

## 1-AOの歴史

1922年にブリルアン (Leon Brillouin) は、相互作用媒体内を伝播する音波によって光が回折することを予言しました。

1932年には、デバイとシアーズ (Debye and Sears)、ルーカスとバイコード (Lucas and Biquard) が、この現象を確認するための最初の実験を行いました。

特定の入射角の下で起きる1stオーダーの回折の特殊なケースについても、ブリルアンが予言していましたが、これについては1935年、レイトロー (Rytov) によって確認されました。

ラマンとナス (1937) が、数個の次数を考慮する相互作用の理想的なモデルを作成しました。このモデルは、一つだけの回折オーダーを含む回折を対象として、Phariseau (1956) が開発したものです。

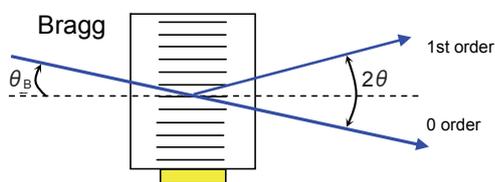
現在までは、音響光学的な相互作用が理想的に存在するのは研究室の実験に限られていました。唯一の用途は、定数と音響係数の計測でした。

レーザの発明により、主として偏向、変調、信号処理の分野では、音響光学とそのアプリケーションが発展しました。結晶成長と高周波圧電トランスデューサの両方における技術的な進歩が、音響光学コンポーネントの改善に貴重なメリットをもたらしました。

## 2-用語集

### Bragg cell ブラッグセル

主として音響光学相互作用 (偏向、変調など) を使用するデバイス。



“Zero” order, “1st” order 0thオーダーと1stオーダー  
0thオーダーは、セルを通過して直接送信されるビームです。1stオーダーは、レーザビームが音波と干渉する時に生成される回折ビームです。

### Bragg angle ブラッグ角 ( $\theta_B$ )

一つの回折オーダーに効率的な回折を与える特定の入射角 (入射ビームと音波の間の角度)。この角度は、波長とRF周波数に依存します。

### Separation angle 分離角 ( $\theta$ )

0thオーダーと1stオーダーの間の角度。

### RF Bandwidth RF帯域幅 ( $\Delta F$ )

一定の方向と可視光の波長が与えられると、そのブラッグ基準に一致する特定のRF周波数が存在します。その一方で、最適レベルに十分に近く、十分な回折が得られる、一定の周波数範囲も存在しています。この一定のRF帯域幅により、例えば、偏向器のスキャン角度やAOTFの回転範囲などが決まります。

### Maximum deflection angle 最大偏向角度 ( $\Delta \theta$ )

RF周波数がRF帯域幅の全体にわたって変化する時、1stビームがこの角度でスキャンを実行します。

### Rise time 立ち上がり時間 (TR)

RF信号内の変化にビームが応答するのにかかる時間。音波がレーザビームを横断するのに要する時間に比例します。この立ち上がり時間は、ビームの幅を狭くすることによって低減することが可能です。

### Modulation bandwidth 変調帯域幅 ( $\Delta F_{mod}$ )

光線の振幅変調が可能な最大周波数。この変調帯域幅は、立ち上がり時間に関連しており、レーザビームの直径を小さくすることによって増大させることができます。

### Efficiency 効率 ( $\eta$ )

“1st”ビーム内に回折させることが可能な、0thビームの割合。

### Extinction ratio 消光比

音波が“オン”と“オフ”を繰り返す時の“1st”ビームにおける光の最大強度と最小強度の間の比率。

### Frequency shift 周波数シフト (F)

回折された光線と入射光線との間の周波数の差。この周波数シフトは音響周波数と等しく、方向に応じてシフトアップまたはシフトダウンさせることが可能です。

### Resolution 分解能 (N)

レイリーの基準による定義にしたがい、偏向器によって生成することができる分解可能な点の数で示します。回折された光線の分離位置の最大数に対応しています。

### RF Power RF電力 (PRF)

ドライバが供給する電力の値。

### Acoustic power 音響出力 (Pa)

圧電トランスデューサによって結晶内で生成される音響出力。電気と機械の変換率が1より小さいため、この値はRF電力より低くなります。

## 3- 物理的な原理 主要方程式

圧電トランスデューサ（適切な結晶が接合されている）に与えられたRF信号は、音波を生成します。この音波が「位相の回折格子」のように作用し、材料の音速とRF信号の周波数に依存した波長で結晶内を移動します。入射するレーザービームはすべてこの格子によって回折され、通常は多くの回折光線が発生します。

### 3-1 相互作用の条件

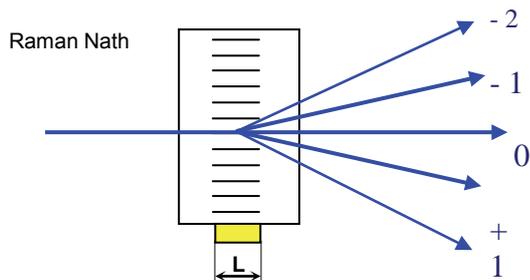
“線質係数、Q”と呼ばれるパラメータが、相互作用の領域を決定します。Qの値は以下の等式から求めます。

$$Q = \frac{2\pi\lambda_0 L}{n\Lambda^2}$$

ここで、 $\lambda_0$ はレーザービームの波長を、 $n$ は結晶の屈折率を、 $L$ はレーザービームが音波の中を移動した距離を、 $\Lambda$ は音響波長をそれぞれ示します。

$Q \ll 1$  : この部分はラマン - ナス領域です。レーザービームは音響ビームに対してほぼ直角な入射光であり、数個の回折オーダー (...-2 -1 0 1 2 3...) があります。強度はベッセル関数によって与えられます。

$Q \gg 1$  : この部分はブラッグ領域です。ある特定の入射角 $\theta_B$ では、たった一つの回折オーダーが生成されます。その他の回折オーダーは相殺的干渉によって消滅します。



中間的な状態では解析的な取り扱い是不可能なため、コンピュータを使用した数値解析を実行する必要があります。

ほとんどの音響光学デバイスはブラッグ領域内で作動していますが、一般的な例外として音響光学方式のロッカーとQスイッチがあります。

### 3-2 波ベクトルの構造

音響光学の相互作用は、波ベクトルを使って記述することができます。運動量保存の法則から以下の等式が得られます。

$$\vec{K}_d = \vec{K}_i + /- \vec{K}$$

$K_i = 2\pi n_i / \lambda_0$  — 入射光線の波ベクトル

$K_d = 2\pi n_i / \lambda_d$  — 回折光線の波ベクトル

$K = 2\pi F/v$  — 音波の波ベクトル

ここでFは、速度vで進んでいる音波の周波数です。 $n_i$ および $n_d$ は、入射光線と回折光線が影響を受ける屈折率です（これらは必ずしも同じではありません）。

エネルギー保存則により： $F_d = F_i + /- F$

つまり、回折ビームの光周波数は、量的には音波の周波数と等しくなります。この「ドップラー偏移」は、 $F \ll F_d$ または $F_i$ なので通常は無視することができますが、ヘテロダイン用途では大きな関心の対象となります。

音響光学コンポーネントは、広範な材料を様々な配置で使用しています。こうした状態を説明するために使用する用語として、縦モード、シェアモード、等方性、異方性などがあります。これらの異なる動作モードは、すべて運動量とエネルギー保存に関して同じ基本原理を共有していますが、非常に異なったパフォーマンスを見せません。

### 3-3 回折光の特性

#### 等方性の相互作用

等方性の相互作用は、縦モードの相互作用と呼ばれることもあります。こうした状態では、音波が結晶内を縦方向に進み、入射ビームと回折ビームに対する屈折率が同じになります。これは大きな対称の状態で、入射角は回折角と一致することが判明しています。この相互作用に付随する偏光に変化はありません。

これらの相互作用は、一般に均一な結晶の中や適切にカットされた複屈折結晶の中で発生します。

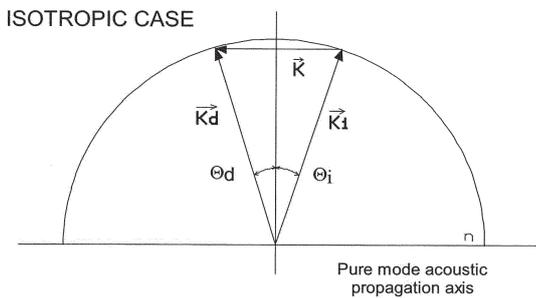
等方性の状態では、下の等式に示すように入射光の角度がブラッグ角 $\theta_B$ と等しくなければなりません。

$$\theta_B = \frac{\lambda F}{2v}$$

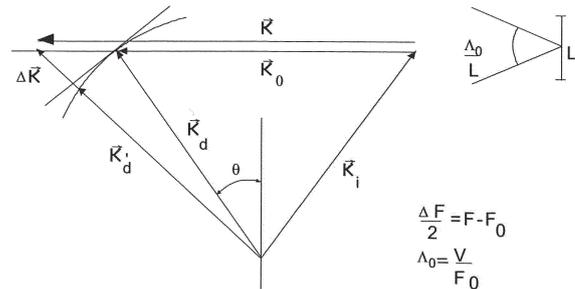
ここで、 $\lambda = \lambda_0/n$ は結晶内における波長、 $v$ は音速、 $F$ はRF周波数を示します。

1stビームと0thビームの間の分離角Qは入射角の2倍であり、したがってブラッグ角の2倍になっています。

$$\theta = \frac{\lambda F}{v}$$



ブラッグ周波数が正しい場合、 $\Delta\phi=0$  ( $F=F_0$ )となり、効率が最大となります。  
 $\Delta\phi$ が増大すると回折効率は減少し、そしてそのまま減少し続けてゼロになります。  
 許容可能な回折効率に下限がある場合は、 $\Delta\phi$ に制限が生じます。これは最大 $\Delta\phi$ を意味しており、そのデバイスのRF帯域幅全体を規定します。  
 RF帯域幅を増大させるため、比率 $\Lambda_0/L$  (音響相違)を増大させることが可能です。  
 RF周波数が増大するにつれて、回折ビームの方向も変化します。これが音響光学偏向器の背後にある基本原理です。



回折光の強度 $I_1$ は、以下のように音響出力 $P$ によって直接制御されます。

$$I_1 = I_0 \sin^2 \sqrt{\eta} \quad \text{with} \quad \eta = \frac{\pi^2}{2\lambda_0^2} M_2 \frac{L}{H} P$$

ここで $I_0$ は入射光の強度、 $M_2$ は結晶の音響光学の性能指数、 $H$ および $L$ は音響ビームの高さと長さをそれぞれ示します。 $\lambda_0$ は入射ビームの波長です。

回折効率 (相対値) は比率 $I_1/I_0$ です。

$$\frac{I_1}{I_0} = \sin^2 \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{P}{P_0}} \quad \text{with} \quad P_0 = \frac{\lambda_0^2}{2M_2} \frac{H}{L}$$

所定の方向では、RF周波数がブラッグ基準に適合するために必要な値と多少違っていても、依然として回折が発生します。ただし回折効率は低下します。この状態を下図に示します。この図では、音波のベクトルである $K$ が、理想的な「ブラッグ波」ベクトル、 $K_0$ より長くなっています。

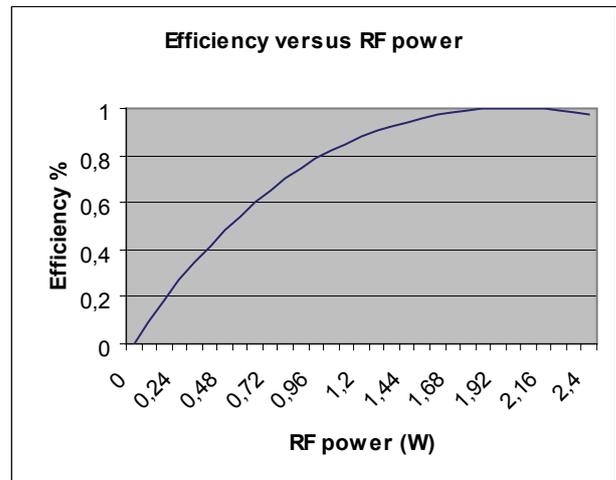
複雑な解析から以下の結果が導かれます。

$$\frac{I_0}{I_1} = \eta \operatorname{sinc}^2 \sqrt{\eta + \frac{\Delta\phi^2}{4}}$$

ここで $\Delta\phi = \Delta K \cdot L$ であり、これは「位相の異時性」と呼ばれます。

等方性の場合には以下の等式が成り立ちます。

$$\Delta\phi = \frac{\pi\lambda}{v} \frac{\Delta F}{2} \frac{L}{\Lambda_0}$$



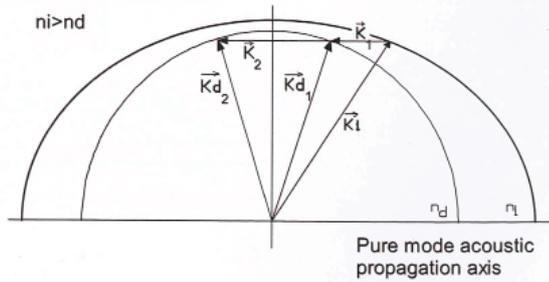
## 異方性相互作用

その一方で、異方性相互作用では、相互作用に付随する偏波が変化するために入射ビームと回折ビームの屈折率は異なります。その様子は次の図で確認できます。ここで、音波ベクトル $K_1$ は入射光および回折波の指標曲線に関連しています ( $K_2$ は非常に異なったRF周波数における同様の相互作用を分かりやすく示したベクトルです)。

同じ非対称性が原因で屈折率に差が発生し、それが原因となってさらに音波が「シェアモード」で進行します。そして二酸化テルルを使用した特殊な例では、これが音速の大幅な低下につながります。

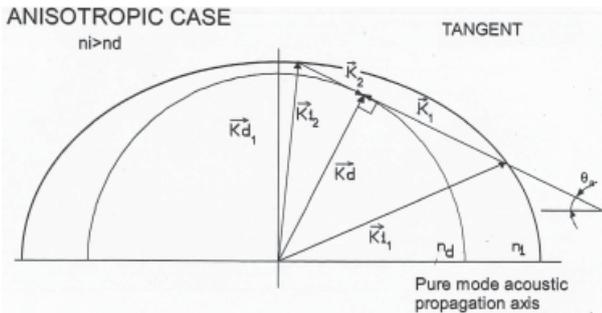
# Theory 理論

## ANISOTROPIC CASE



異方性相互作用は、通常は効率の向上をもたらし、さらに音響と光学の両面で帯域幅が増大します。開口径が大きなデバイスでは、ほぼ汎用的にこの相互作用が使用されています。シェアモードの二酸化テルルでは音速の減少が見られるため、この材料は高分解能の偏向器で使用されます。

次の図では、シェアモードのデバイスから得られる増大した帯域幅を直接的に見ることができます。ここでは、音波のベクトルが回折ビームの指標楕円に対して正接するように、相互作用の構成が選択されています。

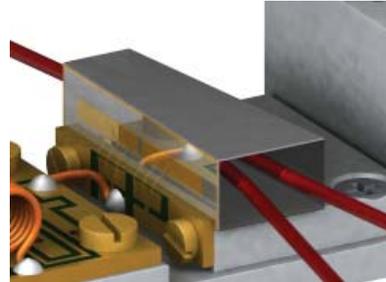


これは、音波ベクトルの長さがかかなり大きく変化するのに、回折ビームの波ベクトルの長さではごく小さな変化しか生じないことを示しています。したがってこの場合、 $\Delta K$ （および  $\Delta \phi$ ）はRF周波数の変化に対してごく鈍感になっています。

シェアモードの相互作用は、解析の対象としてははるかに複雑であり、結晶カット、屈折率、方向などに関する詳細な情報が必要となります。しかし、この相互作用には多くのメリットがあるため、ほとんどの偏向器およびAOTFの全機種がこのシェアモードの相互作用を使用しています。音速が低下すると、これらのデバイスは縦モードのユニットよりもずっと低速になります。一部の利用環境では、これが不利な点と見なされることがあります。

## 5- ブラッグセルの構成

音響相互作用は液体内で観察することができます。実際のデバイスでは、相互作用の媒体として結晶やガラスを使用しており、その際のRF周波数はMHzからGHzの範囲になります。圧電トランスデューサは、RF信号による作動では音波を発生します。



圧電トランスデューサが2つの電極の間に配置されています。上部の電極がトランスデューサの作用限界を決定します。下部の電極は結晶に接着されています。

トランスデューサの厚さは、生成する音響周波数に適合するように選択されます。電極の高さHはアプリケーションのタイプによって異なりますが、レーザービーム径よりも大きくなければなりません。偏向器は、伝播中における結晶内の音響ビームと一直線になるように選択します。

電極の長さLは、必要な帯域幅と周波数が得られるように選択します。

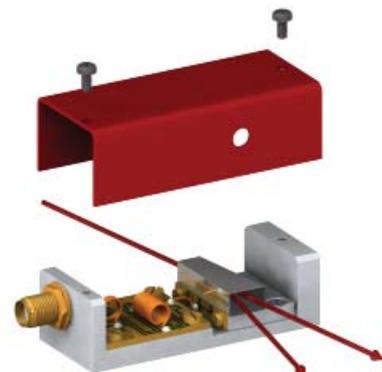
電極の形状はインピーダンス整合によって異なりますが、音波の形状になることもあります。

電極の形状を最適化することにより、音響信号の“アポディゼーション”を取得することができます。

トランスデューサをドライバに連結するため、インピーダンス整合回路が追加されます。実際のところ、この回路はブラッグセルをRF電源のインピーダンス（通常は50オーム）に適合させるために必要なもので、これによって電力の戻り損失を回避します。RF電力の反射損失は、AOデバイスのVSWRによって特徴付けられます。

結晶には一般に、光学表面からの反射を低減するためにARコーティングが施されます。その代わりに、表面を、特定の波長になるようブリュースター角にカットすることも可能です。

様々な材料の使用が可能ですが、それぞれにメリットやデメリットがあります。



## 変調器

このデバイスで光の強度を変調することができます。このタイプのデバイスには、一つだけ回折オーダーを持つブラッグ相互作用領域が使用されます。

立ち上がり時間：

変調器の立ち上がり時間 (TR) は、音波がレーザビーム内を通過する移動時間に比例します。高速変調器の立ち上がり時間は次のように、必ずごく短いものとなります。

$$T_R = \beta \frac{\phi}{V}$$

$\beta$  : レーザビームの形状に依存する定数  
 $\phi$  : ビームの直径  
 $v$  : 音速

$\phi$  は、TRを最小にする唯一のパラメータです。必然的に、ビーム径を小さくして立ち上がり時間を短縮するため、音響ビーム上の入射光に関心が集まります。TEM00ビームの場合、 $\beta$  の値は0.66に等しくなります。

$$T_R = 0.66 \frac{\phi}{V}$$

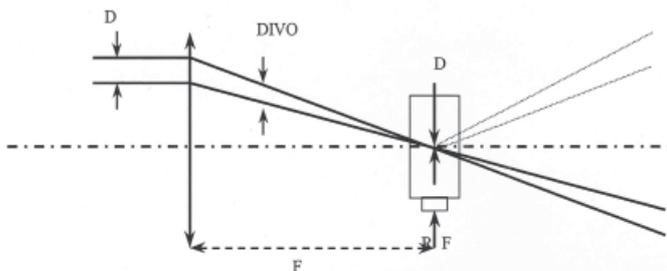
(TEM00レーザビームに有効、直径 $1/e^2$ )

D : レンズを通過する前のビーム径  
 F : レンズの頂点距離

DIVO : 入射レーザビームの発散

$D = \alpha * F * \lambda \phi$  : 結晶内における光線の直径

$\alpha$  : ビームの形状に依存する定数 ( $=4/\pi$ 、TEM00ビームの場合)



## 限界

相互作用を可能にするため、(L) は必ず音響の波長と比較して十分な大きさを維持するようにしてください。

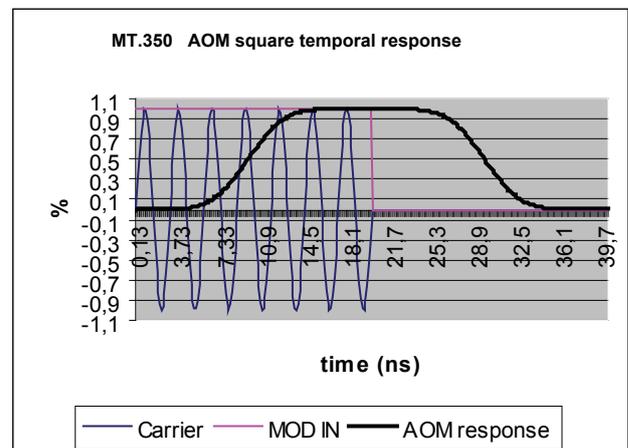
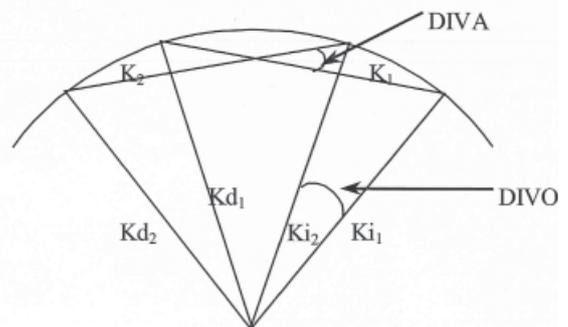
光線には、無視できない程度の発散があります。全帯域幅  $\Delta F$  において相互作用の効率を維持するため、光線のあらゆる角度でブラッグ条件に到達することが必要です。

この目的のため、音響の発散 (DIVA =  $\Lambda/L$ 、ここで  $\Lambda$  は音響波長、また  $L$  は超音波源の寸法) を光の発散 DIVO に対して補償する必要があります。

DIVO >> DIVA の場合：“異時性”が入射の方向に対してごく大きくなり、ブラッグ角から大きく離れるため、相互作用が正しく行われなくなります。したがって光線の回折された部分は楕円になります。

DIVO << DIVA の場合：帯域幅は減少します。音響の発散は光の発散よりわずかに大きいため、帯域幅が維持される限り楕円率は無視することができます。

最後に、変調器の効率は  $\sqrt{P/P_o}$  に関連しており、 $P_o$  は  $L$  に反比例していることに留意してください。結晶による  $P_o$  の最大許容値 (結晶に耐えられる最大電力を考慮に含める) においては、効率の限界に達します。



# MODULATORS 変調器

## コントラスト比（静的および動的）

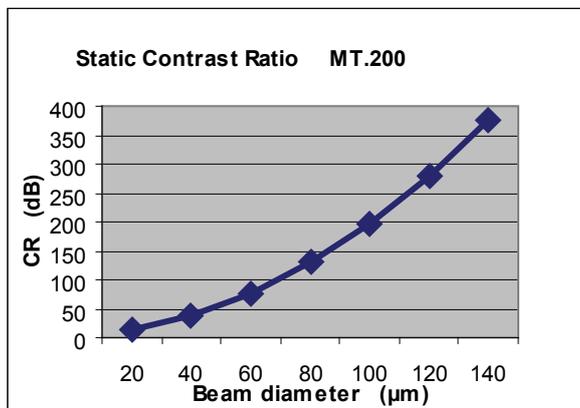
入射レーザービームは、変調器の性能（時間的変化および消光比）に顕著な影響を及ぼします。静的なコントラスト比によって異なる回折オーダー（特に0thと1st）を分離する変調器の能力を測定します。

結果的に、低い方のキャリア周波数と、焦点が良く合っているビームが静的な消光比の限界になります。ガウス分布（TEM00）が最高のパフォーマンスを示し、その後続く部分が検討対象となります。遠視野の1stビーム（角度 $\theta_B$ で発散）は、通常はビームブロックによって0次（ $-\theta_B$ ）から分離されます。このビームブロックは、0までの角度が停止されるように配置されます（ $+2\theta_B$ より高い角度はより高次の分散光を抑制するために停止される可能性があります）。

TEM00の静的なコントラスト比は次のように記述することができます。

$$CR = \int_0^{2\theta_B} I(\theta) d\theta \quad / \quad \int_{-\infty}^{+\infty} I(\theta) d\theta$$

静的なコントラスト比（CR）は、結晶と分散光の欠陥によって物理的に制限されます。



AOMの有限応答時間により、動的なコントラスト比はCRより低下した値になります。

これは、動的オペレーションにおいては、OFF光強度に対するON光強度のコントラスト比の低下につながります。動的なコントラスト比は、変調器の変調帯域に直接関連しています。

## アナログ変調帯域

立ち上がり時間は、変調器の時間的変化を特徴付けるための簡単で便利なツールとして使用できます。しかし、より正確な結果を求めるためには、より完全な特徴付けが有用となる場合もあります。AOMの時間的変化は線形畳み込み積分であり、これはAOMの変調伝達関数（MTF）を取得するためにフーリエ変換を使用して解析することが可能です。ガウス入力光プロファイルに対する音響光学変調器の変調伝達関数は、詳細な計算を示すことなく、次のように記述することができます。

$$MTF(f) = \exp\left(-\frac{f^2}{f_c^2}\right) \quad f_c = \frac{\sqrt{8V}}{\pi\phi}$$

V: 音速 : ビーム径 (1/e<sup>2</sup>)

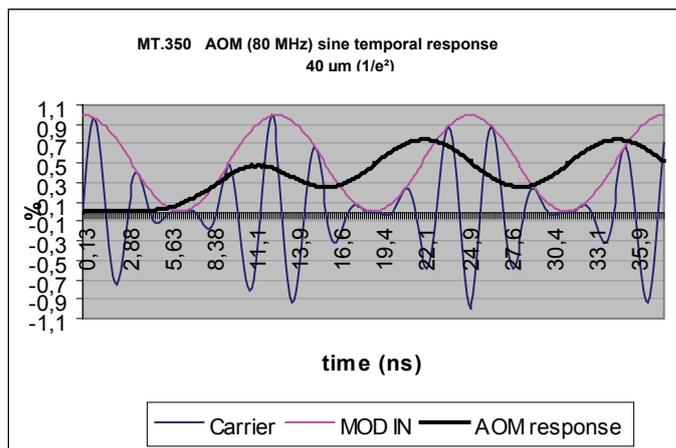
Fc: 1/e<sup>2</sup>応答ロールオフへの周波数

周波数応答ロールオフのもう一つの一般的な手段は、-3dB（50%還元ポイント）におけるアナログ変調帯域です。これは以下の等式のようにfcと関連しています。

$$F_{-3dB} = \sqrt{\log_e 2} f_c$$

ここから、f-3dBと立ち上がり時間の関係を次のように推定できます。

$$F_{-3dB} \approx \frac{0.48}{T_r}$$



最高記録

立ち上がり時間 : 4-8 ns

効率 : 70-85%

用途

- レーザー印刷
- 映像信号の送信
- Noise eater
- ロッカーモード

特殊用途

マルチビーム変調器。変調器の帯域幅に属する数種類の離散周波数（F1、F2-Fn）が変調器に送られます。回折されたビームは、異なる方向に別々に順序づけられません。

垂直方向に設置した（例えば屈折を使用するタイプの）スキャニングシステムを使用することで、その他の用途に加えて、文字を形成することも可能になります（プリンター）。

## 動的分解能 Nd

その周波数の領域に不連続の値が一つも含まれず、連続したスイーピングのみが含まれる場合、動的な分解能を定義する必要があります。その場合、周波数の“勾配”も考慮に含めます。

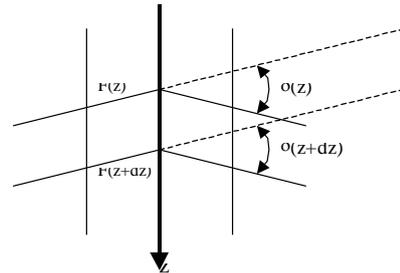
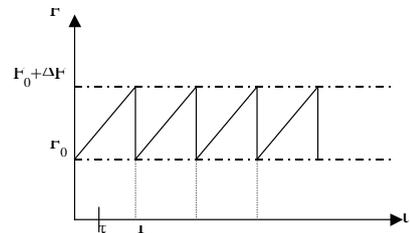
線形周波数のスイーピングの場合：

Z=0（結晶の入口）では、周波数Fは次の等式で表されます。

$$F = F_0 + \frac{\Delta F}{T} t$$

Zでは、周波数が以下の等式で表されます。

$$N_d = N(1 - \frac{T_a}{T}) + 1$$



偏角（δ）は距離（z）および時間（t）の関数となります。

$$\delta = \delta(Z, t) = \frac{\lambda F}{V} = \frac{\lambda}{V} (F_0 + \frac{\Delta F}{T} (t - \frac{Z}{V}))$$

$$d\delta = \frac{\lambda}{V} (\frac{\partial F}{\partial t} dt + \frac{\partial F}{\partial Z} dz)$$

zおよびz+dzにおいては、偏角が同じ値とはなりません。回折ビームは、唯一の平面内で集束します。円柱レンズのこうした効果に注目することには重要な意味があります。この効果は連続的なスイーピング中に介在します（ラスタースキャンを使用するテレビ、印刷など）。

これに相当する円柱の焦点距離は次のようになります。

$$F_{Cyl} = \alpha^2 \frac{V}{\lambda \frac{dF}{dt}}$$

-dF/dt：周波数変調勾配

-V：音速

-α：ビームの形状に依存するパラメータ（角胴形の場合は=1、TEM00では約1.34）

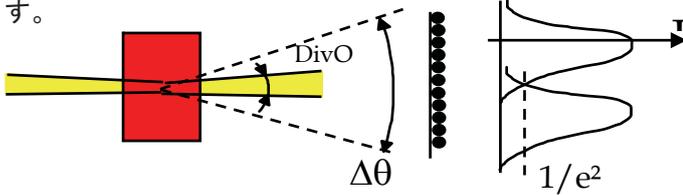
## 偏向器

このコンポーネントは、光線を偏向させるために使用します。ほとんどの用途で高い分解能が要求されます。この目的では、大きなビーム径を使用して作業するために大型の結晶（最大30 mmあるいはこれ以上）を使用します。これにより、光の分散を減少させて分解能を上げることができます。

### 分解能

#### 静的な分解能 N

AOD（音響光学偏向器）の分解能は、回折されたビームを含む識別可能な方向の数として定義されています。TEM00ビームの場合、2つの連続点の中心はレーザービームの直径によって（1/e<sup>2</sup>のところで）分離されます。



$$N = \frac{\Delta\theta}{DIVO}$$

Δθ：偏向角の範囲

DIVO：レーザービームの分散

$$N = \frac{\pi}{4} \Delta F \frac{\phi}{V}$$

TEM00ビームの場合

ΔF：AOの周波数範囲

φ：ビーム径（1/e<sup>2</sup>）

V：音速

アクセス時間

$$T_a = \frac{\phi}{V}$$

Taは偏向器のアクセス時間と呼ばれる値です。この値は、音波がレーザービーム内を通過するのに要する時間に対応しています。したがって、偏向器が一つの位置から他の位置まで情報を伝達するために必要な時間でもあります。偏向器は、多くの場合に時間 × 帯域幅の積 T<sub>a</sub> × ΔF によって特徴付けられます。

# DEFLECTORS

偏向器

# Frequency Shifters

周波数シフター

この目的のために決定したポイント数において、動的な分解能により連続的低減を変換します。これを静的な分解能に対比させて次のように記述することができます。

$$N_d = N(1 - \frac{T_a}{T}) + 1$$

- $N_d$  : 動的な分解能
- $N$  : 静的な分解能
- $T_a$  : アクセス時間
- $T$  :  $F_{min}$ から $F_{max}$ までのスイーピング時間

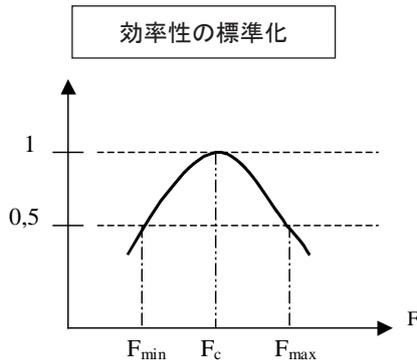
例 :

N	$T_a$ ( $\mu s$ )	$T$ ( $\mu s$ )	$N_d$
1000	10	50	800
2500	50	50	1

### 効率および帯域幅

1stと2ndの重複を避けるため、帯域幅は1オクターブに制限されています。

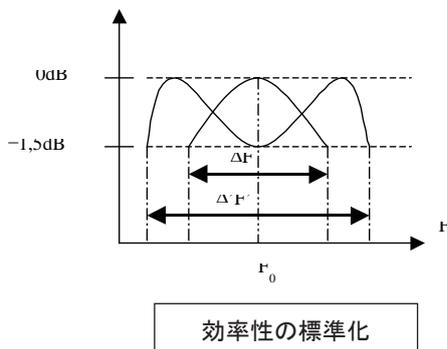
効率曲線に対比させた周波数は、等方性相互作用において次のような形状を示します。



一部の用途では、全帯域において準定効率が要求されることがあります。これは超音波ビームの幅 (l) を減少させることによって取得が可能ですが、最大効率の損失を伴います。

異方性相互作用の特殊な例：異方性相互作用の帯域幅は、等方性相互作用の場合と比較して増大させることが可能です。

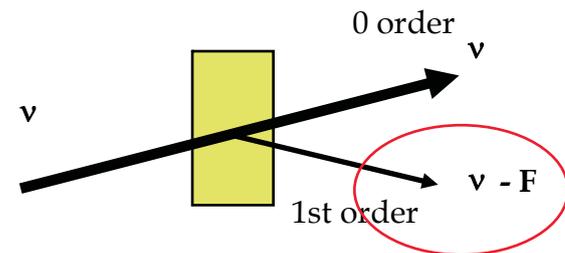
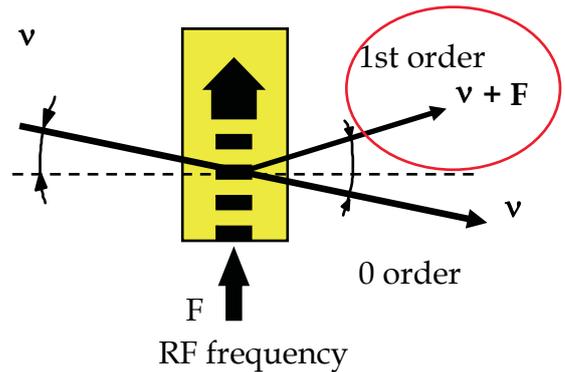
特定の相互作用角では、良好な効率を維持しながら偏向角の範囲を拡大することができるように、ブラッグ条件に適合する2つの同期周波数が存在する可能性があります。



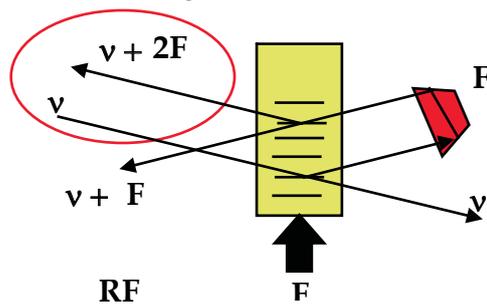
### 周波数シフター

このタイプのコンポーネントでは、回折光の周波数の変換を使用します。(Fd=Fi+/-F) 光学ヘテロダイン方式の周波数変換またはドップラー効果を使用するすべてのアプリケーションにおいて、この特性が用いられています。注意：周波数シフターには、変調器に加えて偏向器の機能もあります。

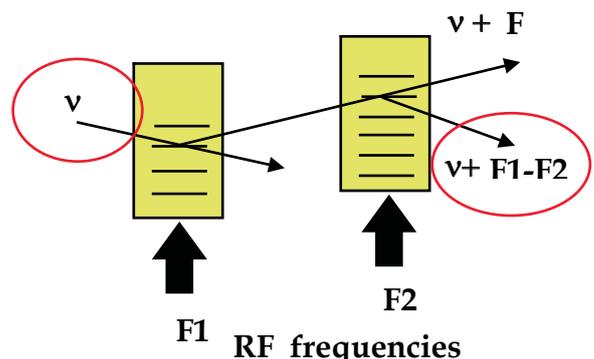
#### Fixed Shifts



#### Multiple Travels Shift : +/-



#### Low Shifts Shift : +/- (F1-F2)



## 振幅変調

### アナログ変調 (0-Vmax)

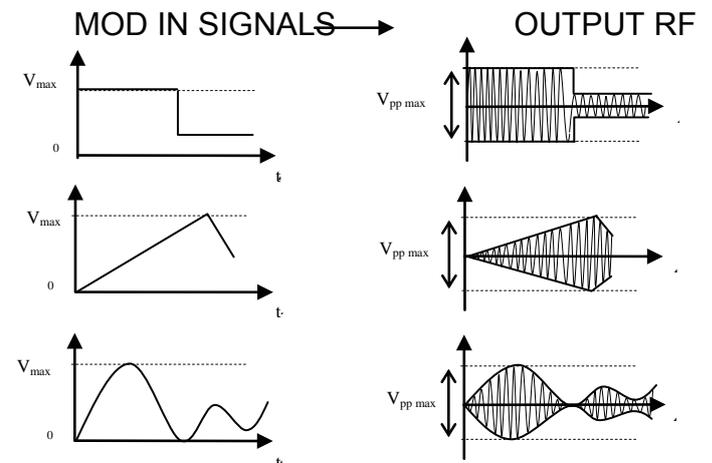
ご使用のドライバのアナログ変調入力、0から最大レベルまでの信号の出力RF振幅を直線的かつ連続的に制御します。

“MOD IN”に0 Vを印加すると、出力信号はありません。

“MOD IN”にVmaxを印加すると、出力信号レベルが最大になります。

出力RFの波形は、両側波帯の振幅変調キャリアになっています。

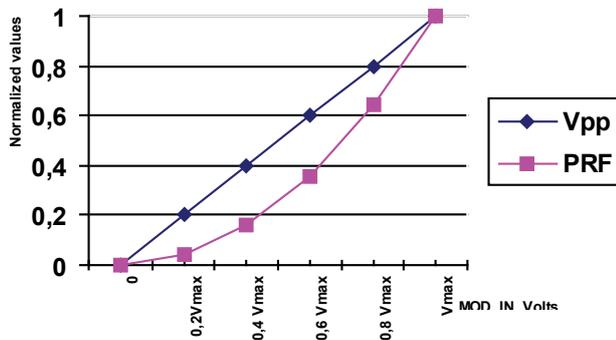
Vmaxは、1-10 Vの範囲で工場での調整が可能です。



## 出力RF電力

50Ωの負荷 (R) を通した出力RF電力PRFは、次の関係式によってピークツーピーク信号の振幅Vppに関連づけられます。

$$P_{RF} = \frac{V_p^2}{8R} = \frac{V_p^2}{400}$$



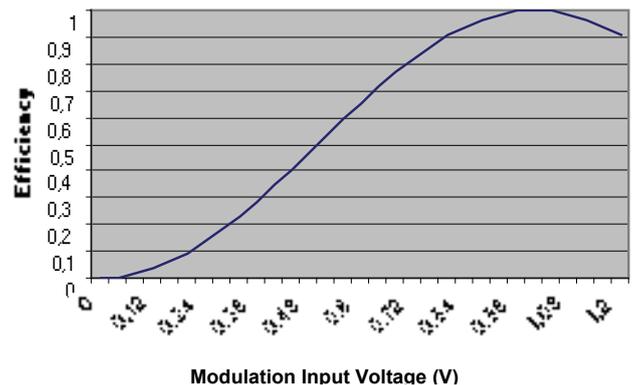
## VSWR (電圧定在波比)

このパラメータは、反射してシステムに送信されたRF電力に関する情報を提供します。

音響デバイスと無線周波数発信源／増幅器との間で最適な適合を実現するためには、発信源とドライバの両方でインピーダンス整合を最適化する必要があります。音響光学デバイスの入力インピーダンスは50オームに固定されているのが一般的で、ドライバ／増幅器の出力インピーダンスも同様です。

VSWR	Reflected POWER
1.002 / 1	0.0001 %
1.068 / 1	0.1 %
1.15 / 1	0.5 %
1.22 / 1	1 %
1.5 / 1	4 %
2 / 1	11 %
2.5 / 1	18 %
3 / 1	25 %

### AOM Response versus input voltage (Video In)



### TTL変調 (ON/OFF)

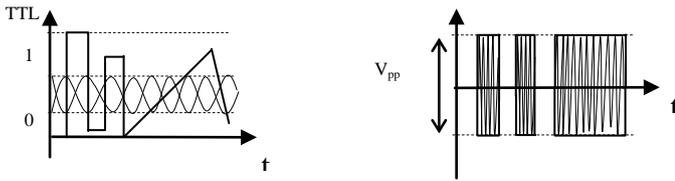
ご使用のドライバのTTL変調入力は標準のTTL信号に適合しています。これにより、ドライバのON/OFFの操作が可能になります。

“MOD IN”に“0”レベル (0.8 V未満) を印加すると、出力信号はありません。

“MOD IN”に“1”レベル (2.4 Vより大) を印加すると、出力信号レベルが最大になります。

TTL変調入力は、アナログ入力信号を使用して操作できる点に注意してください。

# RF Drivers RFドライバ



## 消光比

テストシートに指定されているお使いのドライバの消光比は、最大出力RFレベル (MOD IN = 最大値) と最小出力レベル (MOD IN = 最小値) の比率です。変調入力信号の不良は、消光比の劣化によるものである可能性があります。

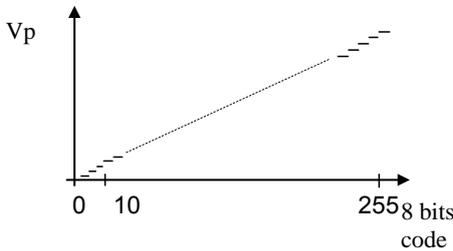
$$\text{Extinction ratio} = 10 \log\left(\frac{P_{\max}}{P_{\min}}\right) = 20 \log\left(\frac{V_{pp \max}}{V_{pp \min}}\right) \quad (dB)$$

## デジタル8ビット振幅変調

1バイト (8ビット) で出力RF信号の振幅を制御します。D/Aコンバータが8ビットのコマンド (N) をアナログ信号に変換し、このアナログ信号が出力振幅を直線的に制御します。

256個のレベルが使用可能です。

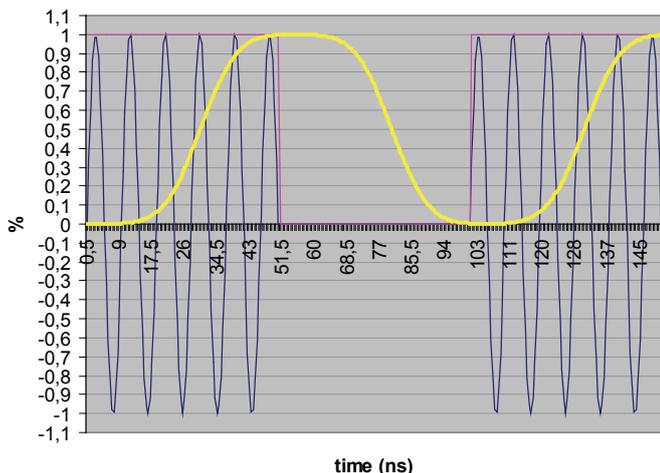
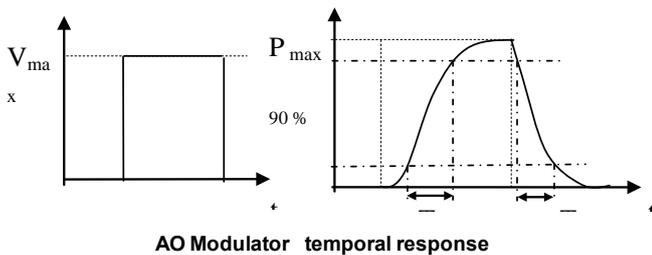
- N = 00000000の時は、出力RF信号はありません。
- N = 11111111の時は、最大出力レベルとなります。



## 立ち上がり時間と立ち下がり時間

お使いのドライバのテストシートに指定されている立ち上がり時間Trと立ち下がり時間Tfは、パルス前縁の通過後に、出力RF信号が最大振幅値の10%から90%まで立ち上がるのに要する時間に対応しています。この時間は、キャリア周波数とRF技術に関連しています。

AA製のクラスAドライバは、最高の立ち上がり/立ち下がり時間性能を提供しています。



## 周波数制御

### アナログ制御 (0-Vmax)

お使いのドライバのアナログ周波数制御入力は、Fmin (最小周波数) からFmax (最大周波数) までの、信号の出力RF周波数を直線的かつ連続的に制御します。

最小周波数および最大周波数は工場であらかじめ設定されていますが、ポテンショメータの“OFFSET”および“GAIN”を使用するとわずかに調整することができます。

標準的なVCOの場合、入力コマンドに対する周波数の直線性は一般に+/- 5%程度です。

### スリーピング時間 (VCO)

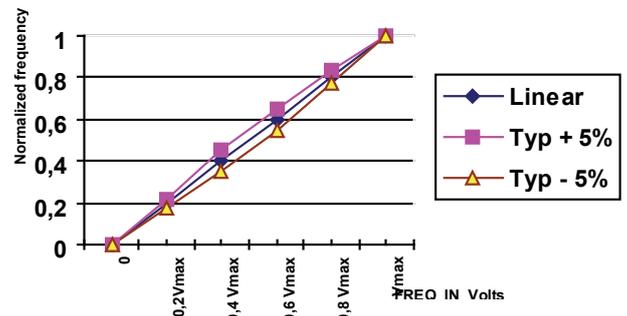
スリーピング時間とは、周波数を最小から最大まで、または最大から最小までスリーピングするのに必要な最大時間です。

周波数ステップに依存するものの、この値は最大ランダムアクセス時間として取得することができます。

“FREQ IN”に0 Vを印加すると、周波数 = F min

“FREQ IN”にVmaxを印加すると、周波数 = F max

(標準周波数制御入力: 0-10 V / 1KΩ)



## デジタル8ビット周波数変調 (15、23、31b)

1バイト (8ビット) で出力RF信号の周波数を制御します。D/Aコンバータが8ビットのコマンド (N) をアナログ信号に変換し、このアナログ信号が出力周波数を直線的に制御します。

256個のステップが使用可能: ピン接続についてはお使いのテストシートを参照してください。

- N = 00000000の時は、RF信号周波数 = F 最小
- N = 11111111の時は、RF信号周波数 = F 最大

入射ポイントと同期ポイントにおける接線が平行になっている（したがって光線が結晶内で平行になっている）限り、開口角を大きくとることが可能なことを明示できます。

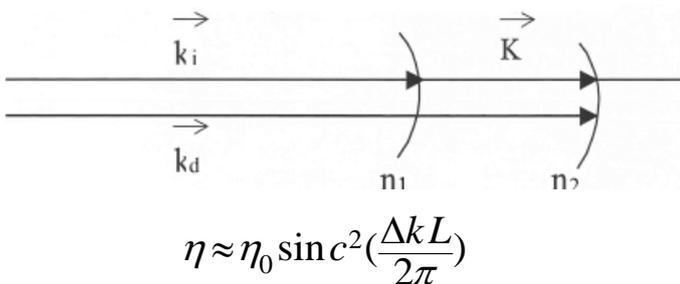
相互作用の長さ（L）が十分に広く、波ベクトルの設定が適切（狭い範囲のKで同期している）であれば、低い帯域幅を確実に得ることができるため、スペクトル幅（ $\Delta\lambda$ ）も低くなります。

入射光源のスペクトル成分の抽出は、音響光学的な相互作用により実行することが可能です。

音響光学偏向器の偏向角は、可視光の波長に比例します。したがって、特定の波長だけを抽出することが可能です。スペクトル分解能は、光線の終了寸法（D）に起因する回折によって制限されます。スペクトル幅の限界は次の等式にしたがって推定できます。

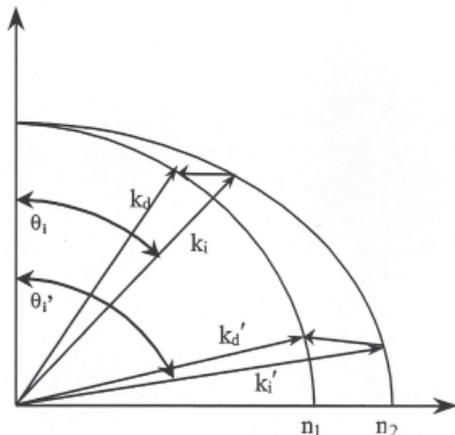
$$\Delta\lambda_0 = \frac{\lambda_0 V}{D F}$$

良好な分解能（ $\lambda_0/\Delta\lambda_0$  高）を得るためには、光線の寸法（D）を大きくする必要があります。したがって、そうしたシステムの開口数は必然的にごく小さくなり、結果的に利用価値も制限されることとなります。同一線上の異方性相互作用により、音響周波数を単純に変化させることでフィルタの調整が可能になります。フィルタの調整は、次の等式で示す特定の開口数の下で行います。



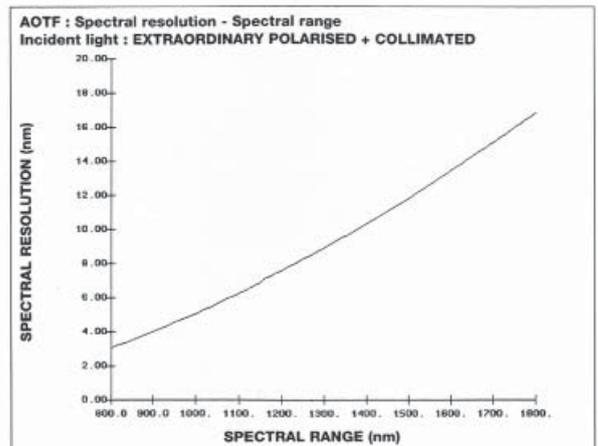
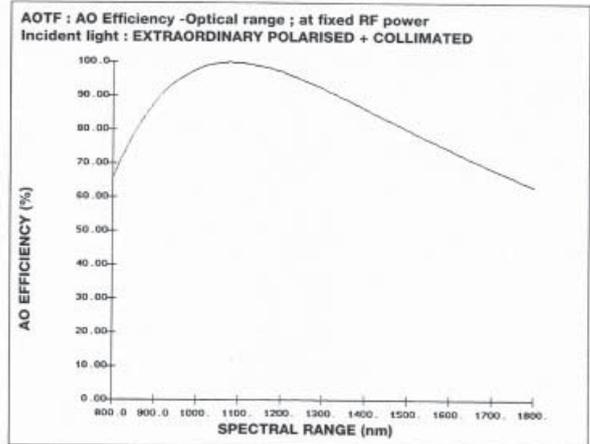
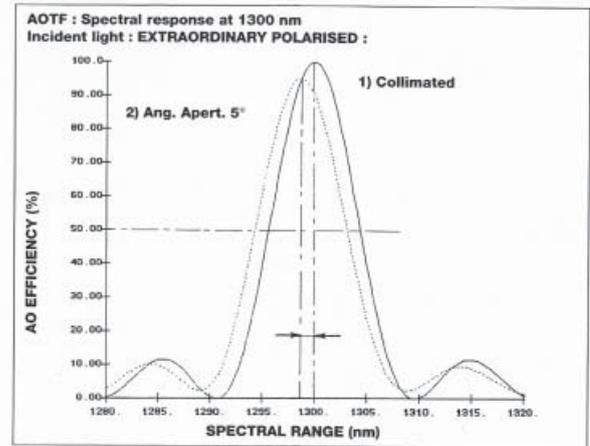
（同一線上のAOTF効率）

同一線上にない異方性相互作用も、大きな入射角（ $\theta_i > 10^\circ$ ）の条件下では使用可能です。この最後の構成により、利益係数が大きな値を持つ材料（二酸化テルル）の使用が可能になります。



$$\lambda = a \frac{\Delta n(\lambda)}{F} \quad \Delta\lambda = b \frac{\lambda^2}{L}$$

Dn : 複屈折 (=|n2-n1|)  
aおよびbは、 $\theta_i$ および $\theta_a$ に依存するパラメータ例：



# AOTF - Tunable Filters AOTF - チューナブルフィルター

## ⇒ 用途事例

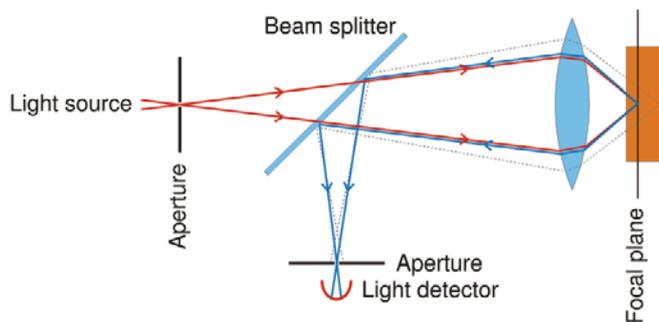
### 共焦点顕微鏡法



共焦点顕微鏡法は、顕微鏡写真のコントラストを高めたい場合や、焦点面よりも厚い試験片において焦点外の光やフレアを排除するために、空間的なピンホールを使用して三次元画像を再構成する際に使用される映像化技術です。この手法は、科学技術や工業分野で最近になって人気が高まっています。一般的な用途としては、ライフサイエンスや半導体の検査などがあります。

### 共焦点レーザ走査顕微鏡法

共焦点レーザ走査顕微鏡法（CLSMまたはLSCM）は、高解像度の画像を取得したり三次元画像の再構成を行う場合などに大変有用なツールです。共焦点顕微鏡法の持つ最大の特徴は、焦点深度が大きく厚みのある試験片でも全くぶれのない画像を生成できる性能です。接眼レンズを通して画像を投影するのではなく、各ポイント毎に画像を取得してからコンピュータを使用して画像全体を再構築します。この特殊な顕微鏡法の原理はマービン・ミンスキー（Marvin Minsky）によって1953年に開発されましたが、1980年代の終わりに共焦点顕微鏡法に使用するレーザの開発が標準的な手法になるまで30年もかかりました。



### 画像形成

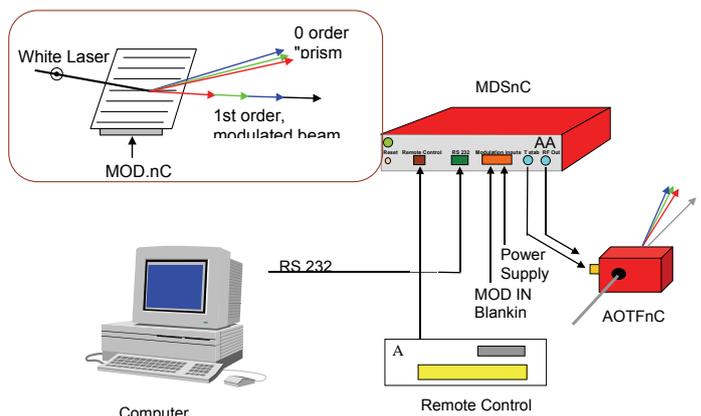
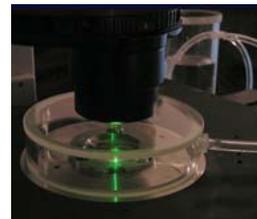
共焦点レーザ走査顕微鏡法では、レーザビームが光源の開口部を通過し、次に対物レンズによって蛍光資料の中にある小さな（理想的には回折限界）焦点ボリュームに集束されます。放射された蛍光と照明されたスポットから反射されたレーザ光の混合光が、対物レンズによって再び集束されます。ビームスプリッタ（分割器）がレーザ光だけを通過させることにより、混合された光を分離し、蛍光を検出装置に向けて反射します。ピンホールの通過後、光検出器（光電子増倍管（PMT）またはアバランシェフォトダイオード）によって検出された蛍光は、光信号から電気信号に転換され、その信号をコンピュータが記録します。

焦点以外から来た光は、検出器の開口部で妨害されます。画像内のグレーの点線部分はその妨害された光を示しています。こうして焦点の合っていない点だけが削除されます。

戻ってくる光は、そのほとんどがピンホールによってブロックされます。その結果として、従来の蛍光顕微鏡法と比較してはるかにシャープな画像が得られる上に、同じサンプルから様々なz軸平面の画像を取得することが可能になります。

試料内の照明された1個のポリウムエレメントから出て検出された光が、生成された画像の1ピクセルを描写します。レーザが対象表面上をスキャンするにつれて画像全体が各ピクセルごとに、さらに各ラインごとに取得され、それと同時に、得られた画像ピクセルの輝度が検出された蛍光の相対強度に対応します。1枚または複数の（サーボ制御式の）周期振動ミラーを使用して、水平面内でサンプル全体にわたってビームがスキャンされます。通常、このスキャン方法は低い反応潜時を持ち、スキャン速度を変えることも可能です。低速でスキャンすることでより良好なS/N比（信号対雑音比）が得られ、結果としてより高いコントラストと分解能を実現することができます。顕微鏡の試料台を昇降させることで、異なる焦点面から情報を収集することができます。コンピュータを使用して連続する焦点面から取得した積み重なった試料の二次元画像を結集させることにより、試料の三次元（立体）画像を生成することが可能です。

さらに共焦点顕微鏡法では、方位分解能の向上に加えて、試料の作成手順をごく最小限に抑えた、無傷の生きた試料の直接的で非侵襲性の連続した光学セクションングの性能においても、大幅な改善を実現させています。共焦点レーザ走査顕微鏡法は蛍光に依存しており、可視化するには試料を蛍光染料で処理する必要があります。しかし実際に使用する染料をごく低濃度に抑えられるため、生体への影響は最小限に抑えられます。装置の中には、たった1個の蛍光分子を追跡することさえ可能なものもあります。これに加えて、遺伝子組み換え技術によって自前の蛍光キメラ分子を生成する有機的組織体を作り出すことも可能です。（GFP（緑色蛍光タンパク質）を、関心のあるタンパク質と融合させる技術など）。



## 光パルスの生成

パルスレーザーには、連続レーザーには無いメリットがいくつかあります。光通信など一部の用途では、パルスを利用して情報が伝達されています。特に大きなピークパワーを得たい場合は、短いパルスを使用します。放射エネルギーはすべて短いパルスに圧縮され、これによって大きなピークパワーを実現しています。光パルスを活用した事例としては、例えば急速な化学反応や半導体内の電子プロセスなど、急激に進行するプロセスのスナップ写真の撮影などがあります。レーザーを使用すると、通常の写真用フラッシュよりも桁違いに短くかつ明るい閃光を発生することができます。状況によっては、レーザーにとって好ましくない熱負荷を減らすために、レーザーの励起機構そのものがレーザーをパルスモード運転に制限することもあります。

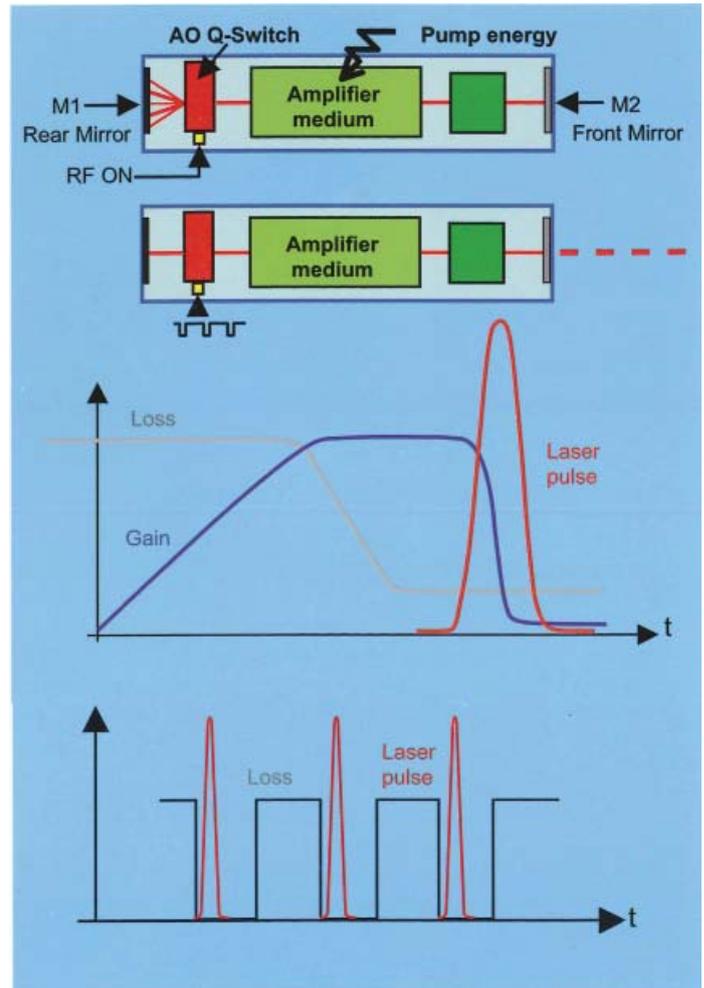
パルス出力を簡単に作り出す方法として、連続波レーザー（CW）の出力に対して光スイッチ（例えばAO変調器など）を設置することがあります。光スイッチでオン・オフを繰り返せば、光のパルスが生成されます。このような方法では効率的でないような場合は、レーザーキャビティ内にスイッチ（Qスイッチ）を設置することを推奨します。Qスイッチには、少なくとも次の2つのメリットがあります。第1に、スイッチが閉じているときは、レーザーが動作不能であることです。つまり、ポンプエネルギーが失われることなく、励起原子の形態で活物質内に蓄えられるか、あるいは光の形態でキャビティ内に留まることを意味します。第2に、スイッチを急に開くと、蓄えられた全エネルギーを短いパルスとして回復できることです。これにより、平均（連続波）パワーの数倍も高いピークパワーが生成されます。

### Qスイッチング

レーザーキャビティのQ（品質）値とは、光エネルギーを定在波の形態で蓄積するキャビティの能力を表します。次の等式に示すように、キャビティ内に蓄えられたエネルギーを、キャビティ内での1サイクル中に失われるエネルギーで割った比率がQ値です。

$$Q = 2\pi \frac{\text{Energy stored in the cavity}}{\text{Energy lost in a cycle}}$$

つまり損失の大きいキャビティは、1サイクル当たり失うエネルギーが大きいので、Q値が小さくなります。そのキャビティのQ値が大きければ、1サイクル当たりのエネルギー損失が小さいことを意味します。キャビティのQ値を効率良く制御するために、キャビティ内の損失を抑えることが可能なデバイスをキャビティ内に挿入する方法を採用しています。このデバイスは、キャビティ内にて光シャッター（または光スイッチ）として機能します。閉じているときは、光を吸収または散乱させて、損失が大きくなります。一方、開いているときは、キャビティ内の損失は小さくなり、Q値は高くなります。このようなスイッチングデバイスはQスイッチと呼ばれています。



### 音響光学Qスイッチ

Qスイッチは、レーザーキャビティ内で繰り返し率の大幅な低下を引き起こすことを目的とした特殊な変調器と言えます（一般に1-100KHz）。Qスイッチを設計する際は、挿入損失を最低限に抑え、ごく強いレーザーパワーにも耐えることができるように計画します。一般的な利用方法では、RF信号を入力して、レーザーキャビティ内の光束の一部をキャビティから分散させます。その結果、キャビティ内の損失が増大して、キャビティからの発振が困難になります。RF信号の入力を停止すると、キャビティ内の損失が急速に減少し、強力なレーザーパルスが誘発されます。

Qスイッチング動作においては、Qスイッチングが光ポンピング機構の一連のタイミングと密接な相関関係を持っていることが重要です。これを具体的に説明すると、例えば、レーザーポンピングが開始されたときに、キャビティのQ値が低いとします。このときは、損失が大きいためレーザー作用は起きず、ポンピング源からのエネルギーはレーザー媒質のレーザー上準位内に蓄積されます。反転分布が最高域に達した時点で、急速にQスイッチを開いて、キャビティ内の損失を少なくします。集団間の差違がごく大きくなるため、レーザー発振が急速に開始されて、蓄積されたエネルギーは単一のジャイアントパルスとなって放射されます。パルスが急激に減少し、レーザー発振上準位が急速に下がり、ゲインが閾値以下になった時点でレーザー発振が停止します。動作領域を取得するため、これら一連の動作を定期的に繰り返します。

# Q-SWITCHES Qスイッチ

付属のRFドライバには便利なQスイッチが組み合わされており、これが効率的なQスイッチングのための重要なコンポーネントとなっています。使用するドライバはクラスAのドライバで、立ち上がり時間が最速のものでなければなりません。これは、キャビティ損失に関する最適の落下勾配を確保し、各パルスごとに最短かつ最高のエネルギーを得る必要があるためです。

パルスからパルスの同期が重要な意味を持つ用途の中には、同期ドライバが必要不可欠なものもあります。同じキャビティ内で複数のQスイッチを使用する場合には、位相固定ドライバも使用可能です。

ドライバのトリガ信号や制御信号の選択も可能ですので、適時にQスイッチの損失を決定してQスイッチング効果を安全かつ効率的に実行する機会を見逃しません。温度安全インターロックは、過熱からQスイッチを保護して耐用年数を延ばすためには必要不可欠な機能です。VSWR制御や切断保護といったその他の安全装置も、ユーザーの負担を軽減してシステムをより安全に使用するために役立ちます。

ドライバの選択は設置スペースや利用可能なリソースに左右されますが、空気冷却式か、ベースプレートを通じた伝導による冷却、あるいは水冷式のドライバが選択肢となり、機種としてはOEMの小型タイプまたは110/230 VACバージョンのいずれかになります。

## ジャイアントパルス

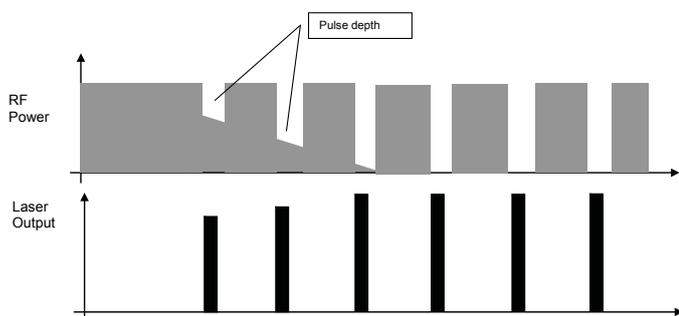
繰り返し率の高いQスイッチレーザでは、一定の運転停止時間後に「ジャイアントファーストパルス」がよく見られます。過剰なエネルギーを持つこのジャイアントパルスは、キャビティ内の光学系に不可逆的な損傷をもたらすことがあります。さらに、こうした第1パルスのエネルギー増大は望ましいものではなく、不均一なピークパワーにつながり、それがアプリケーションに悪影響（例えば異なるマーキング強度など）を及ぼす可能性もあります。

こうした理由から、第1パルスの過剰なエネルギーの消散や抑制をユーザーが行わなければならない場合もあります。この手順は、付属のRFドライバの助けを借りたQスイッチの特殊なシーケンスを使用した制御で実施できます。

## 「ジャイアントファーストパルス」を抑制する一般的な方法

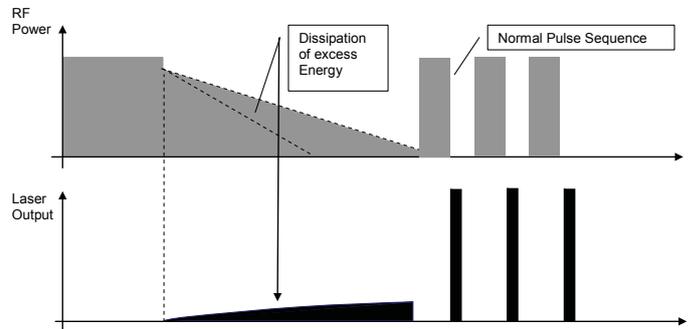
### FPS : ファーストパルスサプレッション

この方法により、Qスイッチのパルス深度が制御されてキャビティが完全に開かないように制限されるため、キャビティから出るエネルギーを制限することが可能になります。損失の量が徐々に減少し、永続的なQスイッチ領域が確保されます。定常的なパルスを得るためには、普通は数パルス必要です。



### PPK : プレパルスクリング

この方法では、パルスシーケンスを開始する前に、キャビティ内の過剰なエネルギーを消散させます。パルスシーケンス開始前に過剰なエネルギーが消去されるため、パルスシーケンスを正常に開始することができます。



## AAドライバ : 制御方法

### 基本的なパルス制御 (DPC入力)

すべてのAAドライバに対して、レーザパルスはTTL信号によってトリガされています (DPC : デジタルパルス制御)。

このDPC入力により、Qスイッチは次に示す2つの状態で制御されます。

- ゼロ損失 (TTL=0) = RF電力がQスイッチに全く印加されない = レーザパルスは進行可能
- フル損失 (TTL=1) = RF電力はすべてQスイッチに印加される = レーザキャビティがブロックされる

### アナログ電力制御 (FAC入力)

AAでは、RF電力レベルを制御するための補助的なアナログ入力を提供しています。この入力はプルダウンされます (通常0-5ボルト)。つまり接続されていない場合は信号が0ボルトまで下降し、その後出力電力が無効になります。アナログFAC信号が出力信号のRF振幅を直線的に制御します。

アナログ電力制御は、TTLパルス制御 (DPC) と次に示すような組み合わせになっていることに注意してください。

出力RF電力 - TTL (DPC) × アナログ (FAC)

- TTL (DPC) = 0の場合 ⇒ 出力RF電力 = 0、FAC入力には無関係 (0または5V)

- TTL (DPC) = 1の場合 ⇒ 出力RF電力 = 0、ただしFAC = 0Vの場合

FAC = 5Vの時に最大、Xxに対比するFAC入力

### パルスアナログ制御 (PAC / RF OFF アナログ制御)

PAC入力は代替的なアナログ入力であり、ドライバのRF OFFレベルを制御します。

この入力 (通常はアナログ0-5V) は、プルアップされます。つまり接続されていない場合は信号が5ボルトまで上昇し、その後はドライバが正常に動作します。

アナログPAC信号が、出力信号のRF OFF振幅を直線的に制御します。また、この入力は漏れの閾値を制御します。PAC振幅制御は、TTLパルス制御 (DPC) と次に示すような組み合わせになっていることに注意してください。

出力RF電力 - TTL (DPC) + アナログ (PAC)

- TTL (DPC) = 0の場合 ⇒ 出力RF電力 = 0、ただしPAC=0Vの場合

PAC = 5Vの時に最大、Xxに対比するPAC入力

- TTL (DPC) = 1の場合 ⇒ 出力RF電力 = 最大、PAC入力には無関係 (0または5V)