

Aleksander OPILSKI
Tadeusz PUSTELNY
Marian URBAŃCZYK

METODY POMIARU TŁUMIENIA I PRĘDKOŚCI POWIERZCHNIOWYCH FAL RAYLEIGHA

Streszczenie. W pracy przedstawiono metody pomiaru prędkości i tłumienia akustycznych fal powierzchniowych Rayleigha. Zwrócono również uwagę na dokładność pomiaru oraz możliwości zastosowania przedstawionych metod pomiarowych w akustycznych badaniach ciała stałego.

1. WSTĘP

Jak wykazano w pracy [1] i [2] z pomiarów prędkości propagacji powierzchniowych fal Rayleigha oraz z pomiarów tłumienia tych fal można uzyskać wiele istotnych informacji o stanach powierzchniowych w ciele stałym. Przed metodami akustycznymi otwiera się szeroka perspektywa wykorzystania ich w badaniach właściwości fizycznych powierzchni ciała stałego, a przede wszystkim stanów powierzchniowych w półprzewodnikach.

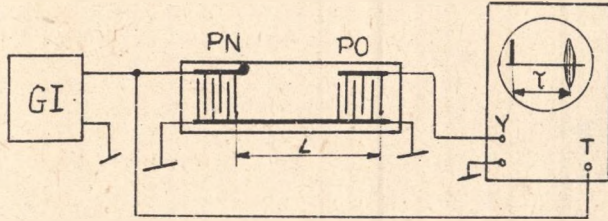
Do wzbudzenia i odbioru fal powierzchniowych stosuje się najczęściej przetworniki międzypalczaste [3], [4]. Ogromne zalety tych przetworników spowodowały, że są one obecnie niemalże jedynym praktycznie stosowanym sposobem wzbudzenia, a następnie odbioru fal powierzchniowych.

We wszystkich metodach pomiarowych należy zwrócić uwagę na szereg czynników mogących zakłócać pomiar. Przetworniki generujące fale powierzchniowe Rayleigha mogą być także źródłem fal powierzchniowych o innych modach. Zawsze jest generowana również fala objętościowa. Są to wszystko czynniki zakłócające pomiar i mogące wprowadzać znaczne błędy. Ponieważ przetwornik nadawczy promieniuje falę w obydwie strony, do odbiornika może dojść fala, która obiegła próbkę w przeciwną stronę niż fala badana. W każdym więc przypadku należy upewnić się, z jakim sygnałem mamy do czynienia oraz zastosować tłumiki fal niepożądanych.

2. PRZEGLĄD METOD POMIARU PRĘDKOŚCI I TŁUMIENIA POWIERZCHNIOWYCH FAL RAYLEIGHA

2.1. Metoda pomiaru czasu przejścia impulsu

Metoda oparta jest na pomiarze odległości między przetwornikami oraz czasu przejścia impulsu od przetwornika nadawczego do odbiorczego. Z ge-



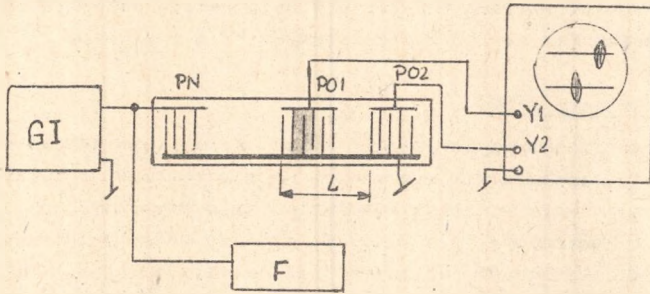
Rys. 1. Metoda pomiaru prędkości fali poprzez pomiar czasu przejścia impulsów

neratora impulsów GI napięcie podawane jest i na oscyloskop i na przetwornik nadawczy PN. Przetwornik ten generuje falę powierzchniową odbieraną przez przetwornik odbiorczy PO. Dalej sygnał z PO wchodzi na to samo wejście oscyloskopu. Prędkość fali uzyskujemy ze stosunku odległości L między przetwornikami i czasu odczytanego z oscyloskopu. Jako generator impulsowy można wykorzystać generator produkcji krajowej typu PGP-4 lub GFP-75. Umożliwia on uzyskanie impulsów o dużej stałości częstotliwości, o czasie trwania krótszym od $25 \mu\text{sek}$ i o czasie narastania i opadania zbocza $>10 \mu\text{sek}$. Z dużym powodzeniem można również wykorzystać generator impulsowy G5-15, prod. ZSRR, który przy tych samych, a nawet większych zaletach częstotliwościowych posiada dużą (do 70 V) amplitudę. Przy podłożach silnie tłumiących jest to ważne. Wadą, uniemożliwiającą jego powszechne zastosowanie, jest zbyt mała częstotliwość repetycji (do 100 kHz). Do pomiaru odległości można wykorzystać mikroskop warsztatowy MWDC produkcji Polskich Zakładów Optycznych. Pozwala on zmierzyć odległość z niedokładnością $1 \mu\text{m}$. Przy odległościach między przetwornikami rzędu 1 cm , błąd pomiaru odległości jest zupełnie nieistotny. O dokładności pomiaru decyduje jedynie pomiar czasu. Stosując oscyloskop OS150 uzyskamy wyniki z niedokładnością 2-3%. Zdecydowanie sprawę dokładności poprawia zastosowanie oscyloskopu C7-7, z cyfrowym, bardzo dokładnym, $>0,5\%$, pomiarem czasu, między dowolnie wybranymi punktami przebiegu.

2.2. Metoda trzech identycznych przetworników

Metoda ta oparta jest na takim zsynchronizowaniu częstotliwości powtarzania impulsów z generatora pobudzającego, by sygnały akustyczne zostały odebrane z przetworników odbiorczych w tej samej chwili (rys. 2).

Regulując częstotliwość repetycji impulsów f generatora należy doprowadzić przebiegi na obu kanałach do wzajemnego pokrycia. Wtedy PO1 odbiera kolejny impuls a PO2 dopiero impuls poprzedni, opóźniony o czas $T = \frac{1}{f}$. Odległość L między PO1 i PO2 odczytujemy z mikroskopu a czas T z czasomierza. Prędkość fali $v = \frac{L}{T}$. Czas przejścia fali powierzchniowej między przetwornikami PO1 i PO2, przy odległościach między nimi rzędu kilku μm , dla typowych podłoży, wynosi $\sim 2 \mu\text{sek}$ (odpowiada to częstotliwości 500 kHz). Tyle też musi wynosić częstotliwość impulsów z generatora GI. Wspom-

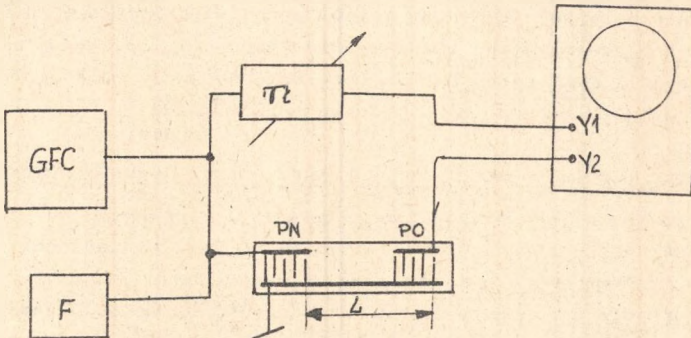


Rys. 2. Metoda trzech przetworników pomiaru prędkości fal

niwane już generatory PGP-4 i PFP-75 pracują do 10 MHz i mogą być tu wykorzystane. W tym wypadku, o dokładności będzie decydował pomiar czasu między dwoma impulsami. Zastosowanie krajowych czasomierzy PFL-20 lub PFL-21 pozwala uzyskać wyniki z dokładnością kilku procent. Czasomierz radziecki Φ UL-4 podnosi dokładność metody do 1%. Wadą metody jest konieczność nanoszenia na podłoże trzech przetworników międzypalczastych (co może być technologicznie kłopotliwe). Układ ma również swoje zalety. Umożliwia dodatkowo pomiar tłumienia fali w procesie propagacji.

2.3. Metoda fazowo-interferencyjna

Idea metody polega na porównaniu sygnału elektrycznego pochodzącego od fali powierzchniowej z bezpośrednim sygnałem od generatora pobudzającego (rys. 3) [3, 4, 5]. Oba sygnały wchodzi na I i II kanał oscyloskopu OS.



Rys. 3. Metoda fazowo-interferencyjna pomiaru prędkości fali

Zmieniając częstotliwość dokonuje się nałożenia przebiegów. Przebiegi mają wtedy zgodną fazę. Zmieniając dalej częstotliwość znajduje się kolejne nałożenia. Prędkość fali: $V = L(f_2 - f_1)$. Można tu zastosować te same przyrządy co poprzednio, np. generator sygnały PG-18, tłumik AHF, mikro-

skop MWDC, częstotłomierz PFL-20. O klasie metody decyduje dokładność wykrycia zgodności faz napięć z przetwornika PO i z tłumika.

2.4. Metoda zerowej fazy

Idea metody polega na określeniu zmian całkowitych długości fali powierzchniowej, mieszczących się między przetwornikiem nadawczym a odbiorczym, wywołanych zmianą częstotliwości sygnału pobudzającego.

Napięcie z generatora fali ciągłej, poprzez układ przetwornika nadawczego PN i odbiorczego PO, oglądane jest na oscyloskopie. Na ekranie wybieramy dowolny punkt, w którym faza przebiegu jest równa zero. Zmieniając częstotliwość o Δf liczymy ilość n przejść przebiegu przez ten punkt (o tyle wzrosła ilość długości fal mieszczących się pomiędzy PO i PN). Prędkość fali $V = \frac{L \cdot \Delta f}{n}$, L - odległość między przetwornikami. Przy zastosowaniu tych samych przyrządów co poprzednio niedokładność nie jest większa niż 1%. Metoda ta, ze względu na prostotę i dużą dokładność, zasługuje na szczególną uwagę.

2.5. Metoda rezonansowa

W metodzie rezonansowej wykorzystuje się fakt, że rezonans elektryczny przetwornika międzypalczonego występuje przy tej samej częstotliwości co rezonans mechaniczny [6]. Mierząc mikroskopem szerokość elektrody P_1 i szerokość przerwy międzyelektrodowej P_2 oraz znając frez otrzymuje się prędkość fali V ze związku:

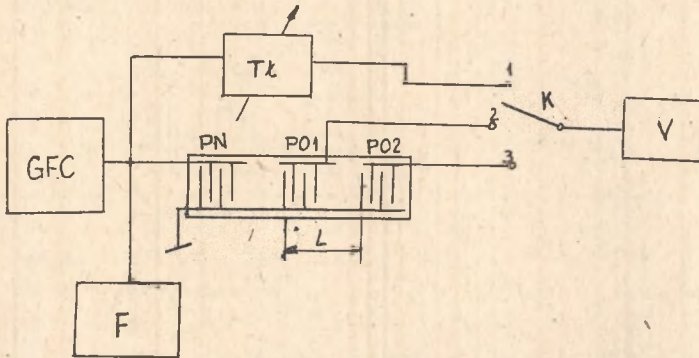
$$V = \text{frez} \cdot 2(P_1 + P_2).$$

Jest to niestety mało dokładny sposób określenia prędkości fali powierzchniowej i nie powinien być bezpośrednio stosowany do pomiaru, lecz raczej do oszacowania prędkości. Jako metoda orientacyjna może być stosowana, tym bardziej, że wymaga tylko jednego przetwornika.

2.6. Pomiar tłumienia metodą trzech identycznych przetworników

Metoda oparta jest na różnicowym pomiarze tłumienia. Napięcie sinusoidalne jest zamieniane w przetworniku PN na falę powierzchniową, odbieraną przez przetwornik PO1 i mierzone woltomierzem V (klucz w położeniu 2). Sygnał z generatora następnie tłumii się o ΔP_1 do poziomu napięcia na przetworniku odbiorczym PO1 (klucz w położeniu 1). Pomiar powtarza się dla drugiego przetwornika odbiorczego PO2, dla którego tłumienie wynosi ΔP_2 . Tłumienie między PO1 i PO2 na jednostkę długości:

$$\Delta p = \frac{\Delta P_2 - \Delta P_1}{L} \quad \left[\frac{\text{dB}}{\text{cm}} \right]$$



Rys. 4. Metoda trzech przetworników pomiaru tłumienia

Przy włączonym PO2 należy PO1 zewrzeć, w celu wyeliminowania wtórnego wzbudzenia fali przez ten przetwornik. Metoda różnicowa pomiaru eliminuje straty przetwarzania i straty elektrycznego niedopasowania.

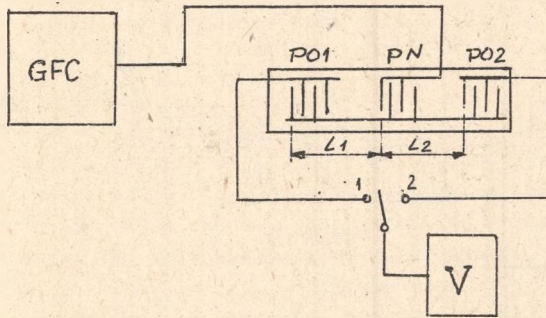
Jako generator fali ciągłej GFC można wykorzystać generator sygnałowy PG-18. Charakteryzuje się on dużą stałością częstotliwości lecz niestety maksymalne napięcie nie przekracza 2 V. Jeżeli napięcie z PO1 i PO2 są zbyt małe należy bezpośrednio przed miernikiem włączyć wzmacniacz. Zastosowanie wzmacniacza jest wskazane również z innego względu. Pozwala zastosować woltomierz lampowy lub woltomierz homodynowy (np. typu VH-150), które to przyrządy nawet klasy O5 są dostępne w kraju. Zastosowanie w układzie pomiarowym wzmacniacza nie wprowadza żadnych błędów, ponieważ pomiary dokonuje się przy stałej częstotliwości. Można zastosować wzmacniacz szerokopasmowy WS-1, produkcji Wrocławskiej "Radiotechniki", czy radziecki YC-44.

Częstościomierz F służy tylko do kontroli stałości częstotliwości (kilkuprocentowe zmiany są nieistotne). O dokładności decyduje przede wszystkim tłumik. Krajowe tłumiki typu AHF lub AAH-250 posiadają niedokładności ~1%. Ta metoda pomiarowa pozwala uzyskiwać wyniki z kilkuprocentową dokładnością. Wykorzystując wyniki pomiaru prędkości z poprzedniej metody otrzymuje się współczynnik tłumienia, odniesiony od razu na długość fali.

2.7. Metoda przetworników naprzeciwległych pomiaru tłumienia

Inną odmianą metody omówionej poprzednio jest pomiar tłumienia w układzie przetworników naprzeciwległych (rys. 5) [7]. Przetworniki odbiorcze PO1 i PO2 umieszczone są z obu stron przetwornika nadawczego PN w odległości L_1 i L_2 od niego. Współczynnik tłumienia na jednostkę długości:

$$\alpha = - \frac{1}{L_2 - L_1} 20 \log \frac{U_2}{U_1}.$$

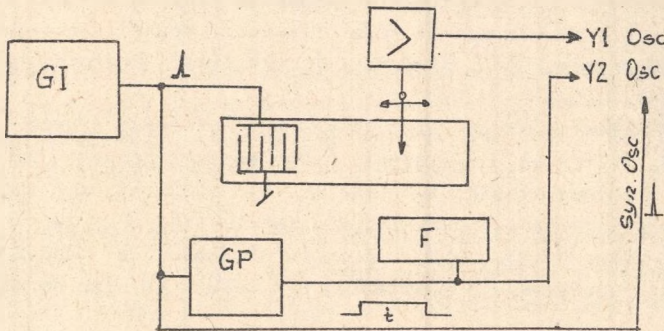


Rys. 5. Metoda przetworników naprzeciwległych pomiaru tłumienia

2.8. Metoda badania rozkładu pola akustycznego

Z propagacją się po powierzchni piezoelektryka sprężystą falą powierzchniową związane jest w wyniku zjawiska piezoelektrycznego, zmienne w czasie i przestrzeni pole elektryczne. Rozkład pola elektrycznego jest identyczny z rozkładem pola akustycznego na powierzchni falowodu. Fakt ten znalazł zastosowanie w badaniach pól akustycznych metodami elektrycznymi.

Metoda określenia prędkości i tłumienia fali powierzchniowej polega na pomiarze potencjału elektrycznego, związanego z propagującą się falą sprężystą przy pomocy sondy elektrostatycznej (rys. 6).



Rys. 6. Metoda badania rozkładu pola akustycznego

Napięcie sinusoidalne o częstotliwości f z generatora GFC podane jest na przetwornik międzypalczasty, wytwarzający falę powierzchniową. Przesuwając stolik mikroskopu z przetwornikiem znajduje się sonda wolframową miejsce, gdzie wychylenie miernika jest największe. Przesuwając dalej stolik otrzymuje się kolejne maksymalne wychylenie. Odległość między dwoma kolejnymi maksimami jest równa długości fali powierzchniowej. Dokładność

określenia długości fali poprawia się poprzez pomiar odległości między kilkudziesięcioma maksimami, biorąc wartość średnią λ_{sr} .
Prędkość fali

$$V = f \cdot \lambda_{sr}.$$

Metoda pozwala na bardzo dokładny pomiar prędkości fali powierzchniowej $>0,5\%$. Dodatkową zaletą jest możliwość określenia intensywności zaburzeń powierzchni wywołanych falą w dowolnym kierunku.

Inna wersja wykorzystania sondy polega na zastosowaniu generatora impulsowego. Sondę ustawia się na drodze propagującego się impulsu. Zmieniając położenie sondy mierzy się, np. na oscyloskopie, opóźnienie czasowe Δt , wywołane tym przesunięciem. Prędkość fali daje stosunek przesunięcia sondy L i opóźnienia Δt .

Podane tutaj metody pomiaru prędkości i tłumienia są wygodne i proste. Układy pomiarowe zostały przedstawione w wersji najprostszej i (w wielu przypadkach) można je zautomatyzować. Dokładność często jest większa od 1% , co dla tych częstotliwości jest dokładnością bardzo dobrą. Proponowane metody zostały zestawione pod kątem zastosowania przede wszystkim aparatury krajowej lub łatwo dostępnej. Należałoby jeszcze zaznaczyć, że przy częstotliwościach wysokich, powyżej kilkuset MHz, do badań fal Rayleigha stosuje się układy z laserami [8, 9, 10], do pomiaru prędkości i tłumienia wykorzystuje się zjawiska dyfrakcji i interferencji światła na na falach powierzchniowych.

LITERATURA

- [1] Opilski A.: Wpływ stanów powierzchniowych na propagację powierzchniowej fali ultra i hiperdźwiękowej. ZN Pol. Śl. Nr 463, Mat.Fizyka. z. 27, 1975.
- [2] Opilski A: Archiwum Akustyki (wersja angielska), 1, 1976.
- [3] Akustyczny Żurnal, 1975, t. 21, nr 1, 68.
- [4] Proc. of IEEE, 1970, t. 58, nr 9.
- [5] Appl. Phys. Lett. 1969, t. 15, nr 12.
- [6] Smith R.: Analysis of interdigital surface wave transducers "IEEE Trans. Mierow. Th", 1969, V. MTT-17, No 10.
- [7] J. Appl. Phys., 1970, t. 41, nr 11, 4380.
- [8] J. Appl. Phys. 1973, t. 44, nr 3, 1061.
- [9] Appl. Phys. Lett. 1970, t. 17, nr 7.
- [10] Acustica, 1972, t. 2, 18.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕМПФИРОВАНИЯ И ПОВЕРХНОСТНЫХ СКОРОСТЕЙ
ВОЛН RAYLEIGHA

Р е з ю м е

В работе рассмотрены методы измерения скоростей и демпфирования акустических поверхностных волн Rayleigha. Обращено внимание на точность измерения и возможности применения данных измерительных методов в акустических исследованиях твёрдого тела.

MEASUREMENT METHODS OF ATTENUATION AND VELOCITY
OF RAYLEIGH SUPERFICIAL WAVES

S u m m a r y

In the work there have been presented methods of measuring velocity and attenuation of Rayleigh acoustic superficial waves. Attention has been paid to measurement precision and possibility to apply the presented measurement methods in acoustic examination of solids.