

ニューフォーカスアプリケーションノート#2

電気光学変調器の使用法とアプリケーション

Practical Uses and Applications of Electro-Optic Modulators



電気光学振幅変調器および位相変調器により、光ビームの振幅、位相、および偏光状態を電氣的に制御できます。たとえば通信システムでは、これらの変調器は光周波数キャリアに情報を乗せます。レーザー自体を直接変調する場合と異なり、外部変調器はレーザーの線幅および安定性を低下させる効果はありません。測定システムにおいては、振幅変調器をアクチュエータとして使用しレーザービームの強度を一定に維持したり、光学チョッパーとして使用しCWレーザービームにパルス流を発生させたりできます。位相変調器はレーザービームの周波数の安定化や、レーザーをモードロックする用途に使用されます。

変調器には基本的にバルク型変調器と積分変調器の2種類があります。バルク型変調器は複数の個別の非線形光学結晶から成り、通常はラボの作業台または光学テーブル上で使用されます。挿入損失が非常に低く、高出力処理が可能であるという特徴があります。ここで取り上げなかった統合型光変調器（導波路技術を使用して必要な駆動電圧を下げる）は、波長に依存します。バルク型変調器とは異なり、これらの変調器はファイバピグテール付で小型です。

このアプリケーションノートでは電気光学効果について簡単に紹介した後、バルク型変調器の使用法とアプリケーションをご説明します。

電気光学効果

線形電気光学効果とは、外部から適用された電場の規模に比例して、屈折率が変化することです¹。適用した電場が屈折率に与える効果は、光学ビームが結晶内の任意の方向で偏光することから確認できますが²、階テンソル場により表されます²。物理量のベクトル性を無視すると、外部電場が結晶の屈折率に与える効果は、次の式から求められます。

$$\Delta n = n_o^3 r \frac{E}{2}$$

ここで、 Δn は屈折率の変化であり、 n_o は非摂動屈折率、 r は電気光学テンソル場の適切な要素、および E は適用した電場です。電気光学係数が大きい結晶はわずかですが、その場合でさえ、この効果は小さ

いです。たとえば、 10^6 V/m の電場をニオブ酸リチウム結晶に適用した場合、屈折率の変化は約0.01%です。屈折率の変化が1%を超えることはほとんどありません。

バルク型変調器

New Focus™では、ニオブ酸リチウム (LiNbO_3) およびKTP結晶を使用した電気光学振幅変調器および位相変調器を製造しています。この2つの結晶は、電気光学係数が高く、光学および電気特性が優れています。これらの結晶は、散乱損失の少ない大きなサイズのブルに成長し、広い透明窓があります。また、吸湿性がないため、密閉容器に入れる必要がなく、光学テーブル上に無期限に置いておくことができます。

位相変調

位相変調器は、最もシンプルな電気光学変調器です。ここで、電場が結晶の主軸のひとつに沿って適用されます³。他の主軸に沿って偏光された光が屈折率の変化を経験するため、適用した電場に比例して、光路長が変化します。そのため、結晶から出てくる光フィールドの位相は、適用した電場に依存することになります。最も一般的なバルク位相変調器は、図1で示す横軸変調器であり、平行電極の間に配置した電気光学結晶で構成されます。これらの変調器は電極間に大きな電場を発生させる一方、それと同時に長い相互作用長 (l) を提供し、そこで位相シフトが蓄積されます。電圧 (V) を適用することで得られた、電極間の光学位相シフト ($\Delta\phi$) は、次の式で与えられます。

$$\Delta\phi = \frac{\pi n_o^3 r V}{\lambda} \cdot \frac{l}{d}$$

ここで、 λ はフリースペース型の波長であり、 d は電極間隔です。電気光学変調器の利点を示すのによく使われる数値は、**半波長電圧 (V_π)** です。これは、電気光学位相が 180° シフトするために必要な電圧として定義します。

光パワー&
エネルギーメータ

光学ディテクタ

汎用ディテクタ

ハイスピード
ディテクタ&
レシオバ

光モジュレータ/
光学チョップ

ビーム
プロファイラ

微弱光ディテクタ
およびセンサ

ビームポジション
ディテクタ

ディテクション
エレクトロニクス

オートバランス
ディテクタ

テクニカル
ノート

T前述の式に代入すると、横軸位相変調器の次の式ができます。

$$V_{\pi} = \frac{\lambda}{n_0^3 r} \cdot \frac{d}{l}$$

位相変調した光ビームの特性は、その他の位相変調キャリアの波長の位相と完全に同じであるにご注意ください。最も重要なことは、位相変調は周波数変調と分けて考えることはできないということです。周期信号の瞬時周波数は、信号の全体的な位相の時間導関数として定義されます。そのため、位相変調信号には次の式が成り立ちます。

$$2\pi f(t) \equiv \frac{d\phi(t)}{dt} = \omega + \frac{d\phi(t)}{dt}$$

ここで $f(t)$ は瞬時周波数であり、 $\phi(t)$ は信号の大域的位相であり、 ω は光周波数です。位相変調 $\phi(t) = m \sin \Omega t$ とすると（ここで m は位相変調率）、正弦位相変調は結果的に正弦周波数変調となります。周波数は固定ですが、位相差は 90° であり、ピーク間の偏位は $2m\omega$ です。

位相変調フィールド振幅は、個別光周波数 ($\omega \pm k\Omega$) でのみパワーが存在するフーリエ成分のセットとして表すことができます。

ここで k は整数であり、 m は位相変調率（変調深さ）、 $J_k(m)$ は k 次の通常のベッセル関数です。変調率が小さい

$$E_{pm} = E_0 e^{i[\omega t + m \sin \Omega t]}$$

$$\equiv E_0 \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} J_k(m) e^{ik\Omega t} + \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_k(m) e^{-ik\Omega t} \right\} e^{i\omega t}$$

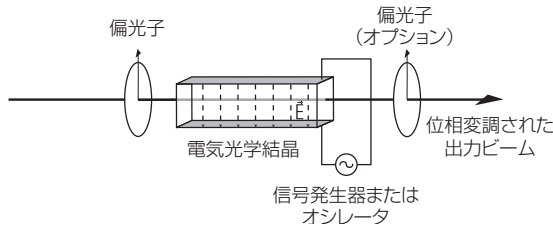


図1：横軸電気光学位相変調器。ここで示す事例では、入射ビームは結晶内の電場の方向に偏光されます。信号は、電圧として電気光学結晶の上部と下部に取り付けられた電極に適用されます。

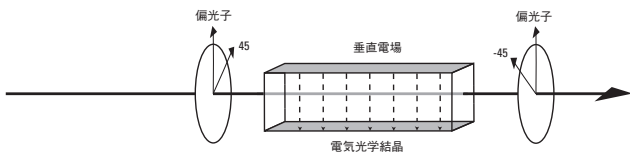


図2：最もシンプルな構成の振幅変調器。2つの交差させた偏光子の間に配置した電気光学結晶から成ります。信号は、電圧として電気光学結晶の上部と下部に適用されます。

($m \ll 1$) 場合、 $k=0$ および $k=1$ の項のみが重要であり、膨張は次の値に減少します。

$$E_{pm} = E_0 [1 + im \sin \Omega t] e^{i\omega t}$$

ここで、光パワーのほとんどはフーリエ成分に存在し、周波数 ω の「キャリア」と呼ばれます。2つの一次サイドバンドに存在する光パワーは少量であり、周波数は $\omega \pm \Omega$ です。この周波数変調特性により、モードロックを行う際に位相変調器を有効活用できるのです⁵。

広帯域変調器は、DCから100 MHzまでの広範な帯域幅で動作できます。共振変調器は、単一の固定周波数で動作し、非常に低い半波長電圧を有します。

振幅変調

電気光学振幅変調器の動作方法について理解するため、まず**電気光学波長板**について考えてみます。結晶の主軸に対して 45° 偏光した光ビームが、電気光学結晶の第三軸に平行に移動すると仮定します。電場を適用していないときは、通常、結晶は任意のリターデーションを発生させるマルチオーダー波長板です。外部の電場を適用すると、電気光学効果により、2つの結晶の方向に沿って屈折率が異なる度合いに変化し、それにより有効な波長板のリターデーションが変化します。

図2に示すシンプルな振幅変調器の配置は、偏光子、ゼロリターデーションにカットした電気光学結晶、およびアナライザで構成されます。入射側の偏光子は、ビームが結晶の主軸に対して 45° の方向に偏光することを保証します。結晶は可変波長板として作用し、適用する電圧が増えるにつれ、出口側の偏光を直線偏光（入射光を 0° 回転）から円偏光へ、直線偏光（入射光を 90° 回転）から円偏光へなどに変化させます。アナライザは偏光回転させた出口側の光の成分のみを透過させますので、それぞれの偏光に対して0、0.5、1、および0.5の合計透過率を発生させます。透過率と適用した電場の関係は、線形というよりも \sin^2 に依存します。線形の振幅変調を得るために、多くの場合これらの変調器に50%の透過率にバイアスをかけ、少ない電圧量を適用して駆動させます。変調器にバイアスをかけるには、2つの方法があります。ひとつは、バイアスTを介してDC電圧を印加する方法、もうひとつはアナライザの前に4分の1波長板を追加することです。4分の1波長板を使用しない場合、50%の透過率を得るようなバイアスを変調器にかけるために必要な電圧は、変調器の4分の1波長の電圧です。これは、横軸位相変調器の4分の1波長の電圧に似た構成です。

このシンプルな配置は、ほとんどの電気光学結晶では実用的ではありません。これらの結晶の複屈折性には温度依存特性があるからです。この温度依存特性により、変調器に温度依存波長板が導入されました。結果的に、非線形媒質 (LiNbO₃ など) を使用する非補償型変調器の透過率には、かなりの熱ドリフトが見られます。この温度感度は、単一結晶の変調器の温度を安定化させるか、2つの同一結晶を使用することで克服することができます。2番目の方法では、図3で示すとおり、2つの同じ長さの結晶を連続して配置しますが、そのときに主軸が互いに対して 90° 回転させます。そうすると、光ビームの偏光成分は、2つの屈折率領域のそれぞれを同じ路長で移動するため、温度に依存しない、ゼロ複屈折構造となります。熱ドリフトは、単一の結晶でできている通常の位相変調器の有効性を限定します。

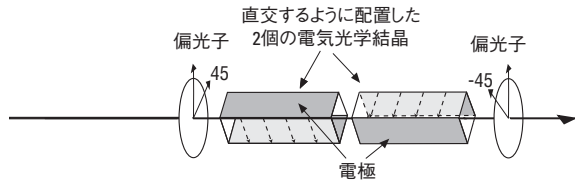


図3：熱バイアスドリフトは、お互いに直交するよう向きに配置した2つの結晶を使用することで、受動的な補償を行うことができます。上記の事例では、各結晶は45°に取り付けられています。従って、入射光の偏光は垂直です。適用した電場は2番目の結晶で反転します。このように、熱複屈折性は補償されますが、望ましい複屈折性は2倍になります。

実用上の制限

これらのデバイスの性能には、複数の実用上の制限があります。主に、LiNbO₃の高出力処理能力が、光屈折損傷として知られる効果により制限されます。この効果が有用な場合もあり（ホログラフィックデータ保存など）、結晶に恒久的な損傷を与えるものではありませんが、変調器の性能を悪化させます。変調器の結晶が光屈折損傷を受けると、そこを通過する光ビームを歪めます⁷。光屈折損傷を避ける最適な方法は、変調器の規定の制限値以下に光強度を維持することです。光屈折効果は波長に大きく依存しますので、これに対応して変調器は波長が長いほど高出力を処理できます。ニューフォーカスでは、酸化マグネシウム (MgO) を添加したLiNbO₃も使用します。この新しい材料は、これまでよりもはるかに優れた出力処理能力を示しています。

もうひとつの制限事項は、電気光学係数がゼロ以外のすべての材料は、圧電物質でもあるという事実によります。つまり、位相変調をもたらすものと同じ電気信号が、振動も発生させるということです。これらの振動が誘発した歪みも、弾性光学効果により屈折率を変化させます。これらの振動は、変調周波数での望ましくない振幅変調またはビーム変位を引き起こすおそれがあります。LiNbO₃の圧電定数は非常に弱く、機械的な共振周波数（代表値は1~10 MHzの間）を回避していれば、結晶の性能には影響を与えません。ニューフォーカスでは、圧電共振付近にチューニングされた単一周波数変調器は出荷前検査で振りが落とされます。

位相変調器を使用するときの3番目の制限は、残留振幅変調です。理想的な位相変調器は、光ビームの強度を変調しません。振幅変調は、位相変調器の後に配置した後方反射光源により誘発されます。後方反射は弱いエタロンをもたらし、そのエタロンがビームに測定可能な振幅変調を導入することで、変調した光ビームの調和性を変化させます。望ましくない振幅変調は、入射光の偏光状態を変調器の主軸に適切に合わせることで最小限に抑えることができます。New Focus™の変調器の場合、主軸は垂直方向です。さらに残留振幅変調を低減するには、変調器の中央下部にある、コリメートビームを使用します。変調器のアライメントを簡単に、短時間で行えるようにするため、ニューフォーカスではモデル 9071チルトアライナーをご用意しています。

広帯域変調器

ニューフォーカスは、直線偏光の光の振幅または位相のいずれかを変調するように設計された変調器を提供しています。DCからおよそ100 MHzまでの広帯域に対応し、比較的低い駆動電圧を有しています。この周波数における電気的な入射光のインピーダンスは、電気光学結晶の静電容量により支配されます。この静電容量の範囲は、モデル 4104振幅変調器の10 pFから、モデル 4002およびモデル 4004位相変調器の30 pFにまでおよびます。信号発生器および周波数合成器の代表的な出力インピーダンスは50-Ωであり、駆動静電容量の負荷には最適化されていません。しかし、30 pFは相当に小さい静電容量ですので、低周波数 (<10 MHz) で信号レベルが小さい場合、ほとんどの信号発生器が適切なドライブとして機能します。静電容量の負荷に最適化した高電圧増幅器は、変調器を効果的に駆動するために使用できます。

高周波数では、変調信号を運ぶ信号と変調器の間のインピーダンスに不整合があると、RF信号の一部が光源に向かって戻るように反射する原因となります⁸。図4に示すとおり、光源と変調器の間に挿入した方向性コプラは、反射したパワーを整合する方の端子に向け直し、結果として信号光源を保護します。位相変調器の100 MHzと振幅変調器の200 MHzを超える駆動周波数では、この終端処理により作られたRC極が駆動振動への応答を20 dB/dec減少させます。

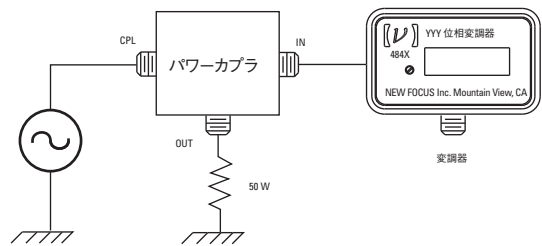


図4：広帯域変調器を使用する場合は、指向性コプラを使用して、変調による後方反射からRF光源を保護します。

変調器の電力散逸量はわずかなので、信号発生器または電力増幅器の最大パワー出力を処理できる終端装置を選ぶことが重要です。たとえば50-Ωシステムのピーク位相偏位 (m) が0.5 ラジアン⁹の光ビームの位相を正弦波的に変調するには、モデル 4002位相変調器の電力が必要です。この高電力には、電力増幅器と特別な終端装置が必要です。

広帯域変調器の長所は、ユーザーがどのような変調周波数も選択でき、正弦波ではない波形による変調も可能にする柔軟性があることです。これが重要なポイントとなるアプリケーションは、光学チョッピング、短パルスモードロックなどがあります。振幅変調器のその他の一般的な使用法は、図5で示すとおり、振幅安定化装置のアクチュエータとして使用することです。ここで、フォトディテクタは、振幅変調器の透過率を調整するためにサーボが使用する、レーザー強度の一部を計測します。このアプリケーションで検討すべきことは、変調器の非線形応答です。入力電圧への変調器の応答の変化スロープは、クローズドループの伝送機能を変化させ、フィードバックの安定性を損なうことにつながります。

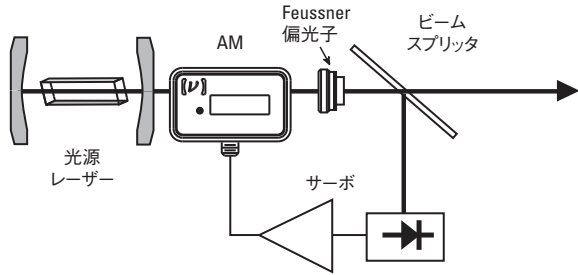


図5: 振幅変調器は、振幅変動を低減させるために使用できます。

共振型変調器

多くのアプリケーションでは、単一の固定周波数で変調する必要があります。特定のアプリケーションに必要な周波数は、数千ヘルツから数十ギガヘルツまで異なります。これらの場合、共振回路を使用することで、真のインピーダンス整合が達成でき、必要な駆動電圧を低減することができます。最もシンプルな種類の共振回路はLCタンクであり、図6に示しています。この回路では、変調結晶および低損失インダクタを使用し、直列の共振型回路を形成します。

共振器では、共振回路はインダクタの損失に値が左右される小型の抵抗器のように見えます。変圧器を使用して、この抵抗を50-Ωの駆動インピーダンスに整合させます。インピーダンスを光源に整合させ、低損失コンポーネントを使用することで、コンデンサ全体の電圧が入力電圧の10倍を超えることも可能です。その結果、広帯域変調器と比較した場合に、半波長電圧を低減することになります。この電圧低減要件は、共振回路のエネルギー保存特性により可能になります。たとえば、モデル 4001の共振型位相変調器を使用し、前回と同じように0.5-ラジアンの変調を発生させる場合、必要な電圧は、次の式で得られます。

$$E_{pm} = E_o [1 + im \sin \Omega t] e^{i\omega t}.$$

$$2\pi f(t) \equiv \frac{d\phi(t)}{dt} = \omega + \frac{d\phi(t)}{dt}$$

集中素子共振器の性能は、2つの要素により制限されます。そのひとつがインダクタのパワー処理能力です。インダクタのコアが飽和することで、光ビームの変調に使用できるRF入力電力が制限されます。また、電力の散逸のほとんどはインダクタで起こり、入力電力が過剰な場合インダクタが焼けて使用できなくなります。もうひとつは、50 MHz以上の周波数で、通常の集中回路素子を作ることが難しいということです。動作波長 (RF) と同等の大きさの回路は効果的なラジエーターですが、そのため分析が非常に困難です。さらに、従来型の有線回路では、表皮効果による放射エネルギー損失が原因で、実行抵抗が高い傾向があります。導電性金属に完全に囲まれた筐体は電場を制限し、電流が流れる広い場所を提供し、同時に放射および高抵抗効果をなくします。このような共振器は自然の共振周波数をも有し、高周波数では共振型回路と置き換えることもできます⁹。ニューフォーカスでは、10 GHzまでの空洞共振器型の単一周波数の変調器をご用意しています。周波数は、電気光学材料自体のRF損失が増えることで限定されています¹⁰。

単一周波数変調器には、多種多様なアプリケーションがあります。音声分野では、これらの変調器はファイバ光学センサや干渉計のアプリケーションとして使用され、また低周波数ロックイン検出スキームにも使用されます。中～高周波数変調器 (250 MHzまで) は、モードロック (AMおよびFM)、レーザー安定化、位相感応検出、およびポンププローブ検出スキームのアプリケーションがあります。10 GHzまでの周波数の変調器は、FM分光法、レーザー安定化、およびレーザー線幅の拡大実験のアプリケーションがあります。

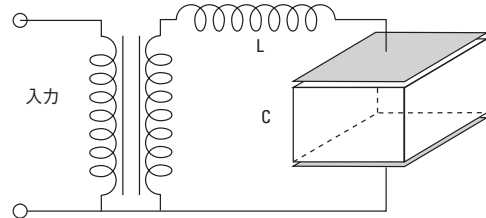


図6: 共振変調器のインピーダンス整合回路の簡略図。

まとめ

バルク電気光学変調器は、幅広いアプリケーションで使用されています。数10ギガヘルツまでの光学信号の振幅または位相を簡単に変調させることができます。バルク型変調器は、パワーが高い、またはスペクトル幅が広いことが要求されるアプリケーションに最適です。これらの変調器の仕組みおよびその取扱い方法を理解することで、最も効果的かつ正確な方法で、測定やシステムの開発を行うことができます。

参考文献

- For further information on the electro-optic effect see A. Yariv, **Optical Electronics**, 3rd edition, Ch. 9, or A. Yariv and P. Yeh, **Optical Waves In Crystals**, New York: John Wiley & Sons, 1984.
- For example, Yariv, pp. 280–283.
- For more background on birefringent crystals, see New Focus™ Application Note 3 on polarization.
- See the analysis in A. B. Carlson, **Communications Systems**, Ch. 6.
- An introduction to laser mode-locking is found in A. Siegman, **Lasers**, Ch. 27.
- Waveplates are described in New Focus Application Note 3 on polarization.
- See T. J. Hall, R. Jaura, L. M. Connors, and P. D. Foote, "The Photorefractive Effect—A Review," in **Prog. Quantum Elect.** 10, pp. 7–146.
- For an introduction to transmission line theory, D. Cheng, **Field and Wave Electromagnetics**, Ch. 9.
- Resonant cavities are discussed in S. Ramo, J.R. Whinnery, and T. Van Duzer, **Fields and Waves in Communication Electronics**, 2nd edition, Ch. 10.
- For more background on high-frequency modulators, ask for a reprint of T. Day, **Laser Focus World**, "Single Frequency Bulk Electro-Optic Modulators."