水晶を用いた可視から近赤外領域に及ぶ 波長可変 Acousto-Optic Filter の試作研究

本 間 則 秋・山 岸 昭 雄・稲 場 文 男

東北大学電気通信研究所
仙台市片平二丁目 (〒 980)

(1975年 4 月21日受理)

Experimental Studies on Acousto-Optic Filter using Quartz Crystal
tunable from Visible to Near Infrared Region

Noriaki HONMA, Akio YAMAGISHI and Humio INABA

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University,
Katahira 2-1-1, Sendai 980

(Received April 21, 1975)

An acousto-optic filter offers a new type of wavelength tunable filter in the optical region by which the tuning is performed electronically through the application of acoustic wave to the filter. This filter is advantageous because it can be constructed compactly in contrast with conventional wavelength selective apparatus such as a prism or grating monochromator. In this paper, an experimental study on the fundamental properties of a reflection type acousto-optic filter using a quartz crystal is reported. A 5.3 cm long crystal of *X* cut quartz is used and a ZnO acoustic transducer is sputtered on one end of the crystal. With the variation of the acoustic frequency from 57 to 120 MHz, tuning of the transmitting wavelength from 850 to 460 nm was realized. The bandwidth of this optical filter around 500 nm was measured to be 0.7 nm. The transmission characteristics of this filter was examined quantitatively not only for coherent laser beams but also for incoherent light.

1. 緒 言

Acousto-Optic Filter (以下 AO フィルターと略す) は、光学的異方性をもつ媒質中での入射光ビームと超音波ビームとの collinear なパラメトリック相互作用を利用した狭帯域光フィルターである¹⁾。このフィルターは加える超音波周波数を変化させるという電気的操作により透過光の波長を任意に選択でき、しかも比較的広い波

長領域での動作が可能であるという特長を有している。また、フィルター本体は十分に小型化でき、従来の干渉フィルターと同様に用いることが可能であり、上記の特長を考え合えると、干渉フィルターとプリズム分光器の長所を兼ね備えているものであると言えよう。この点からも AO フィルターは従来の分光装置の概念をこえた新しい光波デバイスの1つとして注目に値するものである。

AO フィルターの基本的構成には Fig. 1(a), および

Fig. 1. Basic arrangements of tunable acousto-optic filter
(a) Reflection type (b) Transmission type

(b) に示すように 2 種類あり、用いる結晶の形状と超音波トランスジューサーの組合せにより、反射型²⁾と透過型³⁾に分類される。いずれの場合にも、入射光から特定の偏光成分のみを選択するための偏光子と、光学的異方性結晶、超音波トランスジューサー、および入射光を遮断し、透過光のみをとりだすための検光子とで構成されている。このような AO フィルターは、1969 年、Harris らにより提案されたもので、すでに LiNbO_3 ²⁾、 CaMoO_4 ³⁾ といった結晶を用いて、それぞれ波長領域 550～700nm、510～670 nm の光に対して動作するフィルターが報告されている⁴⁻⁹⁾。

原理的にこのフィルター効果には、結晶中での超音波による光の回折現象と結晶の光学的異方性とが関与しているため、その特性は用いる結晶の光学的特性に強く依存する¹⁰⁾。例えば、複屈折性の大きな結晶を用いると非常に狭い透過帯域幅をもたせることが可能であり、また結晶によっては非常に広い波長領域での動作も可能になる。本論文では、この AO フィルターの新しい光学素子としての実用性に着目し、広い波長領域でのフィルター動作を得る目的で異方性結晶として水晶を用いた場合のその基本的動作特性についての実験的検討を行なった結果をまとめて報告したい。

2. AO フィルターの基本的特性

一般に超音波が媒質中を進行すると、それに伴って生ずる歪により媒質中に屈折率の変化をもたらす。このような状態の媒質に入射した光は空間的な屈折率変化により回折される。このようなブラッグ回折においてはエネルギー保存則により、回折光の周波数は入射光の周波数から超音波周波数だけずれている。また入射光、回折光、超音波の各波数ベクトルの間にブラッグ条件（後出 (5) 式）が満たされるときに最も強い回折現象が起きる。これは運動量の保存則から引き出される条件であり、通常位相整合条件と呼ばれる。結晶内ではこのブラッグ条件により、超音波周波数と入射、回折光波長とが 1 対 1 の対応関係にあり、従って特定の超音波周波数では、特定の

波長を有する入射光のみが強い回折光となって取り出される。これが AO フィルターの基本原理である。以下にこのような AO フィルターの特性を支配する条件を解析し、種々のパラメータとの関係を明らかにする。

水晶や LiNbO_3 結晶などの三方晶系に属する結晶の x 軸方向に縦波超音波が伝搬し、これと collinear に光が入射する場合を考える^{1,11)}。 x 軸方向に伝搬する縦波超音波は歪 S_1 で表わされる。この歪により、結晶の impermeability constant が変化し、そこに入射する光電場によって分極が生じることになる。今、入射光と回折光の電場、および超音波の歪を次式で表わす。

$$\left. \begin{aligned} E_i(x, t) &= [E_i(x)/2] \exp j(\omega_i t - k_i x) + \text{C.C.}, \\ E_d(x, t) &= [E_d(x)/2] \exp j(\omega_d t - k_d x) + \text{C.C.}, \\ S_1(x, t) &= [S_1(x)/2] \exp j(\omega_a t - k_a x) + \text{C.C.} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、C.C. は複素共役を表わすものとする。これより超音波との相互作用で生じる電気分極は、光弾性定数 P_{41} 、誘電率 ϵ_0 、常光線および異常光線に対する屈折率 n_o 、 n_e を用いて次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} P_d &= -\epsilon_0 n_o^2 n_e^2 p_{41} S_1 E_i, \\ P_i &= -\epsilon_0 n_o^2 n_e^2 p_{41} S_1 E_d. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

(1)、(2) 式を損失のない場合の Maxwell 方程式に代入すれば、次に示す結合振幅方程式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dE_i}{dx} &= j \frac{\omega_i n_o n_e p_{41}}{4c} S_1 E_d \exp(j\Delta k x), \\ \frac{dE_d}{dx} &= j \frac{\omega_d n_o n_e p_{41}}{4c} S_1 E_i \exp(-j\Delta k x). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし、 $\Delta k = k_i - k_d - k_a$ である。これより、結晶長が $x = L$ の場合の透過光強度は

$$I_d(L) = I(0) \frac{\omega_d}{\omega_i} \Gamma^2 L^2 \frac{\sin^2\{(\Gamma^2 + \Delta k^2/4)^{1/2} L\}}{(\Gamma^2 + \Delta k^2/4) L^2} \quad (4)$$

ただし、 $\Gamma^2 = \omega_i \omega_d n_o^3 n_e^3 p_{41}^2 |S_1|^2 / 16c^2 = (\pi^2 / 2\lambda^2) M P_A$ となる。ここで $M = \rho_{41}^2 n_e^3 n_o^3 / \rho v^8$ 、 P_A は超音波の電力密度、 λ は光の波長である。

従って、AO フィルターの最大透過率を与える超音波周波数 f_a は、波長 λ_0 の入射光に対し、 $\Delta k = 0$ より次式で与えられる。

$$f_a = \frac{v}{\lambda_0} |n_o - n_e| \quad (5)$$

ただし、 v は音速である。また、超音波周波数の変化に対する光の周波数の変化 $\Delta\nu$ は、

Table I. Comparison of various acoustic properties and figure of merit of some typical crystals applicable to the tunable acousto-optic devices.

Crystal	Transmission	Density	Index of Refraction n	Acoustic wave		Photoelastic constant p	Figure of merit M (sec ³ /g)
				Direction	Velocity v (cm/sec)		
Quartz	0.16-4.0 μm	2.65	$n_e=1.533$	X (long.)	5.75×10^5	$P_{41}=0.41$	4.49×10^{-20}
			$n_o=1.543$	Y (shear)	3.72×10^5	$P_{56}=-0.041$	1.45×10^{-19}
LiNbO ₃	0.45-4.5 μm	4.7	$n_e=2.208$	X (long.)	6.57×10^5	$P_{41}=0.155$	2.35×10^{-18}
			$n_o=2.277$	Y (shear)	4.0×10^5	$P_{56}=0.155$	1.05×10^{-17}
CaMoO ₄	0.4 -5.5 μm	4.24	$n_e=1.9983$ $n_o=1.9884$	Y (shear)	2.95×10^5	$P_{45}=0.06$	2.05×10^{-18}

$$\Delta\nu/\Delta f_a \simeq 2\pi/bv \quad (6)$$

である。ここで、 $b = \frac{\partial k_i}{\partial \nu} - \frac{\partial k_d}{\partial \nu}$ である。

次にフィルターの透過率は (4) 式から得られる。同調を完全にとり ($\Delta k=0$), 更に $\Gamma L = \frac{\pi}{2}$ となるように超音波入力を入れた場合は、 $\frac{I_i}{\omega_i} = \frac{I_d}{\omega_d}$ で表わされる Manly-Rowe の関係式が成立する。従って変換される最大電力は $I_d = \frac{\omega_d}{\omega_i} I_i$ で与えられるが、 $\omega_i \simeq \omega_d$ であるから理論的にはほぼ 100% の変換が可能である。このために必要な超音波電力密度は

$$P_A^{100} \simeq \frac{\lambda^2}{2ML^2} \quad (7)$$

となる。水晶の場合、性能指数 $M = \frac{n_e^3 n_o^3}{\rho v^3}$ は $4.5 \times 10^{-20} \text{ sec}^3/\text{g}$ であり、 $L=5 \text{ cm}$ とすると $\lambda=632.8 \text{ nm}$ では $P_A^{100} \simeq 18 \text{ W/mm}^2$ である。 P_A^{100} 以下の超音波電力密度 P_A に対して透過率は

$$\frac{I_d}{I_i} \simeq \sin^2 \Gamma L \quad (8)$$

で与えられる。このことから、高い透過率を得るためには、性能指数 M が大きく、長さ L の長い結晶を用いる必要があることが判る。

Table I に水晶、LiNbO₃、CaMoO₄ の 3 種類の結晶について光学および音響特性と性能指数 M の値を示してある。

AO フィルターの透過帯域幅は、 Δk が周波数に依存するので $|\Delta k L| \simeq 2\pi$, すなわち電気分極とそれから生じる回折光の位相差が、結晶の長さ L を進む間に π になるという条件より決められる。 $\Delta k = b \Delta \nu$ であるから

$$\Delta \nu = \frac{2\pi}{bL} \text{ cm}^{-1} \quad (9)$$

である。 $b \simeq 2\pi \Delta n$ とすると $\Delta \nu \simeq \frac{1}{\Delta n L}$ で与えられる。これより狭い透過帯域幅の特性を得るためには、分散が大きく、長い結晶を用いることが必要である。

Fig. 2. Wave vector relation for nearly collinear propagation. k_i , k_d , k_a , are wave vectors of the incident optical wave, diffracted wave, and acoustic wave, respectively. Δk represents a k vector mismatch.

次に AO フィルターの許容入射角について検討してみる。Fig. 2 に示すように、入射光が超音波と collinear な方向から角 θ だけずれて入射すると波数ベクトルの不整合成分 Δk が生じ、(4) 式から明らかなように、透過帯域幅や透過率が変化する。 θ が十分に小さい場合には

$$\Delta k \simeq \frac{\pi(n_o - n_e)\theta^2}{\lambda} \quad (10)$$

となるため、透過率が $1/2$ になる θ は、

$$\theta \simeq \left[\frac{\lambda}{(n_o - n_e)L} \right]^{1/2} \quad (11)$$

で与えられる。従って、 L を長くすることは透過帯域幅を狭め、透過率を高くするために有効であるが、許容入射角を小さくするようになる訳である。

以上のように、AO フィルターの基本的特性は使用する結晶の特性に大きく依存する。結晶に水晶を用いた場合、可視光に対して 100 MHz 前後の超音波周波数で同調する AO フィルターが可能となるが、性能指数は $M=4.5 \times 10^{-20} \text{ sec}^3/\text{g}$ で LiNbO_3 結晶（同じフィルター構成をして $M \approx 2.4 \times 10^{-18} \text{ sec}^3/\text{g}$ ）などに比較して小さいため高い透過率を得るのが困難である。しかしながら、水晶は良質で大きな結晶が容易に得られるので、長い結晶を用いることによりこの点をある程度カバーすることが可能である。また、 LiNbO_3 などに比較して複屈折性が小さいため、わずかな超音波周波数変化で広い波長領域で同調をとることができる。このような観点から次節では、水晶を用いた AO フィルターの基本的特性について実験的検討を行う^{7,12,13,14}。

3. フィルターの試作とその実験的検討

AO フィルターの動作は、原理的には結晶の全透過域で可能であるが、実際には、超音波トランスジューサーとして広帯域特性のものが得られないため、その周波数特性で制限されてしまう。従って、超音波トランスジューサーとしてはできるだけ周波数帯域幅が広く、しかも高能率であることが要求される。そこで我々は、直流 2 極スパッタ法によって製作した ZnO 薄膜トランスジューサー¹⁵⁾を用いることにした。

Fig. 3 に試作した AO フィルターの基本特性を測定するための実験ブロック図を示す。フィルターは反射型で構成してある。入射光は偏光子で直線偏光にされ、水晶の x 軸方向に入射する。超音波によって回折された光は、ブリュースター角度に挿入したガラスで反射され、検光子を通して入射光と直交した偏光成分がとり出される。

使用した水晶の大きさは、 x 軸方向の長さが 5.3 cm で、その光学研磨された x カット面の一方に縦波超音波を発生させるための ZnO トランスジューサーがスパッタしてある。Fig. 4 に、パルスエコー法により測定した ZnO トランスジューサーの周波数特性を示す。共振周波数は 90 MHz 付近にあり、そのときの挿入損は 16 dB である。

次に光源としては、He-Ne レーザー (632.8 nm)、 Nd^{3+} YAG レーザー (1.06 μm)、 Nd^{3+} YAG レーザーの第 2 高調波光 (532 nm)、および白色光源としてタングステンランプを用いた。Fig. 5 に試作した AO フィル

Fig. 3. Schematic diagram of the experimental arrangement for reflection type acousto-optic filter.

Fig. 4. Measured result of frequency dependence of insertion loss for ZnO transducer.

ターの透過波長の同調特性を示す。実線は (5) 式より計算した理論曲線である。白色光に対しては約 890~460 nm の波長領域で同調を試みた。図から、この波長領域に対応する超音波周波数は約 57~120 MHz であることがわかる。超音波周波数の変化に対する透過波長の変化の割合は 500 nm 付近で約 4.9 nm/MHz である。また、1.064 μm の YAG レーザー光に対しては 47.2 MHz で同調が得られた。

Fig. 6 は、He-Ne レーザー光を入射し、超音波周波数を掃引したときに得られる AO フィルターの透過特性の一例である。632.8 nm のコヒーレント光に対しては 82 MHz 付近の超音波周波数で同調がとれるが、図には幾つかの透過光強度のピークがみられる。これらのピークに対応する超音波周波数の差は 53 KHz で、この値は長さ $L=5.3 \text{ cm}$ の水晶中の超音波定在波のモード間隔 ($v/2L$) に一致している。このことから、Fig. 6 の特性は、波数ベクトルの不整合成分 Δk によって決まる特性と結晶中の超音波の定在波による共振特性とが重な

Fig. 5. Wavelength tuning curve as a function of applied acoustic frequency for a quartz acousto-optic filter.

り合っているものと考えられる。なお各々のピークの全半値幅は約 20 KHz である。このように反射型 AO フィルターでは水晶の両端面が光学研磨された平行平面になっているため、当然水晶中には超音波の定在波が生じる。その存在は透過率を高めるのに有効であるが、透過特性中にモード間隔に対応するピークが生じるという短所をもたらすことになる。

Fig. 7 は He-Ne レーザー光を用いて測定した AO フィルターの透過率の超音波電力依存性を示す。ここで

Fig. 6. Transmitted light intensity versus acoustic frequency of a quartz acousto-optic filter for He-Ne laser light.

透過率は、透過光強度の最大値に対して、偏光子や検光子による損失を除いた結晶だけによる値を示している。図に示すように試作した AO フィルターでは超音波が定在波になっているため、小さい超音波入力でも数%の透過が得られ、最大で 28% の透過が得られた。

Fig. 7. Relation between relative intensity of transmitted light and square of input voltage at the wavelength of 632.8 nm for a quartz acousto-optic filter.

Fig. 8 は、インコヒーレントな白色光を入射させたときの波長 486.2 nm と 507.2 nm における透過光強度の電気的入力依存性を示す。理論的には超音波入力小さいときは、(8) 式は近似的に $(\pi^2/2\lambda^2)ML^2P_A$ となるから、透過率は Fig. 7 と同様に P_A にほぼ比例する。また、この式でも明らかのように透過率は波長依存性をもつため、図のように 486.2 nm と 507.2 nm における透過率を示す直線の傾きが異なる。これら何れの場合にもその透過率を増すためには、性能指数 M の大きな結晶を選ぶことはもちろんであるが、さらに超音波入力を増大することが不可欠である。本実験においては超音波入力の上限は主としてトランスジューサーの破壊電力で決定されているが、トランスジューサーの改善と、より長い結晶を用いることでこの困難は克服されるものと考えられる。

次に、Fig. 9 に白色光を用いて測定したフィルターの透過特性の一例を示す。図は超音波周波数 f_a を固定し、AO フィルターに白色光を入射させ、得られた透過光を分解能 0.09 nm のモノクロメーター (日本分光製 CT-50D 型) で分光した結果である。この場合、 f_a は 105 MHz であり、透過のピーク波長は 506.3 nm になっている。これより 500 nm 付近の波長の光に対する透過率の半値幅は 0.7 nm であることが測定された。

Fig. 8. Relations between relative intensity of transmitted light and square of input voltage at the wavelength of 486.2 and 507.2 nm for a quartz acousto-optic filter.

Fig. 9. Measured result of transmission characteristics of a quartz acousto-optic filter for incident white light.

さらに Fig. 10 には、入射光ビームが超音波と collinear な方向から角 θ だけずれた場合の透過光強度の変化の様子を示す。測定は Fig. 6 に示した He-Ne レーザー光に対する透過特性の測定を、 θ を変化させて繰返し行なったもので、超音波ビームの直径を 4 mm とし、 θ は結晶内で約 2° まで変化させた。実線は (4) 式と

Fig. 10. Transmitted light intensity versus incident angle θ for the He-Ne laser light at 632.8 nm.

Fig. 11. Change of transmission characteristics of a quartz acousto-optic filter with the incident angle of He-Ne laser beam.

(10) 式から計算した曲線である。実験より許容入射角は 0.8° という結果が得られた。しかし、計算値は 1.34° であり、このずれは超音波の定在波に起因しているものと判断される。即ち、波数ベクトルの不整合成分 Δk を Δf (collinear な整合条件からの超音波周波数のずれ) と θ との関数で表わすと (12) 式のようになる。

$$\Delta k \approx \frac{2\pi}{v} \Delta f + \frac{\pi(n_o - n_e)}{\lambda} \theta^2. \quad (12)$$

この式から透過率が最大となるときの超音波周波数と実際の共振周波数とが Δf だけずれている場合には有限な θ の値で透過率が最大となることが判る。そこでこの Δf を 4.5 KHz と見積ると、Fig. 10 の丸印の点で示されるように理論曲線とほぼ一致させることができた。このことはまた Fig. 11 に示すように、透過光強度を超音波周波数の関数として測定してみると明らかであり、 θ が増大すると最大透過率を与える超音波周波数も大きくなる。

4. 結 言

本論文では、可視部から近赤外部にわたる広い波長領域で同調可能な水晶を用いた AO フィルターを試作し、その基本特性について検討を行なった。その結果、波長 500 nm 付近での透過帯域幅は 0.7 nm で、超音波周波数を 60 MHz~120 MHz 変化させることにより、およそ 400 nm から 1100 nm にわたる広い波長領域で動作するフィルターが実現できることが明らかとなった。波長 400 nm 以下の紫外領域においては透過波長領域の点から水晶が優れており、また (4) 式からも明らかのように光の波長が短くなるほど低い超音波電力で高いフィルター透過率が得られる。ただし、(5) 式からも明らかに短波長の光ほど高い超音波周波数が必要であり、水晶を用いた場合、200~400 MHz の超音波周波数で紫外領域の周調が得られる。本実験では測定装置の制限により紫外領域でのフィルター特性には言及しなかったが、原理的にも技術的にも十分実現可能であり、紫外領域における有効な分光素子として期待される。

本論文で扱った反射型 AO フィルターにおいては、その構造上超音波が結晶中で定在波になることを避けるのは困難である。このような超音波定在波を効果的に利用すれば回折効率の著しい改善が可能であるが、同調は不連続になる。この点を避けるためには Fig. 1 (b) に示した透過型にすることが望ましいと考えられる。AO フィルターの許容入射角は 1° 程度と小さく、しかも有効に動作させるには入射光のビーム径を超音波ビーム径と同じかより小さくする必要がある。このため AO フィルターはコヒーレントで比較的広いスペクトル幅を持つ有機色素レーザーの発振波長選択素子として適している^{16,17)}。

AO フィルターの特性は、用いる結晶の分散の大きさ、性能指数 M の大きさ、および結晶の長さでほぼ決められ

てしまうので、実用化のためにはまずすぐれた音響光学材料の探索が重要である。特に性能指数の大きい結晶が望ましい。先に、AO フィルター用結晶として LiNbO₃、CaMoO₄、水晶を挙げたが、他に LiIO₃、LiTaO₃、Pb₅(GeO₄)(VO₄)₂⁸⁾、Al₂O₃、および Ag₃AsS₃ などが可能であり、小型、高効率、広帯域で動作するような新しい同調可能光フィルターは、今後、従来の形ばかり大きい分光装置に代って各分野での実用化が期待されよう。特に、最近目覚ましい研究の進展を見せている集積光学、ないし光 IC 技術にこの AO フィルターは直接結びつくもので¹⁸⁾、その意味でも今後大いにその利用価値は注目されるべきものであろう。

おわりに、ZnO 薄膜トランジューサーの製作に関し、多大な協力を得た本学電気通信研究所菊池研究室の方々に感謝します。

文 献

- 1) S. E. Harris and R. W. Wallace: J. Opt. Soc. Amer. **59**, 744 (1969).
- 2) S. E. Harris and S. T. K. Nieh, and D. K. Winslow: Appl. Phys. Letters **15**, 325 (1969).
- 3) S. E. Harris and S. T. K. Nieh, and R. S. Feigelson: Appl. Phys. Letters **17**, 223 (1970).
- 4) 屋野, 渡部: 第20回応用物理学学会講演予稿集, 28 p-E-9 (1973).
- 5) J. A. Kusters, D. A. Wilson, and D. L. Hammond: J. Opt. Soc. Amer. **64**, 454 (1974).
- 6) I. C. Chang: Appl. Phys. Letters **25**, 323 (1974).
- 7) 本間, 山岸, 稲場: 電子通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会資料, OQE 74-7 (974-05).
- 8) T. Yano and A. Watanabe: Appl. Phys. Letters **24**, 256 (1974).
- 9) T. Yano and A. Watanabe: Appl. Phys. Letters **24**, 256 (1974).
- 10) R. W. Dixon: J. Quantum Electronics **QE-3**, 85 (1967).
- 11) 本間, 市村, 稲場: 第19回応用物理学関係連合講演会予稿集, 2p-K-7 (1972).
- 12) 市村, 本間, 稲場: 昭和47年度電子通信学会全国大会, S10-6 (1972).
- 13) 本間, 山岸, 稲場: 昭和47年度電気関係東北支部連合大会, 2E-19 (1972).
- 14) 本間, 山岸, 稲場: 第33回応用物理学学会講演予稿集, 29p-G-2 (1972).
- 15) 菊池, 中鉢, 皆方: 昭和45年日本音響学会講演論文集, 2-4-19 (1970).
- 16) W. Streifer and J. R. Whinnery: Appl. Phys. Letters **17**, 335 (1970).
- 17) D. J. Tayler, S. E. Harris, and S. T. K. Nieh and T. W. Hänsch: Appl. Phys. Letters **19**, 269 (1971).
- 18) L. Kuhn, M. L. Dakss, P. F. Heidrich, and B. A. Scott: Appl. Phys. Letters **17**, 265 (1970).