レーザー応用の基礎技術 (I)

—変調と偏向—

日本電気株式会社中央研究所 太田義徳
斎藤富士郎

1. ま え が き

レーザー光を種々の目的に応用するためには、それに各種の情報を担わせる手段が必要である。光の振幅(強度)、位相、周波数の時間的な変化を制御する光変調の技術と、光ビームの空間的な位置や方向を制御する光偏向の技術とはその基本である。

レーザー光に変調や偏向を施す方法は、構造的にみて、共振器も含めたレーザー光源内部で行う方法と、その外部で行う方法とに分けられよう。前者はすでにこの講座で触れられているので、ここで重複するのを避ける。広帯域ないし高分解能でランダムな変調・偏向の機能を有する素子という観点から、ここでは光源とは独立に外部で変調や偏向を行うことを目的とする素子について述べてみる。

光に変調や偏向を施すには、電波のように直接電気回路によることがむずかしく、光を透過させる媒体の、光に対する誘電率や吸収係数などを変化させることによって実現される。用いられる物理効果は、電気光学効果、音響光学効果、磁気光学効果、フ란ツケルディッシュ効果、機械的な変形や回転など多くのものがある。

これらの効果によって媒体に生ずる屈折率や吸収係数の変化、媒体そのものの変形や変化は、光に回折、屈折、反射、位相の変化、偏光面の変化、干渉、モード結合、吸収、散乱などの効果を与える。

光変調素子、光偏向素子の原理は、上に述べた物理効果と光学現象とを組合せたものといえよう。実用されている変調素子、偏向素子では、電気光学効果、音響光学効果、機械的な変形や変位を使ったものが多い。

これまで数々の優れた光変調・偏向の技術の提案がなされているが、ここでは代表的な変調・偏向技術のいく

つかについて述べる。

2. 光 変 調

光を変調するために利用できる物理効果および光学的な現象には、前述のように各種のものがある。光変調素子が具備すべき一般的な条件は、高感度で広帯域の変調ができること、光損失が少ないこと、信頼性が高く経済的であることなどをあげることができよう。これらの条件を比較的に満たしている素子は、電気光学効果を使った光変調素子と音響光学効果を使った光変調素子である。ここではこれらを中心に述べる。

2.1 電気光学効果を利用した光変調素子^{1)~3)}

感度が高く帯域幅の広い光変調素子として研究開発の進んでいるのは、結晶の電気光学効果を使った光変調器である。印加される電界によって結晶の誘電率(屈折率)が変化する効果をひろく電気光学効果と呼んでいる。印加電界に比例した屈折率の変化を得る効果をポッケルス効果、電界の2乗に比例した屈折率の変化を得る効果をカー効果と呼ぶ。ここではポッケルス効果を使った光変調器について述べる。

電気光学光変調器の原理は基本的には次のようである。結晶に入射した直線偏光の光は、2つの直交する偏光成分に対する屈折率が異なるため、それぞれの位相速度が異なり、結晶の射出面では一般に楕円偏光となる。

電気光学効果を有する結晶に電界を印加すると、電気光学効果によって屈折率が変化する。このため2つの偏光成分間の位相差は電界の強さに応じて変化し楕円の主軸の方向が変化する。入射光の偏光方向と直交または平行の成分のみを透過する検光子を設けておけば、印加する電界の強さに応じた光の振幅の変調が行われる。

このタイプの光変調器は、光に位相の変化ないし偏光度の変化を与える素子である。光の入射方向、偏光、電界印加方向など、用いる結晶の対称性や電気光学定数の大きさによって異なる。

"Laser and Its Applications; 7. Fundamental Techniques of Laser Application" by Yoshinori Ohta and Fujio Saito (Central Research Laboratories, Nippon Electric Co., Ltd. Kawasaki)

図1 LiTaO₃ 電気光学変調器

一例として、もっとも実用的な変調材料のひとつである LiTaO₃ 結晶を使った素子について述べる。基本的な構成を図1に示す。結晶の光学的な主軸を x, y, z とすると、結晶内の屈折率は1つの楕円体で表わされる。

$$\frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1 \quad (1)$$

ここで、 n_o, n_e は常光線、異常光線に対する屈折率である。結晶の c 軸方向に電界 E を印加すると、(1)式の屈折率楕円体は、

$$\frac{x^2 + y^2}{\left(n_o - \frac{1}{2}n_o^3 r_{13} E\right)^2} + \frac{z^2}{\left(n_e - \frac{1}{2}n_e^3 r_{33} E\right)^2} = 1 \quad (2)$$

となる。ここで r_{33}, r_{13} はポッケルス係数である。 x 軸方向に進む光の y, z 軸方向の偏光成分に対する屈折率は、

$$n_y = n_o - \frac{1}{2}n_o^3 r_{13} E, \quad n_z = n_e - \frac{1}{2}n_e^3 r_{33} E$$

となる。このため、それぞれの成分の受ける位相遅れ量が異なり、長さ l の結晶を出射する面での光の位相差 ϕ は、

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{2\pi}{\lambda} l (n_z - n_y) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} l \left[n_e - n_o - \frac{1}{2} (n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13}) E \right] \quad (3) \end{aligned}$$

となる。このため自由空間で合成される光の偏光は楕円偏光となる。入射光の偏光方向を y, z 軸に対して 45° とすると、出射面でこれに平行および垂直な成分の振幅は、

$$\begin{aligned} \cos \frac{\pi l}{\lambda} \left[n_e - n_o + \frac{1}{2} (n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13}) E \right] \\ \sin \frac{2\pi}{\lambda} \left[n_e - n_o + \frac{1}{2} (n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13}) E \right] \quad (4) \end{aligned}$$

に比例する。結晶の長さを選んで $\pi l (n_e - n_o) / \lambda$ の値を適当にするか、または結晶の前または後に置く波長板で位相変化を与えるかして、光学バイアスを適当に定めることにより、印加電界の変化に対する各成分の振幅の変化、すなわち変調特性を選ぶことができる。たとえば、 $\pi l (n_e - n_o) / \lambda = \pi/4$ となるようにすれば、入射光の偏光方向に垂直な成分の振幅は、

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{2}} \left[1 + \sin \frac{\pi l}{2\lambda} (n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13}) E \right] \\ \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \left[1 + \frac{\pi l}{2\lambda} (n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13}) E \right] \quad (5) \end{aligned}$$

となり、電界にほぼ比例した線形の振幅変調が達成される。

ここに述べた変調素子の構造は、電界印加方向が光の進行方向に対して垂直であり、横電界型光変調器と呼ばれる。これに対して KDP 形結晶ではポッケルス係数が r_{41}, r_{52}, r_{63} のみしかないので、上記の構成をとることはできず、透明電極を光入出面につけるなどして電界印加方向と光の進行方向とが平行な縦効果を利用する。

変調素子の変調感度は、位相差 ϕ を π だけ変化するのに要する電圧で表わされている。LiTaO₃ 変調素子では、

$$V_\pi = \frac{\lambda d}{l} (n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13}) \quad (6)$$

で与えられる。 $d/l=1$ のときの V_π を半波長電界距離積 $[E \cdot l]_{\lambda/2}$ と呼ぶ。縦効果を使う KDP 型結晶では、

$$V_\pi = \frac{\lambda}{2r_{63}n_o^3} \quad (7)$$

であり、得られる位相は結晶の長さに無関係で電圧のみに比例する。

光変調材料の評価は変調感度の大小、変調電力の大小で主に行われている。ひとつの指標となっているのは、 $[E \cdot l]_{\lambda/2}$ 、 $U_\pi = \varepsilon V_\pi^2$ (ε は結晶の誘電率) である。これらの値の低い材料は高感度高効率の材料といえる。LiTaO₃、BaNaNb₂O₁₅、Sr_{0.75}Ba_{0.25}Nb₂O₅、La₂Ti₂O₇ などはずれた変調材料である。

横効果を用いる LiTaO₃ 光変調器では、(3)式に示すように、位相差 ϕ は電界に依存しない自然複屈折項を含む。このため、周囲温度の変化によって複屈折が変化し変調動作が不安定になり、消光比の劣化を来す。これを補償するために、長さの等しい2本の結晶を c 軸を直交させて光の進行方向にならべるとか、長さの等しい2本の結晶の間に半波長板をはさむなどの構成がとられている。

変調感度を高めるには結晶の長さ l を長く、電極間距離 d を短くすればよい。 d/l を減少させると、レーザービームの回折損失を生ずる。ガウスビームが結晶の断面で制限を受けることなく透過するためには、

$$\frac{d^2}{l} \geq \frac{4S^2\lambda}{n\pi} \quad (8)$$

でなければならない。ここで S は安全係数 (safety factor) であり、 λ は光の波長、 n は結晶の屈折率である。通常 $S \geq 3$ にとられている。断面 $0.3 \times 0.3 \text{ mm}^2$ 、結晶長 $12 \sim 15 \text{ mm}$ の LiTaO₃ 結晶を2本、結晶の c 軸を直交

させて温度補償を図った構造の光変調素子では、変調電圧は30～35 V 程度である。

このような光変調器の変調帯域幅は、素子のもつ容量、電極間に挿入する負荷抵抗、リード線の浮遊容量インダクタンスなどで構成される回路の周波数特性でほぼ決まる。100 MHz 程度の帯域幅は比較的容易に得られる。

変調感度を高め、しかも回折損失の制約を逃れる方法として、変調素子の間に集光レンズを挿入し多段化する、光導波形の光変調素子を実現する、などの方法がある。光導波形の光変調素子は、光集積回路の重要な構成要素として、近年盛んに研究が進められている。

誘電体基板表面に、内部より屈折率の高い層を設けると、光は基板内部へ発散することなくエネルギーをほぼその層内に集中させて伝搬する。基板上に能動受動各種の光学素子を形成し、それらの間を光導波路で結合して小型で安定な光学装置を得ようとする光集積回路の概念が提示されてまだ新しい。光集積回路を構成する要素のうち、光制御要素とくに光スイッチ、光変調素子を電気光学効果を用いて実現する試みがなされている。

この光導波形の光変調素子のもつ特長は、前述のように導波光は導波路以外に発散することがないため、回折損失が減少すること、微小の領域のみに電界を印加すればよいと、低い電圧で素子を駆動できることである。また利用できる光学現象としては、位相変化だけでなく、格子による回折、伝搬モード間の変換や結合、モードカットオフなど多くのものが可能である。

図2 光導波形電気光学光変調器

図2にいくつかの例を示す。図2(a)は格子状電極間に電界を印加し、生ずる屈折率の周期的変化によって、電極下を透過する導波光が回折されることを利用した変調素子であり、後述の超音波光変調器、偏向器に類似する。回折光が空間的に分離できるため消光比の高いことが特徴である。印加電圧 10～20 V で 70% 程度の変調効率が得られている。

図2(b)はマイクロ波における方向性結合器に類似した素子である。導波路内または外の屈折率を、媒体のもつ電気光学効果を介して変化させる。これによって導波光の分布が変わり、隣接する導波路へのエネルギーのしみ出し、すなわち導波路間の結合係数を変化させるもの、また電界を印加しない状態では隣接する導波路へ大部分の光のエネルギーが結合するように素子を設計し、電界を印加することによってどちらかの導波路の伝搬定数を変えて結合を解くものなどがあり、変調素子であると同時に光スイッチでもある。変調電圧は後者の方が低い。

図2(c)は屈折率楕円体の回転に寄与するポッケルス係数を介して、光の伝搬モードの TE↔TM の変換を達成し、導体で覆われた導波路中でのモードによる伝搬損失の違いを利用した変調素子である。

このほか各種の形態が考えられており、それぞれの特徴特性がくわしく論じられている⁴⁾。

光導波形の変調器に用いられる材料は、ポッケルス効果が大きく、導波路が形成しやすいこと、良質の材料が得られるなどの条件を備えていることから、LiTaO₃、LiNbO₃、ZnO 薄膜、GaAs などが多く使われる。導波路を形成する方法も、薄膜を成長させる方法、基板中へおよび基板からイオン注入または拡散させる方法など、各種の方法がある。

光導波形の変調器は、従来のバルク形の変調素子にくらべて高い効率と広い帯域幅をもつものとして期待がもたれるが、高い消光比を実現するためには、光の導波特性がすぐれていなければならない。このためには、幾何形状や屈折率の均質性の高い導波路を形成する技術の向上が必要である。また空気中を進む光ビームや光ファイバーとの結合がまだ良好でなく、挿入損が 10 dB 程度と高い。

2.2 音響光学効果を使った光変調素子⁵⁾⁶⁾

固体や液体の媒体中に励起したひずみが媒体の屈折率を変化させる効果は光弾性効果と呼ばれ、よく知られている。高周波のひずみの波動である音波による同様の効果を音響光学効果と呼ぶ。この効果も光を変調する有効な手段である。

音波のつくる屈折率の周期的な変化は光に対して位相格子の役目を果し、入射した光ビームを回折する。回折

された光ビームの強度は、圧電変換子などの電気音響変換子を用いて媒体中に励起される音波の強度によって、また回折角は音波の波長によって変化する。

圧電変換子に印加する高周波正弦信号の振幅や周波数を変化させれば、一定方向に回折される光ビームの強度を変調することができる。このような光変調素子を超音波光変調器という。

音波がつくる屈折率の周期変動が光を回折する現象の理論的な研究は数多くなされている。回折現象は、音波の波長や光に作用する長さによって大きく2つの領域に分けられる。領域を区別するのにパラメーター、

$$Q = K^2 L / nk \quad (9)$$

が用いられる。ここで K は音波の波数、 L は作用長、 n は媒体の屈折率、 k は真空中の光の波数である。 $Q \lesssim 0.3$ 、音波の波長が長く、作用長が短い場合の回折現象の領域は、ラマン・ナース領域といわれ、回折光は高次の次数のものまで現われる (図3(a))。 m 次の回折光の強度 I_m は、

$$I_m = J_m^2 \left(\frac{\xi \sin \chi}{\chi} \right) \quad (10)$$

で与えられる。ここで、

$$\xi = -k \Delta n L / \cos \theta_0, \quad \chi = K L \tan \theta_0 / 2,$$

$$\Delta n = \frac{1}{2} n^3 p s,$$

θ_0 は媒体中での音波波面に対する光ビームの入射角であり、 p は光弾性定数、 s はひずみである。 $Q \geq 4\pi$ をブラッグ領域といい、回折光はほぼ1次回折光のみとなる (図3(b))。このとき1次回折光の強度は、

$$I_1 = \left(\frac{\xi}{2\sigma} \right)^2 \sin^2 \sigma \quad (11)$$

で与えられる。ここで、

$$\sigma^2 = \zeta^2 + \left(\frac{\xi}{2} \right)^2, \quad \zeta = \frac{K L}{2} \frac{\sin \theta_0 - \sin \theta_B}{\cos \theta_0}$$

である。 θ_B は媒体中でのブラッグ角で、

$$\sin \theta_B = \frac{K}{2k} \quad (12)$$

$0.3 < Q < 4\pi$ の領域は2つの領域の遷移領域と呼ばれる。超音波光変調器、偏向器では1次の回折光を利用す

図3 音波による光の回折

る場合が多い。このためブラッグ反射を生起するように素子設計するのが普通である。

変調素子は光の挿入損失が少ないことが必要であり、超音波光変調器ではこのことは回折効率が高いことを意味する。上に示したブラッグ反射での回折光の強度を、媒体の材料定数、音波束の面積で書き表わすと、効率の小さい領域では、

$$I_1 \approx \frac{1}{2} \pi^2 M_2 (\lambda^2 H \cos^2 \theta_0)^{-1} L p_a \quad (13)$$

$$M_2 = p^2 n^6 / \rho v^3 \quad (14)$$

で表わされる。ここで H は音波束の幅、 L は作用長、 p_a は音響パワー、 p, ρ, v はそれぞれ媒体の光弾性定数、密度、音速である。 L, H という素子の設計的な量が同一のもとでは、単位音響パワー当りの回折効率は、媒体の材料定数で表わされる M_2 に比例する。 M_2 を媒体の性能指数 (figure of merit) と呼んでおり、材料選択の指標となっている。

変調用材料としては、変調速度が速いことがもうひとつの重要な性能である。帯域幅と効率の積を評価する性能指数として、 $M_1 = p^2 n^7 / \rho v$ や $M_3 = p^2 n^7 / \rho v^2$ があり、これら3つの指数で音響光学材料の評価がなされている。代表的な音響光学材料を表1に示す。

超音波光変調器の変調帯域ないし変調速度をきめる要因は、ひとつに音波を励起する圧電変換子の帯域特性、そして光学的な制限である。圧電変換子の帯域幅は、用いる圧電結晶の電気機械結合係数、変調媒体と圧電結晶および、それらを音響的に結びつける接着媒体などの音速、密度、厚さなどの音響的な諸条件によって決定される。

光学的な制限は、媒体内での音波の拡がり角と光ビームの拡がり角との関係が左右する。ガウスビーム光の強度をパルス変調する場合を考える。光ビームの径 $2w_0$ が大きく、拡がり角 $\delta\varphi = \lambda/\pi w_0$ が波長 λ の音波の拡がり角 $\delta\theta = \lambda/2L$ より小さいとき、変調光の立上り時間 t_r は、

$$t_r \approx 1.3 w_0 / v \quad (15)$$

で与えられる⁵⁾。ここで v は音速である。

立上り時間を短くするためにビームウエスト w_0 を小さくすると、光ビームの広がり角が音波の広がり角より大きくなり、回折効率が低下し、また回折光はガウス分布を示さなくなる。したがって、音波の拡がり角を増す、すなわち作用長 L を減少させる必要がある。

作用長 L の減少および音波の拡がり角の増大は回折効率の減少を来す。したがって回折効率/立上り時間をひとつの目安とする素子の最適設計が必要である。Maydanによれば最適の $\delta\varphi/\delta\theta$ は1.5付近である⁵⁾。

表 1 音響光学材料

物質	λ (μm)	ρ (gr/cm^3)	音 波			光 波		音響光学性能指数		
			モード	速度 (10^3m/s)	吸収係数 (dB/cm at 1GHz)	n	偏光方向	M_1 ($10^{-7}\text{cm}^2\text{s/g}$)	M_2 ($10^{-18}\text{cm}^2\text{s}^3/\text{g}$)	M_3 ($10^{-12}\text{cm}^2\text{s}^3/\text{g}$)
水	0.633	1.0	long	1.5	2000	1.33	$\perp$	43.6	160	29.1
溶 融 石 英	0.633	2.2	long	5.95	12	1.46	$\perp$	7.89	1.51	1.29
As_2S_3	0.633	3.20	long	2.6	170	2.61	$\parallel$	762	433	293
GaP	0.633	4.13	long (110)	6.32	6.3	3.31	$\parallel$	590	44.6	93.5
GaAs	1.15	5.34	long (110)	5.15	45	1.15	$\parallel$	925	104	179
PbMoO_4	0.633	6.95	long (001)	3.63	15	2.386	$\perp$	113	36.1	31.3
TeO_2	0.633	6.00	long (001)	4.20	15	2.262	$\parallel$	108	36.3	29.8
						2.412	$\parallel$	109	25.6	25.9
						2.260	円偏光	68.6	793	110
Ti_3AsS_4	0.633	6.20	long (001)	2.15	29	2.825	$\parallel$	104.0	800	480
$\text{Sr}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{Nb}_2\text{O}_6$	0.633	5.4	long (001)	5.5	4	2.273	$\parallel$	59.3	8.60	10.8
LiNbO_3	0.633	4.64	long (100)	6.57	0.15	2.20	$\parallel$	66.5	7.0	10.1
LiTaO_3	0.633	7.45	long (001)	6.19	0.1	2.18	$\parallel$	11.4	1.37	1.84

音波の中心周波数 f_0 は、回折光が非回折光(0次光)と分離できること、また能率良く媒体中に励起できることなどからきまる。音波の角度を大きくし、かつエネルギーの発散を防ぐため、図4に示すように円筒波の音波を用いる方法などが考えられている。 As_2S_3 ガラスを媒体とし、 ZnO スパッタ膜を圧電変換子とした構成で、音波周波数 350 MHz、光波長 633 nm の光ビームの立上り時間 6 ns、駆動電気パワー 600 mW、回折効率 70 %を得ている。

2.3 電気光学光変調器と音響光学光変調器の比較

代表的な2つの光変調技術について概観した。これらの素子を大ざっぱに対照すると、表2に示すようになる。

電気光学光変調器の最大の特長は、帯域幅の広いこと

図 4 円筒波音波を使った超音波光変調器

表 2 電気光学-超音波光変調器の対照

	電気光学光変調器	超音波光変調器
周波数帯域	ベースバンド	HF バンド
帯域幅	$\lesssim 1\text{GHz}$	$\lesssim 30\text{MHz}$
駆動電圧(電力)	$\sim 30\text{V}$	$\sim 1\text{Watt}$
光挿入損	数%	10~50%
消光比	$< 20\text{dB}$	$> 30\text{dB}$
安定性	要温度補償	安定
光学調整		容易
光損傷	受けやすい	受けにくい
製作工数	小	大

である。しかしながら消光比の高い素子がなかなか得にくい。このタイプの光変調器は、変調した光を後に電気的に信号処理を行うことのできる光通信装置のような信号伝送装置における広帯域光変調器として用いるのに適している。

一方、音響光学光変調器は、帯域幅は 30 MHz 程度とあまり広くはないが、消光比が高いことから、ファクシミリ、プリンターなど、レーザーを使った各種の記録装置への応用に適するものといえよう。

3. 光 偏 向⁷⁾⁸⁾

光制御技術のうちもうひとつの重要な技術は、光を空間的に制御する技術である。光を同時にかつ空間的に並列に制御する素子が空間変調器であり、時系列的に制御する素子が光偏向器である。空間変調器は光を制御する素子というとらえ方よりも、光学情報を発生する素子という観点でとらえたほうが適当と思われるので、ここでは触れないで置く。

光偏向器の光ビームの進行方向を制御する素子で、各

種の光情報処理機器、記録装置、表示装置に不可欠な素子である。光偏向の技術に利用される物理効果や光学現象は、光変調技術の場合と同様、多種にわたるが、実用性の高いものまた現に実用化されているものは大きく分けて、機械的な回転や変位を利用する方法と、光エレクトロニクス的な物理効果のうち電気光学効果、音響光学効果を用いる方法の2つである。

回転多面鏡、ガルバノミラー、バイモルフ振動鏡などは前者である。デジタル電気光学光偏向器、超音波光偏向器などは後者である。

機械的な偏向器は、一般に大きな偏向角度と多数の偏向点数が得られ、偏向光の利用効率が高いという特長をもち、本質的には走査形の偏向モードで動作する。ランダムな偏向モードで動作させたときには速度は遅く、偏向精度も高くないという欠点をもつ。

電気光学効果や音響光学効果を使った光偏向器は、高速、ランダムな偏向に適する偏向器であるが、機械的な偏向器にくらべて偏向点数は少ない。

現在、これらの偏向器で得られる性能をアクセス時間-偏向点数のダイヤグラムで示すと図5に示すようである⁷⁾。ここでアクセス時間はランダムな偏向モードにおけるアクセス時間を示すものである。機械的な光偏向器の例としては、そのような偏向モードで動作させることができるガルバノミラーを示す。

一般に高速性と高偏向点数とは両立し難いものである。利用の目的にあった光偏向器を選ぶ必要がある。ここではこれらの偏向器の基本的な動作特性と、性能向上の技術について述べる。

3.1 ガルバノミラー

各種の機械的な光偏向器のうちガルバノミラーは、擬似的ではあるが駆動電流波形に応じたランダムな駆動ができる。また取扱いが簡単であることなどから広く利用されている。

角度偏向を行う偏向器に共通して、偏向点数は、

$$N_k = \Phi_m W / r \lambda \quad (16)$$

で与えられる。ここで Φ_m は光の偏向角度、 W はビーム径もしくは反射鏡の開口径である。 λ は光波長、 r は反射鏡を照射するビームの形状や強度分布でできる係数で、ガウスビームでは 1.27、矩形ビームでは 1.0 である。ガルバノミラーを単位階段的に駆動したときの、アクセス時間 τ_a は、

$$\tau_a = 1/2f_0 \quad (17)$$

で与えられる。ここで f_0 はコイルおよびミラーからなる可動部の機械共振周波数である。共振角周波数 ω_0 は、

$$\omega_0^2 = \tau_m / (\theta_p \cdot J)$$

で与えられる。ここで τ_m は最大トルク、 $\theta_p = \Phi_m/4$ はミラーの角度変位、 J は可動部のもつ慣性モーメントである。

共振周波数を高く、角度変位を大きくするためには、トルクは大きく、慣性モーメントは小さくすることが必要である。これらを妨げる多くの制約が存在する。慣性モーメントを小さくするには、ミラーおよびコイルの質量を小さくすればよい。ミラーの開口径を小さくすることなく質量を下げるには、ミラーの厚みを減らし、密度の小さい材質を選べばよいが、厚みを減らすと、大きな加速によってミラーの変形を生じやすくなる。このため、ミラーの面積、加速度、材質の弾性率と厚みとで与えられる変形量から最小の厚みが規定される。ミラーの材質としては密度が小さい堅い材料であるベリリウム、水晶、アルミニウムなどが選ばれる。

可動コイルも同様の制約を受ける。トルクに対しては高い駆動電流を流すことによって生ずる発熱が、また回転角に対しては、磁場の不均質な領域まで回転できない、などの制約がある。これらによって、偏向点数とアクセス時間とはほぼ比例的な関係にある。

3.2 電気光学効果を使った光偏向器

光ビームの偏向に電気光学効果を用いる最大の利点は、偏向速度が速いことである。ここでは代表的な2種の方法についてその原理を示す。

ひとつは結晶の光学的な異方性を利用したデジタル型光偏向器 (DLD) である⁹⁾。光学結晶に入射した光は、エネルギーの伝搬方向が異なる常光線、異常光線に分離する。入射光の偏光方向を切換えることによって、空間的に分離した2つの光路のいずれかに光を導くことができる。

図6(a)はその基本的な構成を示す図である。これを多段に N 段組合わすことによって、 2^N の偏向点を得られる。偏光スイッチは、2.1 節の電気光学光変調器の項で述べた原理で動作する。材料はポッケルス効果の大きい LiTaO_3 、 LiNbO_3 、KDP 結晶などが多く用いられ

図5 アクセス時間-偏向点数ダイヤグラム

(a)

(b)

図 6 デジタル光偏向器

る。偏光分離結晶には屈折率差の大きい方解石 ($n_o - n_e = 0.17$, 光波長; $0.633 \mu\text{m}$) が用いられる。

このタイプの光偏向器は、光の位置偏向を行い、その偏向位置精度の高いことが特長である。多くの偏向点数と高い S/N を得るためには、品質の良い大型の結晶が多数個必要である。偏光スイッチに結晶のポッケルス効果ではなく、ニトロベンゼンのカー効果を用い、2 次元 20 段、 1024×1024 の偏向点数の DLD が試作されている¹¹⁾。

電気光学効果を使った光偏向器のもうひとつの例は、図 7 に示すようなプリズム形の光偏向器である。原理は、電気光学結晶にプリズム状の電極を設け、これに電圧を印加し、光の屈折角を変化させるものである。偏向点数 N は、

$$N = \frac{1}{2} r n^3 \frac{VL}{\epsilon \lambda d} \quad (18)$$

で与えられる。[ここで n は結晶の屈折率、 r はポッケルス係数、 V は印加電圧、 ϵ はビームの形状によって異なる定数である。

偏向点数を増大させるためには、複数個のプリズムを縦続に配置する方法、並列に配置する方法などが試みられている。後者の方法では、印加電圧 $\pm 600 \text{ V}$ (結晶厚 $d = 0.53 \text{ mm}$) で偏向点数 50 を得ている¹²⁾。このプリ

図 7 電気光学プリズム形偏向器

図 8 超音波光偏向器

ズム形光偏向器もアクセス時間は短い、電気光学効果によって得られる屈折率変化は小さいために、高い印加電圧を必要とする。このため駆動電気回路の負担が大きく、現在まだ実用的なものは得られていない。

3.3 超音波光偏向器

2.2 節に述べたように、固体や液体の媒体中に励起された音波は光に対して位相格子の役目をなす。超音波光偏向器は、音波の周波数を変化させて回折する光の角度を制御するもので、構造を図 8 に示す。偏向される角度 $\Delta\theta$ は、

$$\Delta\theta \approx \frac{\Delta f \lambda}{v} \quad (19)$$

ここで、 v は音速、 Δf は偏向器の使用できる周波数幅であり、素子の構造、音波を励起する電気音響変換子の帯域特性によってきまる。偏向点数 N は、

$$N = \frac{1}{r} \frac{D}{v} \Delta f = \frac{1}{r} \tau \Delta f \quad (20)$$

となる。 D は光のビーム径、 r は光の形状や強度分布によって異なる係数である。 τ は光ビームを音波が過ぎるのに要する時間であり、超音波光偏向器のアクセス時間を与える。

高い偏向効率の素子を得るためには、光変調器の項で述べたように、性能指数の高い材料を用いることはいうまでもないが、光偏向器の場合にはさらに音波の減衰係数が小さいことが望ましい。音波の減衰特性は、得られる偏向点数の上限を規定するからである。

超音波光偏向器の帯域幅が、後述する光学的な帯域幅拡大の技術が施こされ、音波を励起する変換子のもつ音響的な帯域幅だけで決まるとするならば、変換子の中心周波数を高めれば、偏向器の帯域幅は増大する。しかしながら音波の減衰係数は結晶において周波数のほぼ 2 乗に比例するため、透過する光ビームの断面内での音波の減衰が増大して、偏向点数は増大しなくなる。帯域幅を増すかわりに開口径を大きくしても偏向点数は増大するが、得られる結晶の大きさでそれは限定される。

偏向点数は、高い周波数では音波の減衰係数によって、低い周波数では取り得る開口の大きさによって限定される。変換子の比帯域を $1/2$ とし、取り得る開口の大きさを 5 cm としたとき、 TeO_2 や PbMoO_4 結晶で得

られる偏向点数の上限は1,000程度、中心周波数は TeO_2 の横波を使った場合で40~50 MHz、縦波の場合、および PbMoO_4 で200 MHz程度という計算例が示されている⁶⁾。

偏向速度の低下を来すことなく多偏向点数を得るには、(20)式に示すように、偏向器の使用できる帯域幅 Δf を広げる技術が必要である。超音波光偏向器の帯域幅は、通常の構成では光学的な帯域制限によってほぼ支配されている。光ビームの入射角度が固定であるため、音波の周波数が変わるとブラッグ条件からずれ、偏向光の強度が低下する。-3dB帯域幅は、

$$\Delta f \approx 1.8nv^2 \cos \theta_0 f_0 \lambda L \quad (12)$$

で与えられる。ここで f_0 は中心周波数、 θ_0 は f_0 におけるブラッグ角、 L は変換子の光透過方向への長さである。

帯域幅を広げる手法の代表的なものは2種類ある。ひとつは音波ビームにステアリングを施す方法であり、他は異方性ブラッグ回折の効果を用いる方法である。

第1の方法は、音響的な工夫によるものである。偏向媒体に音波を励起する変換子を、光の伝搬する方向に沿って位相配列すると、各変換子から発する音波の波面の等位相面は、周波数の変化とともに回転をする。このため、配列が適当であれば、広い周波数にわたってブラッグ条件が満足される。変換子の配列を図9に示すように段階的に行う方法¹³⁾のほか、同一平面上に設ける方法¹⁴⁾もある。後者は偏向効率の低下を来すが、素子の作成は前者にくらべて容易である。

第2の方法は、偏向媒体に用いる結晶の光学的な異方性を巧みに利用している¹⁵⁾。媒体が光学的な異方性をもつ場合の回折現象は特異であり、通常のブラッグ回折とは別に異方性ブラッグ回折と呼ばれる。音波によって回折された光の偏波面が回折光のそれと直交し、それぞれの波数が異なると、図10(a)に示すように、入射光、回折光それに音波の波数ベクトルは、通常の等方体の場合のような2等辺三角形を必ずしも形成しなくても整合し、運動量保存則は満足される。

ブラッグ条件を満たす入射光、回折光の角度は、音波の周波数に対して図10(b)に示すような変化をする。

図9 ステアリングを施された音波による光の回折

図10 異方性ブラッグ回折

入射光の角度の変化は小さく、回折光の角度の変化が大きい周波数領域が生ずる。偏向器を構成した場合、この範囲ではブラッグ条件からのずれが小さい。中心周波数 f_a は、

$$f_a = \frac{v}{\lambda} \sqrt{n_i^2 - n_o^2} \quad (22)$$

で与えられる。ここで n_i 、 n_a は入射光および回折光に対する屈折率である。

通常の結晶では速度の遅い横波を用いてもこの周波数は1 GHz程度と高く、また関与する光弾性定数の値も小さいために偏向効率も低く、実用化しにくかった。

TeO_2 結晶は施光性を有しており、[001]方向に伝搬する2つの円偏光に対する屈折率の差が小さい。また作用させる、[110]方向に伝搬し[110]方向に変化する横波の音速が616 m/sと非常に遅い。このため、 f_a は、0.633 μm の光に対して40 MHz程度と低い。また、音響光学的性能指数も非常に大きい(表1)。

この結晶を使い、このような構成をとった超音波光偏向器は、多数の偏向点が得られ、低い駆動電力で動作する¹⁶⁾。

電気光学効果を使った光変調器の場合と同様に、誘電体の基板の上に超音波光偏向器を構成する試みがなされている。この場合には、音波は体積平面波ではなく、基板表面近くにエネルギーを集中して伝搬する表面波(Rayleigh波)が用いられる。弾性表面波光偏向器のもつ特長を列記する。

光も音波も基板表面にエネルギーを局在させているため、わずかの音波エネルギーで高い回折効率を得られる。弾性表面波は波面の操作が容易であるので、広帯域の偏向が容易である。光の多数の伝搬モード間の回折が利用でき、多様な制御が期待できる。これらの特長をもつ反面、用いる材料に制約があり、偏向光を基板の小さな面積内で分離する技術がまだ充分でないことなどか

ら、まだ実用にまで至っていない。

超音波光偏向器は、比較的速度も速く、ランダムに光を偏向することができる、偏向点数も数百程度得られる、素子が小型で光学的な調整も容易である、1本の信号線でアクセスできる、などの特長をもち、光情報処理機器や表示装置、記録装置などへの利用が行われている。

一方、偏向角度が小さいため、それを拡大する光学系が複雑で大きくなる、広い帯域にわたって高速度に周波数の切換わる駆動回路を必要とする。超音波光偏向器の特性を真に生かすにはこれら周辺技術の向上にも必要である。

4. む す び

ここではレーザー光を利用するために必要な制御素子のうち、光変調器、光偏向器について、その基本的な動作および特性について概説した。ここに述べた光制御の方法のほかにも数多くの提案試みがなされている。とくに半導体材料を用いた光変調技術は、半導体レーザー、集積光回路技術および微細加工技術の進展の目覚ましい昨今、とくに注目され、今後の展開に期待のもたれる分野と思われる。

(参 考 文 献)

- 1) I. P. Kaminow and E. H. Turner: Electro-optic Light Modulator, Proc. IEEE, **54**, 10 (1966) 1374
- 2) 長谷川幸雄, 野村貞夫: レーザ変調と偏向, 信学誌, **51**, 4 (1968) 493
- 3) 内田禎二, 松下茂雄: 光変調, 信学誌, **56**, 4 (1973) 510
- 4) 内田直也: 外部変調器の最近の進歩(I), 昭和 50 年四学会連大, 171
- 5) D. Maydan: Acousto-optic Pulse Modulation, IEEE J., **QE-6**, 1 (1970) 15
- 6) N. Uchida and N. Niizeki: Acoustooptic Deflection Materials and Techniques, Proc. IEEE, **61**, 8(1973) 1073
- 7) J. D. Zook: Light Beam Deflector Performance, Appl. Opt., **13**, 4 (1974) 875
- 8) 阪口光人, 太田義徳: レーザ周辺技術(2)光偏向, 電子展望, **11**, 10 (1974) 36
- 9) W. Kulcke, et al.: A Fast, Digital-Index Light Deflector, IBM J. (1964) 64
- 10) T. C. Lee and J. D. Zook: Light Beam Deflection with Electro-optic Prism, IEEE J., **QE-4**, 7 (1968) 442
- 11) H. Meyer, et al.: Design and Performance of 20-Stage Digital Light Deflector, Appl. Opt., **11**, 8 (1972) 1732
- 12) 二宮佑一: 電気光学プリズムアレイ光偏向器, 量エレ研学会, OQE 73-4 (1973)
- 13) A. Korpel, et al.: A Television Display Using Acoustic Deflection and Modulation of Coherent Light, Proc. IEEE, **54**, 10 (1966) 1429
- 14) G. A. Alphonse: Broad-Band Acousto-Optic Deflectors Using Sonic Grating for First-Order Beam Steering, RCA Rev., **33** (1972) 543
- 15) R. W. Dixon: Acoustic Diffraction of Light in Anisotropic Media, IEEE J., **QE-3**, 2 (1967) 85
- 16) A. W. Warnar, et al.: Acousto-optic Light Deflectors Using Optical Activity in Paratellurite, J. Appl. Phys., **43**, 11 (1972) 4489

— 今 月 の 表 紙 —

488 形デジタル・テストパターン発生器 株式会社シバソク*

デジタルテストパターンは、全デジタル方式で回路を構成し、モノスコープチューブに変えて、記憶素子(ROM)にパターン情報を記憶し、TV 映像器の調整、および優劣を判定できる標準テストパターン発生器です。

特長は、●パターンひずみがなく(偏向ひずみを含まず)
●S/N が非常に良く ●ドリフトがなく高安定度、そして
●パターンの劣化がありません。

画質評価項目は、①解像度(中央水平、垂直、周辺水平、垂直) ②フォーカス(中央、周辺) ③偏向の直線性
④縦横比 3:4 ⑤シェーディング(TV 画面に現われる比較的広い範囲にわたる明暗のひずみ) ⑥ストリーキング(明るさが突然変化する映像の右ふちから水平に尾を引く現象) ⑦階調、輝度の設定 ⑧インターレース ⑨画面置、オーバースキャン(サイズ)

方式は、488/1=525 ライン SYSTEM-M ●488/2=625 ライン SYSTEM-B・G・I。(指定により製作いたします。)

お問合せは、本社 A E 係へ
* 本社・東京営業所
東京都世田谷区深沢 8-19-13
☎ 03 (703) 5151