ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1979

Seria: MATEMATYKA-FIZYKA z. 33 Nr kol. 622

Zygmunt KLESZCZEWSKI

PRZYRZĄDY AKUSTOOPTYCZNE I NIEKTÓRE MOŻLIWOŚCI PRAKTYCZNEGO ICH WYKORZYSTANIA

Streszczenie. W pracy omówiono zasadę działania przyrządów akustooptycznych. Szczególną uwagę zwrócono na modulatory i deflektory światła laserowego. Przedstawiono możliwości praktycznego wykorzystania tych urządzeń w elektronice.

1. WSTĘP

Dyfrakcja światła laserowego na falach akustycznych znajduje obecnie liczne zastosowania praktyczne w urządzeniach akustooptycznych. Wśród tych urządzeń jedne z najważniejszych to na pewno modulatory i deflektory światła laserowego [1-3].

Modulatory światła laserowego znajdują zastosowanie w telekomunikacji, gdzie są wykorzystywane do przesyłania informacji. Inne zastosowania modulacji to uzyskiwanie bardzo krótkich impulsów światła laserowego, synchronizacja modów lasera i wiele innych.

Deflektory wiązki laserowej są wykorzystywane w urządzeniach wyświetlających, telewizji laserowej a także w pamięciach holograficznych, gdzie stanowią element wybierania informacji.

Celem niniejszego artykułu jest krótkie omówienie istoty akustooptycznej modulacji i deflekcji światła laserowego, przedstawienie podstawowych charakterystyk wspomnianych wyżej urządzeń a także zaprezentowanie niektórych ich zastosowań.

2. ODDZIAŁYWANIE AKUSTOOPTYCZNE W CIAŁACH STAŁYCH

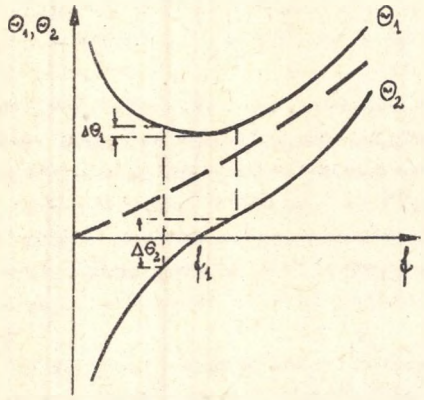
Podstawą działania przyrządów akustooptycznych jest dyfrakcja światła laserowego na falach akustycznych. Nas interesować będzie tzw. dyfrakcja Bragga, która zachodzi dla częstotliwości wyższych, przy których spełniona jest zależność $\frac{\Lambda^2}{\lambda L} \ll \pi$ gdzie Λ, λ oznacza odpowiednio długość fali akustycznej i świetlnej, L - długość drogi oddziaływania. Przy tej dyfrakcji w widmie ugiętego światła pojawia się tylko prążek plus lub minus pierwszego rzędu.

Najważniejszymi wielkościami charakteryzującymi dyfrakcję Bragga są: kąt padania i kąt ugięcia wiązki laserowej oraz natężenie światła ugiętego (efektywność dyfrakcji).

W oparciu o zasadę zachowania energii i prądu przy zderzeniu fonon-fonon wykazać można [4], że kąt padania Θ_1 i kąt ugięcia Θ_2 wyrażają się wzorami

$$\sin\Theta_1 = \frac{\lambda_0 f}{2n_1 v}\left[1 + \left(\frac{v}{\lambda_0 f}\right)^2 (n_1^2 - n_2^2)\right] \tag{1a}$$

$$\sin\Theta_2 = \frac{\lambda_0 f}{2n_2 v}\left[1 - \left(\frac{v}{\lambda_0 f}\right)^2 (n_1^2 - n_2^2)\right] \tag{1b}$$



Rys. 1. Zależność kąta padania Θ_1 i kąta dyfrakcji Θ_2 od częstotliwości fal akustycznych. Krzywe ciągłe - dla ośrodka anizotropowego, przerywana - dla ośrodka izotropowego

gdzie λ_0 oznacza długość fali świetlnej w próżni f, v - częstotliwość i prędkość propagacji fali akustycznej, n_1, n_2 - współczynniki załamania światła w kierunku fali padającej i ugiętej. Zależność Θ_1 i Θ_2 od częstotliwości przedstawiono schematycznie na rys. 1.

Z wykresów wynika, że kąty te zależą w różny sposób od częstotliwości fali akustycznej. Dla nas najważniejszy jest fakt, że kąt odchylenia wiązki laserowej wzrasta wraz ze zwiększeniem częstotliwości. Interesujący jest zwłaszcza przedział w pobliżu częstotliwości $f_1 = \frac{v}{\lambda_0}\sqrt{|n_1^2 - n_2^2|}$, gdzie kąt padania Θ_1 jest prawie stały. Daje to możliwość odchylania wiązki światła wraz ze zmianą częstotliwości bez zmiany kąta padania. Ma to bardzo istotne znaczenie w deflektorach światła laserowego. Jeśli ośrodek jest optycznie izotropowy ($n_1 = n_2 = n$), to wtedy:

$$\sin\Theta_1 = \sin\Theta_2 = \frac{\lambda_0 f}{2nv} \tag{2}$$

Natężenie ugiętego światła jest bardzo złożoną funkcją natężenia fali akustycznej i rozkładu przestrzennego oddziaływujących fal. W przypadku gdy obie fale (akustyczna i świetlna) są doskonale płaskie, efektywność dyfrakcji dana jest wyrażeniem [5]:

$$\frac{I}{I_o} = \sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda_o \cos\theta}\sqrt{\frac{P_a L}{2H}\,\frac{n^6 p^2}{\varrho v^3}}\right) \tag{3a}$$

gdzie $\frac{I}{I_o}$ - oznacza stosunek natężenia światła ugiętego do padającego, Pa - moc akustyczna, L, H - odpowiednio długość i szerokość obszaru oddziaływania, p - stała fotosprężysta, ϱ - gęstość ośrodka.

W przypadku słabych oddziaływań, co bardzo często występuje w praktyce eksperymentalnej, wyrażenie (3a) może być zapisane w postaci:

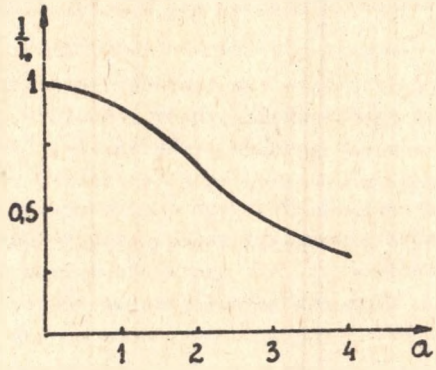
$$\frac{I}{I_o} = \frac{\pi^2}{2\lambda_o^2 \cos^2\theta}\,\frac{P_a L}{H}\,\frac{n^6 p^2}{\varrho v^3} \tag{3b}$$

Z wyrażeń (3a) i (3b) wynika, że efektywność dyfrakcji zależy od mocy wiązki akustycznej i długości drogi oddziaływanie oraz od dobroci akustooptycznej ośrodka, która jest zdefiniowana jako $n^6 p^2/\varrho v^3$. Ponieważ w praktyce jesteśmy ograniczeni mocami akustycznymi (1-2 W, przy f $\cong$ 100 MHz) oraz wartościami L (10-15 mm), w celu uzyskania dużej efektywności dyfrakcji należy stosować materiały o dużej dobroci akustooptycznej.

Najczęściej jednak zarówno fala świetlna jak i elektromagnetyczna cechuje się pewną rozbieżnością. Z teorii dyfrakcji fal wynika, że rozbieżności te są dane zależnościami:

$$\delta\varphi = \frac{\Lambda}{L} \tag{4a}$$

$$\delta\theta = \frac{\lambda}{d}. \tag{4b}$$



Rys. 2. Zależność efektywności dyfrakcji $\frac{I}{I_o}$ od parametru a. Częstotliwość f - 200 MHz, moc akustyczna - 1,7 W

gdzie $\delta\varphi$ i L oznacza rozbieżność i średnicę wiązki akustycznej, $\delta\Theta$ i d - to samo dla fali świetlnej.

Jeśli oddziaływające fale nie są płaskie, to natężenie ugiętego światła zależy bardzo istotnie od stosunku $a = \frac{\delta\Theta}{\delta\varphi}$. Na rysunku 2 przedstawiono względne zmiany $\frac{I}{I_o}$ w funkcji a. Największą efektywność dyfrakcji uzyskujemy dla bardzo małych wartości $\frac{\delta\Theta}{\delta\varphi}$, chociaż nie zawsze taka geometria jest korzystna do zastosowania.

3. PARAMETRY DEFEKTORÓW I MODULATORÓW AKUSTOOPTYCZNYCH

Charakterystyki przyrządów akustooptycznych są uwarunkowane ich przeznaczeniem. Poniżej rozpatrzone będą podstawowe parametry deflektorów i modulatorów akustooptycznych.

A) Akustooptyczny deflektor światła

Deflektor służy do odchylania wiązki laserowej w możliwie szerokim przedziale kątowym. Zmianę kąta odchylania $\Delta\Theta$ uzyskuje się poprzez zmianę częstotliwości fali akustycznej Δf.

Z wyrażenia (2) wynika, że związek między $\Delta\Theta$ i Δf dany jest zależnością:

$$\Delta\Theta = \frac{\lambda_o \Delta f}{nv\cos\Theta} = \frac{\lambda_o \Delta f}{nv} \tag{5}$$

Przy ustalonym kącie padania zmiana częstotliwości fali akustycznej od wartości danej wzorem (2) powoduje zmniejszenie efektywności dyfrakcji, gdyż występuje oddziaływanie tylko z częścią wiązki akustycznej. Dopuszczalny przedział częstotliwości określa się jako tę wartość Δf, przy której natężenie ugiętego światła zmniejsza się o 3 dB. Z obliczeń wynika [6], że przedział ten wynosi:

$$\Delta f = 1{,}8\frac{nv^2}{\lambda_o f L} = \frac{nv\Lambda}{\lambda_o L} \tag{6}$$

Zauważyć należy, że przedział Δf jest duży dla niskich częstotliwości i niewielkich dróg oddziaływania światła i fali akustycznej. Jednakże przy bardzo małych wartościach f nie występuje dyfrakcja Bragga, jak również uzyskujemy bardzo dużą rozbieżność wiązki akustycznej, co wpływa niekorzystnie na efektywność dyfrakcji. Optymalna wartość f_o wynosi [7]:

$$f_o = \frac{2.36}{\sqrt{\frac{\pi L \lambda_o}{2v^2 n}}} \tag{7}$$

Dla λ_0 = 5328 Å, L = 10 mm i typowych wartości n (1,5-2) oraz v (4-5 $\frac{km}{s}$), f_0 wynosi 100-150 MHz.

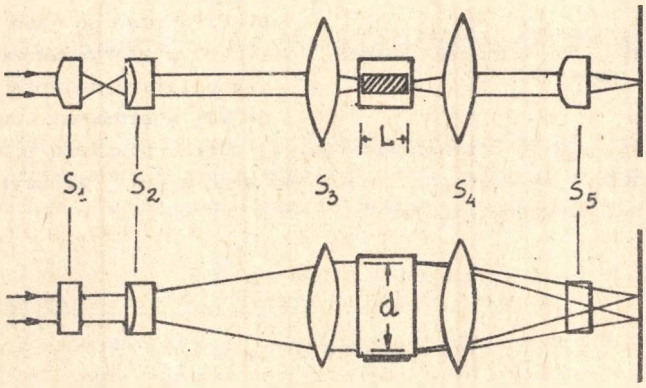
Znajomość wartości $\Delta\Theta$ i $\delta\Theta$ pozwala wyliczyć liczbę niezależnych położeń wiązki laserowej, która jest zdefiniowana jako:

$$N = \frac{\Delta\Theta}{\delta\Theta} = \frac{\Delta f t}{\cos\Theta}, \tag{8}$$

gdzie $t = \frac{d}{v}$ oznacza czas przejścia fali akustycznej przez wiązkę laserową.

Uzyskanie dużej liczby niezależnych położeń wymaga zatem zarówno dużych wartości Δf jak i dużych czasów przejścia fali akustycznej przez wiązkę laserową.

Konieczne staje się w przypadku deflektora stosowanie układów optycznych formujących wiązkę laserową do żądanej geometrii. Schemat takiego układu przedstawiono na rys. 3. Padająca wiązka światła laserowego jest



Rys. 3. Układ optyczny akustooptycznego deflektora światła laserowego

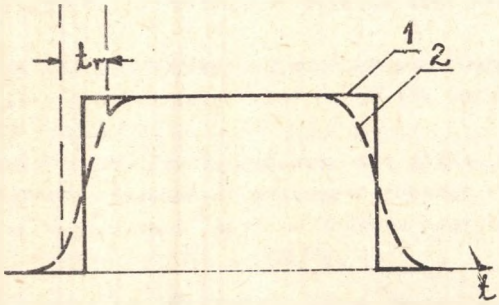
rozszerzana układem teleskopowym złożonym z soczewek S_2 i S_3. Soczewka cylindryczna S_1 ogniskuje wiązkę w płaszczyźnie do prostopadłej do płaszczyzny dyfrakcji. Uzyskujemy w ten sposób wiązkę znacznie rozszerzoną w płaszczyźnie dyfrakcji (10-15 mm) i zwężoną w kierunku prostopadłym (0,5 -1 mm). Po odchyleniu wiązka laserowa jest ogniskowana na ekranie soczewkę sferyczną S_4 i cylindryczną S_5. Taki układ optyczny pozwala uzyskiwać kilkaset niezależnych położeń wiązki laserowej przy typowej wartości Δf, wynoszącej 60-80 MHz.

Oddzielnym zagadnieniem jest wykonanie przetwornika piezoelektrycznego pracującego w takim przedziale częstotliwości.

Następną wielkością charakterystyczną dla deflektora (także dla modulatora) jest efektywność dyfrakcji oraz poziom mocy akustycznej konieczny do jej uzyskania. Stosunek $\frac{I}{I_0}$ winien być nie mniejszy niż 0,5 w całym

przedziale częstotliwości. Stosowane moce akustyczne winny być możliwie małe, gdyż w przeciwnym przypadku powstają w ośrodku akustooptycznym niepożądane efekty termiczne. Wymaga to stosowania materiałów o dużej dobroci akustycznej ($PbMoO_4$, TeO_2, As_2S_3).

B) Akustooptyczny modulator światła



Rys. 4. Przebieg impulsu akustycznego (1) i odpowiadającego mu impulsu świetlnego (2)

Najważniejszymi wielkościami charakteryzującymi akustooptyczny modulator światła są: czas narastania impulsu, kontrastowość oraz omówiona już wcześniej efektywność dyfrakcji.

Czas narastania impulsu związany jest ze skończonym czasem przejścia fali akustycznej przez wiązkę laserową. Określa się go jako przedział czasu, w którym natężenie światła ugiętego zmienia się od 10 do 90% w stosunku do wartości maksymalnej. Sytuację tę przedstawia rys. 4, gdzie pokazano przebieg impulsu akustycznego i świetlnego. Z obliczeń wynika [8], że czas narastania t_r może być wyrażony wzorami:

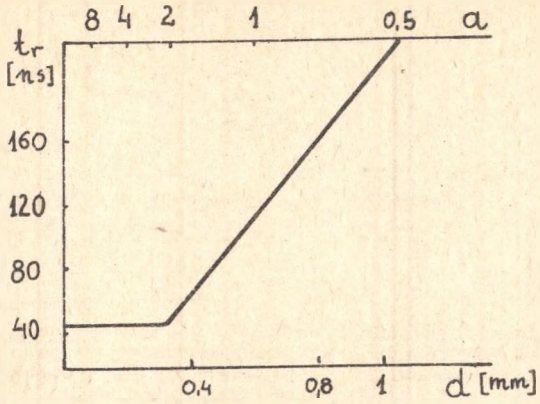
$$t_r = 0{,}64\,\frac{d}{v} \quad \text{dla} \quad a \ll 1. \tag{9a}$$

lub

$$t_r = 0{,}4\,\frac{L\lambda}{v\Lambda} \quad \text{dla} \quad a \gg 1. \tag{9b}$$

Na rys. 5 przedstawiono obliczoną teoretycznie zależność t_r od a i d. Z obliczeń wynika, że dla małych wartości d t_r jest niewielkie i stałe, natomiast ze wzrostem d t_r również wzrasta. Najkorzystniejszy jest przypadek możliwie małych wartości t_r, co zachodzi dla $a \gg 1$. Pamiętamy jednak, że przy $a \gg 1$ jest bardzo mała efektywność dyfrakcji. W związku z tym najbardziej optymalny przypadek występuje przy $a \cong 1$, tzn. dla jednakowej rozbieżności fali świetlnej i akustycznej. Wykonywane obecnie modulatory mają czasy narastania impulsu od kilkunastu do kilkudziesięciu nanosekund przy efektywności dyfrakcji ponad 80%.

Kontrastowość określona jest poprzez stosunek natężenia światła w obszarze oświetlonym przez wiązkę laserową do natężenia światła w obszarze sąsiednim i zależy głównie od rozpraszania światła w ośrodku akustooptycznym. W dobrych kryształach stosunek ten wynosi powyżej 10^3.



Rys. 5. Zależność czasu narastania impulsu światła ugiętego w zależności od a i d. Obliczenia wykonano dla L = 50 mm, λ_0=0,6328 m, f = 80 MHz, Λ = 50 μm

4. PRZYKŁADY PRAKTYCZNEGO WYKORZYSTANIA MODULATORÓW I DEFLEKTORÓW ŚWIATŁA LASEROWEGO

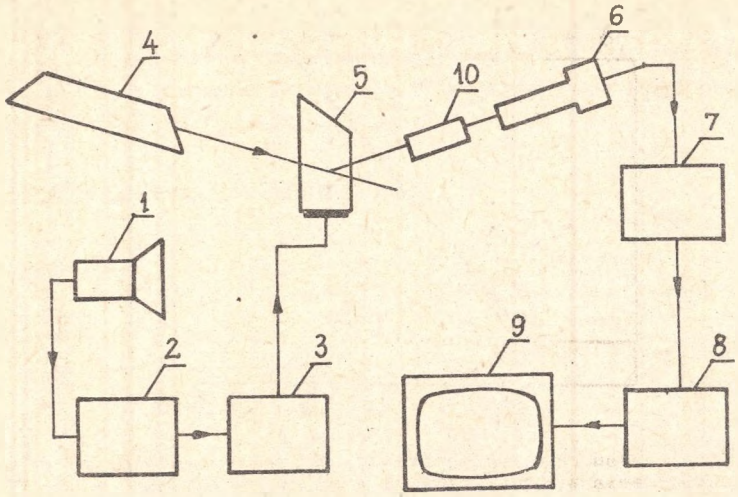
Przyrządy akustooptyczne znajdują obecnie szerokie zastosowanie. Odsyłając zainteresowanego czytelnika do licznych prac z tej dziedziny [9-14], omówimy dwa przykłady zastosowań deflektora i modulatora światła laserowego.

1) Układ do przesyłania obrazu na wiązce laserowej

Jednym z najważniejszych zastosowań modulacji światła laserowego jest wykorzystanie tego zjawiska do przesyłania informacji na wiązce laserowej. Poniżej zaprezentowany zostanie układ do przesyłania obrazu na wiązce laserowej. Został on opracowany i wykonany w Instytucie Fizyki Politechniki Śląskiej. Schemat układu przedstawia rys. 6.

Światło emitowane z lasera przechodzi przez ośrodek akustooptyczny, w którym zostaje wzbudzona fala akustyczna. Przetwornik piezoelektryczny jest pobudzany z generatora wysokiej częstotliwości, który jest modulowany sygnałem wizyjnym. Światło laserowe ulega modulacji amplitudowej analogicznej jak modulacja sygnału akustycznego. Ugięta i zmodulowana wiązka jest rejestrowana przez fotopowielacz, z którego sygnał po wzmocnieniu steruje strumieniem elektronów w kineskopie monitora i w rezultacie powstaje obraz. Na uwagę zasługuje prostota układu i możliwość zastosowania światłowodu do prowadzenia wiązki ugiętej.

W ten sposób cały układ może pracować przy normalnym oświetleniu. Jakość uzyskiwanych obrazów jest bardzo dobra. Wykorzystywany tu modulator pracował na częstotliwości 50 MHz, szerokość pasma pracy wynosiła 25 MHz a efektywność dyfrakcji 50%.



Rys. 6. Układ do przesyłania obrazu na wiązce laserowej:
1 - kamera, 2 - wzmacniacz, 3 - generator wysokiej częstości, 4 - laser, 5 - modulator akustooptyczny, 6 - fotopowielacz, 7 - układ korekcyjny, 8 - wzmacniacz, 9 - monitor TV, 10 - tor przesyłu sygnału

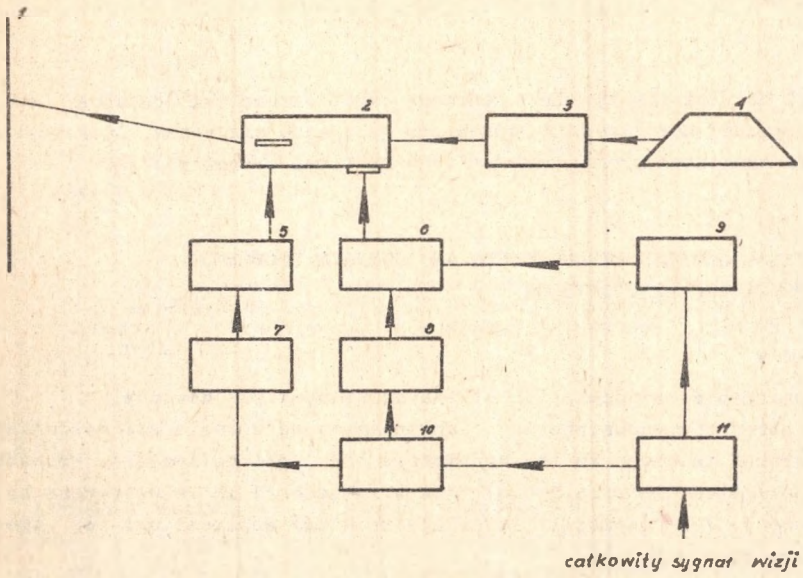
2) Laserowy monitor telewizyjny

Interesującym przykładem wykorzystania akustooptycznego deflektora światła jest laserowy monitor telewizyjny dla potrzeb elektronicznej techniki obliczeniowej. Schemat monitora telewizyjnego przedstawia rys. 7.

Zasadniczym elementem urządzenia jest deflektor X-Y, tzn. deflektor odchylający wiązkę laserową w dwóch kierunkach. Przetworniki piezoelektryczne deflektora są pobudzane w następujący sposób. Przetwornik deflektora poziomego jest pobudzany generatorem wysokiej częstotliwości (60 - 140 MHz), który jest przestrajany w takt działania generatora piłokształtnego odchylania poziomego. Podobnie zasilany jest przetwornik deflekcji pionowej, z tym, że występuje tu dodatkowa modulacja amplitudy napięcia wysokiej częstotliwości sygnałem wizyjnym. Generatory 5, 6, 7, 8 są synchronizowane impulsami otrzymywanymi z całkowitego sygnału wizji w układzie 11. Wykorzystywany deflektor X-Y winien charakteryzować się dużą sprawnością deflekcji i zapewniać bardzo dużą liczbę niezależnych położeń.

Opisany wyżej monitor ma wiele zalet w stosunku do monitora wykorzystującego strumień elektronów, chociaż realizacja praktyczna układu jest sprawą złożoną.

Wymienione tu przykłady wskazują, że urządzenia wykorzystujące dyfrakcję światła na falach akustycznych mogą znaleźć liczne zastosowania praktyczne. W tym aspekcie prowadzi się w Instytucie Fizyki Politechniki Śląskiej prace z zakresu akustooptyki fal objętościowych.



Rys. 7. Laserowy monitor telewizyjny:

1 - ekran, 2 - deflektor X-Y, 3 - układ optyczny skupiania wiązki, 4 - laser, 5, 6 - generatory wysokiej częstotliwości, 7 - generator odchylania poziomego (15625 Hz), 8 - generator odchylania pionowego (50 Hz), 9 - wzmacniacz wizji, 10 - układ synchronizacji, 11 - układ separatora impulsów wizyjnych i synchronizacji

[1] Uchida N., Nuzeki N.: Proc. IEEE, 61, 1073 (1973).

[2] Mason W.: Physical Acoustic, t. 7. Academic Press, New York, 1968.

[3] Maydan D.: IEEE J. Quantum Electronics, QE-6, 15 (1970).

[4] Lemanow W., Szakin O.: FTT 14, 229 (1972).

[5] Chang I.: Proc. IEEE, SU-23, 3 (1976).

[6] Gordon E.I.: Proc. IEEE, 54, 139 (1966).

[7] Bałakszin W., Manieszin H., Mustiel E., Parygin W.: Radiotiechnika i eliektronika, 15, 2353 (1970).

[8] Magdicz L., Mołczanow W.: Akustoopticzieskie ustroistwa i ich primienienie, Moskwa, "Sowietskoje Radio", 1978.

[9] Korpel A., Adler R., Desmares P., Watson W.: Proc. IEEE, 54, 1429 (1966).

[10] Gorog I., Knox J., Goedertier P., Shidlowsky I.: RCA Rev, 33, 623 (1972).

[11] Auria L.D., Huiquard L., Slezak C., Spitz E.: Appl. Opt., 13, 908 (1974).

[12] Chang I.: Appl. Phys. Letters, 25, 323 (1974).

[13] Baronski M.K.: Introduction to integrated Optics, Plenum Press, New York, London 1974.

[14] Magdicz L.: Optika i spiektroskopia, 31, 301 (1971).

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА И НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Р е з ю м е

В работе обсуждаются принципы действия акустооптических приборов. Особое внимание обращено модуляторы и дефлекторы лазерного излучения. Представлено возможности практического применения этих приборов в электронике.

ACOUSTOOPTICAL DEVICES ARRANGEMENTS AND CERTAIN PROBLEMS OF THEIR PRACTICAL APPLICATIONS

S u m m a r y

Baric principles of operation of the acoustooptical devices.

In the paper the acoustooptic arrangement work basis are described. Special accoust is given to the modulators and light deflectors. Possibility of application in practive of this arrangements in electronics have been presented. The possibilities of electronical applications of these elevices are also discumea.