

Zygmunt KLESZCZEWSKI

METODY AKUSTYCZNE I AKUSTOOPTYCZNE W FIZYCE CIAŁA STAŁEGO

Streszczenie: W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania metod akustycznych i akustooptycznych do badania własności ciał stałych. Zaprezentowano wybrane układy pomiarowe oraz omówiono niektóre prace w tym zakresie prowadzone w Instytucie Fizyki Politechniki Śląskiej.

1. WSTĘP

W badaniach z zakresu fizyki ciała stałego ważną rolę odgrywają metody akustyczne i akustooptyczne. W wielu przypadkach są to jedyne metody badania ciał stałych, zwłaszcza kryształów, lub stanowią znakomite uzupełnienie innych metod. Akustyka i akustooptyka ciała stałego nabrała szczególnego znaczenia w ostatnim dwudziestoleciu, kiedy to opanowano metody generacji fal hiperdźwiękowych, a więc fal mechanicznych o częstotliwości powyżej 10^9 Hz, natomiast rozwój techniki laserowej umożliwił zastosowanie monochromatycznych źródeł światła do badania oddziaływań akustooptycznych.

Warto też może dodać, że w zakresie częstotliwości fal akustycznych, w którym prowadzi się badania kryształów /zazwyczaj powyżej 100 MHz/, należy uwzględnić kwantowy charakter fali akustycznej. Mówimy więc często o akustyce kwantowej ciała stałego.

Badając propagację fal akustycznych w kryształach, można uzyskać wiele ważnych informacji o własnościach tych kryształów. Wymieńmy niektóre z tych własności i zjawisk zachodzących w kryształach, które mogą być badane metodami akustycznymi i akustooptycznymi:

- 1/ własności sprężyste w zakresie liniowym i nieliniowym,
- 2/ własności piezoelektryczne i fotosprężyste,
- 3/ oddziaływania fonon-fonon, a więc w rezultacie badanie ruchów cieplnych atomów i dynamiki sieci krystalicznej,
- 4/ oddziaływanie elektron-fonon,
- 5/ wpływ defektów na własności sprężyste kryształów,
- 6/ struktura elektronowa metali, stopów i nadprzewodników.

Należy także dodać, że badania propagacji fal akustycznych w kryształach mają ważne znaczenie praktyczne. Wiele urządzeń współczesnej elektroniki, takich jak modulatory, deflektory czy analizatory widma wykorzystuje własności sprężyste, fotosprężyste i piezoelektryczne ciał stałych.

Celem pracy jest krótkie omówienie własności akustycznych i akustooptycznych kryształów oraz zaprezentowanie niektórych metod pomiarowych, a także uzyskanych rezultatów w aspekcie prowadzonych w tym zakresie badań w Instytucie Fizyki Politechniki Śląskiej.

2. PROPAGACJA FAŁ AKUSTYCZNYCH W KRYSZTAŁACH

2.1. Prędkość propagacji fali

Podstawowym równaniem służącym do analizy propagacji fal akustycznych w kryształach jest równanie ruchu, które w przybliżeniu liniowym ma postać [1]

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l}, \quad /1/$$

gdzie: u_i - składowe wektora przemieszczenia, c_{ijkl} - składowe tensora stałych sprężystych, ρ - gęstość ośrodka.

Jeśli w ośrodku propaguje się fala harmoniczna, to wektor przemieszczenia można zapisać w postaci

$$\vec{u} = A \vec{\gamma} e^{i(\omega t - \vec{q} \cdot \vec{r})} \quad /2/$$

gdzie: A - amplituda fali, $\vec{\gamma}$ - wektor jednostkowy charakteryzujący polaryzację fali, A - amplituda fali, ω , \vec{q} - odpowiednio częstość i wektor falowy fali. Podstawiając zależność wyrażoną wzorem /2/ do równania ruchu otrzymujemy macierzowe równanie Christoffela [1]

$$(\Gamma_{ik} - v^2 \delta_{ik}) u_k = 0, \quad /3/$$

gdzie: $\Gamma_{ik} = c_{ijkl} \gamma_j \gamma_l$, γ_j - składowe wektora jednostkowego w kierunku propagacji fali, δ_{ik} - delta Kroneckera, v - prędkość propagacji fali.

Z zależności /3/ otrzymujemy równanie na prędkość propagacji i polaryzację fal akustycznych

$$|\Gamma_{ik} - v^2 \delta_{ik}| = 0 \quad /4/$$

$$\frac{\gamma_y}{\gamma_x} \left[\Gamma_{xy} \Gamma_{xz} - \Gamma_{yz} (\Gamma_{xx} - v^2) \right] / \left[\Gamma_{yz} \Gamma_{xy} - \Gamma_{xz} (\Gamma_{yy} - v^2) \right] \quad /5a/$$

$$\frac{\gamma_z}{\gamma_x} = \left[\Gamma_{xy} \Gamma_{xz} - \Gamma_{yz} (\Gamma_{xx} - v^2) \right] / \left[\Gamma_{yz} \Gamma_{xz} - \Gamma_{xy} (\Gamma_{zz} - v^2) \right] \quad /5b/$$

Z analizy równania /4/ wynika, że w dowolnym kierunku krytalograficznym mogą propagować się trzy fale, w których przemieszczenia cząstek są wzajemnie prostopadłe.

Falę, w której wektor przemieszczenia jest najbliższy kierunkowi propagacji fali, nazywamy falą quasi-podłużną. Dwie pozostałe fale nazywamy falami quasi-poprzecznymi.

Istnieją jednak w kryształach pewne kierunki, tak zwane czystomodowe, wzdłuż których otrzymujemy czystą falę podłużną i dwie czyste fale poprzeczne. W tych kierunkach propagacji, przemieszczenia cząstek są równoległe do kierunku propagacji fali podłużnej oraz prostopadłe do kierunków propagacji obu fal poprzecznych. Kierunki czystomodowe oraz ich liczba zależą od struktury kryształu i jego stałych materiałowych. Bardzo często, zwłaszcza w kryształach o wyższej symetrii, kierunki czystomodowe leżą wzdłuż osi głównych kryształu.

Kierunki czystomodowe charakteryzują się także tym, że wzdłuż nich pokrywają się kierunki prędkości fazowej i grupowej. W równaniu /4/ występuje prędkość fazowa.

Właśnie zależność /4/ pozwala znaleźć związek między prędkością fali a stałymi sprężystymi.

Liczba stałych sprężystych charakteryzujących kryształ zależy od symetrii kryształu i zmienia się od 3 dla kryształów układu regularnego do 21 dla kryształów układu trójskośnego. Wyznaczenie wszystkich stałych sprężystych dla danego kryształu wymaga pomiaru prędkości propagacji fal podłużnych i poprzecznych w kilku kierunkach krystalograficznych.

W tabeli 1 podano przykładowo wymagane pomiary prędkości fal, tak aby można było wyznaczyć wszystkie stałe sprężyste dla kryształów o strukturze heksagonalnej.

Tablica 1

Zależność prędkości propagacji fali akustycznej od stałych sprężystych w kryształach układu heksagonalnego.

		Prędkość
[001]	[001]	$V_L = \sqrt{\frac{c_{33}}{\rho}}$
[001]	[100]	$V_T = \sqrt{\frac{c_{44}}{\rho}}$
[100]	[100]	$V_L = \sqrt{\frac{c_{11}}{\rho}}$
[100]	[010]	$V_T = \sqrt{\frac{c_{11} - c_{12}}{2\rho}}$
[101]	[101]	$V_L = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left\{ \frac{1}{4}(c_{11} + c_{33} + 2c_{44}) + \left(\frac{c_{11} - c_{33}}{2} \right)^2 + (c_{13} + c_{44})^2 \right\}}$

Ze znajomości prędkości propagacji fal podłużnych i poprzecznych można także wyznaczyć temperaturę Debye'a, która jest ważnym parametrem charakteryzującym własności cieplne kryształu.

2.2. Nieliniowe własności sprężyste

Linioowa zależność między deformacją a naprężeniem i w rezultacie równanie ruchu w postaci przedstawionej równaniem /1/ jest słuszna w przypadku niewielkich przemieszczeń cząstek z położenia równowagi. Wówczas bowiem można mówić o sprężystym charakterze sił międzycząsteczkowych. W przypadku większych przemieszczeń i deformacji, co ma miejsce podczas propagacji fal o dużym natężeniu, przestaje być słuszna linioowa zależność między deformacją a naprężeniem. Występują wówczas nieliniowe efekty sprężyste. Efekty te mogą być opisane za pomocą stałych sprężystych wyższych rzędów. Okazuje się, że po uwzględnieniu stałych sprężystych drugiego i trzeciego rzędu, równanie ruchu ma postać [2]

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = (c_{ijkl} + c'_{ijklqr} \frac{\partial u_q}{\partial x_r} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l}) , \quad /6/$$

gdzie

$$c'_{ijklqr} = c_{ijklqr} + c_{ijlq} \delta_{kr} + c_{ilrq} \delta_{jk} + c_{iklq} \delta_{jr}$$

jest kombinacją stałych sprężystych drugiego i trzeciego rzędu.

Otóż okazuje się [2], że sprężyste efekty nieliniowe sprawiają, że podczas propagacji w kryształach fali akustycznej o częstotliwości ω następuje generacja fali harmonicznej o częstotliwości 2ω . Natężenie tej fali w funkcji odległości od miejsca wytworzenia fali o częstotliwości ω wyraża się wzorem

$$P_{2\omega}(x) = \frac{\Gamma P_{\omega}^2(0) \omega^2}{8 \rho v^3} \left(\frac{e^{-2\alpha_1 x} - e^{-d_2 x}}{\alpha_2 - 2\alpha_1} \right)^2 , \quad /7/$$

gdzie: $P_{2\omega}(x)$ - natężenie fali o częstotliwości 2ω w odległości x od miejsca wygenerowania fali o częstotliwości ω i natężeniu $P_{\omega}(0)$, α_1, α_2 - współczynniki tłumienia fali o częstotliwości ω i 2ω , Γ jest stałą sprzężenia fonon-fonon i jest równa

$$\Gamma = \frac{c_{ijklqr} \gamma_j \gamma_l \gamma_r \chi_i \chi_k \chi_q}{c_{ijkl} \gamma_j \gamma_l \chi_i \chi_k} . \quad /8/$$

Znajomość stałej sprzężenia fonon-fonon. Jej znajomość pozwala wyznaczyć stałe sprężyste trzeciego rzędu. Stałe sprzężenia fonon-fonon wyznacza się na podstawie zależności /7/, wierząc natężenie drugiej harmonicznej w zależności od odległości od przetwornika. Inną metodą wyznaczania stałej Γ jest pomiar prędkości propagacji fali akustycznej w zależności od zewnętrznych naprężeń [3].

2.3. Tłumienie fali akustycznej

Propagująca się w kryształach fala akustyczna ulega tłumieniu. Najważniejsze mechanizmy tłumienia to: oddziaływanie fali akustycznej z fononami cieplnymi, z defektami sieci oraz ze swobodnymi nośnikami prądu. W kryształach nieprzewodzących, które są głównie przedmiotem naszych zainteresowań, najważniejszą rolę odgrywa pierwszy mechanizm, dlatego omówimy go nieco szerzej.

Teoretyczną analizę oddziaływania fali akustycznej z fononami cieplnymi rozpatruje się zwykle w dwóch przypadkach:

- 1/ $\omega\tau_t < 1$, /obszar Akhiezer'a/
- 2/ $\omega\tau_t > 1$, /obszar Landau-Rumera/,

gdzie τ_t jest czasem życia fononów termicznych.

Pierwszy warunek ($\omega\tau_t < 1$) jest spełniony w temperaturach powyżej 50 K i częstościach aż do 10 GHz. Drugi natomiast warunek ($\omega\tau_t > 1$) jest spełniony w temperaturach helowych i częstościach zazwyczaj powyżej 1 GHz

W pierwszym przypadku czas życia fononów termicznych jest zbyt krótki, aby można było rozpatrywać pojedyncze zderzenia fononów cieplnych z fononami koherentnymi propagującymi się w kryształach. Przyjmuje się wówczas, że propagująca się fala akustyczna powoduje zaburzenia w równowagowym rozkładzie fononów termicznych. Zmienia się ich częstość i własności sprężyste ośrodka. Powrót do stanu równowagi ma charakter relaksacyjny i prowadzi do absorpcji fali akustycznej. Współczynnik absorpcji w tym obszarze częstości i temperatur wyraża się wzorem [1]

$$\alpha = \frac{\alpha_v T \gamma^2 \omega^2 \tau_t}{3 \rho v^3}, \quad /9/$$

gdzie: α_v - ciepło właściwe odniesione do jednostki objętości, T-temperatura, γ - efektywna wartość stałej Grüneisena. Stała ta jest właśnie tym parametrem, który opisuje zmiany w równowagowym rozkładzie fononów termicznych i wyraża się poprzez stałe sprężyste drugiego i trzeciego rzędu.

W przypadku bardzo niskich temperatur i wysokich częstotliwości fali akustycznej ($\omega\tau_t > 1$, obszar Landana-Rumera), rozpatruje się pojedyncze procesy rozproszenia fonon koherentny - fonon ciepły. Okazuje się przy tym, że możliwe są oddziaływania zarówno fononów podłużnych z podłużnymi, jak i podłużnych z poprzecznymi. W wyniku tego oddziaływania następuje rozproszenie fononów koherentnych i w rezultacie absorpcja fali akustycznej.

Pewien wpływ na absorpcję fali akustycznej w kryształach mają także defekty sieci krystalicznej, przy czym największy wkład wnoszą defekty o rozmiarach rzędu długości fali, co przy częstotliwości około 10^9 Hz jest rzędu 0,5 μm . Są to więc defekty makroskopowe. Defekty punktowe

/atomy obce, pojedyncze luki w sieci/ zmieniają współczynnik absorpcji głównie przez zmianę rozkładu fononów termicznych w kryształach.

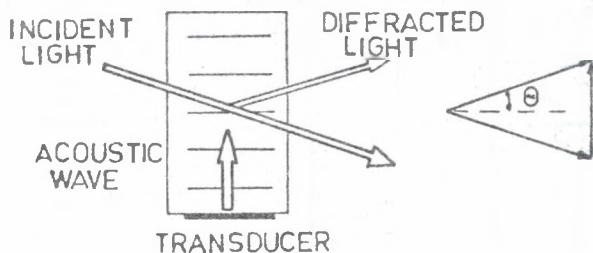
Pomiary tłumienia fali akustycznej w kryształach pozwalają więc uzyskać informacje o dynamice sieci krystalicznej, anharmoniczności oddziaływań międzyatomowych i wpływie defektów na własności kryształa.

3.1. ODDZIAŁYWANIE FOTON-FONON. NIĘKOTÓRE METODY POMIAROWE

Z tego co powiedziano wcześniej wynika, że badania kryształów metodami akustycznymi sprowadzają się w zasadzie do pomiarów prędkości propagacji i współczynnika tłumienia fal akustycznych. Pomiary te prowadzi się zwykle w bardzo szerokim przedziale temperatur /4-300 K/ i częstości / $10^7 - 10^9$ Hz/. Interesujący jest zwłaszcza pomiar współczynnika tłumienia w funkcji temperatury, gdyż można wówczas rozdzielić różne mechanizmy tłumienia.

Wśród różnych metod pomiarowych stosowanych w badaniach akustycznych ważne miejsce zajmują metody wykorzystujące oddziaływanie foton-fonon /oddziaływanie akustooptyczne/. Za pomocą tych metod można bowiem wyznaczać nie tylko prędkości propagacji i współczynnik tłumienia fal akustycznych, ale również stałe fotosprężyste, badać rozkłady pól akustycznych, ustalać kierunki prędkości fazowej i grupowej oraz wyznaczać parametry przetworników piezoelektrycznych.

Jeśli w ośrodku propaguje się jednocześnie fala świetlna i fala



akustyczna, to w wyniku oddziaływania tych fal poprzez efekt fotosprężysty, następuje ugięcie wiązki świetlnej /rys.1/.

Kąt ugięcia i natężenie światła ugiętego I zależą zarówno od parametrów charakteryzujących falę akustyczną, jak i od stałych materiałowych ośrodka.

Rys.1. Dyfrakcja Bragga światła na fali akustycznej.

Fig.1. Bragg diffraction of light on acoustic wave.

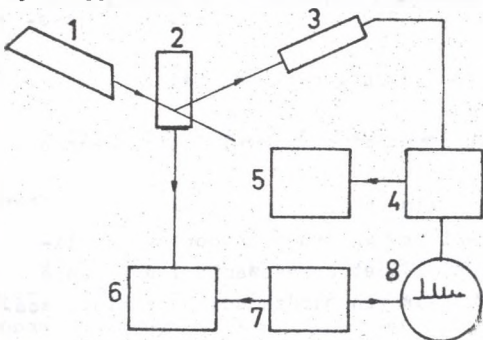
W przypadku dyfrakcji Bragga, która zachodzi dla wyższych częstości fali akustycznej, wielkości te wyrażają się wzorami

$$\Theta = \arcsin \frac{\lambda_0 \omega}{4\pi n v} \quad /10a/$$

$$I = I_0 \frac{\pi^2 n^6 p^2 p_1}{2 \lambda_0^3 v^3 \cos^2 \Theta} \quad /10b/$$

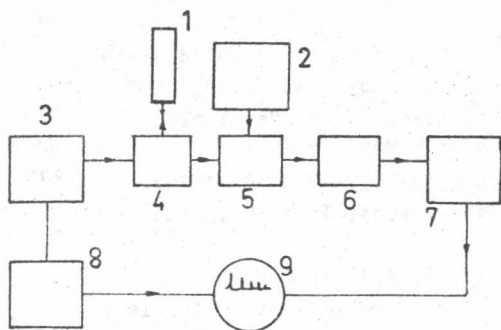
gdzie: λ_0 - długość fali świetlnej, n -współczynnik załamania światła, I_0 - natężenie światła ugiętego, P, l, h - odpowiednio moc, długość i szerokość wiązki akustycznej, p - efektywna wartość stałej fotosprężystej.

Pomiar kąta ugięcia pozwala wyznaczyć prędkość propagacji fali akustycznej, natomiast natężenie ugiętego światła - współczynnik tłumienia fali i stałe fotosprężyste.



Rys.2. Schemat układu pomiarowego /metoda akustooptyczna/; 1-laser, 2-badany kryształ, 3-fotodetektor, 4-nanowoltomierz, 5-rejestrator, 6-generator sygnałowy, 7-generator modulujący, 8-oscylator.

Fig.2. Block diagram of a measuring circuit /acoustooptical method/; 1-laser, 2-examined crystal, 3-photodetector, 4-nanovoltmeter, 5-recorder, 6-signal generator, 7-modulating generator, 8-oscilloscope.



Rys.3. Schemat układu pomiarowego /metoda echo-impulsowa/; 1-badany kryształ, 2-generator heterodynowy, 3-generator sygnałowy, 4-cyrkulator, 5-sprzęgacz kierunkowy, 6-diody mieszająca, 7-wzmacniacz, 8-generator modulujący, 9-oscyloskop.

Fig.3. Block-diagram of a measuring circuit /pulse-echo method/; 1-examined crystal, 2-heterodyne generator, 3-signal generator, 4-circulator, 5-directional coupler, 6-mixing diode, 7-amplifier, 8-modulating generator, 9-oscilloscope.

Na rys.2. przedstawiono schemat układu pomiarowego stosowanego zarówno do wyznaczania parametrów fali akustycznej, jak i do badania oddziaływania akustooptycznego.

Fala akustyczna /impulsowa lub ciągła/ wzbudzana jest za pomocą przetworników piezoelektrycznych z niobianu litu pracujących na częstotliwości podstawowej 100-150 MHz. Światło ugięte jest rejestrowane za pomocą fotopowielacza, z którego sygnał podawany jest na układ wzmacniacza i układ rejestrujący.

Inną metodą służącą do pomiaru prędkości propagacji i współczynnika tłumienia fali akustycznej jest metoda echo-impulsowa /rys.3/.

Z innych metod badania własności sprężystych kryształów, którą również wykorzystujemy w Instytucie Fizyki, należy jeszcze wymienić metodę rezonansową [8]. W metodzie tej wykorzystuje się fakt, że częstość rezonansowa układu mechanicznego zależy od stałych sprężystych, gęstości i geometrii układu.

4. TEMATYKA PRAC Z ZAKRESU AKUSTYKI I AKUSTOOPTYKI CIAŁA STAŁEGO

Badania z dziedziny akustyki ciała stałego i akustooptyki prowadzone są w Instytucie Fizyki od wielu lat i obejmują różne problemy [4-10]. Do najważniejszych z nich można zaliczyć:

- 1/ Badania własności sprężystych, fotosprężystych i piezoelektrycznych kryształów w aspekcie ich wykorzystania w piezoelektronice.
- 2/ Badania oddziaływania fonon-fonon i nieliniowych efektów sprężystych.
- 3/ Opracowanie i wykorzystanie metod rezonansowych do badania własności sprężystych kryształów.
- 4/ Badanie oddziaływania fotonów z fononami cieplnymi i opracowanie odpowiednich metod badawczych.
- 5/ Prace nad praktycznym wykorzystaniem wymienionych zjawisk.

W ostatnim okresie rozwinięto badania z zakresu akustooptyki nieliniowej [11-14]. Jednym z celów tych prac jest opracowanie i wykonanie układu do optycznej generacji fal akustycznych bardzo dużej częstotliwości /około 10^{10} Hz/.

Innym ważnym kierunkiem pracy są badania oddziaływania światła laserowego z impulsami akustycznymi [15, 16]. Prace te oprócz znaczenia poznawczego mają ważny charakter aplikacyjny i powinny zakończyć się opracowaniem akustooptycznego modulatora fal akustycznych.

Wymienione tu przykładowo prace dotyczą wyłącznie akustyki fal objętościowych. W Instytucie Fizyki prowadzi się oprócz tego ciekawe prace dotyczące akustycznych fal powierzchniowych, które ze względu na swoją odrębność nie zostały omówione.

LITERATURA

- [1] J.W.Tucker, V.W.Rampton, *Microwave ultrasonic in solid state physics*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1972.
- [2] R.T.Beyer, S.V.Letcher, *Physical ultrasonics*, New York, 1969.
- [3] D.S.Hughes, J.L.Lelly, *Phys.Rev.*, **22**, 1145, 1953.
- [4] Z.Kleszczewski, *Archives of Acoustics*, **2**, 175-184 /1978/.
- [5] Z.Kleszczewski, A.Mleczko, S.Daszakiewicz, I.Pracka, *Archiwum Akustyki*, **13**, 321-332 /1978/.
- [6] Z.Kleszczewski, *Archives of Acoustic* **4**, **3** /1978/.
- [7] J.Zabawa, A.Klimasek, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, seria: *Matematyka-Fizyka*, z.42 /1983/.
- [8] A.Opilski, A.Klimasek, J.Zabawa, J.Rałużskiewicz, S.Szrajber, H.Bagiński, *Jurnal of Technical Physics*, **18**, 2, 231-238 /1977/.
- [9] Z.Kleszczewski, M.Tomaszewski, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, serie: *Matematyka-Fizyka* z.42 /183/.
- [10] Z.Kleszczewski, J.Bodzenta, *Phys.Stat.Sol.* **76** / 146,467-474 /1988/.
- [11] R.Bukowski, A.Mleczko, Z.Kleszczewski, *Acustica*, **52**, 179 /1983/.
- [12] R.Bukowski, Z.Kleszczewski, *Acustica*, **56**, 48 /1984/.

- [13] R. Bukowski, Z. Kleszczewski, Phys. Stat. Sol. /b/, 143, 281 /1987/.
- [14] R. Bukowski, Praca doktorska, Gliwice 1986.
- [15] J. Bodzenta, Z. Kleszczewski, Prace Naukowe Instytutu Telekomunikacji i Akustyki Pol. Wrocławskiej, 58, 283-285 /1987/.
- [16] J. Bodzenta, Z. Kleszczewski, Phys. Stat. Sol., w druku.

Recenzent: Doc. dr Zygmunt SUROWIAK

АКУСТИЧЕСКИЕ И АКУСТООПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ФИЗИКЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Резюме

В работе представлены возможности использования акустических и акустооптических методов для исследования свойств твердых тел. Показаны избранные измерительные установки, а также описаны некоторые работы, которые ведутся в этой области в Институте физики Силезского Политехнического Института.

ACOUSTIC AND ACOUSTOOPTIC METHODS IN SOLID STATE PHYSICS

Summary

Possibilities of using acoustic and acoustooptic methods in studying properties of solids have been in the paper described. Some measuring arrangements have been presented and some research works in the Institute of Physics of the Silesian Technical University in the above subject have been described.