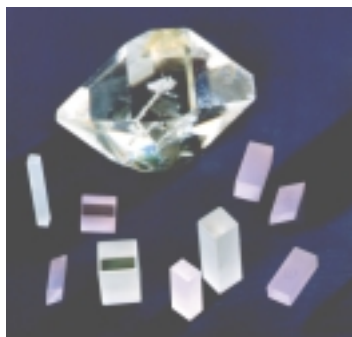


非線形光学結晶



ここでいう非線形光学結晶（NLO）とは、レーザの波長変換に使われるものを指しています。CASIX社では、BBO、LBO、KTP、LiNbO₃、MgO:LiNbO₃およびAgGaS₂などの結晶を含めた一連の非線形光学結晶を取り揃えております。CASIX社では、CLBOやCBOのような新しい非線形光学結晶も現在開発中です。これらの結晶の基本的な特性、利点および応用について、このカタログに記載します。

周波数変換

第二高調波発生（和周波発生の特例なケース）、和周波発生（SFG）、差周波発生（DFG）および光パラメトリック発振（OPG）を含む周波数変換のプロセスは以下の式で導かれます。

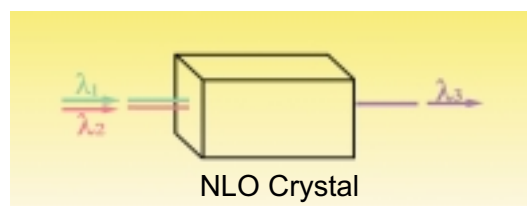
和周波発生（SFG）

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 \quad (\text{または } 1/\lambda_1 + 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3 : \text{波長})$$

2つの低エネルギー（低周波数）フォトンが高エネルギーフォトン1つに結合されます。

例えば、

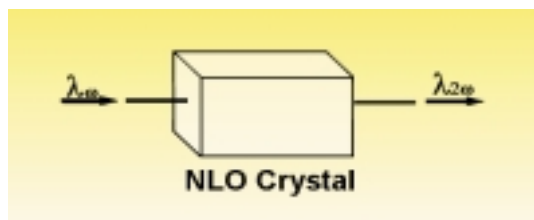
$$1064\text{nm} + 532\text{nm} \rightarrow 355\text{nm}$$



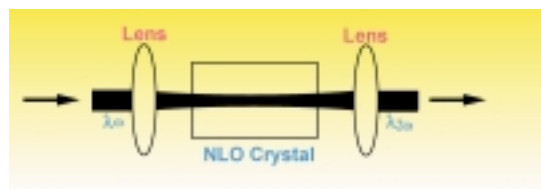
和周波発生（SFG）

周波数逡倍

周波数逡倍あるいは第二高調波発生（SHG）は、2つの入力波長が同じである場合、 $2\omega_1 = \omega_2$ （または $\lambda_1 = 2\lambda_2$ ：波長）における和周波発生の特例なケースです。最も単純な第二高調波発生の構成は外部共振器（エクストラキャビティ）での第二高調波発生です。レーザは、図で示されるように、ただ1度のみ非線形結晶を通過します。しかし、例えば、連続発振のNd:YAGレーザやアルゴンイオンレーザの第二高調波発生のように、レーザのパワー密度が低い場合、結晶内でのパワー密度を上げるために、通常、フォーカスされたビーム、共振器内（イントラキャビティ）周波数逡倍法や外部共振器が使われます。もし、どのような構成にするかで何か疑問があれば、その解決法については弊社にご連絡をください。



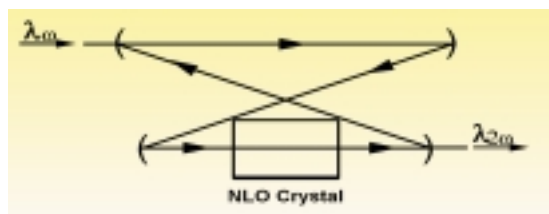
エクストラキャビティ
第二高調波発生（SHG）



フォーカスされたビームと
第二高調波発生（SHG）



イントラキャビティ SHG



外部共振器 SHG

三通倍（第三高調波発生）

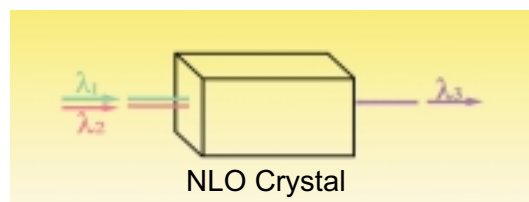
三通倍または第三高調波発生（THG）は、和周波発生（SHG）の例です。例えば、ネオジウム・ヤグレーザの第三高調波発生では $\omega_1 = 1064\text{nm}$ 、 $\omega_2 = 532\text{nm}$ で、発生する波長は $\omega_3 = 355\text{nm}$ です。BBO 結晶で基本波とチタン・サファイアレーザの第三高調波（THG）の和周波をとることによって、最短で 193nm までの短波長を発生させることができます。

差周波発生（DFG）

$\omega_1 - \omega_2 = \omega_3$ （または $1/\lambda_1 - 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ ：波長）
2つの高エネルギー光子が低エネルギー光子1つに結合されます。

例えば、

$$532\text{nm} - 810\text{nm} \rightarrow 1550\text{nm}$$



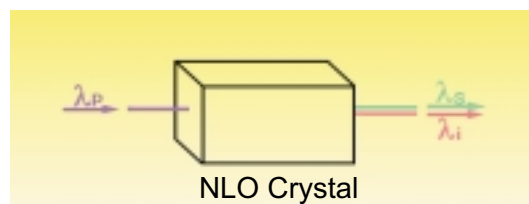
差周波発生（DFG）

光パラメトリック発振（OPG）

$\omega_p = \omega_s + \omega_i$ （または $1/\lambda_p = 1/\lambda_s + 1/\lambda_i$ ：波長）
1つの高エネルギー光子が2つの低エネルギー光子に分割されます。

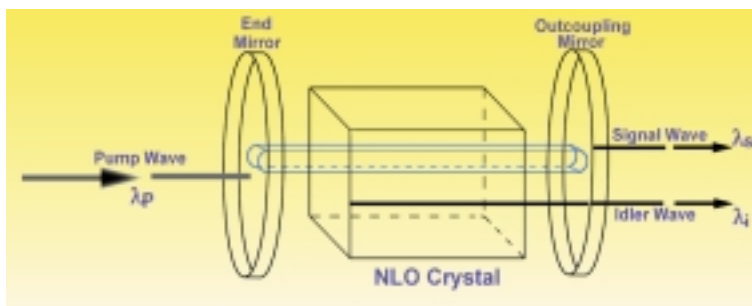
例えば、

$$355\text{nm} \rightarrow 532\text{nm} + 1064\text{nm}$$



光パラメトリック発振

光パラメトリック発振（OPG）は和周波発生（SHG）の逆過程です。1つの高い周波数の光子（励起波長： λ_p ）を2つの低い周波数の光子に分割します（信号波： λ_s 、とアイドラー波： λ_i ）。図のように、共振器を形成するように2つのミラーを加えれば、光パラメトリック発振器（OPO）が構成されます。固定の励起波長に対して、結晶を傾けることによって信号波とアイドラー波を無限に発生させることができます。それ故に、光パラメトリック発振器（OPO）は、広い帯域で波長可変なコヒーレント光を発生させることができる優れた光源です。BBO、KTP、LBO および LiNbO_3 は、光パラメトリック発振器（OPO）や光パラメトリック増幅器（OPA）への応用に適した結晶です。



光パラメトリック発振器

位相整合

高い変換効率を得るために、入力ビームと発生ビームの位相ベクトルが一致していなければなりません。すなわち、

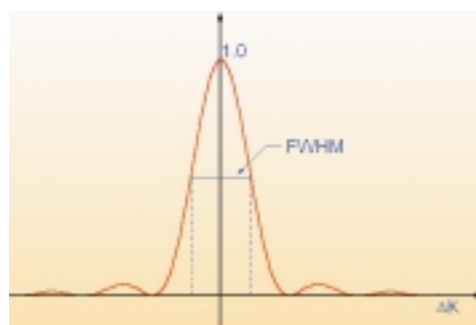
$$\Delta k = k_3 - k_2 - k_1 : 2\pi n_3 / \lambda_3 - 2\pi n_2 / \lambda_2 - 2\pi n_1 / \lambda_1 = 0 \text{ (和周波発生の場合)}$$

ここで、 Δk は位相非整合、 k_i は波長 λ_i での位相ベクトル、 n_i は波長 λ_i での屈折率です。

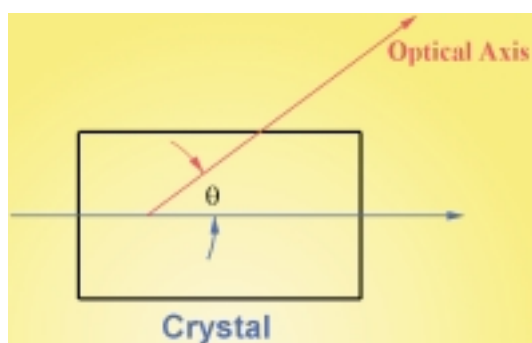
低パワーの場合、変換効率と位相不整合との間の関係は、次の式で表わされます。

$$\eta \propto (\sin(\Delta k L) / \Delta k L)^2 \text{ (図8参照)}$$

これからも分かるように、 Δk が増えれば変換効率は急激に低下します。



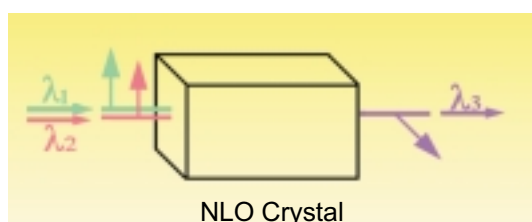
変換効率対 Δk



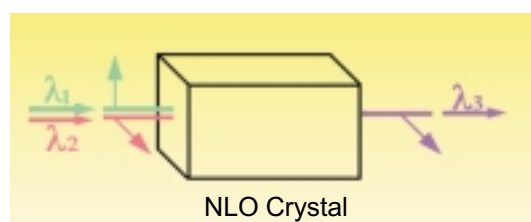
臨界位相整合

位相整合には、角度チューニング、温度チューニングあるいはその他の方法があります。角度チューニングは、左図に示すような位相整合を得るために最もよく使われています。もし光軸とビームのなす角(θ)が90度あるいは0度でない場合、臨界位相整合 (CPM) と呼んでいます。または、90度臨界位相非整合 (NCPM) では $\theta = 90$ 度で、0度臨界位相非整合では $\theta = 0$ 度です。

レーザの偏光方向によって、位相整合は2つに分類されます。もし、2つの入力ビーム (和周波の場合) の偏光方向がお互いに平行の場合、タイプI位相整合と呼ばれます。偏光方向がお互いに直角の場合は、タイプII位相整合と呼ばれます。



タイプI位相整合



タイプII位相整合

変換効率

あるレーザに対して、周波数変換用として非線形結晶をどのように選ぶか？最も重要なことは高い変換効率を得ることです。変換効率は、非線形係数 (d_{eff})、結晶長 (L)、入力パワー密度 (P) および位相非整合 ($\Delta\kappa$) と、以下の関係があります。

$$\eta \propto PL^2 (d_{\text{eff}} \sin(\Delta\kappa L) / (\Delta\kappa L)^2$$

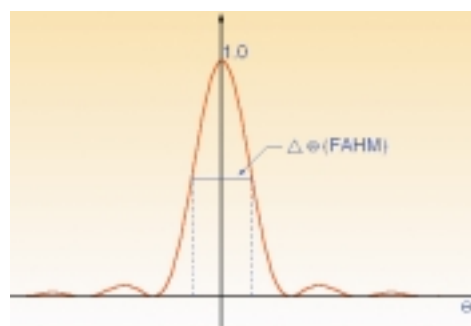
一般に、パワー密度が高ければ高いほど、結晶長が長ければ長いほど、非線形係数が大きければ大きいほど、位相非整合が小さければ小さいほど、変換効率は高くなります。しかしながら、常に非線形結晶とレーザにはある種の制限があります。例えば、 d_{eff} はそれ自身が非線形結晶によって決定され、そして入力パワー密度は結晶の損傷しきい値より低くなければなりません。それ故に、適切な結晶を選ぶことが重要となります。次の表に、適切な結晶を選ぶためにレーザと結晶パラメーターを示します。

非線形結晶選択のためのパラメーター

レーザパラメーター	結晶パラメーター
非線形プロセス	位相整合のタイプと角度、 d_{eff}
パワー、エネルギーあるいは繰り返し周波数	損傷しきい値
ビーム拡がり角	許容角
バンド幅	光スペクトル許容幅
ビームサイズ	結晶の大きさ、ウォークオフ角
パルス幅	群速度非整合
環境	湿度・温度の許容量

結晶の許容角

もしレーザ光が、位相整合角に対して $\Delta\theta$ の角度で入射した場合、変換効率は極端に減少します (図参照)。ここで、 $\theta = 0$ を位相整合の方向としたとき、許容角 $\Delta\theta$ を半値全幅 (FWHM) で定義します。例えば、1064nm の Nd:YAG レーザ第2高調波発生用のタイプ。BBO結晶の許容角は、1mrad-cm です。従って、第2高調波発生を行う時に Nd:YAG レーザが 3mrad のビーム拡がり角を持っていたら、半分以上の入力ビームは無駄になります。この場合には、約 8mrad-cm の大きな許容角を持つ LBO 結晶が適しています。臨界位相非整合の場合、臨界位相整合の場合に比べ、通常、圧倒的に許容角は大きくなります。例えば、タイプ I の臨界位相非整合用 LBO の場合では 52mrad-cm^{1/2} です。

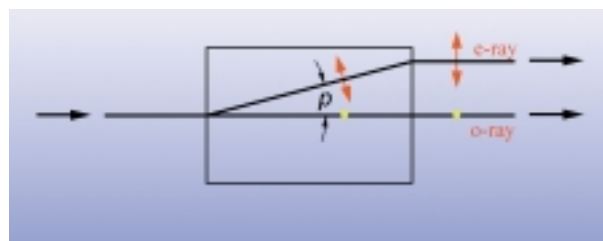


許容角 (半値全角)

さらに、これに加えて結晶のスペクトル許容幅($\Delta\lambda$)とレーザのスペクトル幅を考慮しなければなりません。すなわち、結晶の許容温度 (ΔT) と環境の温度変化です。

ウォークオフ

非線形結晶の複屈折性により、異常光線 (n_e) には、図に示すようなポインティング・ベクトルのウォークオフがあります。入力レーザのビーム径が小さい場合、発生する高調波ビームと入力ビームは、結晶の中でウォークオフ角 (ρ) で分かれ、変換効率の低さの原因となります。従って、集光されたビームや共振器内 (インドラキャビティ) 高調波発生では、ウォークオフが変換効率を制限する要因となります。



ウォークオフ角 (ρ)

群速度非整合

フェムト秒 (fs) のパルス幅を持つ Ti: サファイヤや色素レーザのような超高速パルスレーザの非線形プロセスでは、変換効率を主に制限するのは群速度非整合 (GVM) です。GVM は、非線形結晶の群速度分散によって引き起こされます。例えば、800nm の Ti: サファイヤレーザの高調波発生では、BBO 結晶の群速度の逆数 ($1/VG$) は、それぞれ 800nm で $1/VG = 56.09\text{ps/cm}$, 400nm で $1/VG = 58.01\text{ps/cm}$, $1/VG = 1.92\text{ps/cm}$ です。すなわち、1mm 長の BBO 結晶では、2つの波長でパルス間を 192fs 分離させます。それゆえ、パルス幅を極端に広げないで高変換効率を得るために、100fs の Ti: サファイヤレーザでは、96fs の分離を持つ 0.5mm 長の BBO 結晶が推奨されています。CASIX 社では、5fs までの短パルスレーザアプリケーション用として、薄さ 0.02mm の BBO 結晶を提供できます。

非線形結晶の扱い方

結晶をきれいにしておく

CASIX 社から結晶を受け取られましたら、内部のプラスチックケースを、クリーンな環境下で開けることができるのは、責任者のみに限定してください。非線形結晶のプラスチックケースを開けるときは、結晶の研磨面またはコーティング面に指紋やオイル、その他汚染物質が付着しないようご注意ください。

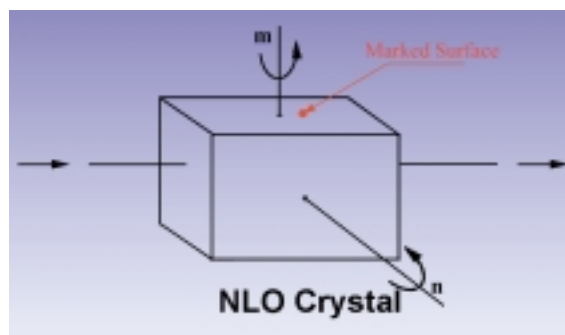
もし、表面が汚れていたら、エアブラシで表面を吹き飛ばしてください。それでも結晶面に汚れがあるのなら、洗浄液と柔らかい絹の布で拭いてください。BBO 結晶の場合、50%の高純度アルコールと50%の高純度エチルアルコールとの混合液を洗浄液として推奨します。汚れた面のままだと損傷を受けやすいということに注意してください。

非線形結晶の中には、潮解性をわずかながら持つものがありますので、湿度の低い環境でお使いになるようお願いします。研磨面が曇ったり損傷を受けた場合、再研磨または再コーティングについてお問い合わせください。

適切な結晶のご注文方法

角度チューニング

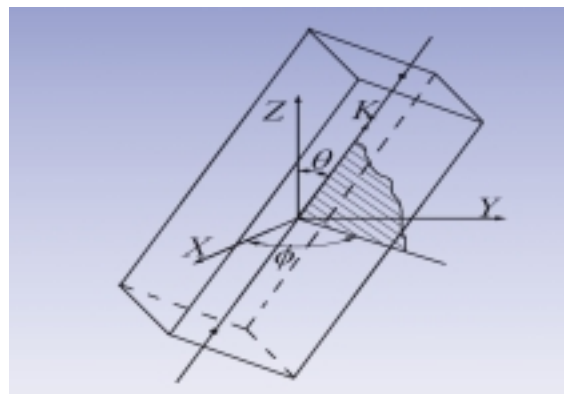
最大変換効率を得るために、通常、角度を傾けて位相整合を取る方法が用いられます。右図に示すように、結晶角を傾けるには2つの軸があります。CASIX社によって供給される非線形結晶は、通常、結晶の主断面でカットされているので、変換効率は n 軸回りの角度チューニングに敏感ではありません。しかし、印を付けた面に直角で非線形結晶の回転軸と呼ぶ m 軸回りの角度チューニングには非常に敏感です。したがって、 m 軸回りに回転させるときは、特別な注意を払う必要があります。結晶の取り付け角度は5アーク秒以内が望まれます。



結晶の傾斜角

最適な結晶サイズとカット

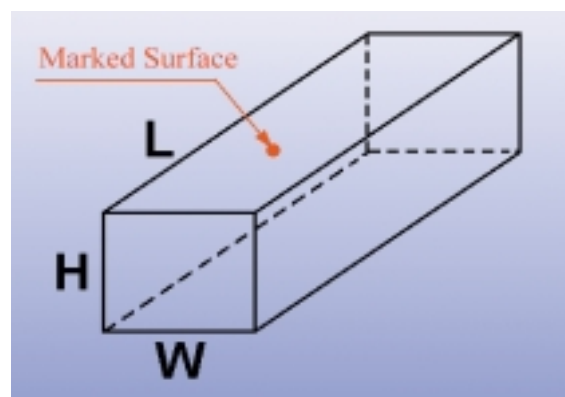
非線形光学結晶を発注する時、結晶方向（あるいは結晶のカット）とサイズを知らなければなりません。結晶方向は、もっぱら非線形光学プロセスによって決定されます。例えば、 $1.064\ \mu\text{m}$ のタイプ。第2高調波発生では、BBO結晶は $\theta = 22.8^\circ$ と $\phi = 0^\circ$ でカットされます。ここで、 θ は結晶の光軸と成長軸のなす極軸角、 ϕ はXY面の結晶成長軸とX軸のなす角です。もし、結晶の向きに不慣れで非線形プロセスに経験の無くお困りの場合は、弊社の営業マンやエンジニアが正しい結晶方向のアドバイスをいたします。



結晶の極軸
(Kは光の進行方向)

結晶サイズは、一般に $W \times H \times L\text{mm}^3$ で記載されるように、 W （幅）、 H （高さ）、 L （長さ）の3方向で規定されます。結晶の価格が結晶サイズで変わるので、結晶サイズを慎重に決定することが重要です。さらに重要なことは、変換効率が結晶長に直接関係することです。

最適な結晶の高さ（ H ）を選ぶためには、結晶を通過するレーザーのビーム径を考慮しなければなりません。最適な結晶の高さは、結晶がレーザービーム径よりわずかに大きい（例えば、 1mm に対して 2mm ）ことが必要です。



結晶の寸法

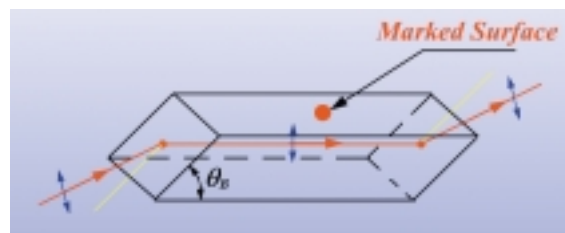
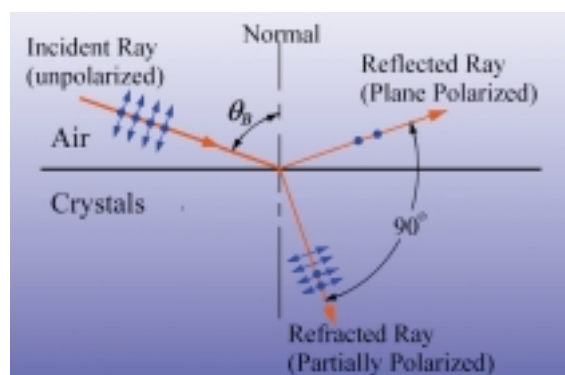
最適な結晶の幅 (W) を設計する時は、非線形結晶 (NLO) 結晶中のレーザービーム径と波長可変レンジの両方とも考慮しなければなりません。例えば、周波数逡倍の 532nm の場合のように、もしそれが単一の非線形プロセスであるなら、 $W = H$ を選びます。例えば、BBO 結晶を使って、440nm から 660nm の色素レーザーの周波数逡倍の場合のように、波長チューニングの広い非線形プロセスであるなら、結晶は $\theta = 36^\circ$ から $\theta = 66.6^\circ$ ままで角度チューニングしなければなりません。従って、結晶の幅 (W) は、 $H + 2 \times \tan((66.6^\circ - 36^\circ) / 2) \times L$ にします。結晶の高さ (H) が 4mm で長さ (L) が 7mm であれば、W は約 8mm の長さになります。

すべての非線形結晶は、ナノ秒より長いパルス幅のレーザーの周波数逡倍には、標準の長さ (L) があります。例えば、BBO や KTP 結晶の標準の長さは、それぞれ 7mm と 5mm です。しかし、光パラメトリック発振器 (OPO) や光パラメトリック増幅器 (OPA) では、例えば、BBO 結晶では > 12mm というように長くなり、超短パルスレーザーの SHG や THG では、1mm 以下の長さというように薄い結晶を使います。弊社の営業マンやエンジニアが、種々の応用に関する標準の結晶長の情報をまとめてあります。この情報については、無料で供給しています。

非線形結晶のブリュウスター角

レーザービームが空気中から屈折率 n の非線形結晶に入射した場合、ブリュウスター角は $\theta_B = \arctan(n)$ で定義されます。ブリュウスター角では、光の進行方向で規定される面および表面に直角な面で偏光した光の表面反射はゼロです。

表面反射を低く抑えるために、ブリュウスター角にカット (B カット) した非線形結晶が使われます。特別の注意がなければ、CASIX 社では同封の図面に従い、標準の B カットにします。標準カットとは異なるカットをご希望の場合は図面をご提供ください。



ご注文指定方法

Crystals Name	Application Type I OR Type II $\theta = ? \quad \phi = ?$	Dimension WXHXL	Polished	Coated	Mounted
For Example:					
BBO Crystals Type I SHG 1064nm 3X3X7 mm Polished Uncoated Unmounted					
OR BBO Crystals $\theta = 22.8^\circ \quad \phi = 0^\circ$ 3X3X7 mm Polished Uncoated Unmounted					

マウントに関する詳細は N-16 ページをご参照ください。