レーザー技術ノート

光変調器の温度特性安定化

井筒雅之*・末田 正*

(1980年6月6日 受理)

Compensation of Temperature Dependence of Birefringence in Light Modulators

Masayuki IZUTSU and Tadasu SUETA

(Received June 6, 1980)

1. まえがき

光変調器を種々の光システムに実用しようとする場合の大きな問題点の一つに、変調器の温度安定性がある。

光変調器には、電気光学効果、音響光学効果等、様々な光学結晶(媒質)の非線形性が用いられる。中でも、電気光学効果を用いた横形構成の光変調器は、比較的低電圧で駆動できること、高速度化、広帯域化が可能であること等から、活発に研究が行なわれている。しかし、このタイプの変調器を実際に利用しようとする場合には、結晶の自然複屈折が温度によって変化するために生じる光学バイアスの変動を、何らかの方法で補償することが不可欠である。

本文では、光変調器の温度特性安定化に焦点を当て、種々の方法を概観すると共に、筆者らが試作した簡便な光変調器の温度特性安定化装置について報告する。

2. 光変調器の温度特性

電気光学効果を用いた光変調器^{1)~3)}では、印加電圧により生じる屈折率の微小変化(誘導複

屈折)によって、光波の位相が変化を受けることを用いる。光強度を変調しようとする場合には、通常、2種の直交する偏光成分の受ける誘導移相量の差を偏光器等を用いて強度変化に変換する。2つの偏光を同時に用いるのであるから、結晶に固有の複屈折(自然複屈折)があれば、両偏光の位相差は定常的な差、すなわちバイアス、が生じることになる。結晶長は通常cmのオーダーであり、光波長に比べて十分大きいので、微小な自然複屈折であっても非常に大きな定常的位相差が現れる。特に問題となるのは、結晶の屈折率が温度によって変化することである。複屈折を示す結晶では、常屈折率と異常屈折率の温度による変化の程度がわずかに違うため、これがバイアス変動の原因となる。

電気光学効果を用いた光変調器の代表的な構成法に縦形と横形とがある(Fig. 1参照)。縦形では、光伝搬の方向と印加電界の方向とが同一であり、これを光学軸方向に選べば(単軸結晶では)自然複屈折は現れない。この例として、KDP, ADP等の(縦形)変調器がある。このような変調器では、原理的に温度による光学バイアスの変動はなく、温度変化に対して安定に

*大阪大学基礎工学部(560 豊中市待兼山町1-1)

Faculty of Engineering Science, Osaka University(Toyonaka, Osaka, 560 Japan)

Fig.1. Configuration of longitudinal (a) and transverse (b) modulators.

動作させることができる。しかし、動作電圧としては数 kV (KDP を用いた $0.63 \mu\text{m}$ 光の変調では、半波長電圧約 9 kV)が必要である。

一方横形構成では、光の伝搬方向と、変調電界方向が垂直であり、電極が光線の進路を遮ぎることがなく有利であると同時に、電極間隔 d を狭くできるので同じ印加電圧に対して高い変調電界が得られ、また、結晶を長くできるので同じ屈折率変化に対して光の位相が大きく変化する。結晶の長さ l と d の比 l/d が大きいほど低い電圧で駆動できることになる。LiNbO₃ を用いる場合、 $l/d=10$ とすれば半波長電圧は約 400 V (波長 $0.63 \mu\text{m}$ において) となる。しかし、結晶長 l を 3 cm とすると、わずかに 0.5°C 以下の温度変化でも、半波長分のバイアス変化が生じる。すなわち出力光強度が最大から最小にまで変化することになる。このことから、横形光変調器は駆動電圧の点で有利であるが、温度による光学バイアスの変動を何らかの方法で補償しなければ、実用は困難と考えられる。

3. 温度特性の安定化法

上述のように、光変調器を安定に動作させるには、自然複屈折の補償が重要である。これに関して、これまでも多くの研究がなされているが、それらを大きく分けると、変調器の構成そのものに工夫をこらすものと、変調器外部に自然複屈折を打消すための素子を加えて安定な動作を得ようとするものの2種に大別することができる。

Fig. 2 は、温度特性を安定化するための変調器構成例である。(a) では変調用結晶を 2 つの部分に等分し、その間に半波長板を挿入する。変調器の前半部分をそれぞれ常および異常光線として透過した光成分は、半波長板によって偏光面が 90° 回転されるので後半部分では各々異常および常光線となる。すなわち、偏波面の直交する 2 つの光波成分は、変調器を通過する間に常、異常の両偏光を半々に経験することになり、結晶の自然複屈折が全体としては打消される。一方、2 分割された結晶の軸方向を反転しておく。あるいは電圧印加の方向を逆に

Fig. 2. Schemes of compensating temperature dependence of the static birefringence.

することによって、変調電界によって生じる誘導複屈折は変調器の前半と後半とで加算されるので変調を掛けることができる。2つの結晶の長さが微少に違う場合には、自然複屈折は完全には打消されず、長さの差に応じた複屈折が残る。しかし、結晶長は通常かなりの精度で一致させることができるので、2分割しない場合に比べて飛躍的に温度安定性が増す。(b)に示す方法の動作原理は(a)とほぼ同じである。半波長板を用いるかわりに、2つの結晶の軸方向を90°回転することによって自然複屈折を打消す。(a),(b)の方法では、2つの結晶を用いるので、長さの不一致、結晶軸の傾き、あるいは変調器の前後における温度差によって安定性が損われる。これを避けようとするものとして、偏光回転反射法(c)がある⁵⁾。図示のように、反射

鏡を用いて光路を折返し、単一の結晶を順逆相方向に2度通過させる。その際、反射板の前に4分の一波長板を入れ反射光の波面を90°回転させる。いわば(a)を半分に折返したものと考えることができる。実験的にも温度変化に対して非常に安定な動作が確かめられている。ただし、このままでは自然複屈折と同時に誘導複屈折も打消してしまうので、反射鏡を結晶端面から離し、反射に要する時間を変調波の周期に同期させる。あるいは進行波動作を用いて反射光に対する変調の掛り具合を小さくする等の対策が必要である。(d)および、(e)は、いわゆるプッシュプル形変調器である⁶⁾。それぞれ、マイケルソン・モーレ、マッハ・ツェンダ形干渉計の2つの分枝に位相変調器を挿入したもので、両変調器で逆位相の変調を掛ける。この場合には、2つの光路長を一致させ、温度変化に対しても同じ変化を示すように構成することによって安定な素子が得られる。しかし、(a),(b)と同様に軸の傾き、温度分布等に注意を払う必要がある。

つぎに、変調器そのものには手を加えず、外部(帰還)回路を用いて温度変化に対する動作安定化を図るものがある。制御の対象として、主なものには、温度⁷⁾、バイアス値がある。いずれの場合にも、変調器出力光の平均値をモニタし、変動があればそれに応じて帰還量を変化させる。帰還回路の応答速度を変調速度に比べ十分遅くすることによって、温度変化によって生じるゆるやかな出力光強度変化を抑えようとするものである。このタイプの具体的な例として、光学バイアス制御による動作安定化を次節に述べる。

4. KDP 波長板を用いた温度特性安定化

上述のように、光変調器の構造を工夫することによって自然複屈折を打消すには、かなり複雑で微妙な素子構成を取ることが必要となる。種々の光システムに光変調器を実際に利用しようとする立場からすると、より簡便に安定な動作を得ることが重要となる。筆者らは、一つの

Fig. 3. Apparatus for the light modulation using KDP compensator.

試みとして、材料として電気光学結晶 (KDP) を用いた電気光学波長板とでもいうべき、一種の光変調器を試作し、これを温度特性安定化に利用している。

Fig. 3 に、光変調回路構成を示す。KDP 波長板を用いている以外は、通常の光変調回路構成と同一である。入力光と出力光の強度を、半透過鏡を用いて検出し、制御回路に入力すると、入出力光強度比とあらかじめ設定した基準値とを比較し、その差に応じて KDP 波長板への印加電圧が調整される。Fig. 4 は、使用した KDP 波長板の構成である。厚さ (電極間隔) 2 mm,

Fig. 4. KDP crystal dimension for the compensator steeped in Si oil.

長さ 30 mm の KDP (x' , y' , z 方向にそれぞれ $30 \times 2 \times 2$ mm) 結晶を用いた。半波長電圧は約 1200 V である。制御回路のブロック図を Fig. 5 に示す。図示のように、アナログ回路とデジタル回路を組合わせて用いた。KDP 波長板へは、DC-DC コンバータからの出力電圧を印加した。0~15 V の入力電圧に対して 0~5000 V の出力電圧が得られる。できるだけ応答速度の速いものということから、0~15 V のステップ入力に対して出力が 5000 V 変化するに要する時間が 50 ms のコンバータを用いた。スルーレートは 100 V/ms ということになるが、実際に使用してみるとこの値より数倍速いようであった。コンバータへの入力電圧はデジタル回路を用いて制御している。10 ビットの D/A コンバータを用いたので、KDP への印加電圧は 1 ビット当り 5 V 程度となる。すなわち 5 V ステップで印加電圧が変化する。半波長電圧が 1200 V であるから、5 V の電圧変化は最大 0.4 % の光強度変化に対応する。さて、制御用のデジタル信号はアップダウンカウンタによって得ている。このカ

Fig. 5. Block diagram of the controller.

カウンタは、U/D 制御信号により1ビットずつカウントを加算あるいは減算するものである。カウントの速度は発振器からのクロックパルス($\sim 2\text{ kHz}$)で制御した。入出力光強度の比と基準値とを比較し、その大小によって U/D 制御信号を変化することによって印加電圧は増加あるいは減少する。応答速度は半波長電圧当り約 0.2 s 程度となる。出力光強度比と基準値とが一致した場合には、カウンタは加算、減算を交互に繰返すことになり、出力電圧は一定値を取る(正確には微少に振動する)。カウンタの初期値は適当に決まるのであるが、コンバータのレンジ以上あるいは以下になると半波長電圧の整数倍(ここでは4倍, 約 4800 V)に対応するビット数だけずらした初期値を自動的に与えるようにした。

この装置を用いて実際に変調器の温度特性安定化に利用した。Fig. 6は、測定した温度特性の例である。装置を動作させると、出力光強度

の安定することがわかる。出力レベルの設定可能な範囲は、このままの構成(Fig. 4)で全出力光強度の5%から95%程度であった。平均出力光強度をさらに小さく(あるいは大きく)取ろうとする場合にはFig. 7に示すような光変調回路構成を取るとよいと思われる。

簡便な光変調器の安定化装置について述べた。

この装置では低周波のセンシング雑音($\sim 2\text{ KHz}$, 最大 -23 dB 程度)を避けることはできないが、実際にこのような装置を用いようとするのは数MHzからGHzオーダの光強度変化を得ようとする場合であり、十分実用できると考えられる。使用した電源の最大出力は 5000 V であり、それに対応する以上の温度変化がある場合には、電圧レンジをはずれないように出力電圧が自動的に修正される。この場合、過剰的な出力光強度の変動が生じる(0.1 秒程度)ことが問題であるが、 $2\sim 3\text{ cm}$ の変調器の動作安定化に使用する場合では、温度変化を $2\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程

Fig. 6. Variation of the output light intensity due to the temperature variation (experimental result).

Fig. 7. Modified apparatus for the light modulation using KDP compensator.

度以下とすればこのような状況はあまり現れない。

5. むすび

光変調器の温度特性安定化について述べた。温度特性安定化のための変調器構成法を概観すると共に、筆者らの試作したKDP波長板とその制御装置について報告した。光変調器を実際に利用する場合の一助になれば幸いである。

最後に、実験に協力頂いた芳賀宏君に深謝します。

参 考 文 献

- 1) I. P. Kaminow: "An introduction to electrooptic devices" Academic Press, N. Y. (1974)
- 2) 末田: レーザー研究, **1** (1973) 83
- 3) 小林, 小西, 末田: レーザー研究, **3** (1975) 167
- 4) C. J. Peters: Proc. IEEE, **53** (1965) 455
- 5) K. Goto, T. Sueta, T. Makimoto: IEEE J. Quantum Electron. **QE-8** (1972) 486
- 6) W. H. Steier: IEEE J. Quantum Electron., **QE-3** (1967) 664
- 7) 安, 張吉, 松尾: 信学論C, **58-C** (1975) 451