

2. Acoust-Optics

2-1. Background

音響光学素子は、レーザ装置内などで強度変調あるいはビーム位置の電気的制御のために広く使われています。ある媒体内にレーザ光線と音響波が存在するとき、すべての光学媒体において音響光学効果が起こります。音響波が光学媒体中に入ると、正弦グレーティングのように作用するある屈折率を持った波が生じます。入射レーザ光はこのグレーティングを通過するとき、いくつかのオーダーに回折されます。適切に素子を設計すれば、第1次回折光線に最大効率を持たせることができます。この光線の偏向角度は音響周波数に対して比例するため、従って、高い周波数ほど偏向角度は大きくなります（下式参照）。

$$\theta = \frac{\lambda \cdot f_a}{V_a} \dots\dots\dots(1)$$

=0オーダー光線と1次光線間の角度

=空気中の光波長

f_a=音響波周波数

V_a=音響波速度

図1には、音響波とレーザビームの角度関係を示しています。回折光（偏向光）の強度は、音響波パワー（P_{ac}）と、材質の性能示数（M₂）幾何学的ファクタ（L/H）に比例し、波長の二乗に反比例します（下式参照）。

$$diff. eff. = \eta = \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{M_2 \cdot P_{ac} \cdot L}{2 \cdot H} \right) \right)^{1/2} \dots\dots(2)$$

音響光学素子では、ビームの偏向と強度変調が同時に可能です。加えて、レーザビーム周波数は、音響周波数と同じだけシフトします。この周波数シフトは、ヘテロダインのアプリケーションに使用できます。

2-2. 音響光学材選択

様々な音響光学媒体の選択は、波長（光学透過範囲）偏光、パワー密度などのレーザパラメーターにより決定します。表1はBrimroseで最も使われている媒体の概要です。可視および近赤外領域では、AOMは主にガリウムリン（Brimroseが最初に開発）二酸化テルル、インジウムリン（Brimroseが最初に開発）カルコゲナイトガラス（Brimroseが最初に開発）水晶単結晶（Brimroseが最初に開発）あるいは熔融石英が使用されます。赤外領域では、ゲルマニウムが、変調器としては比較的性能示数が高いということで唯一商品化されています。リチウムナイオベート、インジウムリンおよびガリウムリンは、高周波数（GHz）の信号処理用素子として使用されています。

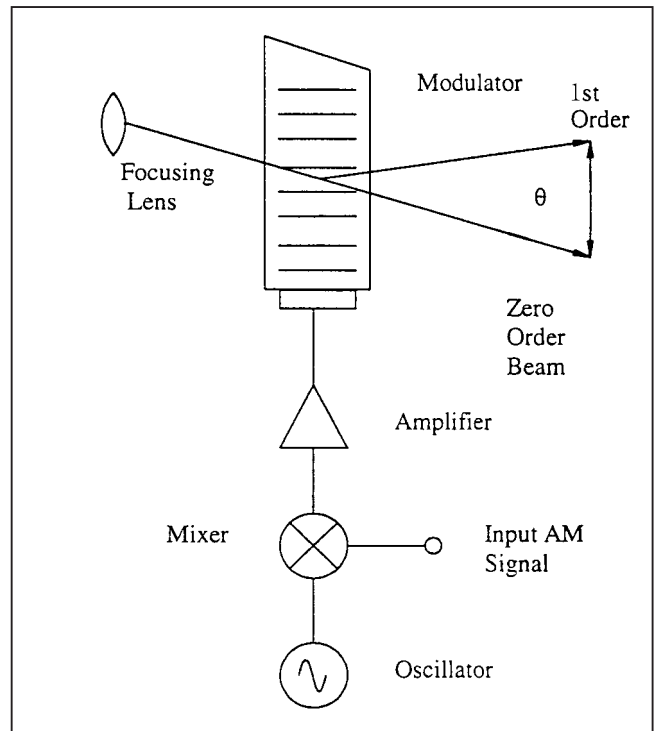


図1. 回折ビームの角度位置

2-3. 音響光学素子の構造

ひとたび音響光学媒体が選ばれると、その媒体は光学研磨され、リチウムナイオベートトランスデューサが最先端技術を用いて金属圧縮接着されます。Brimroseでの金属接着技術は、エポキシ接着よりも非常に優れた音響カップリング性があります。非常に高性能な金属接着剤のみ使用されています。トランスデューサには、1GHzレベルの搬送周波数までが入力できます。

2-4. ARコーティング

AO変調器には多層ブロードバンドあるいは"V" ARコーティングを施すことができます。通常ロス外部共振器で2-3%内部共振器で0.2%です。

2-5. アプリケーション

音響光学変調器はレーザビームをアナログあるいはデジタル変調します。例えばクローズドループ制御されたレーザシステムは、レーザ光出力の制御にAOMを使用しています。光の周波数シフトを起こし、距離や速度を精度よく測定するヘテロダインのアプリケーションもあります。

内部共振器AOMは、多くのアプリケーションがある高出力レーザパルスをつくり出します。CW励起のNd:YAGレーザは、40-200nsecのパルス幅の、10KW以上のパルス出力を出します。繰り返しは50KHzです。キャビティダンパArとNd:YAGレーザは、繰り返しが最大1MHzあります。Arレーザのピークパワー

表1. 音響光学媒体の特徴

材質	波長範囲	偏光	最大CW レーザーパワー (W/mm ²)	屈折率	音響モード	音響速度 (km/sec)	性能指数 x10 ⁻¹⁶ m ² /W	型番
カルコゲナイトガラス	1.0-2.2	ランダム	0.5	2.7	L	2.52	164	AMM-0-0
フリントガラスSF6	0.45-2.0	ランダム	100	1.8	L	3.51	8	FGM-0-0
熔融石英	0.2-4.5	直線	>100	1.46	L	5.96	1.56	FQM-0-0
ガリウムリン	0.59-10.0	直線	5	3.3	L	6.3	44	GPM-0-0
ゲルマニウム	2.0-12.0	直線	2.5	4.0	L	5.5	180	GEM-0-0
インジウムリン	1.0-1.6	直線	5	3.3	L	5.1	80	IPM-0-0
リチウムナイオベート	0.6-4.5	直線	0.5	2.2	L	6.6	7	LNM-0-0
リチウムナイオベート	0.6-4.5	直線	0.5	2.2	S	3.6	15	LNM-0-0
二酸化テルル	0.4-5.0	ランダム	5	2.25	L	0.62	34	TEM-0-0
二酸化テルル	0.4-5.0	円	5	2.25	S	5.5	1000	TEM-0-0

は、15nsecのパルス幅で約100Wです。モードロッカーレーザーは非常に狭いパルスをつくり出せます。最高36psec、80MHzの繰り返しのNd:YAGレーザーが可能です。我々の担当者が、AOMシステムに関する技術的問い合わせに対応します。

2-6. デジタル変調とレーザービームシャッター

AOMは、レーザービームを外部TTL信号により"ON"と"OFF"にシャッターする事に使われます。TTL信号はコンピューター操作が簡単です。on-off信号をサポートするために、AOMの立ち上がり時間はデジタル波形の伝搬に伴わなくてはなりません。AOMの立ち上がり、立ち下がり時間の限界は音響波がビームを伝搬する時間です。立ち上がり時間は下記の通りです。

$$\tau = \frac{DIA}{1.5Va} \dots\dots\dots (3)$$

通常、1mmのレーザービームの時の立ち上がりは約150nsecです。より早い立ち上がり時間を得るために、ビームを絞った伝搬時間を少なくする必要があります。ビームを絞ったAOMのセットアップ図を図1.に示します。入射ビームはコリメートされずに拡がりを持っているため、回折効率率はビーム拡がり角により低くなり、音響ビームの拡がり角は増加します。広帯域AOMについて御興味がある方は、Ref9.を参考にしてください。

標準的なAOMの立ち上がり時間とスポットサイズのプロットを、図2に示します。

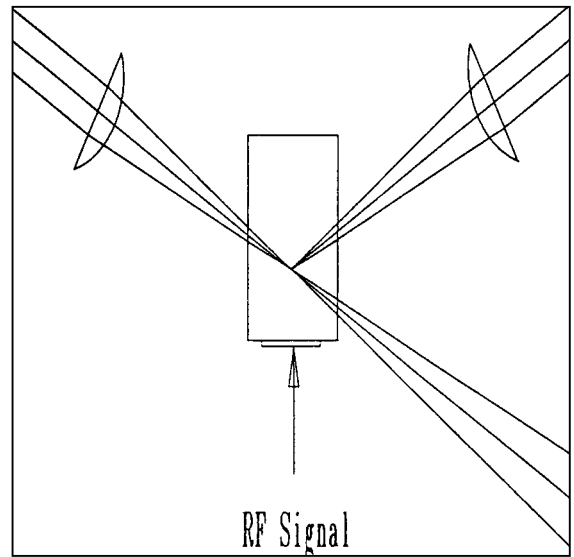


図2. AO変調器の集光幾何学図

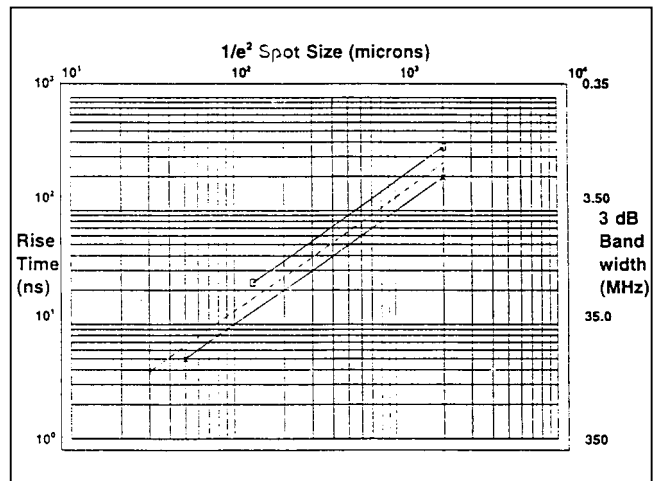


図3. 立ち上がり時間とスポットサイズ
(x 熔融石英、+ 二酸化テルル、 SF6)

2-7. アナログ変調

AO変調器は非線形トランスファ関数を持ちます：従って、アナログ変調システムとして使用する場合は注意が必要です。変換関数を特徴化し、50オームインピーダンスの入力ドライブポート内へ適切な電圧を供給することが最も単純な制御です。正弦変調には、トランスファ関数の線形領域の作動ポイントへバイアスを移動することが必要とされ、多くの場合適切な立ち上がり時間を確保するためにビームを絞る必要があります。

変調トランスファ関数 (MTF) は次式の通りです。

$$MTF = \exp\left[-\left(\frac{f_m}{1.2 \cdot f_0}\right)^2\right]; f_0 = \frac{0.35}{T_r} \dots\dots\dots(4)$$

f_m は変調周波数です。典型的なMTFを図4に示します。ビデオ帯域幅は、MTFが0.5まで下落する周波数範囲 f_m により定義されます。ある f_m での変調コントラスト比は以下の式から算出されます。

$$CR(f_m) = \frac{1 + MTF(f_m)}{1 - MTF(f_m)} \dots\dots\dots(5)$$

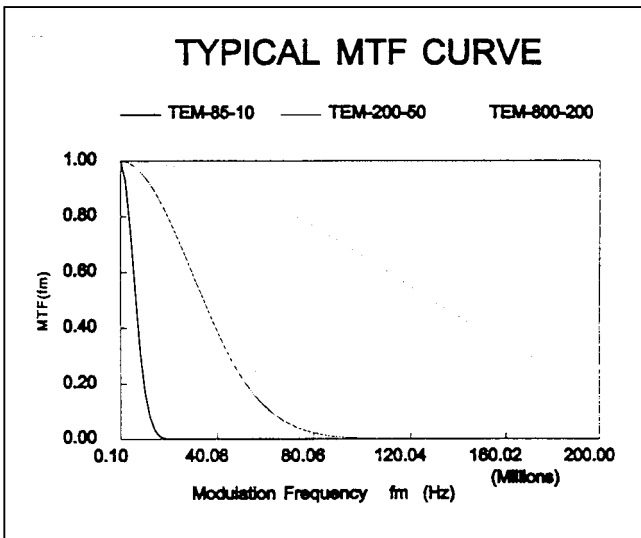


図4. TeO₂の一般的なMTF

2-8. DCコントラスト比

ダイナミックコントラスト比は、変調周波数の増加により減少し、変調器の周波数応答は駆動中に劣化します。

DCコントラスト比は次式で定義されます。

$$CR = \frac{I_{max}}{I_{min}} \dots\dots\dots(6)$$

I_{max} = 測定最大レーザ強度であり、 I_{min} = 1次光に対する測定最小レーザ強度です。DCの場合、 I_{min} とは光の分散と変調器の駆動RFの漏出による光の変調です。最適コントラスト比を得るために I_{max} は最適でなければなりません。通常DCコン

トラスト比は、500~1000の間の値です。

2-9. 変調トランスファ関数

レーザ偏向あるいはスキャニングを全域で行うとき、MTFあるいはコントラスト比を考慮する必要があります。パラメータ“ p ”で表すAOBDで発されるレーザビームの円錐比です。

$$p = \frac{D}{W} \dots\dots\dots(7)$$

W は $1/e^2$ 強度点でのレーザビーム径で、 D は光学アパーチャーです。MTFは、図3に示されています。例えば、 $p=0$ (整った発光) とMTF0.5では、ラインごとの最大サイクル数は $F_{ax} \times T/2$ と等しくなります。 $p=1$ では、強度はアパーチャエンドでの $1/e^2$ まで下がります。ラインごとのサイクル分解能は、 $F_{ax} \times T/2.1$ 程度です。

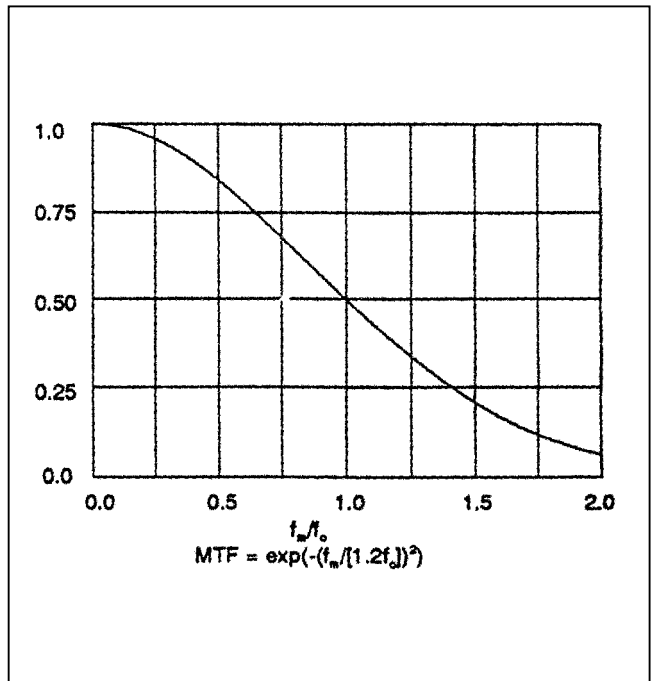


図5. 変調変換機能

2-10. 周波数ドライバーの構造

RFドライバーは通常、入力調整が可能なインターフェイスをもつRF振動子及び振幅変調器、及びAOMを作動するRFアンプから構成されます。カタログ内に、詳しい変調器/ドライバーシステムの駆動の様子が記述されています。

2-11. AOBD光学ドライバーシステム

AOBDとドライバーのシステム図を図4に示しました。AOBDで特徴的なのは、アパーチャサイズ (高さH、幅D) です。設計上、アパーチャ幅は通常高さよりも大きくなります。従って、入力および出力レーザビームは、シリンドリカルレンズを使い

円形から長方形に変換してAODに入力し、出力側も同様に長方形から円形ビームに戻す必要があります。通常、出力面の上に集光した円形ビームが偏向してラインを描くように、出力側にレンズを配置します。

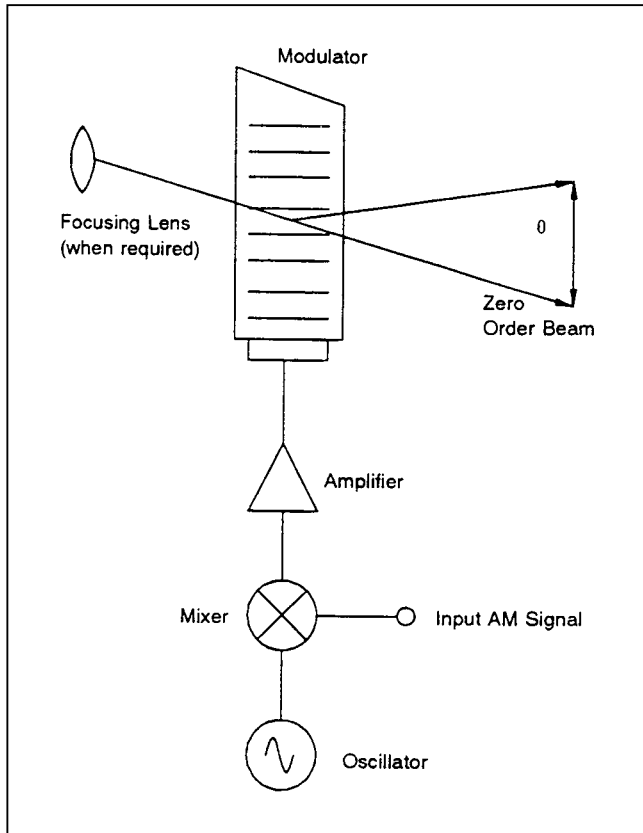


図6. AOレーザスキャナシステム

スキャナー用のドライバーは、アプリケーションにより三種類から選びます。第一にCWレーザスキャナー用は、RF周波数に比例して偏光角が大きくなります。従って、リニア電圧制御オシレーター（VCO）がAOBDのRFアンプに使われます。継続的なラインスキャンのためには、リニアなこぎり波がVCOを駆動し、リニアなRF信号を出力します。この信号がAOBDにラインスキャンを出力させます。二番目のアプリケーションは、ランダムスキャンが必要な場合で、電気的入力通常出力ビームの位置を表すデジタル信号です。D/A回路がデジタル信号をアナログ信号に変換し、リニアVCOを駆動します。この電気入力では、AOBDはレーザビームは出力面上の特定の場所に偏向されます。次の位置に移るためには、最小のフライバック時間（AOBDアパーチャ時間（ D/V_a ）と電気的回復時間の合計）を考慮する必要があります。周波数のリニアリティはきわめて重要で、追加してVCOの小さなノンリニアリティを補正しなければなりません。三番目は信号処理で、入力RF信号はAOBDアンプとして駆動し、他の電気機器は必要ありません。

2-12. AOBD設計の公式

いままでのAOMの章で述べた、材質選択、偏向角度vs 入力周波数および回折効率の式は、AOLS（AOレーザスキャナー）にも適用されます。

2-13. 光スキャン分解能

光学偏向器は、機械的なものから固体型まで全て同じ分解能式を用いて表します。偏向器のアパーチャは 'D' です。通常に拡がるコリメートされたレーザビームの 'd' は、次式に等しいです。

$$\Delta\phi = \frac{\lambda}{D} \dots\dots\dots (8)$$

全スキャン角度が θ で表された場合、分解されるスポット全数は以下です。

$$N = \frac{\theta}{\Delta\phi} = \frac{\theta D}{\lambda} \dots\dots\dots (9)$$

上式は、全ての偏向器で使われます。さて、この式がAOBDに適用されるとAOBDの全スイープ角度 θ は、

$$\theta = \lambda \frac{\Delta f_a}{V_a} \dots\dots\dots (10)$$

=光の波長、 F_a =AOバンド幅そして V_a =音響速度です。
に分解能の式を代入します。

$$N = \Delta F_a \frac{D}{V_a} = \Delta F_a \cdot \Delta T \dots\dots\dots (11)$$

または、分解能ポイントはAOBDのアパーチャ時間に音響バンド幅をかけた値と等しいです。（time bandwidth productsと言われます）NはアパーチャDからの均一した発光により得られます。偏向器からの出力が、スポットに集光された時は、隣り合ったスポットは最初のゼロ強度上の一つのピークです。ふたつのスポットが、40%強度ポイントで重なり合いそのプロファイルは図5のようになります。分解能の全数を下げる要素はいくつかあります。それを下記に示します。

2-14. スキャンフライバック時間

音響波がAOBDアパーチャを満たす時間は有限です。その為、全分解スポット数は下記に減少します。

$$N = \left\{ 1 - \frac{\Delta T}{T + \Delta T} \right\} \cdot \left\{ \Delta T \cdot \frac{\Delta F}{a} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

Tは全リニアFMスキャン時間、 $a=1$ （長方形ビームに対して）あるいは $a=1.34$ （ガウシアンビーム）

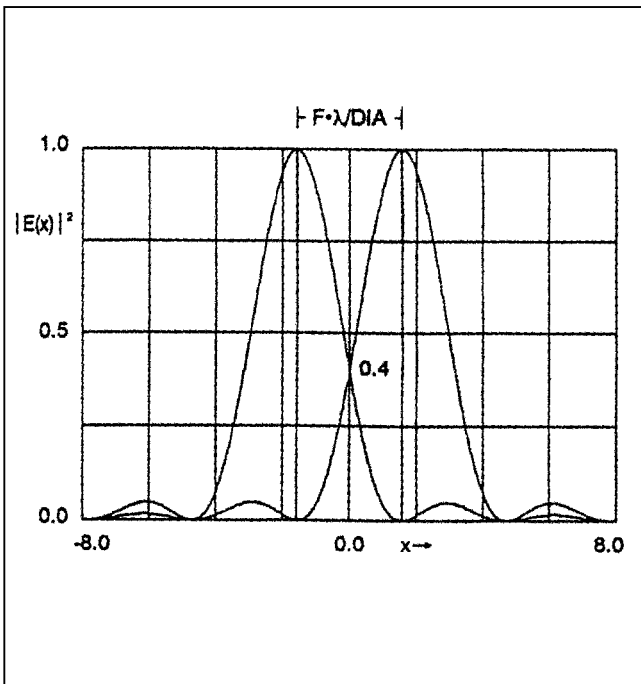


図7. スポットの重なり合いのプロファイル

2-15. シリンドリカルレンズ効果

AOBDのリニアなFM変調は、偏向に加えてレンズ効果も生み出します。焦点距離 (FL) は、以下の通りです。

$$FL = \frac{V_a^2}{\lambda \cdot \frac{df_a}{dt}} \dots\dots\dots (13)$$

df_a/dt はFM傾斜です。AOLSに関するより詳しい分析は、参考文献を参照して下さい。