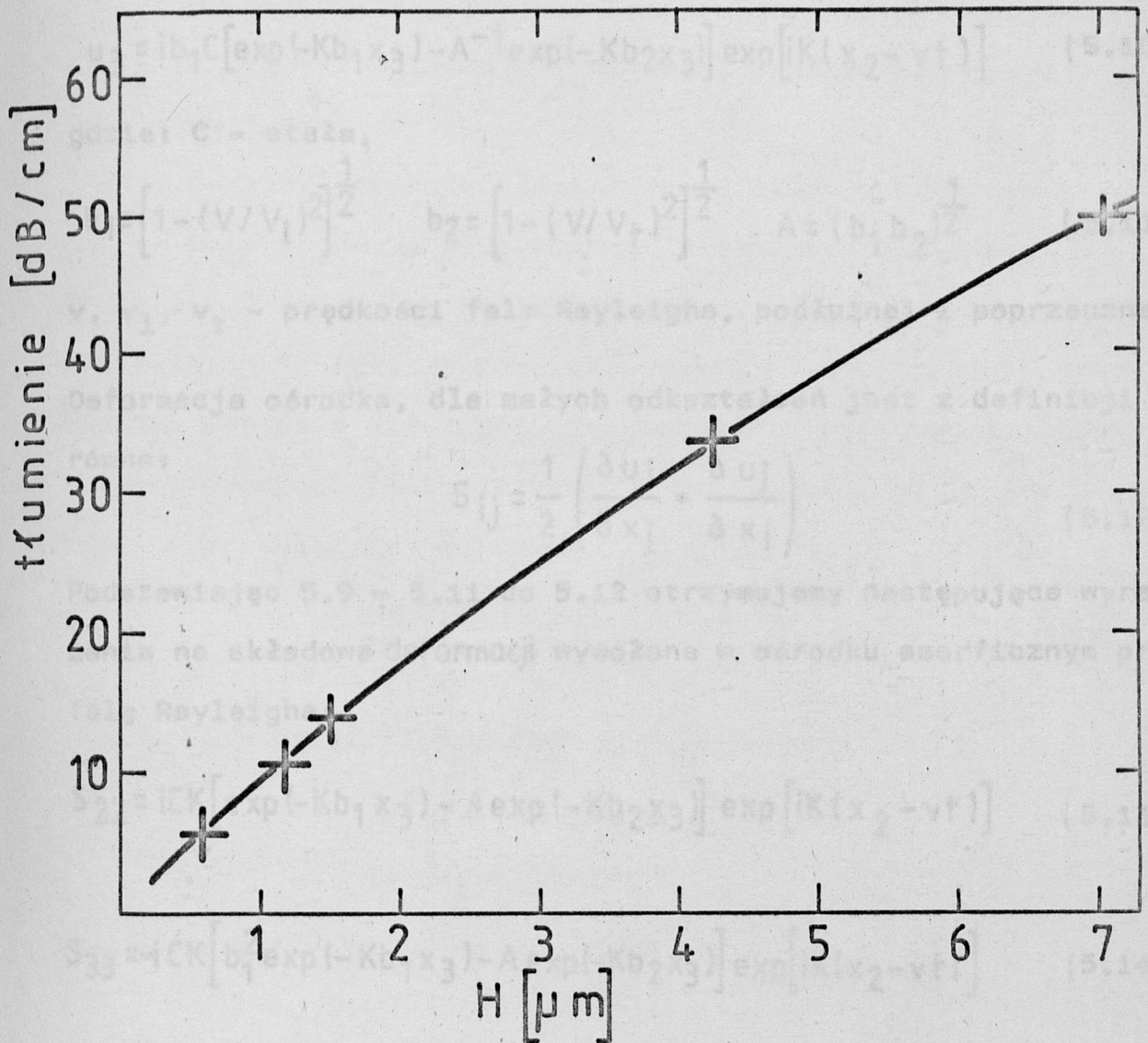
Wartości prędkości fali podłużnej i poprzecznej i stałych sprężystych pięciotlenku tantalu można obliczyć analizując zależność prędkości fali Rayleigha od grubości warstwy, co wykracza poza zakres niniejszej pracy. Inną metodą jest pomiar prędkości drugiego modu fali Rayleigha w funkcji grubości warstwy. Ze wzrostem grubości prędkość drugiego modu fali maleje asymptotycznie do wartości prędkości fali poprzecznej w materiale warstwy. Pomiar prędkości fali poprzecznej tą metodą wymaga wykonania warstw o grubości 5 - 10 K·H /gdzie K - wektor falowy AFP, H - grubość warstwy/. Wykonanie tak grubych warstw Ta₂O₅ wymagało by kilkudziesięciogodzinnych czasów nanoszenia. Dodatkowym czynnikiem uniemożliwiającym pomiary wyższych modów fali Rayleigha, jest duże tłumienie AFP w grubych warstwach Ta₂O₅. Zmierzone wartości tłumienia AFP w warstwach Ta₂O₅ o różnej grubości przedstawiono na rys. 5.4.

Poniżej przedstawiono inną metodę oceny szybkości fali podłużnej i poprzecznej w Ta₂O₅. Korzystając z wyliczonych wartości tych prędkości obliczono następnie stałe sprężyste pięciotlenku tantalu i rozkład deformacji w warstwie.

Analizę oparto na następujących danych i założeniach:

1. Ta₂O₅, z którego zbudowany jest światłowód ma strukturę amorficzną typu szkła
2. Prędkość fali Rayleigha w Ta₂O₅ wynosi 2250 m/s
3. Gęstość Ta₂O₅ wynosi $8,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Założenie o strukturze amorficznej warstwy oparto na wynikach badań strukturalnych. Wartość gęstości przyjęto za równą gęstości materiału litego. Gęstość warstwy może być mniejsza od tej wartości. Prędkość fali Rayleigha w Ta₂O₅ jest wartością uzyskaną w niniejszej pracy.



Rys. 5.4. Tłumienie akustycznej fali powierzchniowej w światłowodach z Ta₂O₅ na podłożu z utlenionego krzemu w funkcji grubości warstwy Ta₂O₅. Grubość warstwy SiO₂ - 1,2 um.

Składowe odkształcenia wywołane akustyczną falą powierzchniową rozchodzącą się na powierzchni ośrodka izotropowego wyrażają wzory:

$$u_2 = C [\exp(-Kb_1 x_3) - A \exp(-Kb_2 x_3)] \exp[iK(x_2 - vt)] \quad (5.9.)$$

$$u_3 = ib_1 C [\exp(-Kb_1 x_3) - A^{-1} \exp(-Kb_2 x_3)] \exp[iK(x_2 - vt)] \quad (5.10.)$$

gdzie: C - stała,

$$b_1 = [1 - (V/V_l)^2]^{\frac{1}{2}} \quad b_2 = [1 - (V/V_t)^2]^{\frac{1}{2}} \quad A = (b_1 b_2)^{\frac{1}{2}} \quad (5.11.)$$

v , v_l , v_t - prędkości fal: Rayleigha, podłużnej i poprzecznej

Deformacja ośrodka, dla małych odkształceń jest z definicji

równa:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.12.)$$

Podstawiając 5.9 - 5.11 do 5.12 otrzymujemy następujące wyrażenia na składowe deformacji wywołane w ośrodku amorficznym przez falę Rayleigha:

$$S_{22} = iCK [\exp(-Kb_1 x_3) - A \exp(-Kb_2 x_3)] \exp[iK(x_2 - vt)] \quad (5.13.)$$

$$S_{33} = -iCK [b_1^2 \exp(-Kb_1 x_3) - A \exp(-Kb_2 x_3)] \exp[iK(x_2 - vt)] \quad (5.14.)$$

$$S_{23} = -\frac{1}{2} CK [2b_1 \exp(-Kb_1 x_3) - (b_2 + b_2^{-1}) A \exp(-Kb_2 x_3)] \exp[iK(x_2 - vt)] \quad (5.15.)$$

Jak widać ze wzorów 5.11 określenie rozkładu deformacji wymaga znajomości prędkości fali podłużnej, poprzecznej i powierzchniowej fali Rayleigha. Prędkość akustycznej fali powierzchniowej w pięciotlenku tantalu określono, mierząc zależność prędkości

fali od grubości warstwy. Zależność tę przedstawiono na rys. 3.16. Ze wzrostem grubości warstwy, prędkość asymptotycznie zbliża się do 2250 m/s, przyjęto że jest to prędkość powierzchniowej fali Rayleigha w pięciotlenku tantalu.

Podstawą dalszej analizy są podobieństwa występujące między pięciotlenkiem tantalu i ciężkimi szklami ołowowymi:

- duża gęstość
- duża efektywność oddziaływania akustooptycznego
- mała prędkość akustycznej fali powierzchniowej.

Na rys. 5.5 przedstawiono zależność v_R/v_t i v_t/v_l od gęstości dla różnych szkieł. Na podstawie wykresów przyjęto, że odpowiednie wartości dla pięciotlenku tantalu będą wynosić 0,93 i 0,54. Prędkość fali podłużnej i poprzecznej obliczamy korzystając z przybliżonej zależności [67]:

$$\frac{v_R}{v_t} = \frac{0,718 - (v_t/v_l)^2}{0,750 - (v_t/v_l)^2} \quad (5.16.)$$

Po prostych przekształceniach otrzymujemy:

$$\begin{aligned} v_t &= 2420 \text{ m/s} \\ v_l &= 4480 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (5.17.)$$

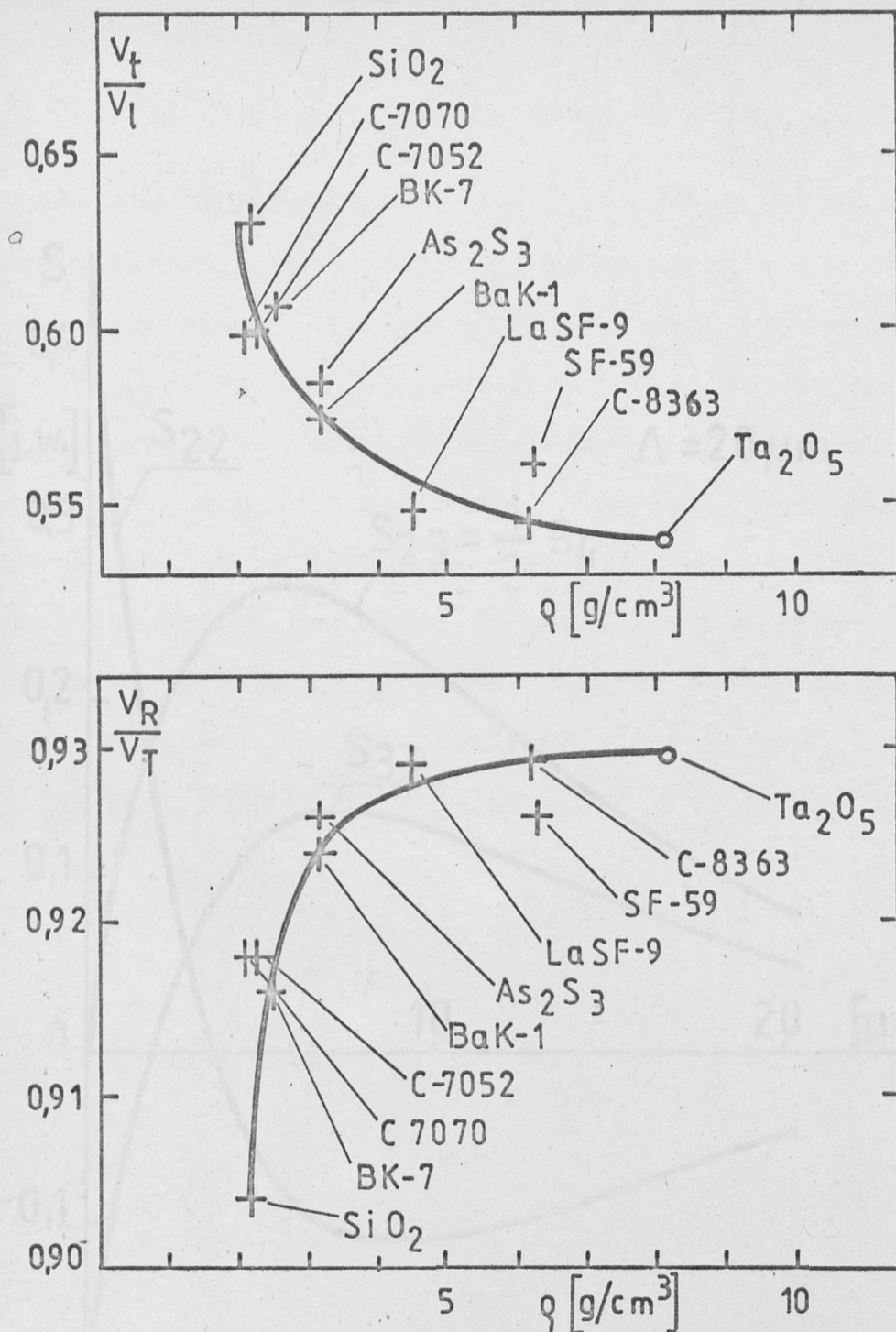
Następnie korzystając ze związków:

$$v_t = \sqrt{c_{44}/\rho} \quad v_l = \sqrt{c_{11}/\rho} \quad c_{44} = \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12}) \quad (5.18)$$

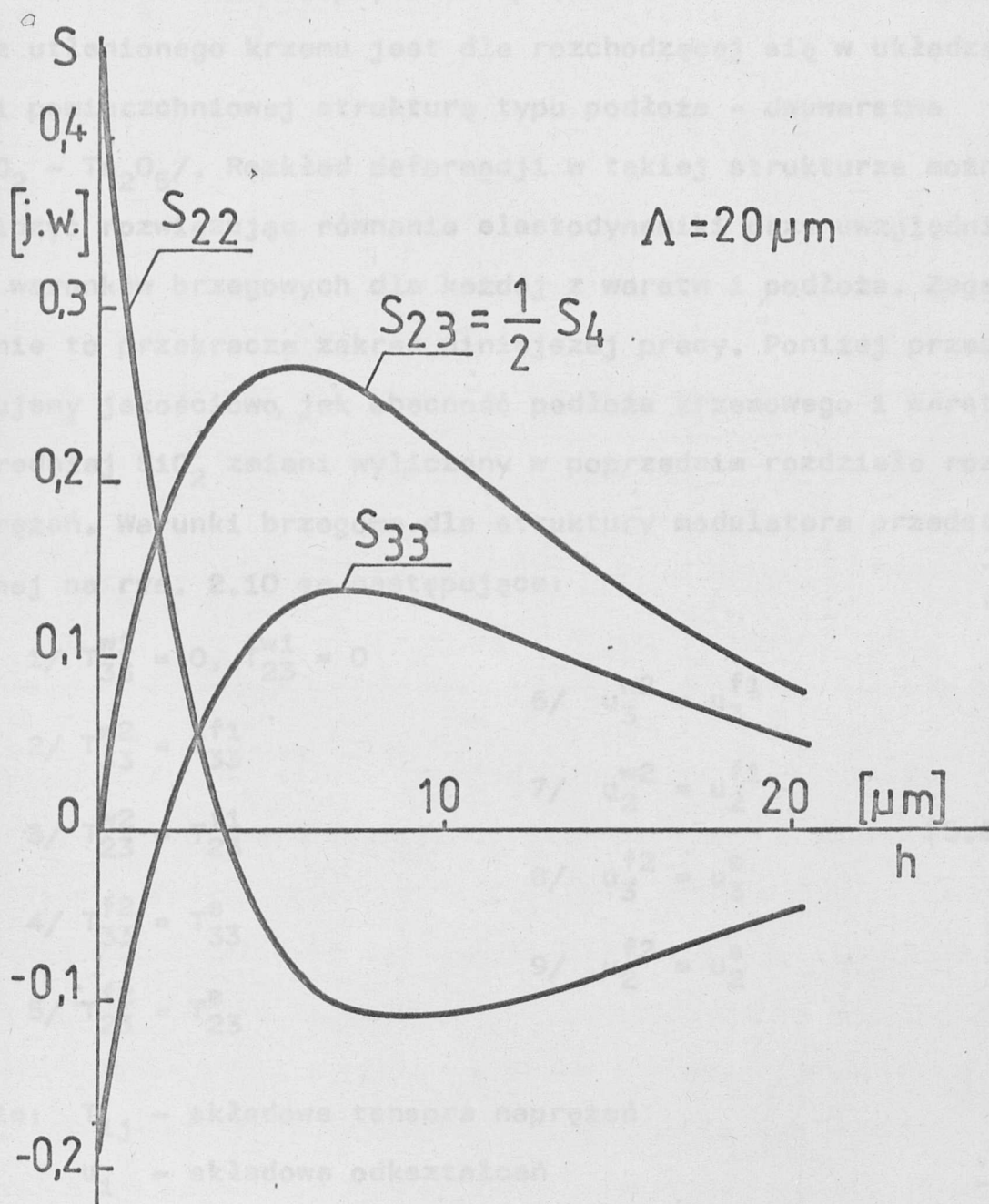
otrzymujemy wartości stałych sprężystych:

$$\begin{aligned} c_{11} &= 16,5 \cdot 10^{10} \text{ Pa} \\ c_{12} &= 6,9 \cdot 10^{10} \text{ Pa} \\ c_{44} &= 4,8 \cdot 10^{10} \text{ Pa} \end{aligned} \quad (5.19.)$$

Na rys. 5.6 przedstawiono rozkład deformacji wywołanych falą powierzchniową w pięciotlenku tantalu.



Rys. 5.5. Zależności wartości ilorazów V_t/V_l i V_R/V_t od gęstości ośrodka dla różnych szkieł.
 V_t - szybkość fali poprzecznej, V_l - szybkość fali podłużnej,
 V_R - szybkość fali Rayleigha
 + - wartości obliczone dla szkieł na podstawie danych katalogowych
 o - wartości postulowane dla Ta_2O_5



Rys. 5.6. Rozkład deformacji wywołanych falą Rayleigha w pięciotlenku tantalu. Przedstawiony rozkład odpowiada fali powierzchniowej o długości $20 \mu\text{m}$

5.2.2. Rozkład deformacji w światłowodach z Ta_2O_5

Modulator akustooptyczny z pięciotlenku tantalu na podłożu z utlenionego krzemu jest dla rozchodzącej się w układzie fali powierzchniowej strukturą typu podłoże - dwuwarstwa $/SiO_2 - Ta_2O_5/$. Rozkład deformacji w takiej strukturze można obliczyć rozwiązując równanie elastodynamiki przy uwzględnieniu warunków brzegowych dla każdej z warstw i podłoża. Zagadnienie to przekracza zakres niniejszej pracy. Poniżej przeanalizujemy jakościowo, jak obecność podłoża krzemowego i warstwy pośredniej SiO_2 zmieni wyliczony w poprzednim rozdziale rozkład naprężeń. Warunki brzegowe dla struktury modulatora przedstawionej na rys. 2.10 są następujące:

$$1/ \quad T_{33}^{w1} = 0, \quad T_{23}^{w1} = 0$$

$$2/ \quad T_{33}^{w2} = T_{33}^{f1}$$

$$3/ \quad T_{23}^{w2} = T_{23}^{f1}$$

$$4/ \quad T_{33}^{f2} = T_{33}^s$$

$$5/ \quad T_{23}^{f2} = T_{23}^s$$

$$6/ \quad u_3^{w2} = u_3^{f1}$$

$$7/ \quad u_2^{w2} = u_2^{f1}$$

$$8/ \quad u_3^{f2} = u_3^s$$

$$9/ \quad u_2^{f2} = u_2^s$$

(5.20.)

gdzie: T_{ij} - składowe tensora naprężeń

u_i - składowe odkształceń

górne indeksy: w - światłowod, f - warstwa pośrednia, s - podłoże, 1 - górna powierzchnia warstwy, 2 - dolna powierzchnia warstwy.

Zachowanie się składowych tensora deformacji S_{ij} na powierzchniach granicznych możemy określić stosując następujące równości:

$$T_{ij} = c_{ijkl} S_{kl} \quad (5.21.)$$

$$S_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) \quad (5.22.)$$

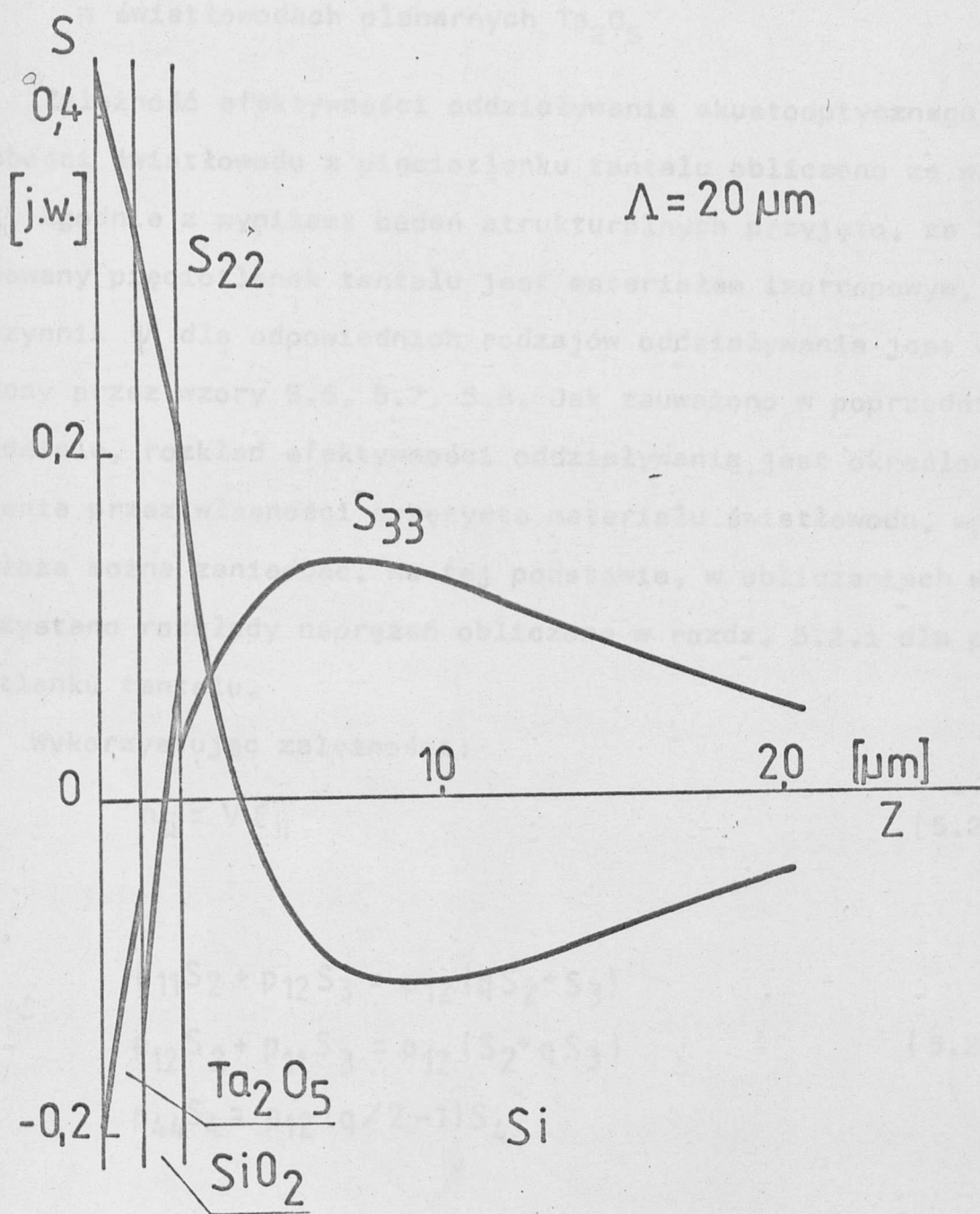
W tabeli 5.1. zebrano stałe sprężystości Ta_2O_5 , SiO_2 i Si .

Tabela 5.1

Zestawienie stałych sprężystości, prędkości i gęstości materiałów zastosowanych w modulatorze akustooptycznym $Ta_2O_5/SiO_2/Si$

	c_{11}	c_{12}	V_R	ρ
	$\times 10^{10} \text{ Pa}$		m/s	$\times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Ta_2O_5	16,46	6,86	2250	8,2
SiO_2	7,85	1,61	3400	2,2
Si	16,56	6,39	4550	2,4

Na rys. 5.7 przedstawiono rozkład deformacji w dwuwarstwowej strukturze modulatora $Ta_2O_5/SiO_2/Si$. Rozkłady te otrzymano korzystając z danych zawartych w tabeli 1, wzorów 5.20-22 i z rys. 5.6. Jak widać składowe deformacji S_{33} zmieniają się skokowo na granicach warstw. Składowe S_{22} są zachowane na granicach warstw. Z tabeli 5.1 wynika, że krzem i pięciotlenek tantalu mają podobne stałe sprężystości. Warstwa SiO_2 występująca w strukturze spowoduje zmniejszenie efektywnej stałej sprężystości struktury c_{12} , tzn. warstwa SiO_2 spowoduje zwiększenie deformacji w stosunku do deformacji wywołanej przez falę powierzchniową w jednorodnym Ta_2O_5 .



Rys. 5.7. Rozkłady deformacji w dwuwarstwowej strukturze modulatora $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2/\text{Si}$. Schemat ilustruje zmiany deformacji w strukturze podłoża dwuwarstwowego w stosunku do deformacji w materiale jednorodnym

5.2.3. Analiza efektywności oddziaływania akustooptycznego w światłowodach planarnych Ta_2O_5

^a Zależność efektywności oddziaływania akustooptycznego od grubości światłowodu z pięciotlenku tantalu obliczono ze wzoru 5.1. Zgodnie z wynikami badań strukturalnych przyjęto, że zastosowany pięciotlenek tantalu jest materiałem izotropowym, i czynnik ψ dla odpowiednich rodzajów oddziaływania jest wyrażony przez wzory 5.6, 5.7, 5.8. Jak zauważono w poprzednim rozdziale, rozkład efektywności oddziaływania jest określony głównie przez własności sprężyste materiału światłowodu, wpływ podłoża można zaniedbać. Na tej podstawie, w obliczeniach wykorzystano rozkłady naprężeń obliczone w rozdz. 5.2.1 dla pięciotlenku tantalu.

Wykorzystując zależności:

$$n_{ij} = \sqrt{\epsilon_{ij}} \quad (5.23.)$$

$$\begin{aligned} p_{11}S_2 + p_{12}S_3 &= p_{12}(qS_2 + S_3) \\ p_{12}S_2 + p_{11}S_3 &= p_{12}(S_2 + qS_3) \\ p_{44}S_4 &= p_{12}(q/2 - 1)S_4 \end{aligned} \quad (5.24.)$$

$$q = p_{11}/p_{12} \quad (5.25.)$$

możemy przekształcić równanie 5.1 do postaci, w której własności optyczne będą opisywane efektywnym współczynnikiem załamania, a nie stałą przenikalności elektrycznej materiału. Efektywność oddziaływania możemy teraz opisać następującym równaniem [3]:

$$\eta = \sin^2 \sqrt{\eta_0} \quad (5.26)$$

$$\eta_0 = C N_B^3 N_I^3 p_{12}^2 W P_S \Gamma^2 \quad (5.27)$$

gdzie $\Gamma =$

$$\int_0^H \sin^2(\pi z/H) (q S_2 + S_3) dz \quad \text{dla oddziaływania TE}_0 - \text{TE}_0 \quad (5.28)$$

$$\int_0^H \sin^2(\pi z/H) (S_2 + q S_3) dz \quad \text{dla oddziaływania TM}_0 - \text{TM}_0 \quad (5.29)$$

$$\int_0^H \sin^2(\pi z/H) (q/2 - 1) S_4 dz \quad \text{dla oddziaływania TE}_0 - \text{TM}_0 \quad (5.30)$$

N_B - efektywny współczynnik załamania dla wiązki ugiętej

N_I - efektywny współczynnik załamania dla wiązki padającej

C - stała, dla $H \ll \lambda$ $C = \pi^2/4 \lambda_0^2$

Jak widać ze wzoru 5.27, efektywność oddziaływania akustooptycznego jest proporcjonalna do kwadratu współczynnika elastooptycznego. Zależność efektywności od grubości światłowodu jest określona czynnikiem Γ (5.28 - 5.30). Pomiar przeprowadzone w niniejszej pracy i w pracach [5,29] wykazały, że w zakresie grubości od 0 do ok. 2 μm efektywność dyfrakcji dla modów TM jest co najmniej o dwa rzędy większa od efektywności oddziaływania dla modów TE. Analizując zależność równania 5.27 od wartości czynnika q stwierdzono, że wynik ten można otrzymać teoretycznie przyjmując, że $q=0,39[D1]$. Podstawiając otrzymaną wartość q do wzoru 5.27 otrzymano jakościowe zależności efektywności oddziaływania akustooptycznego od grubości światłowodów dla oddziaływań typu TE - TE, TM - TM i TE - TM. Otrzymane przebiegi wyskalowano porównując je ze zmierzonymi wartościami efektywności oddziaływania $\text{TM}_1 - \text{TM}_1$. Otrzymano przy tym następujące wartości współczynników elastooptycznych dla pięciotlenku tantalu:

$$p_{11} = 0,024 \pm 0,008$$

$$p_{12} = 0,062 \pm 0,022$$

(5.31.)

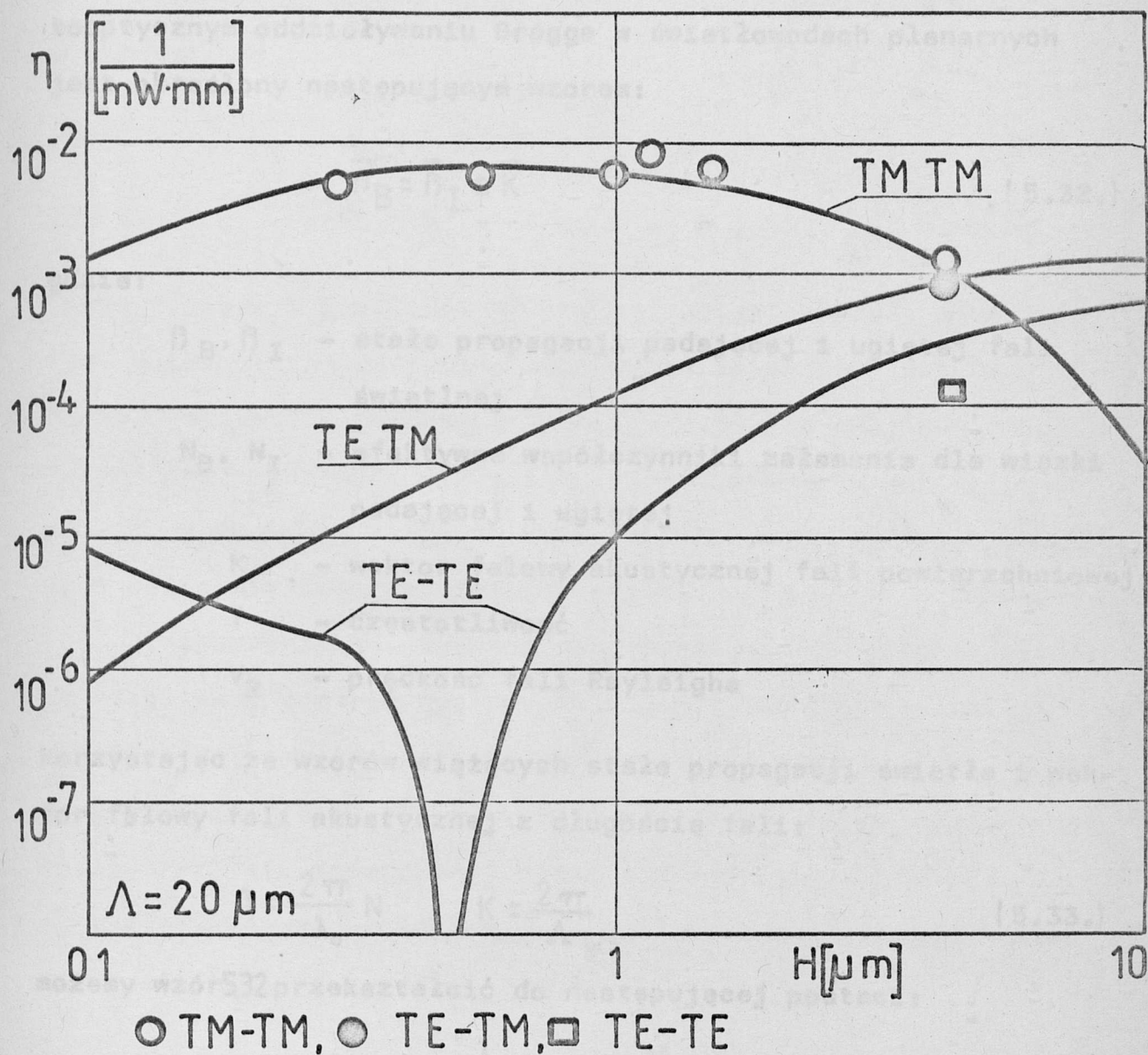
$$p_{44} = -0,038 \pm 0,013$$

Na rys. 5.8 przedstawiono otrzymaną zależność efektywności oddziaływania akustooptycznego od grubości światłowodu /na jednostkę mocy akustycznej i na jednostkę apertury przetwornika/.

Jak widać otrzymano dobrą zgodność wyników teoretycznych i eksperymentalnych dla oddziaływania TM - TM. Na podkreślenie zasługuje również fakt zgodności teorii i eksperymentu dla oddziaływania z konwersją modów TE - TM, ponieważ w trakcie przedstawionej analizy teoretycznej nic na temat tego oddziaływania nie zakładano. Można więc przyjąć, że wynik ten /efektywność oddziaływania TE - TM/ jest niezależnym potwierdzeniem słuszności przeprowadzonej analizy.



Rys. 5.8. Zależność efektywności oddziaływania akustooptycznego od grubości światłowodu d . Parametry: $\lambda = 20 \mu m$, $\rho = 2,65 \times 10^3 kg/m^3$, $v = 3,46 \times 10^3 m/s$, $\eta = 0,001$, η_{eff} na jednostkę mocy akustycznej i na jednostkę apertury przetwornika. Wyniki obliczeń teoretycznych i eksperymentalnych dla światłowodu z kreslowym, jednowarstwowym osłoniem SiO_2 o grubości $2,2 \mu m$.



Rys. 5.8. Zależność efektywności oddziaływania akustooptycznego od grubości światłowodów Ta_2O_5 . Podano efektywność przypadającą na jednostkę mocy akustycznej i jednostkę apertury przetwornika. Światłowod naniesiono na utlenionym podłożu krzemowym, grubość warstwy SiO_2 wynosiła 1,2 μm .

5.3. Związki fazowe i zależności dyspersyjne w światłowodach ZnO

W rozdziale 3.2 pokazano, że kąt ugięcia wiązki przy akustooptycznym oddziaływaniu Bragga w światłowodach planarnych jest określony następującym wzorem:

$$\vec{\beta}_B = \vec{\beta}_I \pm \vec{K} \quad (5.32.)$$

gdzie:

β_B, β_I - stałe propagacji padającej i ugiętej fali świetlnej

N_B, N_I - efektywne współczynniki załamania dla wiązki padającej i ugiętej

K - wektor falowy akustycznej fali powierzchniowej

f - częstotliwość

V_R - prędkość fali Rayleigha

Korzystając ze wzorów wiążących stałe propagacji światła i wektor falowy fali akustycznej z długością fali:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0} N \quad K = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (5.33.)$$

możemy wzór 5.32 przekształcić do następującej postaci:

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda_0}{2\Lambda N} \quad (5.34.)$$

W przypadku, gdy modulator akustooptyczny jest wykonany w światłowodzie planarnym, w którym prędkość akustycznej fali powierzchniowej zależy od grubości warstwy, kąt Bragga wygodniej jest obliczać ze wzoru:

$$\sin \theta_B = \frac{f \lambda_0}{2NV_R} \quad (5.35.)$$

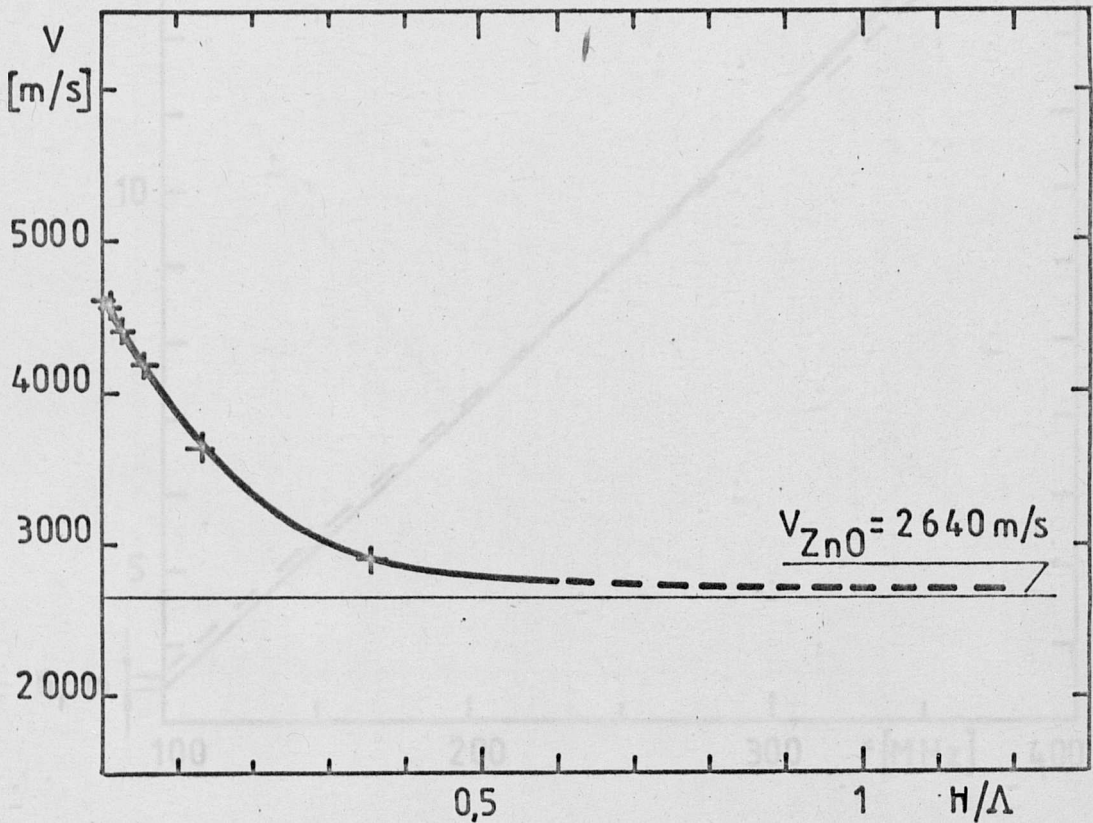
Wzory 5.34 i 5.35 są spełnione dla oddziaływania bez zmiany numeru i polaryzacji modu. Zależność prędkości akustycznej fali powierzchniowej od grubości światłowodowego ZnO przedstawiono na rys. 5.9. Linia ciągłą zaznaczono przebieg aproksymowany wielomianem:

$$V_R = \sum_{i=0}^3 a_i (h/\Lambda)^i \quad (5.36.)$$

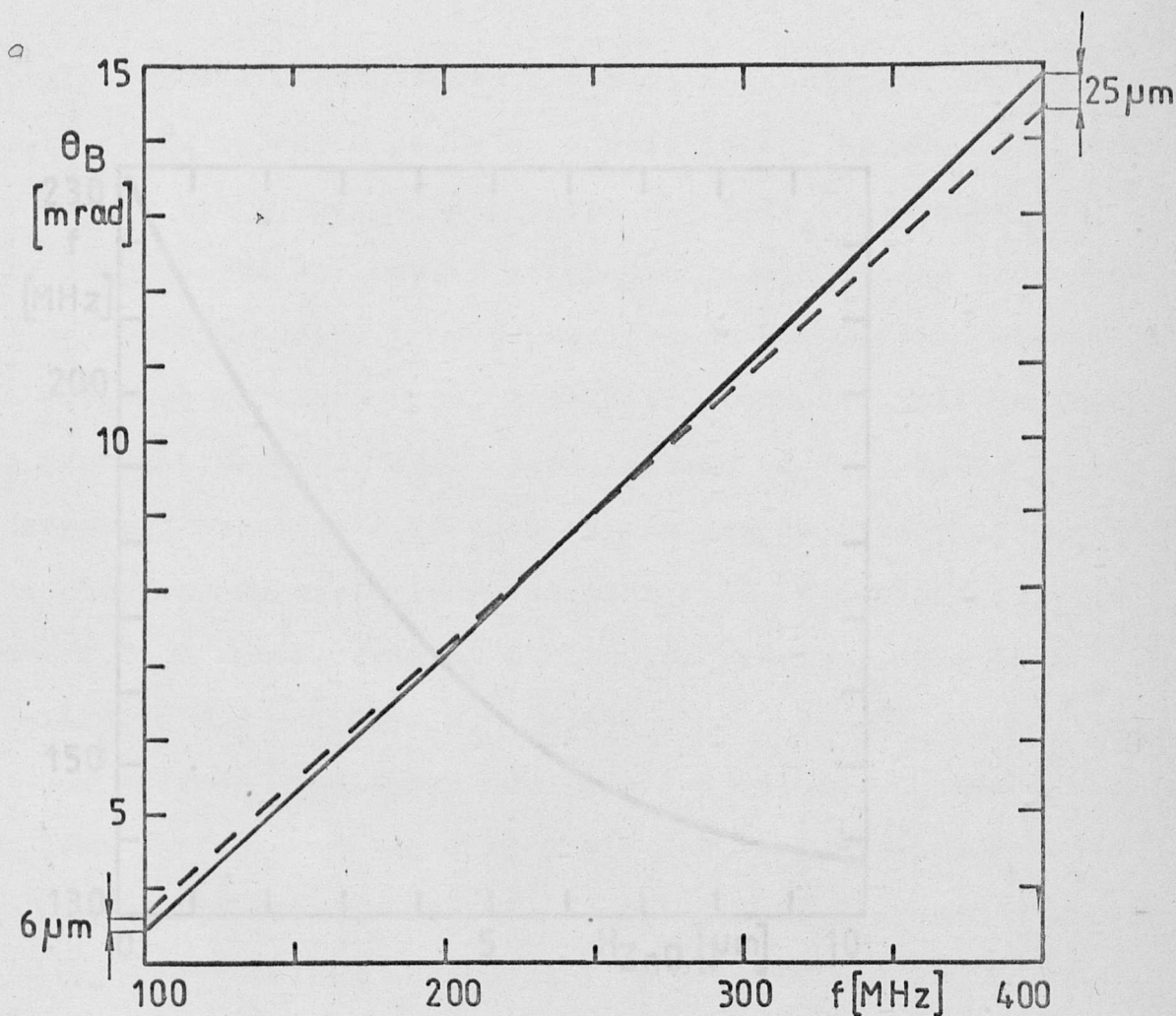
gdzie: $a_0 = 4625$, $a_1 = -8990$, $a_2 = 14080$, $a_3 = -7066$

Wpływ dyspersji prędkości AFP na kąt ugięcia wiązki ilustruje rys. 5.10. Linia przerywaną zaznaczono zależność kąta Bragga od częstotliwości, obliczoną ze wzoru 5.34 bez uwzględnienia zmiany prędkości AFP. Linia ciągłą przedstawiono kąt ugięcia obliczony ze wzoru 5.35. Na rys. 5.10 zaznaczono również zmiany w położeniu centrum wiązki w odległości 5 cm od modulatora.

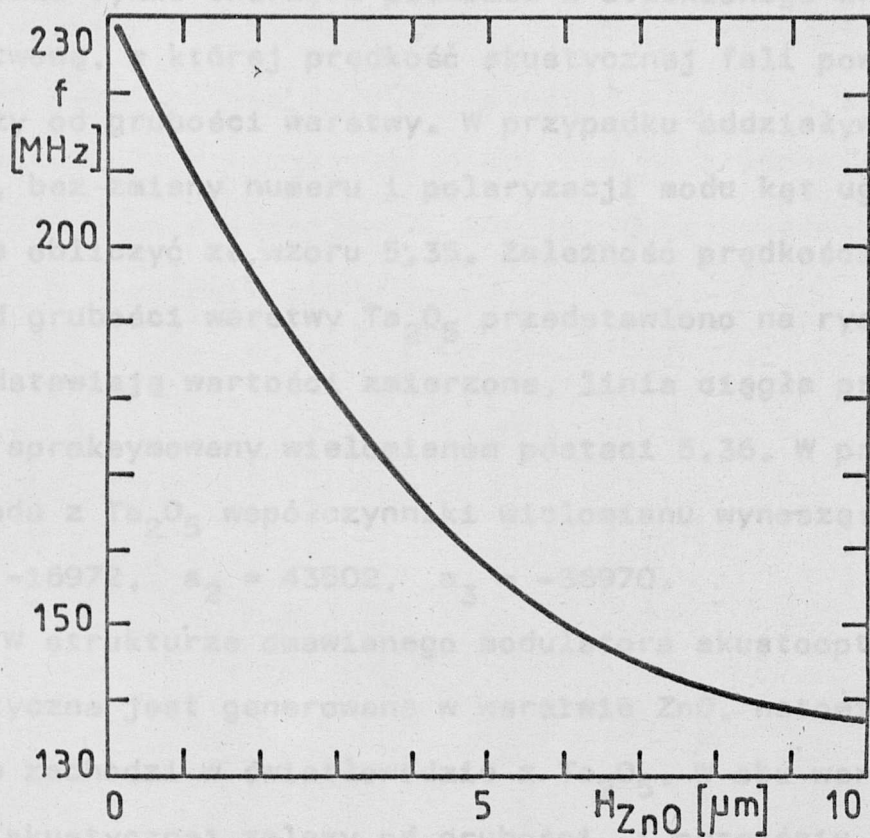
Zastosowanie warstwowego przetwornika AFP pozwala zmieniać częstotliwość generowanego sygnału nie tylko poprzez zmianę stałej przetwornika międzypalcowego, ale również poprzez zmianę grubości warstwy. Na rys. 5.11 przedstawiono zależność częstotliwości fali generowanej przez przetwornik od grubości warstwy tlenku cynku naniesionej na podłoże z utlenionego krzemu /grubość $\text{SiO}_2 = 1,2 \mu\text{m}/$.



Rys. 5.9. Zależność prędkości akustycznej fali powierzchniowej w warstwie ZnO naniesionej na podłożu z utlenionego krzemu od stosunku H/Λ . Grubość warstwy $\text{SiO}_2 = 1,2 \mu\text{m}$. H - grubość warstwy ZnO, Λ - długość fali AFP.



Rys. 5.10. Wpływ dyspersji prędkości akustycznej fali powierzchniowej na kąt ugięcia wiązki przy akustooptycznej dyfrakcji Bragga w światłowodach planarnych z tlenku cynku. Linia przerywaną zaznaczono zależność kąta ugięcia wiązki od częstotliwości, obliczoną bez uwzględnienia zmiany prędkości AFP z częstotliwością. Linia ciągłą zaznaczono kąt Bragga obliczony z uwzględnieniem dyspersyjnej zależności prędkości AFP. Zaznaczono również zmiany położenia centrum wiązki w odległości 5 cm od obszaru oddziaływania spowodowane dyspersją.



5.11. Zależność częstotliwości fali akustycznej generowanej przez przetwornik międzypalczasty od grubości warstwy ZnO. Wykres dotyczy przetwornika o szerokości palca równej $5 \mu m$, generującego falę akustyczną o długości $20 \mu m$.

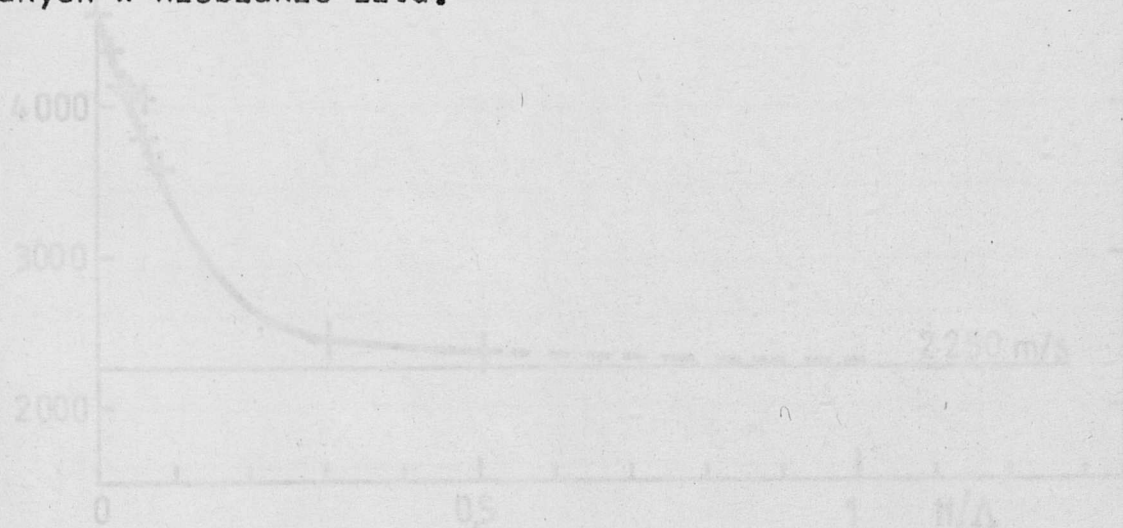
5.4. Związki fazowe i zależności dyspersyjne w światłowodach z Ta_2O_5

Światłowod z pięciotlenku tantalu, podobnie jak światłowod z tlenku cynku tworzy z podłożem z utlenionego krzemu strukturę warstwową, w której prędkość akustycznej fali powierzchniowej zależy od grubości warstwy. W przypadku oddziaływania izotropowego, bez zmiany numeru i polaryzacji modu kąt ugięcia wiązki można obliczyć ze wzoru 5.35. Zależność prędkości fali Rayleigha od grubości warstwy Ta_2O_5 przedstawiono na rys. 5.12. Punkty przedstawiają wartości zmierzone, linia ciągła prezentuje przebieg aproksymowany wielomianem postaci 5.36. W przypadku światłowodu z Ta_2O_5 współczynniki wielomianu wynoszą: $a_0 = 4615$, $a_1 = -16972$, $a_2 = 43502$, $a_3 = -36970$.

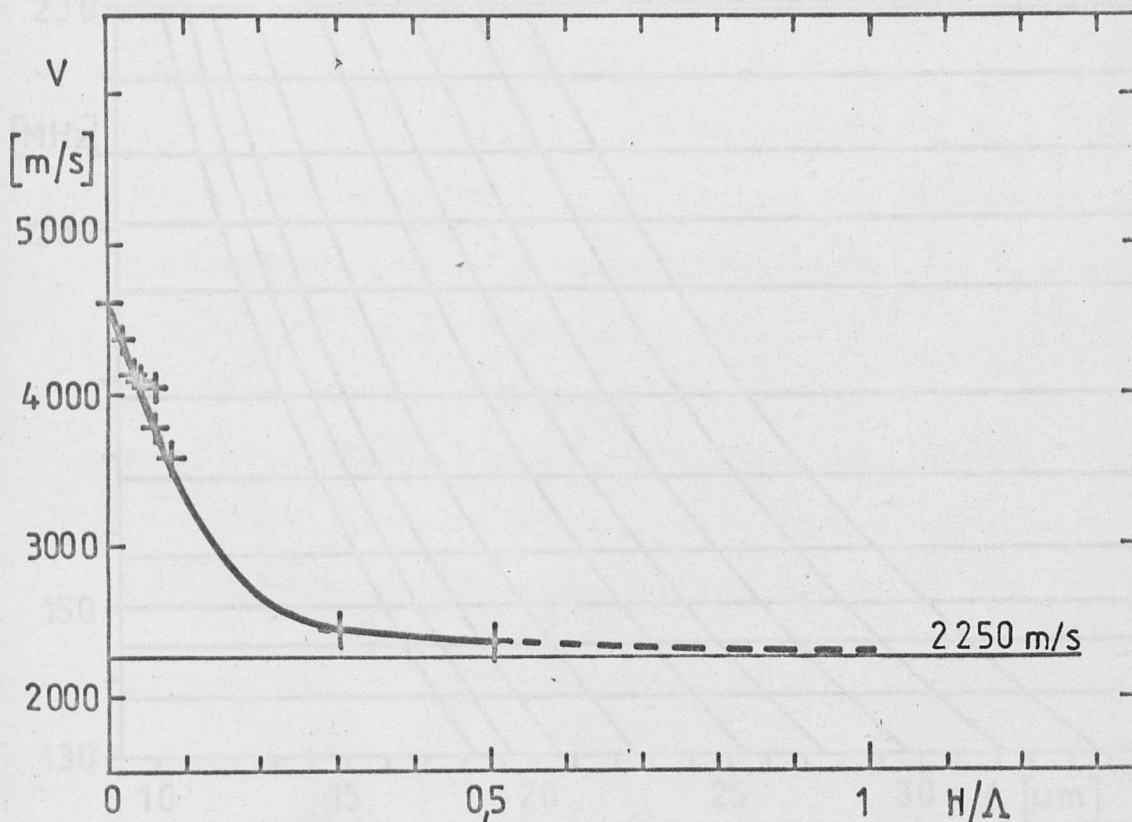
W strukturze omawianego modulatora akustooptycznego fala akustyczna jest generowana w warstwie ZnO, natomiast oddziaływanie zachodzi w światłowodzie z Ta_2O_5 . W obu warstwach prędkość fali akustycznej zależy od grubości, i przejściu z ZnO do Ta_2O_5 towarzyszy zwykle zmiana długości fali AFP. Efekt ten można zastosować do niezależnego ustalania częstotliwości i długości fali w ośrodku modulatora akustooptycznego. Efekt ten zilustrowano na rys. 5.13. Z rysunku możemy odczytać jak należy dobrać grubości warstw przetwornika ZnO i światłowodu Ta_2O_5 aby w obszarze oddziaływania akustooptycznego otrzymać zadane wcześniej wartości częstotliwości i długości fali akustycznej.

Z rys. 5.13 wynika również, że dysponując przetwornikiem międzypalczystym o szerokości palca $5\ \mu m$ generującym w ZnO falę o długości $20\ \mu m$, możemy w światłowodzie z Ta_2O_5 otrzymać falę akustyczną o dwukrotnie mniejszej długości, czyli dwa ra-

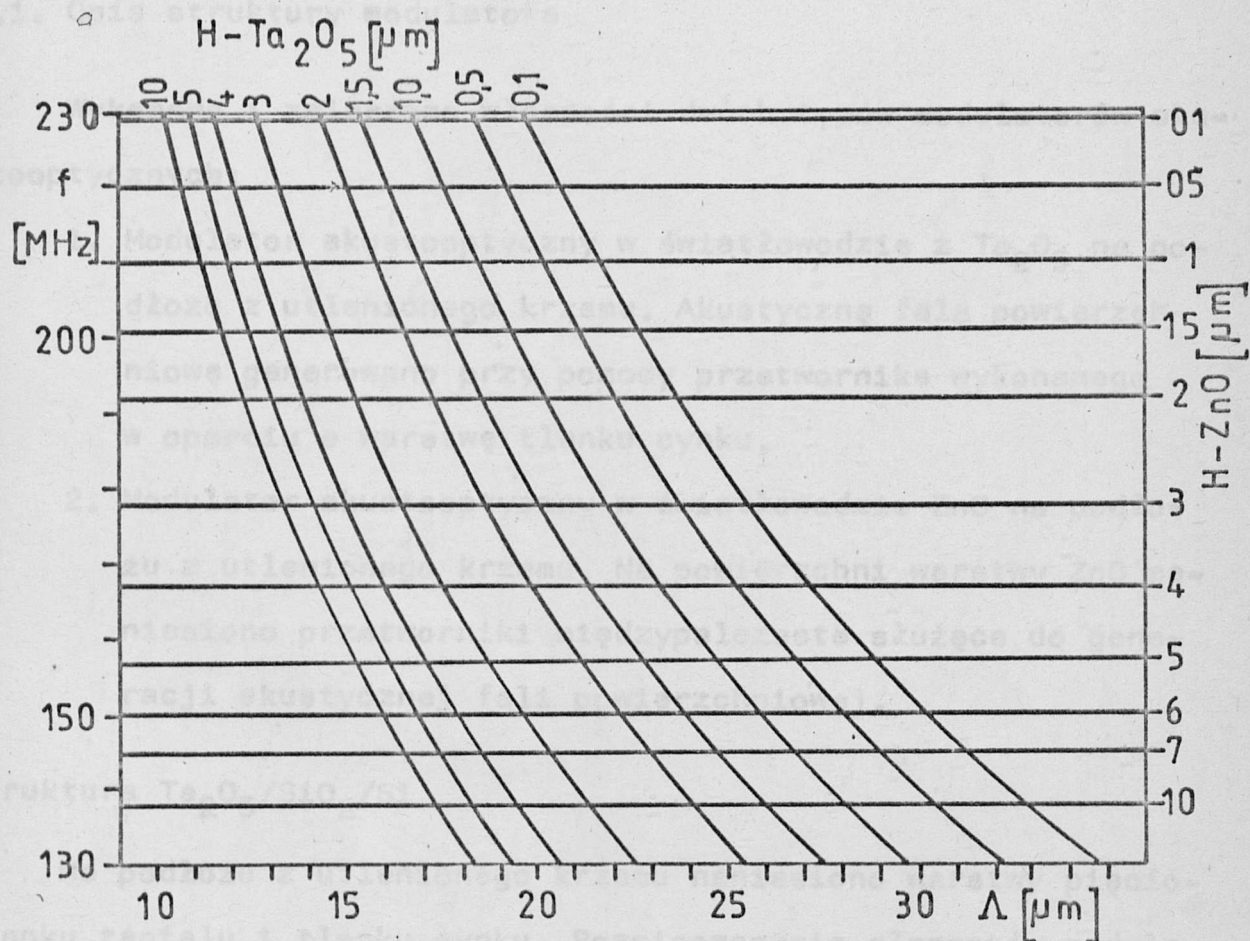
zy większy kąt Bragga. W przypadku zastosowania opisanej struktury do budowy zintegrowanego analizatora widma opisany efekt pozwala dwukrotnie zwiększyć jego rozdzielczość. Na zakończenie warto podkreślić, że zarówno efekt zwiększenia częstotliwości przetwornika AFP poprzez zmianę grubości warstwy ZnO jak i możliwość niezależnego doboru długości fali AFP i częstotliwości przedstawione w niniejszej pracy nie mają odpowiedników w najszerszej obecnie stosowanych modulatorach akustooptycznych wykonanych w niobianie litu.



5.12. Zależność prędkości akustycznej fali powierzchniowej w warstwie Te_2O_3 naniesionej na podłożu z utlenionego krzemu od stosunku H/λ . Grubość warstwy SiO_2 = 1,2 nm. H - grubość warstwy ZnO, λ - długość akustycznej fali powierzchniowej.



5.12. Zależność prędkości akustycznej fali powierzchniowej w warstwie Ta_2O_5 naniesionej na podłożu z utlenionego krzemu od stosunku H/Λ . Grubość warstwy $\text{SiO}_2 = 1,2 \mu\text{m}$. H - grubość warstwy ZnO , Λ - długość akustycznej fali powierzchniowej.



Rys. 5.13. Zależność długości i częstotliwości fali akustycznej w światłowodzie z pięciotlenku tantalum od grubości warstw przetwornika ZnO i światłowodu Ta_2O_5 . Wykres ilustruje m.in. możliwość niezależnego określania częstotliwości i długości fali akustycznej w obszarze modulatora. Rysunek określa strukturę modulatora wykonaną na podłożu z utlenionego krzemu z tlenkiem o grubości $1,2 \mu\text{m}$ i przetwornikiem międzypalczastym o szerokości palca $5 \mu\text{m}$ generującym falę akustyczną o długości $20 \mu\text{m}$.

6. BADANIE ODDZIAŁYWANIA AKUSTOOPTYCZNEGO W ŚWIATŁOWODACH

Z Ta_2O_5 i ZnO

6.1. Opis struktury modulatora

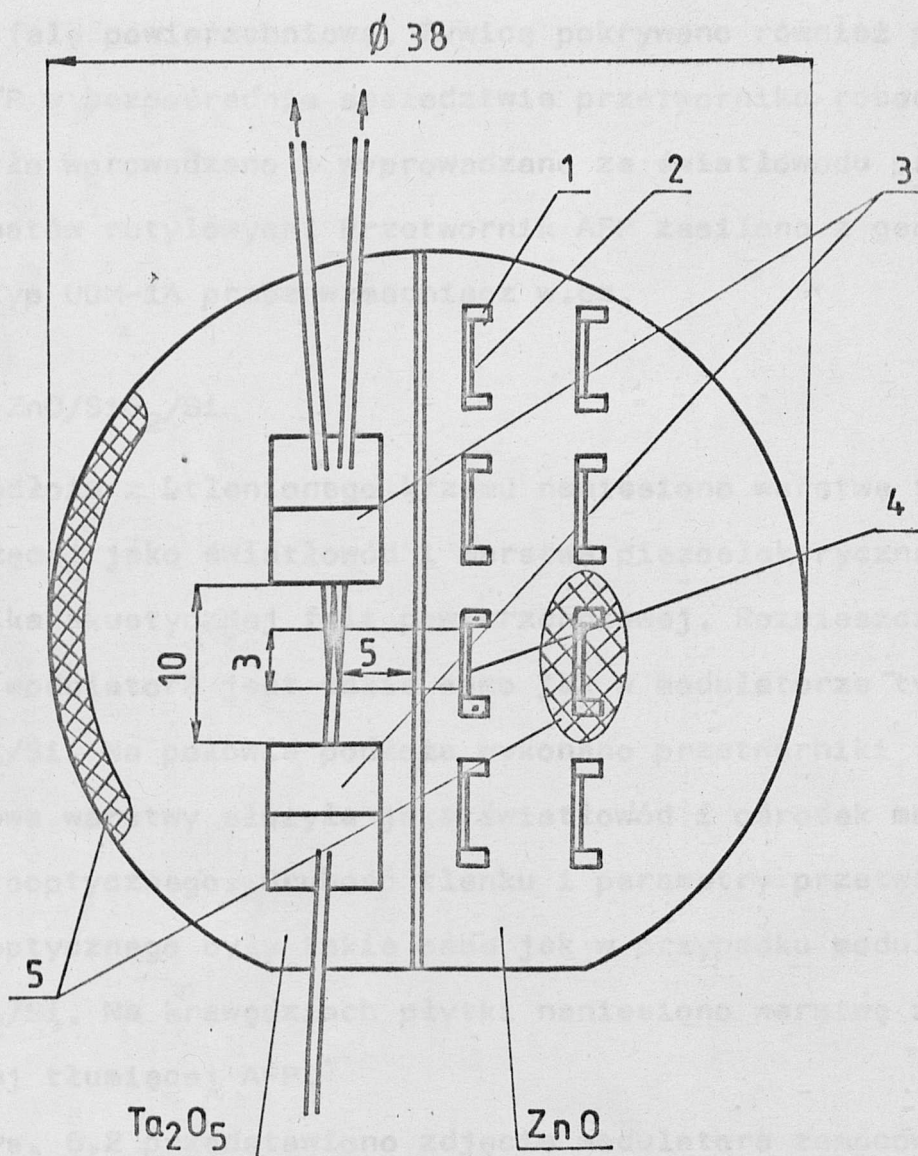
Wykonano i zmierzono własności dwóch typów modulatorów akustooptycznych;

1. Modulator akustooptyczny w światłowodzie z Ta_2O_5 na podłożu z utlenionego krzemu. Akustyczną falą powierzchniową generowano przy pomocy przetwornika wykonanego w oparciu o warstwę tlenku cynku,
2. Modulator akustooptyczny w światłowodzie ZnO na podłożu z utlenionego krzemu. Na powierzchni warstwy ZnO naniesiono przetworniki międzypalczaste służące do generacji akustycznej fali powierzchniowej.

Struktura $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2/\text{Si}$

Na podłożu z utlenionego krzemu naniesiono warstwy pięciotlenku tantalum i tlenku cynku. Rozmieszczenie elementów modulatora na podłożu przedstawiono na rys. 6.1. Grubość warstwy pośredniej SiO_2 wynosiła $1,2 \mu\text{m}$. Warstwa SiO_2 o tej grubości ograniczała tłumienie światła na skutek odsprzęgania ze światłowodu do podłoża do wartości mniejszej od $0,01 \text{ dB/cm}$. Połowę płytki podłożowej zajmowała piezoelektryczna warstwa ZnO , drugą połowę - światłowod Ta_2O_5 . Na powierzchni warstwy piezoelektrycznej metodą fotolitografii wykonano przetworniki międzypalczaste.

Elektrody przetwornika wykonano z aluminium o grubości około 200 nm . Przetwornik międzypalczasty miał 20 par palców, aperturę 3 mm i generował falę o długości $20 \mu\text{m}$. Krawędzie warstw ZnO i Ta_2O_5 w środku płytki miały kształt łagodnych zboczy. Zew-



Rys. 6.1. Rozmieszczenie elementów modulatora typu $Ta_2O_5/SiO_2/Si$ na płytce podłożowej z utlenionego krzemu. Podstawowe wymiary struktury: apertura przetwornika - 3 mm, średnica podłożowej płytki krzemowej - 38 mm, odległość obszaru oddziaływania od krawędzi Ta_2O_5 - 5 mm, odległość obszaru oddziaływania od przetwornika AFP - około 7 mm, odległość między pryzmatami - 10 mm.
1 - pola kontaktowe przetwornika, 2 - elektrody przetwornika, 3 - pryzmaty rutowe, 4 - przetwornik roboczy, 5 - tłumiąca warstwa żywicy epoksydowej

Wewnętrzne krawędzie warstw pokryto warstwą żywicy epoksydowej tłumiącej falę powierzchniową. Żywicą pokrywano również przetwornik AFP w bezpośrednim sąsiedztwie przetwornika roboczego.

Światło wprowadzano i wyprowadzano ze światłowodu przy pomocy pryzmatów rutowych. Przetwornik AFP zasilano z generatora w.cz. typ UGM-1A przez wzmacniacz w.cz.

Struktura $\text{ZnO}/\text{SiO}_2/\text{Si}$

Na podłożu z utlenionego krzemu naniesiono warstwę tlenku cynku służącą jako światłowód i warstwa piezoelektryczna dla przetwornika akustycznej fali powierzchniowej. Rozmieszczenie elementów modulatora jest takie samo jak w modulatorze typu $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2/\text{Si}$. Na połowie podłoża wykonano przetworniki AFP, druga połowa warstwy służyła jako światłowód i ośrodek modulatora akustooptycznego. Grubość tlenku i parametry przetwornika akustooptycznego były takie same jak w przypadku modulatora $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2/\text{Si}$. Na krawędziach płytki naniesiono warstwę żywicy epoksydowej tłumiącej AFP.

Na rys. 6.2 przedstawiono zdjęcie modulatora zamocowanego w uchwycie ze sprzęgaczami rutowymi.

Rys. 6.2. Zdjęcie płaskiego modulatora akustooptycznego zamocowanego w uchwycie z pryzmatami rutowymi



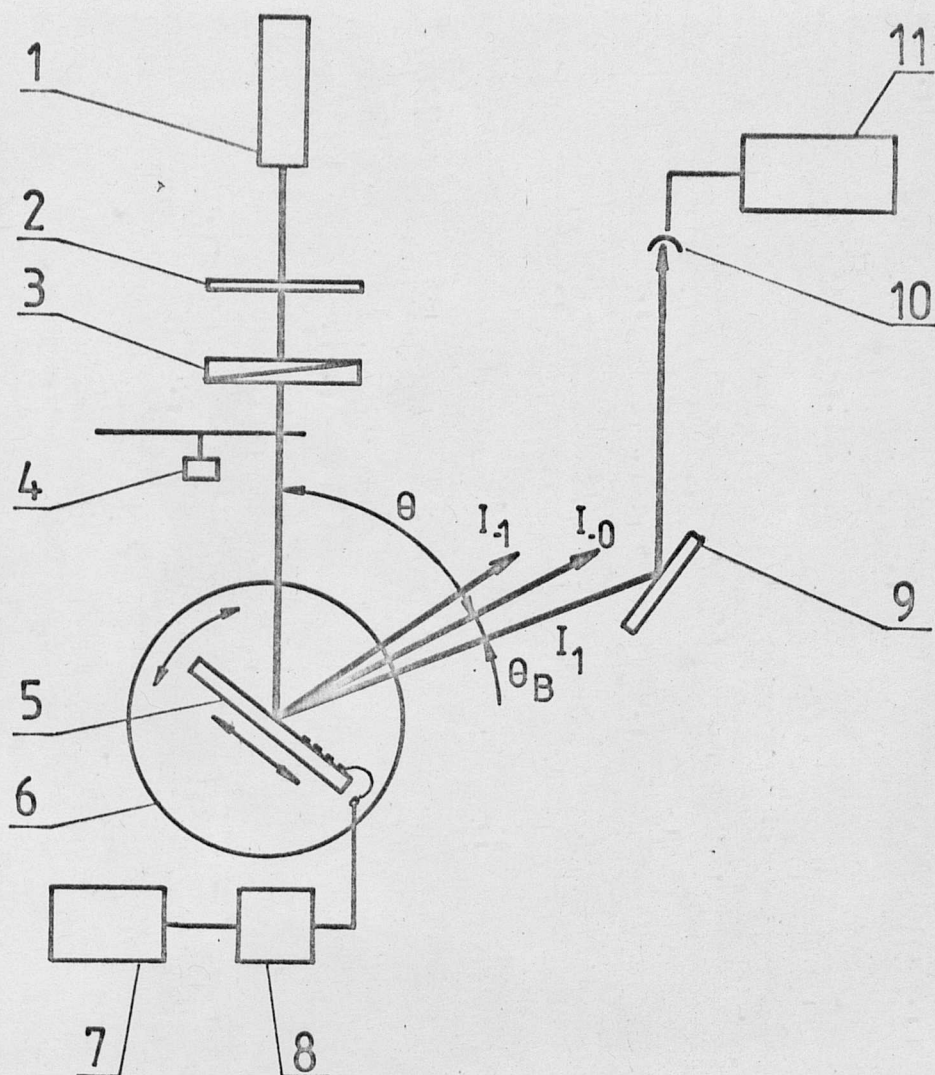
Rys. 6.2. Zdjęcie planarnego modulatora akustooptycznego zamocowanego w uchwycie z pryzmatami rutowymi

6.2. Badanie propagacji akustycznej fali powierzchniowej w strukturze warstwowej

6.2.1. Opis układu pomiarowego

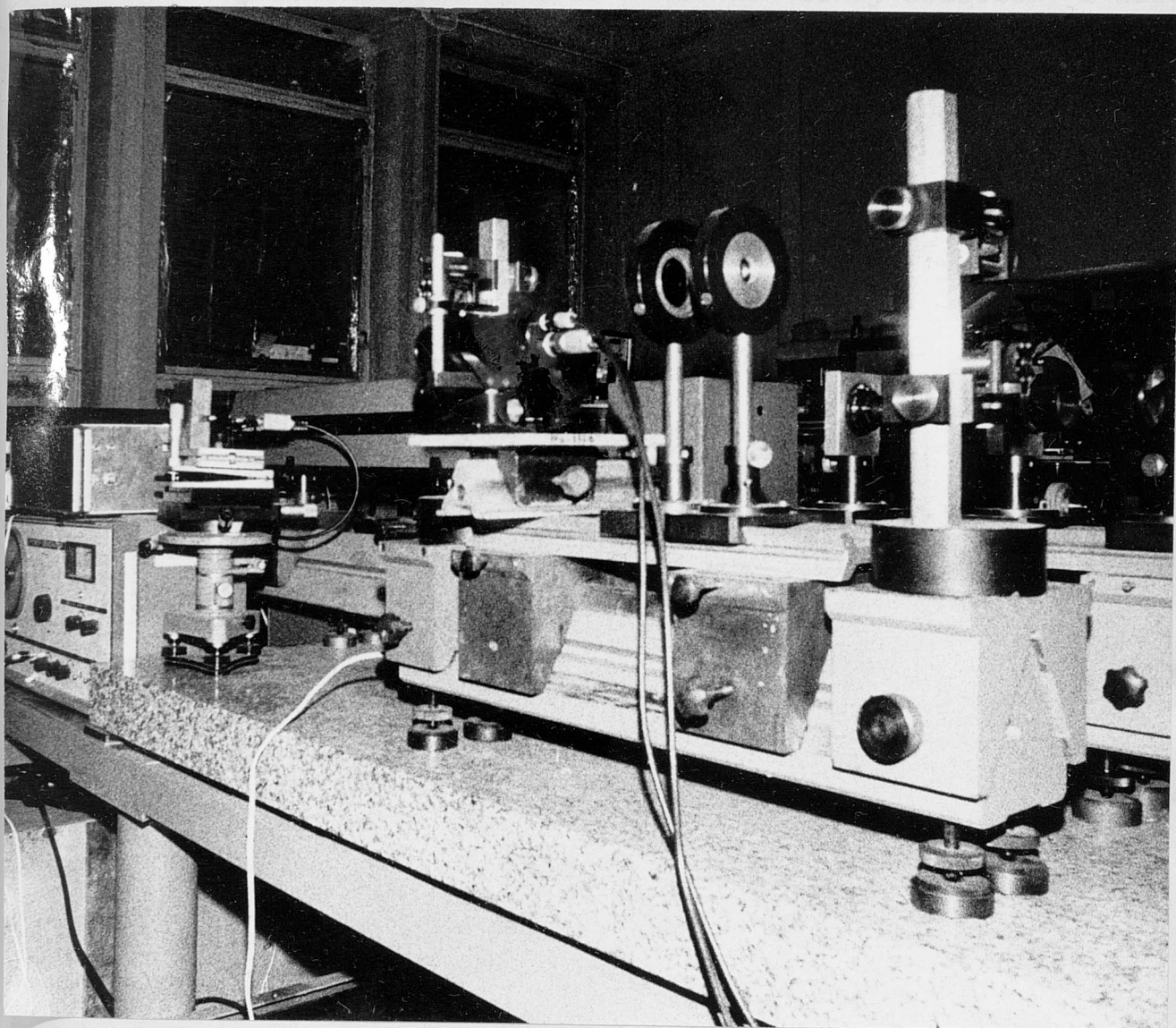
Do pomiarów własności akustycznej fali powierzchniowej zastosowano metodę sondy laserowej [67]. Korzystając z tej metody mierzono: długość fali, szybkość fazową, moc i tłumienie AFP, charakterystykę przetwornika, moc akustycznej fali powierzchniowej w obszarze oddziaływania i współczynnik sprzężenia elektromechanicznego warstwy. Na rys. 6.3 i 6.4 przedstawiono schemat i zdjęcie układu pomiarowego. Wiązka światła z lasera He - Ne pada na powierzchnię, po której rozchodzi się akustyczna fala powierzchniowa. Wywołane przez AFP periodyczne odkształcenia powierzchni i zmiany współczynnika załamania podłoża tworzą odbiciową siatkę dyfrakcyjną. Natężenie światła w prążku dyfrakcyjnym jest proporcjonalne do kwadratu amplitudy odkształcenia powierzchni, zaś kąt dyfrakcji odwrotnie proporcjonalny do długości fali akustycznej. Dysponując tymi danymi możemy obliczyć pozostałe parametry akustycznej fali powierzchniowej.

Rys. 6.3. Schemat układu do pomiaru parametrów akustycznej fali powierzchniowej.
1 - laser He - Ne, 2 - cylindryczne, 3 - polaryzator, 4 - modulator akustyczny, 5 - siatka na próbce, 6 - generator, 7 - generator dźwięku, 8 - wzmacniacz dźwięku, 9 - wzmacniacz, 10 - fotodioda, 11 - przetwornik selektywny.



Rys. 6.3. Schemat układu do pomiaru parametrów akustycznej fali powierzchniowej.

1 - laser He - Ne, 2 - ćwierćfalówka, 3 - polaryzator, 4 - modulator mechaniczny, 5 - mierzona próbka, 6 - goniometr, 7 - generator mocy w.cz. 8 - wzmacniacz w.cz., 9 - zwierciadło, 10 fotopowielacz, 11 - woltomierz selektywny.



Rys. 6.4. Zdjęcie układu do pomiaru parametrów akustycznej fali powierzchniowej.

6.2.2. Pomiar długości akustycznej fali powierzchniowej

Długość akustycznej fali powierzchniowej obliczamy z następującego wzoru [3]:

$$2 \sin(\theta_B/2) \cos(\theta + \theta_B/2) = -\lambda/\Lambda \quad (6.1.)$$

gdzie: Λ - długość fali AFP

λ - długość fali światła

znaczenie kątów θ_0 i θ_1 wyjaśniono na rys. 6.3.

Dokładność wyznaczenia długości fali była głównie określona dokładnością pomiaru kąta θ_B i wynosiła $\pm 0,4 \mu\text{m}$.

6.2.2.1. Prędkość akustycznej fali powierzchniowej

Prędkość akustycznej fali powierzchniowej obliczono ze wzoru

$$V_R = \Lambda f \quad (6.2.)$$

gdzie V_R - prędkość fazowa akustycznej fali powierzchniowej

f - częstotliwość fali akustycznej

Λ - długość fali akustycznej.

Dokładność wyznaczenia prędkości wynosiła 2,5% tzn. błąd nie przekraczał 100 m/s.

6.2.3. Pomiar mocy akustycznej fali powierzchniowej

Moc akustycznej fali powierzchniowej w obszarze oddziaływania akustooptycznego jest określona przez następujące czynniki:

- efektywność generacji przetwornika AFP
- tłumienie fali akustycznej

- rozpraszanie AFP na granicach warstw światłowodu i przetwornika.

W pracy moc fali akustycznej zmierzono przy pomocy sondy laserowej [67]. Metoda ta pozwala określić całkowitą moc fali akustycznej dokładnie w obszarze oddziaływania, bez konieczności rozpatrywania wpływu wymienionych wyżej czynników.

Innym sposobem jest pomiar parametrów wykonanej na strukturze modulatora akustooptycznego linii opóźniającej. Metodę tę zastosował m.in. Hickernell [5] do pomiaru efektywności oddziaływania i tłumienia AFP w światłowodach z Ta_2O_5 , ZnO , Si_3N_4 i C-7059. Wadą tej metody jest nieuwzględnianie asymetrii rozpraszania fali akustycznej na granicach warstw. Optyczna metoda pomiaru mocy fali akustycznej opiera się na pomiarze efektywności dyfrakcji wiązki laserowej przy odbiciu od powierzchni z falą Rayleigha i na wykorzystaniu proporcjonalności;

$$P_{ak} \sim u_3^2 \sim \eta \quad (6.3.)$$

gdzie P_{ak} - moc fali akustycznej

u_3 - amplituda normalnej składowej odkształcenia powierzchni

η - efektywność dyfrakcji przy odbiciu

Poniżej przeanalizowano oddziaływanie światła z AFP przy odbiciu od struktury warstwowej. Opracowana metoda pomiaru może służyć do określenia mocy fali Rayleigha rozchodzącej się w strukturach wielowarstwowych pod warunkiem, że całkowita grubość wielowarstwy jest mniejsza od długości fali akustycznej.

6.2.3.1. Analiza oddziaływania światła z falą Rayleigha przy odbiciu od struktury warstwowej

Amplitudę składowej normalnej akustycznej fali powierzchniowej można określić wykorzystując zjawisko dyfrakcji promienia odbitego od powierzchni z AFP. Periodyczne pole naprężeń wytworzone przez AFP wywołuje odkształcenie powierzchni i zmianę współczynnika załamania ośrodka wywołaną efektem elastooptycznym. W przypadku fali Rayleigha rozchodzącej się po powierzchni ośrodka jednorodnego, dyfrakcja wywołana jest głównie przez zjawisko deformacji powierzchni. Efekty związane ze zmianą współczynnika załamania można w tym przypadku zaniedbać. Efektywność dyfrakcji wyraża się wzorem [3]:

$$I_1/I_0 = (k_0 \cos \theta_1 u_3)^2 \quad (6.4.)$$

gdzie I_1 - natężenie światła w pierwszym prążku dyfrakcyjnym
 I_0 - natężenie światła w wiązce zerowej
 k_0 - wektor falowy padającej fali świetlnej.

W przypadku odbicia światła od powierzchni z naniesioną warstwą należy uwzględnić odkształcenie górnej i dolnej powierzchni warstwy, efekty interferencyjne i zmiany współczynnika załamania warstwy pod wpływem deformacji. Natężenie światła w pierwszym i zerowym prążku dyfrakcyjnym opisują odpowiednio wzory [68]

$$I_1 = I_0 (k_0/2)^2 G \left[(Ar_1)^2 + (At_1 t_1' r_2)^2 + 2AA't_1 t_1' r_1 r_2 \cos(KH \operatorname{tg} \theta_1 + 2n_1 H k_0 \cos \theta_1) \right] \quad (6.5.)$$

$$I_0 = I_0 G \left[r_1^2 + (r_1 r_2 t_1 t_1')^2 + 2r_1 r_2 t_1 t_1' \cos(2n_1 k_0 H \cos \theta_1) \right] \quad (6.6.)$$

$$A' = 2 \cdot u_3 \cdot \cos \theta_0 \quad (6.8.)$$

$$A = C \cdot \cos \theta_1 \quad (6.9.)$$

gdzie C - czynnik opisujący amplitudę zmian współczynnika załamania warstwy

k_0 - wektor falowy fali świetlnej w próżni

I_1 - natężenie wiązki padającej

r_1, r_2 - fresnelowskie współczynniki odbicia dla górnej i dolnej powierzchni warstwy

t_1, t_1' - współczynniki transmisji w kierunku powietrze warstwy i warstwy powietrze

G - czynnik opisujący rozkład natężenia światła w wiązce

K - wektor falowy AFP

H - grubość warstwy.

Dla warstw o grubości około $1 \mu m$ i fali akustycznej o długości $20 \mu m$ /wartości typowe w optoelektronice zintegrowanej/ składnik $K \cdot H \cdot \tan \theta_1$ we wzorze 6.5 jest znacznie mniejszy od $2 \cdot n_1 \cdot k_0 \cdot H \cdot \cos \theta_1$ i można go pominąć. Jeżeli wpływ zmian współczynnika załamania warstwy na natężenie wiązki ugiętej jest pomijalnie mały wyrażenie 6.9 przyjmuje postać:

$$A = 2 \cdot u_3 \cdot \cos \theta_1 \quad (6.10.)$$

Dla kąta padania zbliżonego do normalnego otrzymujemy:

$$A \approx A' = 2 u_3 \cos \theta_0 \quad (6.11.)$$

Podstawienie we wzorze 6.10 θ_0 zamiast θ_1 daje błąd mniejszy od 4% jeżeli θ_0 jest mniejsze od 20° .

Podstawiając 6.11 do 6.5 a następnie dzieląc 6.5 przez 6.6

otrzymujemy wzór na efektywność dyfrakcji przy odbiciu od powierzchni pokrytej warstwą identyczny ze wzorem 6.4.

Wyrażenie 6.11 otrzymano przy założeniu, że wpływ zmian współczynnika załamania warstwy można pominąć. Założenie to wymaga uzasadnienia. Ze wzorów 6.5, 6.6 wynika, że natężenia zerowego i pierwszego prążka dyfrakcyjnego są opisane wzorami postaci;

$$I_0 \sim (a^2 + b^2 + abc \cos \theta) \quad (6.12.)$$

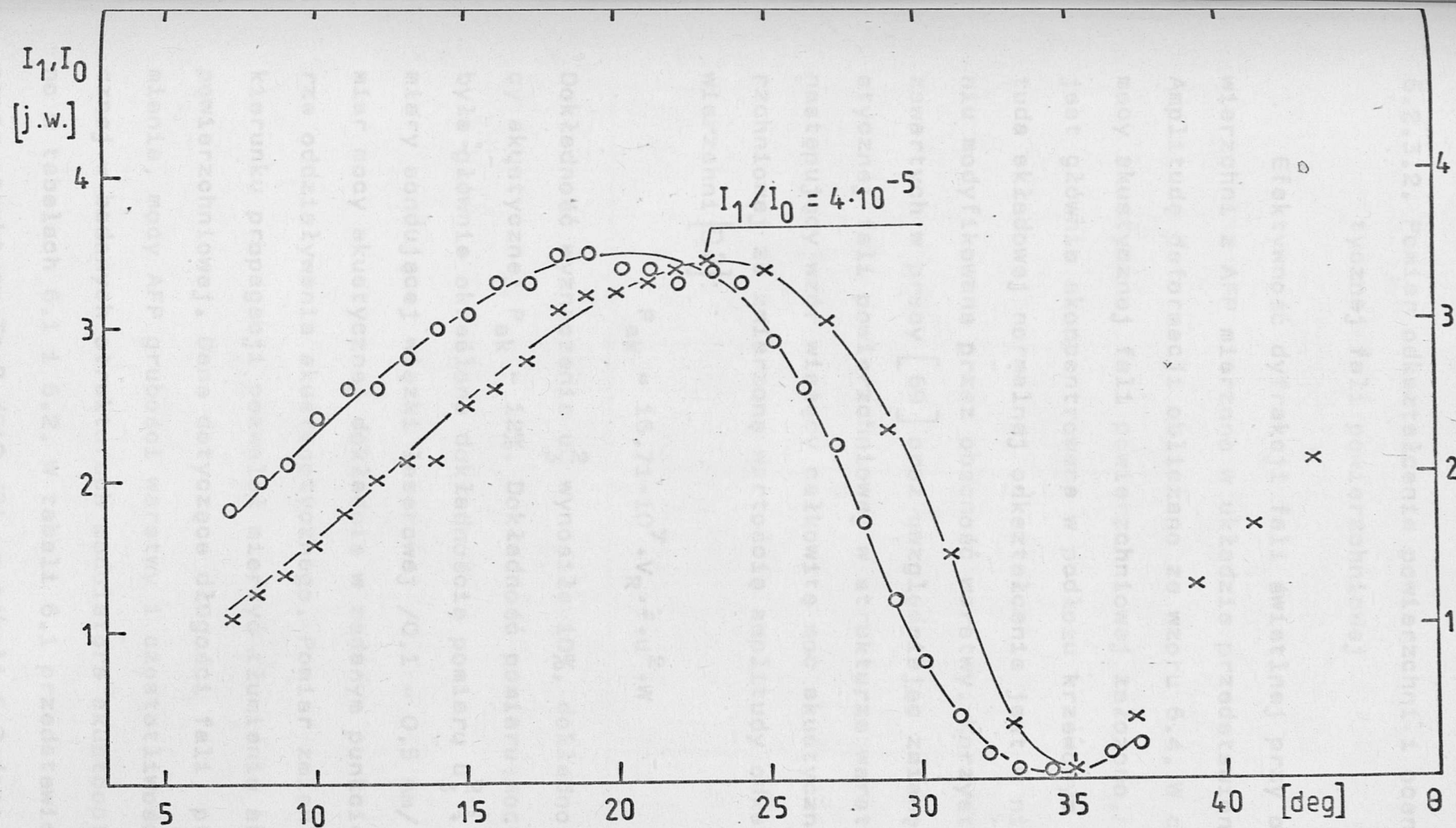
$$I_1 \sim [(c_1 a)^2 + (c_2 b)^2 + c_1 c_2 abc \cos \theta] \quad (6.13.)$$

Jeżeli zmiany współczynnika załamania warstwy są małe, to

$$c_1 = c_2 = c \quad (6.14.)$$

i wykresy funkcji 6.12 i 6.13 różnią się tylko skalą osi:

$I_1/I_0 = c^2$. Jeżeli założenie 6.14 nie jest spełnione, po przeskalowaniu osi wykres funkcji będą się nadal różniły odległością pomiędzy maksimum i minimum funkcji. Na rys. 6.5 przedstawiono zależność natężenia światła w zerowym i pierwszym prążku dyfrakcyjnym od kąta padania światła. Zależność tę zmierzono dla światłowodów z tlenku cynku o grubości 2,8 μm naniesionym na podłożu z utlenionego krzemu. Jak widać z rysunku, wykresy dla obu maksimów dyfrakcyjnych pokrywają się. Rozważania dotyczące istotności zmian współczynnika załamania warstwy na natężenie prążka ugiętego stosują się również do struktur wielowarstwowych, pod warunkiem, że całkowita grubość struktury jest znacznie mniejsza od długości fali akustycznej. W szczególności opisaną metodę pomiaru można zastosować do pomiaru amplitudy odkształcenia powierzchni światłowodów w strukturze dwuwarstwowej $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2/\text{Si}$ lub $\text{ZnO}/\text{SiO}_2/\text{Si}$.



Rys. 6.5. Zależność natężenia światła w zerowym i pierwszym prążku dyfrakcyjnym od kąta padania światła. Zależność zmierzono dla światłowodu z tlenku cynku naniesionym na podłożu z utlenionego krzemu. Grubość warstwy ZnO = 2,8 μm , grubość warstwy SiO₂ = 1,2 μm . Przesunięcie kątowe krzywych jest spowodowane ugięciem dyfrakcyjnym wiązki.

6.2.3.2. Pomiar odkształcenia powierzchni i ocena mocy akustycznej fali powierzchniowej

o
Efektywność dyfrakcji fali świetlnej przy odbiciu od powierzchni z AFP mierzono w układzie przedstawionym na rys. 6.3. Amplitudę deformacji obliczano ze wzoru 6.4. W celu obliczenia mocy akustycznej fali powierzchniowej założono, że energia AFP jest głównie skoncentrowana w podłożu krzemowym oraz, że amplituda składowej normalnej odkształcenia jest w niewielkim stopniu modyfikowana przez obecność warstwy. Korzystając z wyników zawartych w pracy [69] oraz uwzględniając zmianę szybkości akustycznej fali powierzchniowej w strukturze warstwowej otrzymano następujący wzór wiążący całkowitą moc akustycznej fali powierzchniowej ze zmierzoną wartością amplitudy odkształcenia powierzchni [D2]:

$$P_{ak} = 16,71 \cdot 10^7 \cdot v_R \cdot f \cdot u^2 \cdot W \quad (6.15.)$$

Dokładność wyznaczenia u_3^2 wynosiła 10%, dokładność pomiaru mocy akustycznej P_{ak} - 12%. Dokładność pomiaru mocy akustycznej była głównie określona dokładnością pomiaru u_3^2 . Niewielkie rozmiary sondującej wiązki laserowej /0,1 - 0,5 mm/ umożliwiały pomiar mocy akustycznej dokładnie w zadanym punkcie, np. w obszarze oddziaływania akustooptycznego. Pomiar zmian mocy AFP wzdłuż kierunku propagacji pozwalał mierzyć tłumienie akustycznej fali powierzchniowej. Dane dotyczące długości fali, prędkości, tłumienia, mocy AFP grubości warstwy i częstotliwości fali akustycznej w badanych strukturach modulatora akustooptycznego zebrano w tabelach 6.1 i 6.2. W tabeli 6.1 przedstawiono dane dotyczące struktury $Ta_2O_5/SiO_2/Si$, w tabeli 6.2 dane dotyczące struktury $ZnO/SiO_2/Si$.

TABELA 6.1. Zestawienie parametrów akustycznej fali powierzchniowej dla wykonanych struktur modulatora typu $Ta_2O_5/SiO_2/Si$

nr	H	Λ	H/ Λ	α_{ak}	V	f
	μm	μm	-	dB/cm	m/s	MHz
3	1,04	27,9	0,037	*	4030	145
3/2	1,02	28,3	0,036	*	4080	145
3/3	0,56	29,1	0,019	*	4360	150
14	4,13	14,1	0,304	34	2440	173
14/1	7,02	13,8	0,509	50	2370	172
15	1,53	20,2	0,075	14	3590	178
15/1	1,16	21,2	0,054	11	3780	178
15/2	0,67	23,2	0,029	*	4120	178
15/3	0,30	24,4	0,012	*	4400	178

Oznaczenia: H - grubość warstwy Ta_2O_5 ,

Λ - długość fali AFP,

α_{ak} - tłumienie fali akustycznej,

V - prędkość fali Rayleigha,

f - częstotliwość środkowa przetwornika AFP.

* - tłumienie mniejsze od 10 dB/cm

TABELA 6.2. Zestawienie parametrów akustycznej fali powierzchniowej dla wykonanych struktur modulatora typu $\text{ZnO}/\text{SiO}_2/\text{Si}$.

Oznaczenia jak w tabeli 6.1.

nr	H	Λ	H/ Λ	α_{ak}	V	f
	μm	μm	-	dB/cm	m/s	MHz
C-1	2,75	20	0,358	-	3620	181
3/1	7,16	20	0,358	-	2890	145
14	2,81	20	0,141	-	3440	173
21	1,14	20	0,057	16	4180	209
22	0,49	20	0,024	3	4420	221
23	0,22	20	0,011	-	4540	227

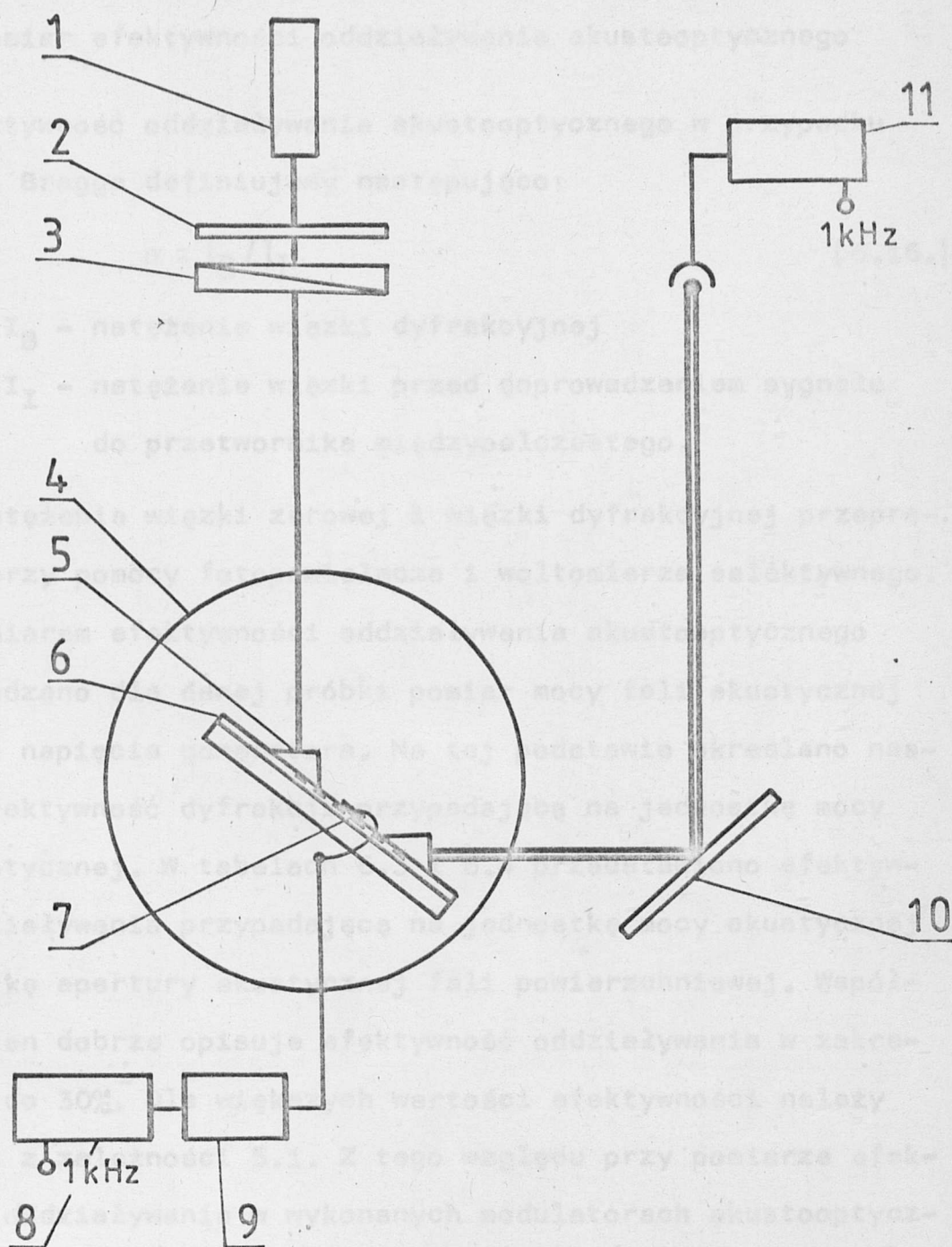
6.3. Badanie oddziaływania akustooptycznego i parametrów optycznych modulatora

6.3.1. Opis układu pomiarowego

Schemat układu do pomiaru parametrów optycznych i efektywności oddziaływania akustooptycznego przedstawia rys. 6.6. W skład układu wchodzi: laser, ćwierćfalówka, polaryzator, goniometr, uchwyt modulatora akustooptycznego, detektor /fotopowielacz/, generator mocy i wzmacniacz w.cz., woltomierz selektywny. Światło jest wprowadzane z modulatora przy pomocy dwóch pryzmatów rutowych. Na stoliku goniometru umieszczono nie zaznaczony na rysunku stół pochylony, umożliwiający zmianę kąta wprowadzania wiązki światła do modulatora. Sygnał w.cz. zasilający przetwornik międzypalczysty modulowano amplitudowo częstotliwością 1 kHz. Sygnał z detektora mierzono przy pomocy woltomierza selektywnego.

6.3.2. Pomiar współczynnika załamania i grubości światłowodów

Efektywne współczynniki załamania modów, współczynnik załamania i grubość światłowodów mierzono metodą sprzęgacza pryzmatycznego [36]. Współczynnik załamania określano z dokładnością $\pm 1 \cdot 10^{-3}$, grubość z dokładnością $\pm 1 \cdot 10^{-2}$ μm . Wyniki pomiarów zebrano w tabelach 6.3 i 6.4.



Rys. 6.6. Schemat układu do badania efektywności oddziaływania akustooptycznego i własności optycznych modulatora akustooptycznego: 1 - laser, 2 - ćwierćfalówka, 3 - polaryzator, 4 - stolik goniometru, 5 - pryzmat rutowy, 6 - światłowod, 7 przetwornik akustycznej fali powierzchniowej, 8 - generator mocy w.c.z. 9 - wzmacniacz w.c.z., 10 - zwierciadło, 11 - woltomierz selektywny. Linia podwójną zaznaczono na rysunku pojawienie się na wyjściu modulatora dwóch wiązek.

6.3.3. Pomiar efektywności oddziaływania akustooptycznego

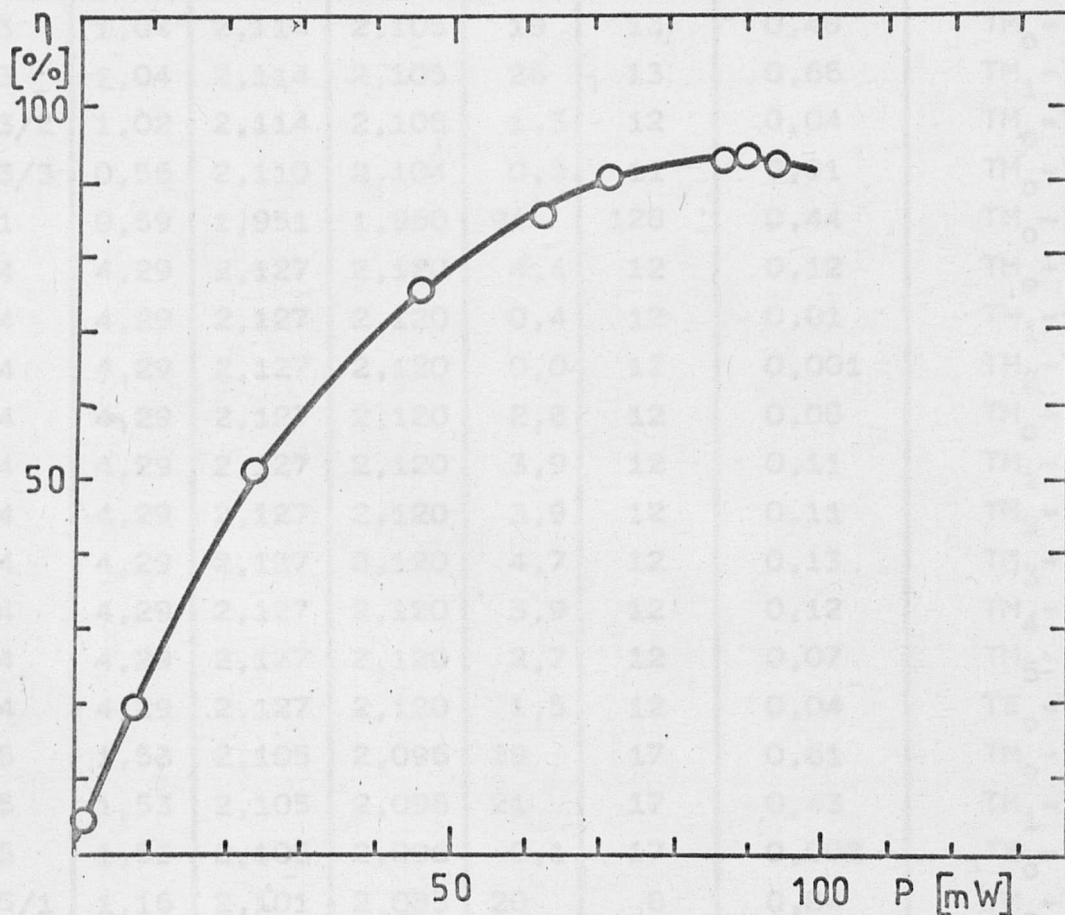
Efektywność oddziaływania akustooptycznego w przypadku dyfrakcji Bragga definiujemy następująco:

$$\eta = I_B / I_I \quad (6.16.)$$

gdzie: I_B - natężenie wiązki dyfrakcyjnej

I_I - natężenie wiązki przed doprowadzeniem sygnału do przetwornika międzypalczastego.

Pomiar natężenia wiązki zerowej i wiązki dyfrakcyjnej przeprowadzano przy pomocy fotopowielacza i woltomierza selektywnego. Przed pomiarem efektywności oddziaływania akustooptycznego przeprowadzano dla danej próbki pomiar mocy fali akustycznej w funkcji napięcia generatora. Na tej podstawie określano następnie efektywność dyfrakcji przypadającą na jednostkę mocy fali akustycznej. W tabelach 6.3 i 6.4 przedstawiono efektywność oddziaływania przypadającą na jednostkę mocy akustycznej i jednostkę apertury akustycznej fali powierzchniowej. Współczynnik ten dobrze opisuje efektywność oddziaływania w zakresie od 0 do 30%. Dla większych wartości efektywności należy korzystać z zależności 5.1. Z tego względu przy pomiarze efektywności oddziaływania w wykonanych modulatorach akustooptycznych z reguły nie przekraczano wartości 30%. Dla próbki nr 11 przeprowadzono pomiar maksymalnej możliwej do osiągnięcia efektywności dyfrakcji Bragga. Wynik pomiaru przedstawiono na rys. 6.7. Otrzymano efektywność dyfrakcji 94%. Osłabienie natężenia światła w wiązce zerowej wynosiło 99%.



Rys. 6.7. Zależność efektywności oddziaływania od mocy akustycznej. Próbkę nr 11. Maksymalna efektywność oddziaływania 94%. Osłabienie natężenia wiązki zerowej = 99%.

TABELA 6.3. Zestawienie optycznych i akustooptycznych parametrów modulatorów akustooptycznych wykonanych w strukturze $Ta_2O_5/SiO_2/Si$.

nr	H	n_o	n_e	η	P_{ak}	$\eta / P_{ak} \cdot W$	Typ oddziaływania
	μm			%	mW	%/mW mm	
3	1,04	2,114	2,105	19	13	0,48	TM_0-TM_0
3	1,04	2,114	2,105	26	13	0,66	TM_1-TM_1
3/2	1,02	2,114	2,103	1,3	12	0,04	TM_0-TM_0
3/3	0,56	2,110	2,104	0,3	11	0,01	TM_0-TM_0
11	0,59	1,951	1,960	94	128	0,44	TM_0-TM_0
14	4,29	2,127	2,120	4,4	12	0,12	TM_0-TM_0
14	4,29	2,127	2,120	0,4	12	0,01	TM_1-TM_1
14	4,29	2,127	2,120	0,04	12	0,001	TM_2-TM_2
14	4,29	2,127	2,120	2,8	12	0,08	TM_0-TE_0
14	4,29	2,127	2,120	3,9	12	0,11	TM_1-TE_1
14	4,29	2,127	2,120	3,9	12	0,11	TM_2-TE_2
14	4,29	2,127	2,120	4,7	12	0,13	TM_3-TE_3
14	4,29	2,127	2,120	3,9	12	0,12	TM_4-TE_4
14	4,29	2,127	2,120	2,7	12	0,07	TM_5-TE_5
14	4,29	2,127	2,120	1,5	12	0,04	TE_0-TE_0
15	1,53	2,105	2,096	29	17	0,61	TM_0-TM_0
15	1,53	2,105	2,096	21	17	0,43	TM_1-TM_1
15	1,53	2,105	2,096	0,1	17	0,002	TE_0-TM_0
15/1	1,16	2,101	2,085	20	8	0,84	TM_0-TM_0
15/1	1,16	2,101	2,085	23	8	0,99	TM_1-TM_1
15/3	0,30	2,096	2,078	9,0	8	0,40	TM_0-TM_0

Oznaczenia: H - grubość światłowodu,

η - efektywność oddziaływania,

P_{ak} - całkowita moc fali akustycznej w obszarze oddziaływania,

W - apertura AFP.

Uwaga: W tabeli przedstawiono komplet wyników. Analizę w rozdz. 5. prowadzono dla modów TM_0 , TE_0 . W próbkach 3/2 i 3/3 wystąpił spadek efektywności po trawieniu jonowym Ta_2O_5 .

TABELA 6.4 Zestawienie optycznych i akustooptycznych parametrów modulatorów akustooptycznych wykonanych w strukturze $\text{ZnO/SiO}_2/\text{Si}$.

Oznaczenia jak w tabeli 6.3.

nr	H	n_o	n_e	η	P_{ak}	$\eta/P_{ak} \cdot W$	Typ oddziaływania
	μm			%	mW	%/mW mm	
C/1	2,75	2,014	2,024	21	158	$4,8 \times 10^{-2}$	$\text{TE}_0 - \text{TE}_0$
C/1	2,75	2,014	2,024	6,0	158	$1,3 \times 10^{-2}$	$\text{TM}_0 - \text{TM}_0$
3/1	7,16	2,014	2,024	0,03	29	$3,7 \times 10^{-4}$	$\text{TE}_0 - \text{TE}_0$
3/1	7,16	2,014	2,024	7,7	29	$9,0 \times 10^{-2}$	$\text{TM}_0 - \text{TM}_0$
21	1,14	2,015	2,025	5,0	18	$9,4 \times 10^{-2}$	$\text{TE}_0 - \text{TE}_0$
21	1,14	2,015	2,025	0	18	0	$\text{TM}_0 - \text{TM}_0$
22	0,49	2,016	2,027	1,7	18	$3,0 \times 10^{-2}$	$\text{TE}_0 - \text{TE}_0$
22	0,49	2,016	2,027	0,24	18	$4,3 \times 10^{-3}$	$\text{TM}_0 - \text{TM}_0$
23	0,22	2,016	2,027	-	-	-	-

6.4. Pomiar charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej przetwornika akustycznej fali powierzchniowej

Charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową przetwornika AFP określono metodą sondy laserowej. Mierzono zmianę mocy akustycznej fali powierzchniowej przy zmianie częstotliwości sygnału generatora zasilającego przetwornik. Pomiar przeprowadzano dla każdej nowej struktury modulatora i na podstawie zmierzonych charakterystyki określano częstotliwość środkową przetwornika, przy której następnie przeprowadzano pomiary efektywności oddziaływania tabela 6.3 i 6.4 .

6.5. Pomiar współczynnika sprzężenia elektromechanicznego warstwy ZnO

W celu oceny jakości piezoelektrycznej warstw ZnO dla jednego z przetworników oszacowano wartość współczynnika sprzężenia elektromechanicznego k^2 . Dla przetworników akustycznej fali powierzchniowej wykonanych na tlenku cynku, jeżeli liczba par palców jest mniejsza od ośmiu [63], szerokość pasma /3 dB/ jest opisana wzorem 3.40. W badanym przetworniku usunięto 12 spośród 20 par palców, i opisaną w poprzednim rozdziale metodą zmierzono charakterystykę otrzymanego przetwornika. Korzystając ze wzoru 3.40 i z rys. 3.12 stwierdzono, że współczynnik sprzężenia elektromechanicznego otrzymanej warstwy stanowi 85% wartości maksymalnej możliwej do otrzymania dla warstwy monokrystalicznej. Błąd oszacowania określony dokładnością pomiaru mocy akustycznej wynosił $\pm 10\%$.

PODSUMOWANIE

Celem niniejszej pracy było opracowanie technologii i wykonanie planarnego modulatora akustooptycznego w światłowodzie z pięciotlenku tantalu na podłożu z utlenionego krzemu oraz przeprowadzenie analizy teoretycznej oddziaływania akustooptycznego w tej strukturze.

Opierając się na elementach technologii półprzewodnikowej opracowanych w ITE Politechniki Wrocławskiej i wykorzystując posiadane przez ITE urządzenia do rozpylania jonowego opracowano technologię planarnego modulatora akustooptycznego w światłowodzie z Ta_2O_5 na podłożu z utlenionego krzemu. Proces technologiczny składał się z następujących części;

1. Przygotowanie i utlenianie podłoży krzemowych,
2. Nanoszenie światłowodu z Ta_2O_5 metodą reaktywnego rozpylania w.c.z.,
3. Nanoszenie warstwy ZnO metodą reaktywnego rozpylania stałoprądowego.

Technologia wytwarzania warstw ZnO została samodzielnie opracowana przez autora niniejszej pracy. Otrzymane warstwy tlenku cynku miały dobre własności piezoelektryczne i optyczne, co pozwoliło wykonać również modulator akustooptyczny w światłowodzie ZnO .

4. Wykonanie przetworników międzypalczastych metodą fotolitografii.

Otrzymano planarny modulator akustooptyczny o efektywności oddziaływania Bragga przypadającej na jednostkę mocy akustycznej większej od efektywności otrzymywanej dotychczas w modulatorach

wykonanych w oparciu o światłowodowy warstwowy z innych materiałów. Dodatkowo, stosując opracowaną technologię, wykonano modulator akustooptyczny w światłowodzie ZnO na podłożu z utlenionego krzemu.

Wykonano stanowisko pomiarowe i opracowano metodę pomiaru parametrów modulatora akustooptycznego. Mierzono następujące parametry modulatora: Efektywność oddziaływania akustooptycznego, długość, prędkość i moc fali akustycznej, tłumienie fali świetlnej i akustycznej, współczynnik załamania i grubość światłowodu.

Przeanalizowano teoretycznie oddziaływanie akustooptyczne typu Bragga w światłowodzie planarnym z pięciotlenku tantalu. Obliczono zależność efektywności oddziaływania od grubości światłowodu, wyjaśniono przyczynę znacznej różnicy efektywności oddziaływania akustooptycznego dla modów TE i TM w światłowodach z pięciotlenku tantalu i obliczono wartości współczynników elastooptycznych Ta_2O_5 .

Przeanalizowano zależność efektywności oddziaływania akustooptycznego od grubości światłowodu z tlenku cynku. Pokazano, że w przypadku wykonania modulatora w warstwie ZnO o jednolitej grubości dla całego obszaru modulatora /światłowód i przetwornik akustycznej fali powierzchniowej/ i zastosowania jako podłoża krzemu o małej rezystywności, elektrody przetwornika międzypalczastego należy umieszczać na powierzchni warstwy, a nie jak w przypadku struktur na podłożu dielektrycznym pomiędzy warstwą i podłożem.

WNIOSKI

W pracy opracowano technologię i wykonano planarny modulator akustooptyczny w światłowodach z Ta_2O_5 na podłożach z utlenionego krzemu. Stwierdzono, że światłowody z Ta_2O_5 dają największą efektywność oddziaływania akustooptycznego spośród wszystkich zbadanych do tej pory światłowodów planarnych. Analiza teoretyczna i pomiary wykazały, że efektywność oddziaływania Bragga dla modów TM słabo zależy od grubości światłowodu. Właściwości te sprawiają, że pięcioletek tantalu może być stosowany do budowy urządzeń optyki zintegrowanej wykorzystujących modulatory akustooptyczne, np. procesorów optycznych typu analizatora widma.

Czynnikiem różniącym światłowodowe modulatory akustooptyczne wykonane w materiałach jednorodnych /np. $LiNbO_3$ / od modulatorów wykonanych w światłowodach warstwowych jest zależność prędkości fali powierzchniowej od materiału i grubości warstwy i materiału podłoża. Zależność ta powinna być uwzględniona przy projektowaniu urządzeń. W pracy pokazano, że duża różnica prędkości fali Rayleigha w podłożu krzemowym i w warstwach Ta_2O_5 i ZnO daje nowe możliwości konstrukcyjne, nieosiągalne w innych konstrukcjach modulatorów akustooptycznych. Możliwa jest między innymi zmiana częstotliwości środkowej przetwornika AFP poprzez zmianę grubości warstwy ZnO i zmiana długości fali akustycznej w obszarze oddziaływania poprzez zmianę grubości światłowodu z Ta_2O_5 .

Wykonanie przy pomocy opracowanej technologii modulatora w światłowodzie ZnO pozwala przypuszczać, że przy jej wykorzystaniu będzie można w przyszłości wykonać modulatory i badać oddziaływanie akustooptyczne w innych strukturach.

W części teoretycznej pracy przedstawiono sposób analizy oddziaływania akustooptycznego, który nie wymaga znajomości stałych materiałowych światłowodu.

Przeanalizowano zależność efektywności oddziaływania akustooptycznego od grubości światłowodu i obliczono wartości współczynników elastooptycznych Ta_2O_5 . Pokazano również, że duża efektywność oddziaływania akustooptycznego dla modów TM i bardzo mała dla modów TE może być wyjaśniona relacją występującą między współczynnikami elastooptycznymi p_{11} i p_{12} .

LITERATURA

1. N. Chubachi i in., Monolithically integrated Bragg deflection for an optical guided wave made of zinc oxide film, *Electron. Lett.*, vol. 9, 1973, 193-194.
2. N. Chubachi, H. Sasaki, Surface acoustooptic interaction in ZnO thin films, *Wave Electronics*, vol. 2, 1976, 379-396.
3. I. B. Jakovkin, D. V. Pietrov, Difrakcja swieta na akusticeskich povierchnostnykh volnach, Nauka, Novosibirsk 1979.
4. M. C. Hamilton, D. A. Wille, W. J. Micelli, An integrated optical RF spectrum analyzer, *Optical Engineering*, vol. 16, no. 5, 1977, 475-478.
5. F. S. Hickernell i in., The acoustooptic properties of thin-film Si_3N_4 , Ta_2O_5 , ZnO and 7059 glass on oxidized silicon substrates, 1978 Ultrasonics Symp. Proc., IEEE Cat. 78CH 1344-1SU.
6. L. Brillouin, Diffusion de la lumiere et des rayons X par un corps transparent homogene, influence de l'agitation thermique, *Ann. de Phys.*, vol. 17, 1922, 88-122.
7. P. Debye, F. W. Sears, On the scattering of light by supersonics waves, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, vol. 18, no. 6, Washinton DC, 1932.
8. R. Lucas, P. Biquard, New optical properties of liquids excited by ultrasonics waves, *Compt. Rend.* 194, 1932.
9. L. Kuhn i in., Deflection of an optical guided wave by a surface acoustic wave, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 17, 1970, 265.

10. F. R. Gfelle, C. W. Pitt, Collinear acoustooptic deflection in thin films, *Electron. Lett.*, vol. 8, 1972, 549-551.
11. Y. Ochmachi, Acoustooptic TE - TM mode conversion in a thin film amorphous tellurium dioxide optical waveguides on quartz substrate, *Electron. Lett.*, vol. 9, 1973, 539-541.
12. D. A. Willie, M. C. Hamilton, Acoustooptic deflection in Ta_2O_5 waveguides, *Appl. Phys. Lett.* vol. 24, no. 4, 1974, 3928-3933.
13. J. F. Weller i in., Experimental characterization of acoustooptical deflection in multimode optical waveguides, *J. Appl. Phys.*, vol. 46, no. 2, 1975, 974-976.
14. J. M. White i in., Thin film acoustooptic interaction in $LiNbO_3$, *Electron. Lett.* vol. 10, 1974, 510-511.
15. L. Kuhn i in., Optical guided mode conversion by an acoustic surface waves, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 19, no. 10, 1971, 428-430.
16. Y. Ochmachi, Acoustooptical light deflection in thin films, *J. Appl. Phys.*, vol. 44, no. 9, 1973, 3928-3933.
17. J. Kushibiki i in., Thickness dependence of acoustooptic diffraction efficiency in ZnO - film optical waveguides, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 26, no. 7, 1975, 362-364.
18. H. Sasaki i in., Thickness dependence of effective coupling factors of ZnO thin films surface wave transducers, *Electron. Lett.*, vol. 9, 1973, 92-93.
19. H. Sasaki i in., Efficient acoustooptic TE - TM conversion in ZnO film, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 25, no. 9, 1974, 476-477.
20. J. Kushibiki i in., Improvement of diffraction efficiency in surface-acoustooptic devices by means of multilayered struc-

- ture, Appl. Phys. Lett., vol. 29, no. 6, 1976, 333-335.
21. A. Venema, R. F. Humpreys, Inclusion of conductivity in silicon SAW component design, Electron. Lett., vol. 13, 1977, 594-596.
 22. R. V. Smidt i in., Acoustooptic diffraction of guided optical waves in LiNbO_3 , Appl. Phys. Lett., vol. 23, no. 8, 1973, 417-419.
 23. S. Valette i in., Integrated optical spectrum analyser using planar technology on oxidized silicon substrate, Electron. Lett., vol. 19, no. 2, 1983, 883-885.
 24. M. Kondo i in., Acoustooptic diffraction by an acoustic surface wave in an ion-exchanged waveguide, Electron. Letters, vol. 10, no. 24, 1974, 518-519.
 25. M. Kanazawa i in., High resolution integrated optic spectrum analyser, IOOC'83, Tokyo, 30 June 1983, 30 B3-5.
 26. J. Albert i in., Hybrid bistable optical device using an acoustooptic waveguide modulator, Canadian Journal of Physics, vol. 59, no. 9, 1981, 1251-1253.
 27. A. Opilski, Technology of waveguide formation and methods of investigating waveguides applied to planar acoustooptics, Proc. of the Second Spring School on Acoustooptics and Applications, May 1983, Gdańsk-Wieżyca, 328-354.
 28. W. Ciurapiński, M. Szustakowski, B. Świetlicki, 100% acoustooptic diffraction of light in $\text{LiNbO}_3\text{:Ti}$ - diffused waveguides, Third National Symposium Optical Fibers and Their Applications, Jabłonna 1983, vol. 1, 22-25.
 29. T. G. Giallorenzi, A. F. Milton, Light diffraction in multi-mode waveguide using acoustooptic interaction, J. Appl. Phys., vol. 45, no. 4, 1974, 1763-1774.

30. W. S. C. Chang, Acoustooptical deflection in thin films, IEEE J. Quantum Electronics, QE-7, 1971, 167-170.
31. T. J. Giallorenzi, Acoustooptical deflection in thin film waveguides, J. Appl. Phys., vol. 44, 1973, 242-253.
32. D. B. Anderson i in., An integrated - optical approach to the Fourier transform, IEEE Journal of Quantum Electron., QE-13, no. 4, 1977, 268-275.
33. M. K. Barnoski, Introduction to integrated optics, Plenum Press, New York, 1974.
34. G. S. Kino, R.S. Wagers, The theory of interdigital couplers on nonpiezoelectric substrates, J. Appl. Phys., vol. 44, 1978, 1480-1488.
35. E. Dieulesaint, D. Royer, Ondes elastiques dans les solides, Masson et C-ie, 1974.
36. T. Tamir, Integrated optics, Springer - Verlag, NY 1975.
37. K. W. Loth i in., Bragg coupling efficiency for guided acoustooptic interaction in GaAs, Appl. Opt., vol. 15, no. 1, 1976, 156-166.
38. P. K. Tien, Light waves in thin films and integrated optics, vol. 10, 1971, 2395-2413.
39. C. W. Pitt i in., RF sputtered thin films for integrated optics components, 26, 1975, 25-51.
40. L. I. Maisel, R. Glang, Handbook of thin film technology, McGraw Hill, NY 1970.
41. R. Ulrich, Thin dielectric films for integrated optics, J. Vac. Sci. Technol., vol. 11, no. 1, 1974, 156-162.
42. W. D. Westwood i in., Effect of pressure on the properties of reactively sputtered Ta_2O_5 , J. Vac. Sci. Technol., vol. 11, no. 1, 1974, 381-384.

43. S. J. Ingrey, W. D. Westwood, Birefringent waveguides prepared by reactive sputtering niobium in $O_2 - N_2$ mixtures, Appl. Opt., vol. 15, no. 3, 1976, 607-609.
44. S. J. Ingrey i in., Birefringent waveguides in thermally oxidized nitrogen-doped sputtered tantalum films, Thin Solid Films, vol. 35, 1976, 1-9.
45. D. H. Hensler i in., Optical propagation in sheet and pattern generated films of Ta_2O_5 , Appl. Opt., vol. 10, no. 5, 1971, 1037-1042.
46. S. J. Ingrey i in., Variable refractive index and birefringent waveguides by sputtering tantalum in $O_2 - N_2$ mixtures, Appl. Optics, vol. 14, no. 9, 1975, 2194-2198.
47. Westwood, Fabrication of optical waveguides by ion-beam sputtering, J. Vac. Sci. Technol., vol. 13, no. 1, 104-106.
48. J. Wei i in., Accurate phase matching in sputtered birefringent $Ta_2O_5N_x$ waveguides, Appl. Phys. Lett., vol. 28, no. 6, 1976, 317-318.
49. W. D. Westwood, S. J. Ingrey, Effects of substrate position and angle of incidence on the refractive index of sputtered, birefringent $Ta_2O_5N_x$ films, J. Vac. Sci. Technol., vol. 14, no. 1, 1977, 196-199.
50. W. M. Paulson i in., Effects of deposition parameters on optical loss for optical sputtered Ta_2O_5 and Si_3N_4 waveguides, J. Vac. Sci. Technol., vol. 16, no. 2, 1979, 307-310.
51. J. Kądziela, J. Radojewski, S. Patela, B. Licznarski, M. Łukaszewicz, Opracowanie analizatora widma sygnałów elektromagnetycznych w technice optoelektroniki zintegrowanej, Raport ITE, seria SPR nr 30, Wrocław 1983.
52. A. N. Chernets, Preparation and properties of thin films of

- ZnO hypersonics transducers, Thin Solid Films, vol. 18, 1973, 247-255.
53. G. Weise, Preparation, characterization and properties of pure and lithium doped zinc - oxide films, Thin Solid Films, vol. 32, 1976, 87-91.
54. R. F. Bett, G. S. Florio, Preparation of ZnO thin film transducers by transport, J. Appl. Phys., vol. 39, no. 11, 1968, 5215-5223.
55. J. M. Hammer i in., Low-loss-epitaxial ZnO optical waveguides, Appl. Phys. Lett., vol. 21, 1972, 358-360.
56. T. Shiosaki i in., As-grown CVD ZnO optical waveguides on sapphire, Appl. Phys. Lett., vol. 33, no. 5, 406-407.
57. F. S. Hickernell, ZnO processing for bulk and surface wave devices, 1989 Ultrasonics Symp. Proc., Boston MA, USA, 1980, vol. 2, 785-794.
58. F. S. Hickernell, Low loss zinc oxide optical on amorphous substrates, Integrated and Guided - Wave Optics Digest, Incline Village, NY, USA, 1980, WB6/1-4.
59. S. Dutta i in., Use of laser annealing to achive low loss in Corning 7059 glass, ZnO, Si_3N_4 , Nb_2O_5 , and Ta_2O_5 optical thin film waveguides, Opt. Eng., vol. 22, 1982, 117-120.
60. W. Stutius, W. Streifer, Silicon nitride films on silicon for optical waveguides, Appl. Opt., vol. 16, 1977, 3218-3222.
61. R. C. Alferness, Guided - wave devices for optical communication, IEEE Journal of Quantum Electron., QE-17, no. 6, 1981, 946-959.
62. K. Więckowski, Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1977.

63. A. I. Morozow, Piezopoluprowodnikowyje prieobrazowatieli i ich primienienije, Energia, Moskwa 1973.
64. A. Krzesiński, Technologia cienkich warstw tlenku cynku dla akustyki mikrofalowej, akustooptyki i optyki zintegrowanej, Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1980.
65. M. D. Ambersley, C. W. Pitt, Piezoelectric ZnO transducers produced by R. F. magnetron sputtering, Thin Solid Films, vol. 80, 1981, 183-195.
66. T. Hada i in., Structure and electrical properties of ZnO films prepared by low pressure sputtering system, Thin Solid Films, vol. 18, 1973, 247-255.
67. A. A. Oliner, Acoustic surface waves, Springer - Verlag, New York 1978.
68. J. F. Weller, T. G. Giallorenzi, Optical detection of acoustic surface waves in layered substrates: theory and experiment, IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics, SU-21, no. 3, 1974, 196-203.
69. B. A. Auld, Acoustic Fields and waves in solids, Willey-Interscience, New York, London 1973, Appendix 4.