

光 波 変 調

大阪大学基礎工学部助教授 末 田 正

1960年 Maiman がルビーレーザーの実験に成功して10年以上経過し、レーザーについて多くの基礎および実用化研究がなされて来た。今日では、紫外から遠赤外にわたって、多数の波長においてレーザー発振が可能であり、数 kW の連続出力を示すものも現われている。一方、レーザー応用についても、加工、通信、計測、情報処理等に多くの提案がなされ、そのいくつかは実用化され成果を収めている。しかし、現在の所、レーザー光の潜在能力を十分利用しているとは言えない。たとえば、光波通信は広い周波数帯域幅を取れ、大容量通信の可能性を持つことが特長であるが、現在実用化段階にあると考えられる帯域幅は数百 MHz に過ぎない。高度のレーザー応用を実現するには、関連技術を含めて、今後待つ所が大きい。

さて、レーザー応用においては、レーザーから得られるコヒーレント光ビームの強度、位相、進行方向等を意図に応じて電氣的に変えることがしばしば要求される。たとえば、光波通信における強度および位相変調、光メモリ、光ディスプレイにおける変調および偏向等がその例である。このように、光波変調は、レーザー応用における周辺技術の一つとして重要な役割を演じている。ここでは、光波変調とその応用について、最近の事情を含めて述べてみよう。

光変調の歴史は古く、レーザーの発明よりかなり以前から、KDP による強度変調器が用いられていた。しかし、レーザー以後、強力なコヒーレント光を変調するというこれまでと違った観点から見直され、新しい材料、新しい構成法の研究が進められて来た。その意味で、本文では、光変調に代って、光波変調という表現を用いている。

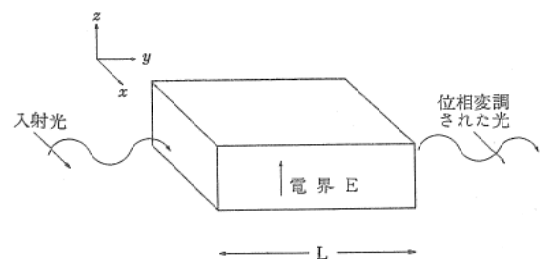
光波変調の原理

物質に強い電界、磁界、音場等を印加すると、その物質の光学的性質、たとえば、吸収係数、屈折率等が変化する。これらの現象は、広義の電気、磁気、あるいは音響光学効果と呼ばれ、原理的には、いずれも光波変調に利用できる。ここでは、これらの内、印加電界に比例して結晶の屈折率が変わる効果、いわゆるポッケルス効果、について、LiTaO₃ を例にとって説明する。

LiTaO₃ は、3 m 対称の異方性結晶で、z 軸 (c 軸) 方向に電界 E を印加すると、主屈折率 (x, y, z 方向の直線偏光に対する屈折率) は、

$$\left. \begin{aligned} n_x &= n_y = n_o + n_1 E \\ n_z &= n_e + n_2 E \end{aligned} \right\} (1)$$

の形で変化する。図1に示すように、 y 方向に進行する光波の場合、 x 方向の偏光成分に対しては屈折率が n_x となり、長さ L の結晶を通過すると $(2\pi/\lambda_0)n_x L$ の位相変化を受ける。同様に、 z 方向の偏光成分は、 $(2\pi/\lambda_0)n_z L$ の位相変化を受ける。式(1)にも表わしたように、これらの位相変化量には電界 E に比例する部分を含んでいる。したがって、入射光として、 x または z 方向に直線偏光した光波を用い、 E として信号電界を加えると光位相変調が行なわれる。

図1 LiTaO₃ のポッケルス効果

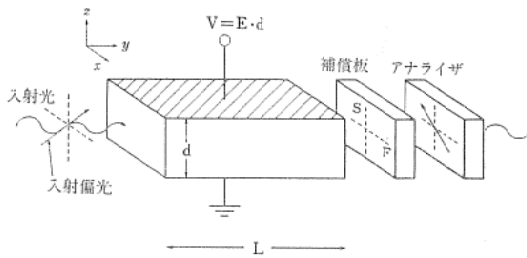


図2 LiTaO₃による光波強度変調

図2に示すように、 x および z 方向に対し 45° の方向に直線偏光した光波を入射させると、結晶中では、 x および z 偏光に分れて進行する。結晶通過後、両偏光の間には、

$$\begin{aligned} \theta &= (2\pi/\lambda_0)(n_x - n_z)L \\ &= (2\pi/\lambda_0)(n_0 - n_z)L + (2\pi/\lambda_0)(n_1 - n_2)EL \end{aligned} \quad (2)$$

の位相差（いわゆるリターデーションに相当）を生じ、出力光は、一般には楕円偏光となり、しかも偏光状態が印加電界に応じて変化する。

式(2)のはじめの項は自然複屈折によるもので、印加電界には無関係である。あとの項は電界によって生じたもので、誘導複屈折による項と言われる。結晶の出力側に入射直線偏光と直交するように偏光器（いわゆるアナライザ）を置くと、出力光の強度 I は、

$$I = I_0 \sin^2(\theta/2) \quad (3)$$

となる。ここで、 I_0 は入射光強度である。図3はこの関係を示したもので、 θ が 2π の整数倍のとき出力光は零、 π の奇数倍のとき最大となる。 θ は式(2)により電界に応じて変化し、これに従って出力光強度も変化し、強度変調が得られる。変調特性は、図3(a)(b)にも示されるようにバイアス点によって異なる。(a)の場合には電界印加時のみ出力光が得られるので、光波のオ

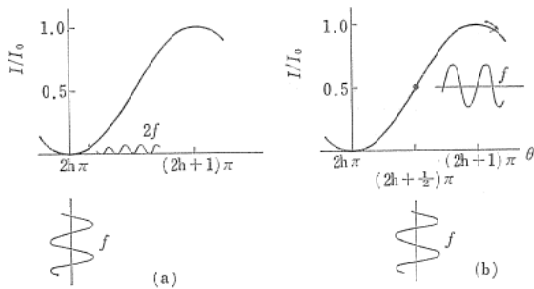


図3 光強度変調特性

ン・オフ、光波 PCM 通信系等に利用される。(b)の場合、直線変調に利用され、比較的小信号で強度変調を行なえる。バイアス点は、自然複屈折による項に、四分の一波長板、補償板、直流電圧等を加えて所期の値に合わせる。しかし、いずれの場合にも、 π に比べて充分せまい範囲に安定化する必要がある。たとえば(a)の場合、消光比 (I_0 と洩れ光強度との比)を20 dBに保つには、 $\pm\pi/16$ の安定度が要求される。

出力光強度が零から最大値になるには、 θ に π だけの变化が必要となる。これに相当する $E \cdot L$ 積(式(2)参照)を、半波長電界距離積と呼び、材料の電気光学効果を表わすのにしばしば用いられる。LiTaO₃では、 $\lambda_0 = 6328 \text{ \AA}$ のとき、この値は2700Vとなる。図2から分るように、半波長電圧は、上の値に d/L を掛けたものとなる。たとえば、 $0.25 \times 0.25 \times 10 \text{ mm}^3$ のLiTaO₃棒を考えると、 $d/L = 1/40$ 。したがって、半波長電圧は $2700 \times (1/40) = 68 \text{ (V)}$ となる。図3(a)の場合には68Vのパルス電圧により、(b)の場合には、実効値 $68 \div 2\sqrt{2} = 24 \text{ (V)}$ の交流電圧により100%強度変調の得られることが分る。

電気光学結晶

光波変調に用いられる結晶に対して一般的に要求されることは、光波および変調波に対し低損失であること、強い電気光学効果を示すこと、良質の結晶が入手でき加工性、大気に対する安定性が良いこと、光学的損傷（強い光を入射させたとき光の透過特性を損うこと）を起し難いこと等である。表1は、二三の電気光学結晶の諸性質を示している。総合的に考えると、現在では、KDP、LiTaO₃、GaAs（赤外）等が代表的であると思われる。

光波変調器の設計に関する問題点

以上のような原理に基づいて光波変調器を設計する際、特に問題となる点について述べてみよう。(変調器の実例については、応用の項参照)

結晶の形状と光ビームの透過 初期の光変調器は、KDP等の縦形（電界方向と光進行方向とが平行）であった。この形式の利点は、開

表1 代表的な電気光学結晶

結 晶	対称性	電界および 光伝搬方向*	半波長電界距離積 ($\lambda=0.633\mu$ の値)	ϵ	$\tan \delta$	透明な波 長域 (μ)	屈 折 率	備 考
KDP	$\bar{4}2m$	$E//z$ 光 $//x'$	17,500 (DC) 21,000 (HF)	21	7.5×10^{-8}	0.2~1.55	$n_o=1.51$ $n_e=1.47$	
LiTaO ₃	3m	$E//z$ 光 $//x$	2,700	43	2×10^{-8} (100 MHz)	0.9~2.9 3.2~4.0	$n_o=2.176$ $n_e=2.180$	可視光域では室 温で光学的損傷 を起し易い。
LiNbO ₃	3m	$E//z$ 光 $//x$	2,830	28		0.35~5	$n_o=2.286$ $n_e=2.200$	
Sr ₂ Ba _{1-x} Nb ₂ O ₆	4mm	$E//z$ 光 $\perp z$	($x=0.75$) 48(P-P) (15 MHz)	3,400 (15 MHz)			$n_o=2.3117$ $n_e=2.2987$	
			($x=0.5$) 580	450			$n_o=2.3123$ $n_e=2.2734$	
Ba ₂ NaNb ₅ O ₁₅	mm2	$E//z$ 光 $//x$	($x=0.25$) 1236	120		0.4~8	$n_o=2.3411$ $n_e=2.2596$	
			1,570	51		0.4~5	$n_1=2.326$ $n_2=2.324$ $n_3=2.221$	
GaAs	$\bar{4}3m$	$E//x'$ 光 $//y'$	91,500 (10.6 μ)	12.5		1~18	$n_o=3.3$	赤外用
CdTe	$\bar{4}3m$	$E//x'$ 光 $//y'$	44,100 (10.6 μ)			1~30	$n_o=2.6$	赤外用

* (x, y, z) は結晶軸, x', y' は x, y を z のまわりに 45° 回転したもの。

口寸法を大きくできること, 光ビームの平行度に対する条件がきびしくないこと, 自然複屈折の問題がないこと等である。しかし, $d/L=1$ であるため, 変調電圧の高いことが欠点である。レーザを光源とする場合, 回折限界までは細くて平行度の良い光ビームを作ることができるので, 現在では, d/L (したがって, 半波長電圧) を小さくできる横形変調器の用いられることが多い。

横形では, d/L の小さい程高感度となるが, 極端に細長い結晶では, コヒーレント光であっても, 回折制限のために, 光ビームが結晶を通過するのが困難になる。レーザからのガウスビームが円柱状の結晶 (直径 d , 長さ L , 屈折率 n) を容易に通過するためには,

$$d^2/L = S^2 4 \lambda_0 / n\pi \quad (4)$$

程度にする必要がある¹⁾。ここで, λ_0 は光の波長, S は安全因子で通常 $3 \sim 6$ にとられる。たとえば, LiTaO₃ ($n=2.2$) の場合, $\lambda_0=0.633 \mu$, $L=10 \text{ mm}$, $S=5$ として, $d=0.3 \text{ mm}$ となる。これより細長くすると, レンズ系等を用いても, 光ビームを通すことが困難となる。

集中形と進行波形 結晶中の電界が場所に依

らず同位相で, 電気回路的にはコンデンサと考えるとよい場合を集中形と呼んでいる。小形で構造が簡単なので, 現在実用されているものの大部分はこの形式である。しかし, 光波が結晶を走行する時間が変調波の周期に比べて無視できなくなると変調度が低下する。また, 電気回路的に見るとコンデンサであるため, 本質的に周波数特性を持ち広帯域動作には不利である。

進行波形では, 結晶を伝送線路の一部として使用し, 光波と共に変調波も結晶中を進行させ, 上のような欠点を除いている。しかし, 一般に, 結晶中におけるマイクロ波の速度は, 光波の速度に比べてかなり小さい (たとえば KDP の場合, 約 $1/3$) ため, 結晶の各部分における変調が相加的に働くためには, 何等かの対策が必要となる (いわゆる, 位相整合, 速度整合)。

変調電力 集中形式では, 変調周波数帯域を広くするため, 結晶を含むコンデンサに抵抗 (場合によってはインダクタンスも) を並列に加えている。これから, 一定の変調度に対する変調電力は帯域幅に比例することが示される。実際にも, 変調電力は, 変調度を指定した上で, 単位帯域幅当りの変調電力として表わされることが多い。LiTaO₃ を用いたものの一例で

は、30%の直線変調に対し 18 mW/MHz の電力を必要としている。

進行波形式の場合、変調電力は帯域幅には無関係に決まる。したがって、広帯域のもの程、単位帯域幅当りの電力は少なくてすむ。1 GHz 程度の帯域を持つ場合には、KDP のようなポッケルス効果の小さい結晶を用いたものでも 10 mW/MHz 程度の値が得られている。したがって、GHz 程度以上の帯域を考える場合には、進行波形の方が変調電力の点では有利になる。

自然複屈折の温度変化 式(2)の第1項は、電界が印加されなくても生ずる項で、自然複屈折 ($n_o - n_e$) に起因している。現在実用的と考えられている電気光学結晶のほとんどは(ただし、赤外用を除く)異方性結晶なので、この問題は LiTaO₃ だけに限るものではない。周囲温度の変化、結晶および電極における変調電力損失等により結晶の温度が変化すると、結晶長や屈折率がそれに従って変化するため、式(2)の第1項が変化し、バイアス点の変動して動作が不安定となる。LiTaO₃ の場合、 $(n_o - n_e)L$ の温度変化量は、単位長当り $4.7 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ である。 $L=20 \text{ mm}$, $\lambda_0=0.633 \mu$ とすれば、動作点の変動を $\pi/8$ に抑えるには 0.04°C のきびしい温度制御が必要となる。

自然複屈折の温度変化を補償するため、結晶を2分割し、光学軸(\approx 軸)方向を直交させる方法、およびその変形がある。しかし、これらの方法では、2個の結晶の長さの差、温度の差、結晶軸のアラインメント誤差等のため完全な補償は困難であり、温度制御等を併用することが多い。これに対し、最近、1個の結晶を用い反射形にすることにより自然複屈折を完全に打消す偏光回転反射法が提案されている³⁾。

光波変調器の高性能化

光波変調器としては、できるだけ少ない変調電力で、広帯域の変調を、安定に行なえるものが望ましい。すなわち、高能率化、広帯域化、安定化等が性能向上の題目となる。安定化は、主として自然複屈折の変動に関連したものであり、対策としては、すでに述べたように、精密

に温度を制御する方法、結晶を2分割する方法、偏光回転反射法、フィードバック法等が考えられる。

単純な集中形変調器では、電気回路的に変調電力は帯域幅に比例し、高能率化と広帯域化とは矛盾する要求となる。そこで、単位帯域幅当りの変調電力を小さくするには、

- (1) 新しい電気光学結晶を用いる。
- (2) 進行波形式にする(ただし、GHz 程度以上の帯域の場合)。
- (3) 最適の光波進行方向および電界印加方向を見出す⁴⁾。(従来用いられている方向は解析容易なものも多く、必ずしも最適ではない)。
- (4) 新しい変調器構成法を用いる。

等の方法が考えられる。(4)の内、もっとも簡単なものは反射形であり、実効長、したがってエネルギーを2倍にすることができる。図4に示す応用例では反射形を用いている。また、進行波形式の場合にも、偏光回転反射法を利用することにより実効長を2倍にすることができる⁵⁾。

さらに、結晶をファブリイ・ペロー干渉計中に挿入し多重反射を利用して高能率化を図る方法もある⁶⁾。この場合、光の透過損失を伴うことがあり、また、干渉計の動作時間によって、変調用電気回路とは別に、いわば光波回路的に変調周波数の帯域制限を受ける。

新しい構成法としては、これらの他、光波遅延路を導入して、式(2)第2項の $n_1 - n_2$ を $n_1 + n_2$ の形にして高能率化を図る方法⁶⁾、偏光回転反射法を集中形式に適用する方法、速度整合の不要な進行波形式等いろいろの方法が提案されている。これらの方法は、光波回路的理由による変調周波数帯域制限を受けるが、オクターブ程度の帯域幅を得るのは困難ではない。

応用

光波変調器の応用としてまず考えられるのは光波通信であろう。レーザの発明後2~3年経って、各地で、レーザ通信のデモンストレーションとして、テレビ映像の伝送実験が行なわれた。このとき用いられた変調器の多くは KDP の縦形であり、変調電圧を下げるために数個の

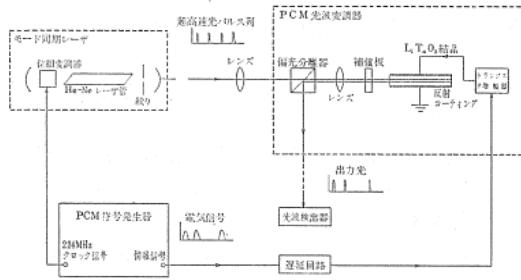


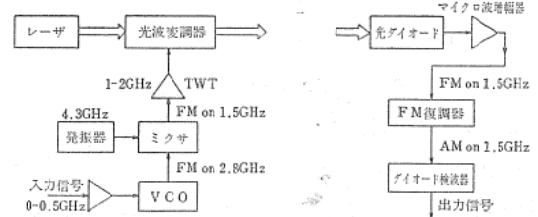
図4 224 Mbit/S 光波 PCM 系

変調器をカスケードに並べたものが多かった。その後、LiNbO₃、LiTaO₃ 等新しい結晶が作られると共に変調器も高度なものを得られるようになった。

図4は、モード同期レーザを利用した光波 PCM 通信系の一例である⁷⁾。レーザ発振器の共振器内に光変調器（この場合位相変調器）を挿入し、いわゆる縦モード間のビート周波数に近い正弦波（周波数 f_p とする）で変調を行なうことによりモード同期が起り、くり返し周波数 f_p の超高速パルス列が得られる。図の例では、He-Ne レーザで、 $f_p=224$ MHz の場合、パルス幅 0.6 nS、パルス間隔 4.46 nS ($1/f_p$) である。パルス幅は、レーザ媒質のスペクトル幅から決まる。

モード同期レーザからの超高速パルス列は、光 PCM 通信系の心臓部である光強度変調器へ導かれ、符号発生器からの情報信号によって、オン(1)、オフ(0)の変調を受け符号化される（1語は9ビットから成っている）。この場合、変調器はゲート回路として働くので、パルス幅までの高速性能は不要で、パルス間隔程度の分解能があればよい。すなわち、周波数帯域としては、 $f_p=224$ MHz 程度でよい。実際には、 $0.25 \times 0.25 \times 10$ mm³ の LiTaO₃ を用い反射形としている。安定化は、 $\pm 0.04^\circ\text{C}$ の精密温度制御によっている。半波長電圧は約30Vで、トランジスタ増幅器によって励振している。

このような光波 PCM 通信系では、パルス幅がパルス間隔に比べて小さいため、モード同期レーザからの光ビームをいくつかに分割し、各光パルス列を適当に遅延させ、別個に PCM 変調を行なって、ふたたび合成し、時分割多重を行なうこともできる。



VCO: Voltage controlled oscillator

図5 広帯域 FM/IM 光波データ伝送系

図5は、広帯域レーザデータ通信系の一例を示している⁸⁾。この場合、信号によって周波数変調 (FM) されたマイクロ波により光波の強度変調を行なう。変調器としては、 $0.5 \times 0.5 \times 5$ mm³ の LiNbO₃ 結晶を、交差指形マイクロ波フィルタの高電界部に挿入したものを用い、出力5Wの進行波管増幅器によって励振し、0.8~2.3 GHz（帯域幅 1.5 GHz）で30%の変調度を得ている。このような広帯域通信系では、変調用のマイクロ波電子回路系も問題になる。図示のものでは、まず、2.8 GHz を中心として信号を作り、4.3 GHz とのビートによって 1.5 GHz を中心とした信号に直し、最後に進行波管を用いて増幅している。

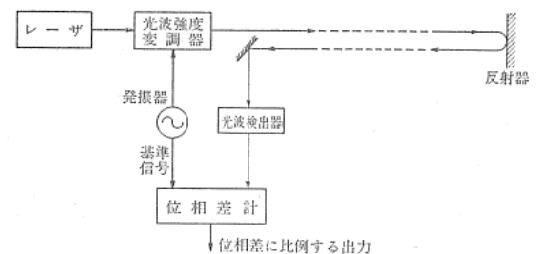


図6 光波強度変調器を利用した測距法の原理

図6は、光波強度変調器を利用したレーザ測距法の動作原理をブロック図によって示したものである。目標地点に反射器を置き、正弦波で強度変調を行なった光を送り、反射光を受けてこれを復調する。復調波は変調波に比べ、光の往復時間に相当するだけ位相が遅れている。空気中の光速（あるいは屈折率）が既知であれば、この位相遅れを測定して距離を求めることができる。位相差を 0.1° まで測定できたとすると、距離分解能は $1/2$ 変調波長の $0.1/360 = 1/3600$ となる。変調周波数を 50 MHz とすれば、この値は 1mm 以下となり、パルス法に比

べてはるかに高分解能であることが分る。ただし、大気の屈折率変動によっても分解能は制限される。Spectra-Physics 社で商品化されたものでは、分解能は $\pm 1\text{mm}$ あるいは（測定距離の） 10^{-6} のいずれか大きい方となっており、測距範囲は、晴天時、夜間 80 km, 昼間 30 km である。なお、この方法では、 $1/2$ 変調波長の整数倍の距離は分らないので、複数個の周波数で変調を行なって距離の絶対値を求める。

文 献

- 1) I. P. Kaminow: Proc. IEEE, **54**, p. 1374, (1966)
- 2) F. S. Chen: Proc. IEEE, **58**, p. 1440, (1970)
- 3) 末田他: 電子通信学会論文誌, **53**, p. 464, (1970)
- 4) K. Hookabe: Electronics Lett., **6**, (1970)
- 5) E. I. Gordon et al: B. S. T. J., **42**, p. 155 (1963)
- 6) K. Goto et al: 6th Internat. Quant. Electron. Conf., 5.11, (1970)
- 7) R. T. Denton et al: Proc. IEEE, **56**, p. 140, (1968)
- 8) H. V. Hance et al: Proc. IEEE, **58**, p. 1714, (1970)