

Janusz BERDOWSKI

Michał STROZIK

HETERODYNCWE I DYFRAKCYJNE METODY DETEKЦИИ
I WIZUALIZACJI AKUSTYCZNYCH FAL POWIERZCHNIOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono cztery układy badawcze służące do analizy i wizualizacji akustycznych fal powierzchniowych (AFP). Metoda defleksji punktowej światła została użyta w trzech różnych układach; przy wyższych częstotliwościach użyto metody dyfrakcji światła. Każda z tych metod pozwala wyznaczyć inne parametry AFP i badać różne zjawiska towarzyszące jej propagacji. Układy umożliwiają prowadzenie badań w bardzo szerokim zakresie częstotliwości AFP.

1. WSTĘP

W ostatnich latach nastąpił bardzo szybki wzrost zainteresowania akustycznymi falami powierzchniowymi (AFP) ze względu na ich szerokie zastosowanie w: elektronice, holografii akustooptycznej, modulatorach i deflektorach akustooptycznych, optyce zintegrowanej. Zrodziło to potrzebę opracowania bardzo czułych metod detekcji, analizy i wizualizacji tych fal.

Nastąpił szybki rozwój metod badawczych AFP wykorzystujących akustooptyczne oddziaływania. Metody te można ogólnie podzielić na cztery grupy:

- a) bezpośrednie sondowanie AFP przez rozpraszanie światła laserowego na powierzchni propagacji [1],
- b) metody wykorzystujące interferometr Fabry-Perota [2],
- c) techniki heterodynowe [3],
- d) rozpraszanie płaskiego strumienia światła propagującego w falowodzie na AFP [4].

Zbudowane w Instytucie Fizyki Politechniki Śląskiej układy badawcze reprezentują jedną z najbardziej wyszukanych technik heterodynowych oraz metodę dyfrakcyjną. Pczwalają one nie tylko na znalezienie z dużą dokładnością podstawowych parametrów opisujących AFP lecz również na otrzymanie obrazu fali na ekranie monitora telewizyjnego, więc dostarczają także informacji o fazie fali powierzchniowej.

Układy umożliwiają prowadzenie badań w bardzo szerokim zakresie częstotliwości AFP. Zostaną one przedstawiłone kolejno poniżej.

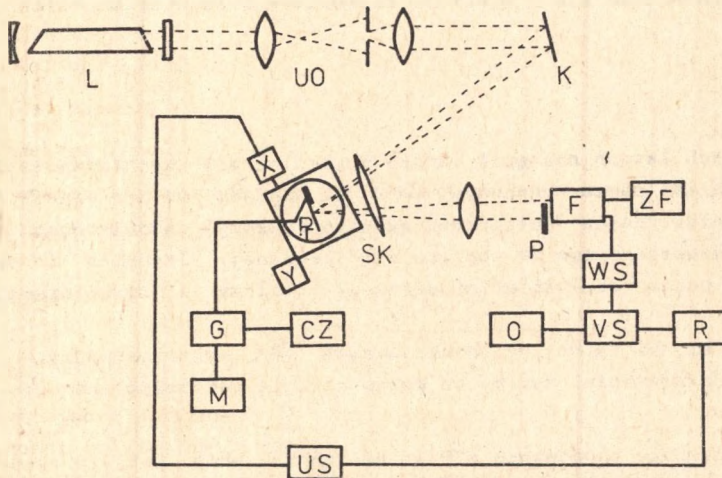
2. HETERODYNOWE METODY DEFLEKCJI PUNKTOWEJ ŚWIATŁA

W metodach tych wykorzystano odbicie wiązki światła o wymiarach poprzecznych mniejszych od długości fali powierzchniowej ($d \leq \lambda$). Periodyczne odbicie wiązki laserowej na biegnącej AFP typu Rayleigha wiąże się ze zmianą nachylenia powierzchni i jest rejestrowana przez fotopowielacz, przed którym znajduje się diaphragma nożowa.

Metoda deflekcji punktowej światła może zostać użyta w badaniach w trzech różnych wersjach, z których każda pozwala wyznaczyć inne parametry AFP i badać różne zjawiska towarzyszące jej propagacji.

A) Metoda ze statyczną wiązką świetlną

Schemat układu tej metody eksperymentalnej przedstawiono na rys. 1. W metodzie tej wykorzystano deflekcję punktową światła nieruchomej wiązki laserowej.



Rys. 1. Schemat układu do detekcji akustycznej fali powierzchniowej:

- - laser He-Ne, UO - układ optyczny, K - kierowacz wiązki, Pr - próbka z falą powierzchniową, X, Y - mechanizmy przesuwu, SK - soczewki korekcyjne, G - generator w.c.z., Cz - częstotściomierz, M - generator m.c.z. modulujący, F - fotopowielacz, ZF - zasilacz fotopowielacza, WS - wzmacniacz selektywny w.c.z., VS - woltomierz selektywny, O - oscyloskop, R - rejestrator, P - diaphragma nożowa

Wiązka światła emitowana przez laser He-Ne o długości fali $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$ i mocy $P_0 = 6 \text{ mW}$ po przejściu przez układ optyczny UO posiadała przekrój poprzeczny w kształcie kwadratu i minimalny wymiar w ognisku $d = 0,03 \text{ mm}$. Odbijana była od powierzchni kryształu, po którym propagowała się AFP. Po przejściu przez soczewkę korekcyjną padała na fotopowielacz F.

Gdy na odbiorniku fotoelektrycznym wytworzono asymetrię oświetlenia, przepuszczając przez diafragmę nożową P tylko górną krawędź odbitej wiązki, wówczas moc sygnału na fotodetektorze będzie wynosić [3, 5]:

$$P_s = 4\pi \left(\frac{d}{\lambda}\right) \left(\frac{\delta}{\lambda}\right) R^2 E_1^2 \sin \Omega t \quad \text{gdy } d \leq \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

$$P_s = 4\pi \left[1 - \frac{d}{\lambda}\right] \left(\frac{\delta}{\lambda}\right) R^2 E_1^2 \sin \Omega t \quad \text{gdy } \frac{\lambda}{2} < d \leq \lambda \quad (2)$$

gdzie:

λ, Ω, δ - długość, częstotliwość i amplituda AFP,

E_1^2 - natężenie światła padającego,

R - współczynnik odbicia powierzchni.

Z zależności tych widąc, że sygnał fotodetektora zmienia się z częstotliwością AFP, a jego amplituda jest proporcjonalna do amplitudy AFP.

Wykorzystując opisany układ badawczy można wyznaczyć następujące parametry charakteryzujące AFP: prędkość propagacji z dokładnością 0,1%, amplitudę z dokładnością 2%, względną zmianę amplitudy w danym punkcie z dokładnością 0,1%, tłumienie z dokładnością około 5%, kąt dyfrakcji, kąt zbroczenia fali akustycznej.

Układem tym można także analizować rozkład pola akustycznego w przekrojach poprzecznych i podłużnych - przesuwając próbkę; badać pracę przetwornika; generację składowych harmonicznich; badać efekty nieliniowe itd.

B) Metoda jednowymiarowego skanowania

Druga wersja układu pozwala otrzymać jednowymiarowy rozkład pola akustycznego na ekranie oscyloskopu. Schemat tego układu przedstawiono na rys. 2.

Zmodulowana wiązka światła laserowego o geometrii jak w układzie poprzednim była skanowana w jednym kierunku po powierzchni kryształu, po której propagowała się AFP. Jako skanera użyto bimorfu piezoelektrycznego. Skanowanie odbywało się równolegle lub prostopadle do kierunku propagacji AFP. Światło odbite od powierzchni było zmodulowane z częstotliwością AFP - zmienioną o przesunięcie dopplerowskie, gdy kierunek skanowania był równoległy do kierunku propagacji. Światło to padało na fotopowielacz z diafragmą nożową. Sygnał fotopowielacza był wzmacniany selektywnie i demodulowany. Następnie wzmacniano selektywnie sygnał o częstotliwości modulacji f_m i podawano go na odchyłanie pionowe lampy oscyloskopowej. Wielkość tego sygnału była proporcjonalna do amplitudy AFP w danym miejscu. Wychylenie poziome wiązki elektronów lampy oscyloskopowej było synchronicznie skanowane z wiązką optyczną.

Rozwiązanie takie pozwalało otrzymać na ekranie oscyloskopu stacjonarny obraz rozkładu amplitudy pola akustycznego w danym kierunku. Układ ten pozwalał wyznaczyć wszystkie podstawowe parametry opisujące AFP, otrzymać

Wiązka światła laserowego o geometrii takiej jak w układzie pierwszym była tym razem skanowana w obu kierunkach po powierzchni kryształu, po której propagowała się AFP. Skanerem był tym razem układ bimorfów piezoelektrycznych; maksymalny obszar skanowania wynosił 12×8 mm. Światło odbite od powierzchni było zmodulowane z częstotliwością AFP, zmieniając o przesunięcie doplerowskie wywołane ruchem wiązki świetlnej. Padało ono na fotopowielacz z diaphragmą nożową. Sygnał fotodetektora po wzmocnieniu selektywnym był mieszany z sygnałem RF generatora AFP.

Sygnał z mieszacza po selektywnej detekcji i wzmocnieniu modulował strumień elektronów lampy kineskopowej. Wychylenie wiązki laserowej i elektronowej było zsynchronizowane ze sobą, dzięki czemu na ekranie monitora powstawał stacjonarny obraz AFP.

Układ ten pozwala określić fazę AFP w danym punkcie powierzchni jak również obserwować jej zmiany w dowolnym obszarze; pozwala na bardzo dokładny pomiar prędkości propagacji AFP oraz jej zmiany wywołane np. metalizowaniem powierzchni kryształu. Może on zostać użyty do badania szeregu zjawisk, np.: steeringu, dyfrakcji, rozpraszania fali na defektach, odbicia na końcach próbki; pozwala badać: elementy ogniskujące i prowadzące AFP, generację fali przez poszczególne fragmenty przetwornika, rezonatory akustyczne, układy akustooptyki zintegrowanej.

Heterodynowe metody deflekcji punktowej światła są jednymi z najczulszych technik detekcji periodycznego odkształcenia powierzchni. Jak wynika z wyliczeń [3], maksymalna czułość detekcji występuje przy warunku $d = \frac{1}{2} \lambda$; wówczas minimum detekowanego przemieszczenia wynosi:

$$\delta_{\min.} = \left(\frac{2e B}{\alpha P_0} \right)^{1/2} \frac{\lambda}{2\pi}. \quad (3)$$

gdzie:

- B - szerokość pasma układu,
- α - czułość fotodetektora,
- P_0 - moc wiązki laserowej.

Dla metody wizualizacji przedstawionej w 2/C $\delta_{\min.} = 0,02 \text{ \AA}$.

Na podkreślenie zasługuje również duża rozdzielczość przestrzenna pomiarów prowadzonych tymi metodami, znacznie większa niż dla innych metod. Pozwala to zmierzyć parametry AFP w ściśle określonym punkcie powierzchni.

Układy te mogą być stosowane do analizy pól AFP aż do częstotliwości około 100 MHz.

3. METODA DYFRAKCJI ŚWIATŁA NA AKUSTYCZNYCH FALACH POWIERZCHNIOWYCH

Dyfrakcja światła na falach powierzchniowych występuje przy odbiciu lub przy przejściu przez powierzchnię propagacji. Ponieważ prędkość światła jest o wiele rzędów większa od prędkości AFP, padające światło napotyka zasadniczo stałą deformację powierzchni i objętości. Światło odbite czy przechodzące jest wówczas fazowo zmodulowane. Światło przechodzące napotyka ponadto fluktuacje współczynnika załamania, wywołane efektem elastooptycznym a w materiałach piezoelektrycznych także efektem elektrooptycznym. Z tego względu prostszym przypadkiem jest dyfrakcja światła występująca przy odbiciu od powierzchni propagacji AFP i taka będzie dalej rozważana.

Kąt ugięcia prążka m -tego rzędu wynosi [5]:

$$\sin\theta_m = \sin\theta_1 + \frac{mK}{k_1} \quad (4)$$

gdzie:

θ_m - kąt ugięcia.

θ_1 - kąt padania.

\vec{K} - wektor falowy AFP.

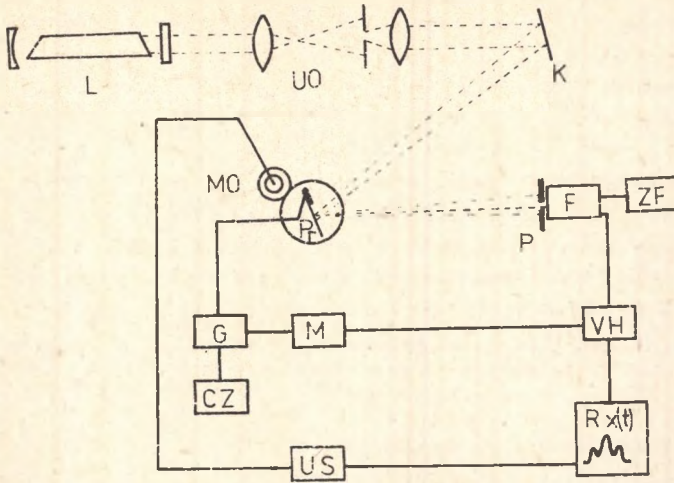
\vec{k}_1 - wektor falowy padającej fali elektromagnetycznej;

jego natężenie jest określone przez:

$$J_{\pm m} = J_{1R} \frac{(k_1 \cos\theta_1 \delta)^{2m}}{(m!)^2} \quad (5)$$

Korzystając z zależności (4) można wyznaczyć prędkość propagacji AFP, z zależności (5) jej amplitudę.

Schemat układu pomiarowego wykorzystującego dyfrakcję światła na AFP przedstawiono na rys. 4. Wiązka światła laserowego taka jak w układach heterodynowych lub o geometrii kołowej padała na powierzchnię kryształu, po której propagowała się AFP. Część światła ugięta pod kątem $\theta_{\pm 1}$ przepuszczała diaphragma kołowa P, która spełniała rolę przestrzennego filtra. Ze względu na bardzo małe natężenie ugiętych wiązek musiano zastosować detekcję homodynową. W tym celu częstość generatora AFP była modulowana impulsami prostokątnymi o częstości 1 kHz. Sygnały z fotopowielacza F po detekcji homodynowej i wzmacnieniu podawane były na pisak R. W celu dokładnego określenia kątów dyfrakcji próbka z międzypalczystymi przetwornikami umieszczona była na stoliku goniometrycznym. Mechaniczny obrót stolika umożliwił rejestrację obu ugiętych wiązek pierwszego rzędu. Pozwalało to zwiększyć dokładność pomiarów.



Rys. 4. Schemat układu do badania akustycznej fali powierzchniowej metodą dyfrakcji światła

MO - mechanizm obrotu, VH - nanowoltomierz homodynowy, $R_x(t)$ - rejestrator $x(t)$, P - diafragma kołowa

Za pomocą przedstawionej metody można wyznaczyć następujące parametry charakteryzujące AFP: prędkość propagacji z dokładnością 1%, amplitudę z dokładnością 2%, tłumienie z dokładnością 5%, kąt dyfrakcji, kąt zbroczenia. Można także analizować rozkład pola akustycznego oraz badać zjawiska wymienione w części 2 A.

Metodę dyfrakcyjną można użyć do badania AFP w zakresie częstości od około 30 MHz do 2G Hz. Tak więc pomimo nieco mniejszej dokładności niż dla metod heterodynowych pozwala ona prowadzić badania AFP o dużych częstotliwościach.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione metody wykorzystujące oddziaływania akustooptyczne okazały się bardzo użytecznymi technikami badawczymi AFP. Zapewniają one wszechstronność i różnorodność przeprowadzonych badań oraz dużą dokładność pomiarów.

Zestaw czterech przedstawionych układów pozwala prowadzić badania w całym zakresie częstotliwości generowanych obecnie AFP. Wyniki badań otrzymane podczas sondowania pola AFP, propagujących w kierunku (001) na powierzchni (110) płytek krystalicznych $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, przedstawiono w [6].

Opisane układy badawcze pozwalają uwzględnić w pomiarach takie efekty, jak np. dyfrakcję czy zbroczenie wiązki akustycznej, które były zaniebdywane w innych metodach pomiarowych obciążonych dużym błędem systematycznym.

nym. Metody tego typu powinny odegrać w perspektywie dużą rolę w badaniach akustycznych fal powierzchniowych oraz w optyce zintegrowanej.

LITERATURA

- [1] Slobodnik A.J.: Jour. Acoust. Soc. Amer., 48, 203, (1970).
- [2] Vella et al P.J.: Jour. Appl. Phys., 44, 1, (1973).
- [3] Whitman R.L., Korpel A.: Appl. Optics, 8, 1567, (1969)
- [4] Schmidt R.V.: IEEE Trans. Sonics. and Ultrasonics, SU-23, 22, (1976).
- [5] Stegeman G.J.: IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics, SU-23, 33, (1976).
- [6] Berdowski J., Strozik M.: Ultrasonics (w druku).

ГЕТЕРОДИННЫЕ И ДИФРАКЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ДЕТЕКЦИИ И НАБЛЮДЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

Р е з ю м е

В работе описаны устройства предназначены для исследования звукового поля упругих поверхностных волн (УПВ). В трёх системах применяется метод дефлексии света, четвёртая система для исследования УПВ в диапазоне больших частот использует дифракцию света. Описанные устройства позволяют производить исследования УПВ в широком диапазоне частот.

HETERODYNE AND DIFFRACTION METHODS OF DETECTION AND VISUALIZATION OF ACOUSTICAL SURFACE WAVES

S u m m a r y

Four experimental setups used for analysis and visualization of surface acoustical waves (SAW) are described. The method of point deflection was used in three of presented systems, designed for lower frequencies while at higher frequencies the method of diffraction of incident light beam was applied. Each of these methods enables to determine other parameters of SAW and to investigate different effects associated with the propagation of SAW. The described setups allow for investigations in a wide range of SAW frequency.