



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	プルースタイト・アップコンバータにおける視野角
Author(s)	小柳, 幸次郎; 三島, 瑛人; 桜庭, 一郎
Citation	北海道大學工學部研究報告, 101, 1-8
Issue Date	1980-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41648
Type	departmental bulletin paper
File Information	101_1-8.pdf



ブルースタイト・アップコンバータにおける視野角

小柳幸次郎* 三島 瑛人* 桜庭 一郎*

(昭和 55 年 6 月 30 日)

Acceptance Angle in Proustite Upconverters

Kojiro KOYANAGI, Teruhito MISHIMA and Ichiro SAKURABA

(Received June 30, 1980)

Abstract

Upconversion experiments on acceptance angle were carried out with a proustite crystal, pumped by a Nd:YAG laser ($1.06\ \mu\text{m}$) and a signal from a CO_2 laser ($10.6\ \mu\text{m}$) in the case of several phase-matching ways. Under tangential phase-matching conditions, all of the $10.6\ \mu\text{m}$ radiation passing through an approximate circle was upconverted to $0.96\ \mu\text{m}$ waves and an acceptance angle of the infrared beam of 7.0 degrees was measured for a $9.4\ \text{mm}$ length crystal. Measured values of acceptance angle agree reasonably well with the theoretical results. It was also shown that the periodic variations of the sum-frequency output have a periodicity near 0.7 degrees ascribed to the interference effects of infrared beam in the crystal.

1. ま え が き

非中心対称結晶ブルースタイト (Ag_3AsS_3) の二次非線形効果を用いたパラメトリック上側帯波変換により, 赤外線を可視光に変換するデバイスすなわちブルースタイト・アップコンバータは, 在来の赤外線検出器に比べて高感度, 広帯域そして高速応答の利点を持つため, 多くの関心を集めている^{(1),(2),(3)}。しかし変換効率が低く, 視野が狭いという欠点があり, 実用上問題点となっている。これらの難点のうち, アップコンバータの効率向上に関しては, いくつかの試みがなされているが^{(4),(5),(6)}, 視野については一次元の視野特性の検討があるけれども⁽⁷⁾, 二次元の特性における最適視野の詳細な実験報告は見当らない。

著者らは, Type I の位相整合で動作するブルースタイト・アップコンバータにおいて, $1.064\ \mu\text{m}$ のポンピング光 (常光線) を用い, $10.6\ \mu\text{m}$ の赤外線 (常光線) を $0.97\ \mu\text{m}$ の和周波数光 (異常光線) に変換する実験を行ってきた^{(8),(9)}。この報告の目的は, 位相整合条件を変化した場合, すなわち赤外線とポンピング光が collinear に入射する場合の位相整合状態から, 接線整合状態まで変化した場合における二次元的視野特性を測定し, 最適視野を検討することにある⁽¹⁰⁾。さらに視野特性における赤外線の結晶内多重反射の影響も考察されている。

* 電子工学科 電子物理工学講座

2. 位相整合と赤外線視野

アップコンバータにおける和周波数出力は次式で与えられる⁽¹⁾。

$$P_s(D) = \frac{\omega_s^2 d^2 D^2}{2n_i n_p n_s} \left(\frac{\mu_o}{\epsilon_o} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{P_i(0) P_p}{A} \left[\frac{\sin(\Delta k D/2)}{(\Delta k D/2)} \right]^2 \quad (1)$$

ここで Δk は結晶内における位相の不整合量であり

$$\Delta k = |k_s - k_i - k_p| \quad (2)$$

で与えられる。 k は結晶内部における波動ベクトルであり、添字 i , p と s はそれぞれ赤外線、ポンピング光および和周波数光を表わす。また n は屈折率、 ω は角周波数、 A は相互作用断面積、 D は結晶の厚さ、 d は実効非線形光学定数および $P_i(0)$ と P_p は結晶に入射する赤外線電力とポンピング光電力である。式 (1) の $[\sin(\Delta k D/2)/(\Delta k D/2)]^2$ の項よりわかるように、 D が光波長に比べて非常に大きいため、和周波数光出力は Δk に敏感である。位相整合条件を満足する場合、すなわち $\Delta k = 0$ のとき最大出力を示し、 Δk が増加すると出力が低下し、視野の大きさを決定する。

図 1 に波動ベクトルと結晶の関係を示す。ポンピング光が結晶に垂直入射し、結晶の表面の法線方向を x 軸とし、光学軸が xy 平面内にくるよう直交座標を決めてある。最初に xy 平面内における、一次元的視野角と位相整合について考察する。Type I の位相整合において、不整合量 Δk は

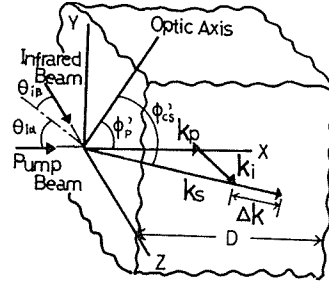


図 1 波動ベクトルと結晶

$$\Delta k = 2\pi \left[\frac{n_s(\phi_p' + \phi_i')}{\lambda_s} - \frac{n_p^o}{\lambda_p} \cos \phi_s' - \frac{n_i^o}{\lambda_i} \cos(\phi_s' - \phi_i') \right] \quad (3)$$

となる。ここで ϕ_p' は光学軸とポンピング光のなす角度であり、 ϕ_i' と ϕ_s' は、 xy 平面内における赤外線および和周波数光が、結晶内でポンピング光となす角度である。また λ は波長であり、 n^o と n^e は、それぞれ常光線と異常光線に対する主屈折率である。出力最大の $\Delta k = 0$ を満たす ϕ_p' と ϕ_i' の関係と、出力零の状態 $\Delta k = \pm 2\pi/D$ を満たす ϕ_p' と ϕ_i' の関係の計算結果を図 2 に示した。

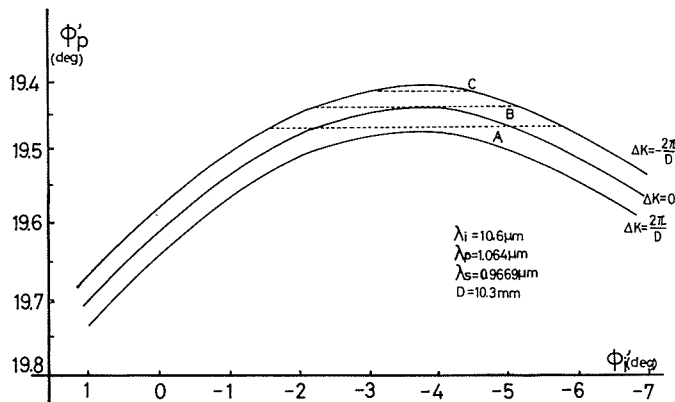


図 2 位相整合角特性 (理論値)

使用した数値は、 $\lambda_i = 10.6 \mu\text{m}$, $\lambda_p = 1.064 \mu\text{m}$, $\lambda_s = 0.9669 \mu\text{m}$, $n_i^o = 2.6966$, $n_p^o = 2.8157$, $n_s^o = 2.8348$ と $n_s^e = 2.5966$ であり、 D は 10.3 mm である⁽¹¹⁾。また赤外線波長 $10.55 \mu\text{m}$, $10.59 \mu\text{m}$, $10.61 \mu\text{m}$ と $10.63 \mu\text{m}$ についての、 $\Delta k = 0$ を満たす ϕ_p' と ϕ_i' の関係の実験結果の一例を図. 3 に示した⁽⁹⁾。実験に使用した結晶プルースタイト ($D = 10.3 \text{ mm}$) の光学軸と結晶の表面の法線方向とのなす角度 Θ は $22^\circ \pm 1^\circ$ であり、図. 3 には $\Theta = 22.72^\circ$ として ϕ_p' を目盛っている。この結果

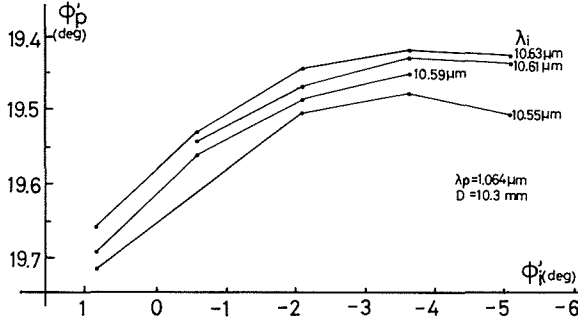


図3 位相整合角特性 (実験値)

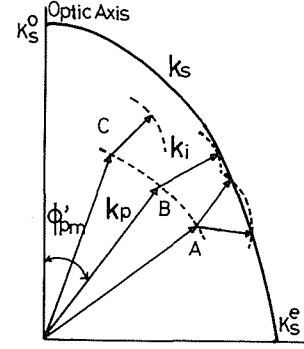


図4 位相整合状態の説明

は、図. 4 に示した単軸負結晶における、和周波数光の波動ベクトル面 (k_s 面) と $k_i + k_p$ の波動ベクトルの交点で示される位相整合状態より次のように説明される。図. 4 のBの場合、 k_s 面と $k_i + k_p$ が一点で接する状態であり、この場合の ϕ_p' を ϕ_{pm}' 、 ϕ_i' を ϕ_{im}' と置けば次式が成立する。

$$\Delta k \Big|_{\substack{\phi_i = \phi_{im} \\ \phi_p = \phi_{pm}}} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Delta k}{\partial \phi_i'} \Big|_{\substack{\phi_i = \phi_{im} \\ \phi_p = \phi_{pm}}} = 0 \quad (5)$$

この状態が文献 (7) で tangential phase-matching condition と呼ばれる状態であるが、ここでは接線整合と呼ぶことにする。プルースタイトのような負結晶では $k_s^o > k_s^e$ なので、図. 4 のAのように $\phi_p' > \phi_{pm}'$ の場合は、 k_s 面と $k_i + k_p$ 面は二点で交わり双峰性の視野特性を示し、図. 4 のCのような $\phi_p' < \phi_{pm}'$ の場合交点は存在しなく、最大出力が減少した単峰性の視野特性が得られる。故に ϕ_i' に対する和周波数光出力、すなわち赤外線視野角の特性は、 ϕ_p' に強く依存することになる。接線整合の場合、赤外線視野角は最大となる。従って広い赤外線視野角が要求される場合、接線整合を満たす必要がある。

次に二次元的視野角の特性を検討する。図. 1 より二次元における Type I の位相整合において、不整合量 Δk は次式のようになる。

$$\Delta k = \left[\frac{2\pi n_s(\phi_{cs}')}{\lambda_s} - |k_p + k_i| \right] \quad (6)$$

$$|k_p + k_i| = \sqrt{\left(\frac{2\pi n_p^o}{\lambda_p} \right)^2 + \left(\frac{2\pi n_i^o}{\lambda_i} \right)^2 + \frac{4\pi n_p^o}{\lambda_p} k_{ix}} \quad (7)$$

$$n_s(\phi_{cs}') = \left[\left(\frac{\cos \phi_{cs}'}{n_s^o} \right)^2 + \left(\frac{\sin \phi_{cs}'}{n_s^e} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$\cos \phi_{cs}' = \frac{(2\pi n_p^o / \lambda_p + k_{ix}) \cos \phi_p' + k_{iy} \cdot \sin \phi_p'}{|k_p + k_i|} \quad (9)$$

$$k_{ix} = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta'_{ia}}} \left(\frac{2\pi n_i^o}{\lambda_i} \right) \sqrt{1 - \sin^2 \theta'_{i\beta}}, k_{iy} = k_{ix} \cdot \tan \theta'_{ia} \quad (10)$$

$$\sin \theta_{ia} = n_i^o \sin \theta'_{ia}, \quad \sin \theta_{i\beta} = n_i^o \sin \theta'_{i\beta} \quad (11)$$

ここで θ_{ia} は、光学軸とポンピング光とを含む平面 (図. 1 の xy 平面) における、結晶外部でのポンピング光に対する赤外線入射角度であり、 $\theta_{i\beta}$ は xy 平面に対する赤外線の傾斜角度である。 ϕ_p' をパラメータとした二次元的視野角の数値計算結果を図. 5 に示した。使用した数値は、 $\lambda_i =$

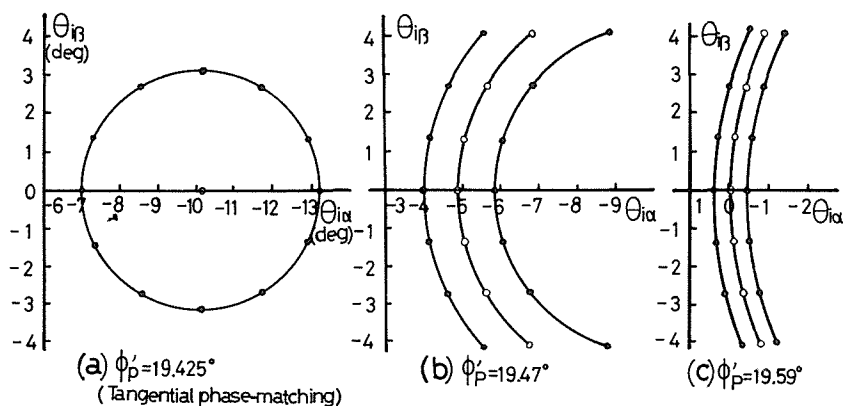


図5 二次元的視野角の数値計算 ($\lambda_i = 10.6 \mu\text{m}$, $\circ$ 出力最大点, $\bullet$ 出力半値点)

$10.6 \mu\text{m}$, $\lambda_p = 1.064 \mu\text{m}$, $\lambda_s = 0.967 \mu\text{m}$, $n_i^o = 2.6966$, $n_p^o = 2.8157$, $n_s^o = 2.8348$ と $n_s^e = 2.5966$ であり、 D は 9.4 mm である⁽¹¹⁾。図. (a), (b) と (c) は、接線整合から collinear な整合状態までの二次元的視野角の特性を示している。図. 5 (a) は接線整合の場合における二次元的視野角の特性であり、出力半値幅約 6.3° (結晶外) のほぼ円形な視野が得られている。なお二次元的視野の詳細な解析によると⁽¹²⁾, Δk を Taylor 展開により赤外線入射角度の二次関数で近似し、視野特性を解析した場合、接線整合するときの二次元的視野が、楕円近似されることが示されている。

3. 測定系

図. 6 に測定系の概要を示す。前述したように赤外線を可視光に効率よく変換するには、位相整合条件を満たす必要がある。ここでは結晶の周囲温度を一定にし、媒質の光学的異方性による角度同調法が用いられた。赤外線光源として炭酸ガスレーザを用い、波長は $10.51 \mu\text{m} \sim 10.61 \mu\text{m}$ の範囲で変化させ、分光器でモニタした。ポンピング光源は、波長 $1.064 \mu\text{m}$ で単一横モードの YAG レーザを使用した。発生する和周波数光は約 $0.97 \mu\text{m}$ である。S-1 特性を持つ光電子増倍管により和周波数光を検出し、ロックインアンプを通して、レコーダに記録した。ロックインアンプを使用するため、炭酸ガスレーザをチョップで変調し、同時に参照信号を取り出している。球面鏡 M_1 と結晶とは、球面鏡 M_2 に関して像点と物点の位置関係に設定してある。故に M_1 を回転させることにより、赤外線を常に結晶に入射させながら、赤外線入射角度を変化させることができる。

図. 7 に結晶と角度の関係を示した。使用したブルースタイトの厚さは約 9.4 mm であり、入射面法線方向と結晶の光学軸のなす角 Θ は $20^\circ \pm 1^\circ$ である。入射面法線方向とポンピング光が

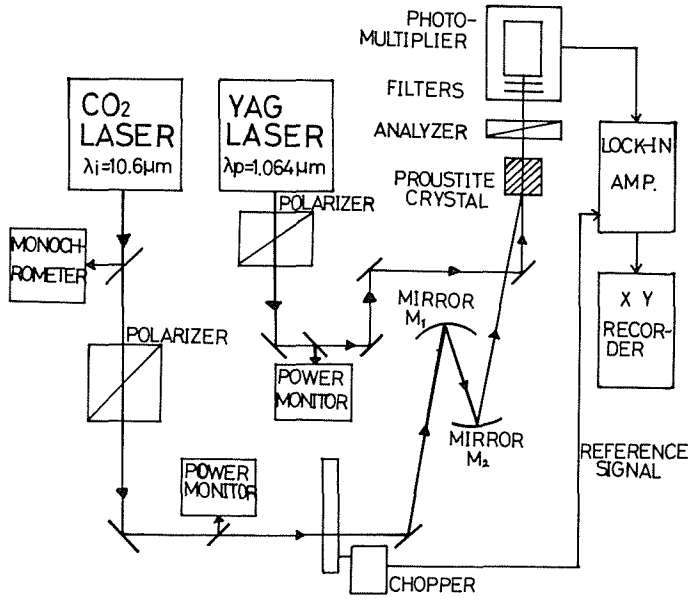


図6 測定系の概要

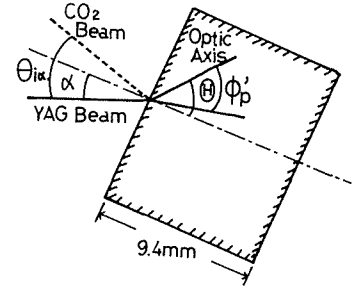


図7 結晶の角度

結晶外部でなす角を α とすれば、この角度は結晶の回転角に相当し、結晶を回転して ϕ_p' を変化させることができる。ここで α と ϕ_p' の間には次の関係がある。

$$\phi_p' = \theta - \sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{n_p^o}\right) \quad (12)$$

実験は、位相整合条件を満足する適当な結晶回転角 α に対して、 $\theta_{i\beta}$ をパラメータとし、赤外線入射角度 $\theta_{i\alpha}$ に対する和周波数光出力を測定し、二次元的視野角の特性を得た。

4. 測定結果

4.1 二次元的視野角

接線整合から collinear 整合に近い状態までの、二次元的視野角の測定結果の一例を図. 8 に示した。この図は位相整合の条件を満足する角度で生じる最大出力に対して、出力が半分に減少

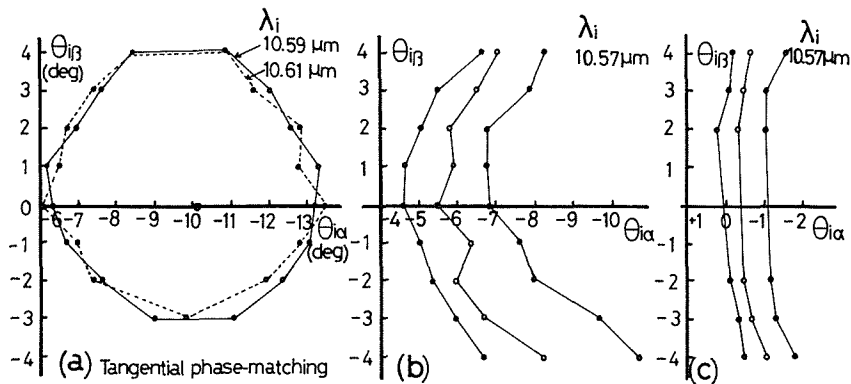


図8 二次元的視野角の測定結果 (○出力最大点, ●出力半値点)

する角度をプロットしてある。図. 8(a)は接線整合する場合であり、出力半値幅約 7° （結晶外）前後のほぼ円形な視野特性が得られた。使用した CO_2 レーザ波長は、 $10.59\mu\text{m}$ と $10.61\mu\text{m}$ であり、その場合結晶回転角 α は 3.24° と 3.28° であった。これらの角度に対応する ϕ_p' の値は、 Θ を 20.58° とすると 19.43° と 19.42° になる。図. 8(b)と(c)は、接線整合の場合からずれて、collinearに近い状態へ移る場合の視野特性を示す。使用した CO_2 レーザ波長は $10.57\mu\text{m}$ であり、結晶回転角 α は図. 8(b)で 3.08° ($\phi_p'=19.48^\circ$)、図. 8(c)で 2.74° ($\phi_p'=19.60^\circ$)である。collinear整合に近づくに従い、曲率が小さくなるリング状の視野特性の一部を示す測定結果が得られた。collinearに近い所では、ほぼ 1° 前後の狭い幅の視野特性しか得られない。これらの結果を、屈折率の数値⁽¹⁾を用いて計算した二次元的視野角の数値計算の結果図. 5と比較すると、定性的な特性は良く一致していることがわかる。測定値が理論値よりもやや広めに出ているが、これはポンピング光などの角度広がり（約 0.06° ）によるものと思われる。

4. 2 干渉効果

図. 9に入力赤外線用 CO_2 レーザの波長 $10.57\mu\text{m}$ および結晶回転角 $\alpha=3.12^\circ$ において、 x 平面内における、赤外線入射角 θ_{ia} に対する和周波数光出力の測定結果を示した。この場合ほぼ接線整合が満たされている。同図からわかるように約 $0.4^\circ\sim 1.1^\circ$ の周期性を持つ多くのピークが観測されている。Y. Klinger⁽¹³⁾は、これを共振効果と記述しているが、詳細に説明していない。従ってこれについて詳しく考察してみた。図. 9には、赤外線入射角 θ_{ia} に対する赤外線の結晶透過光出力の測定結果もあわせて示してある。これらを比較すると、出力最大の位置や周期性および脈流分の割合などが良く一致していることがわかる。これらの結果は、赤外線波長が変化し、結晶回転角の異なる場合でも同様であった。

いま平行平面の結晶における、繰返し反射の干渉効果を考慮した透過光の強さを考えてみる。透過光の強さは、よく知られているように次式で与えられる⁽¹⁴⁾。

$$|T|^2 = \frac{1}{1 + 2F \sin^2(\delta/2)} \quad (13)$$

ただし、 $F = 4r^2/(1-r^2)^2$ 、 $\delta = 4\pi n_i^o D \cos i' / \lambda_i$ 、 i' は結晶内の入射角度そして r は反射率である。赤外線入射角度 i （結晶外）に対する透過光出力の計算結果を図. 10に示した。使用した数値は、赤外線波長 $10.57\mu\text{m}$ 、屈折率 $n_i^o=2.6969$ 、反射率 $r=0.459$ そして $D=9.4\text{mm}$ である。図. 9と図. 10を比較すると、出力最大の位置の周期性が良く一致していることがわかる。ただし角度 i と実験で使用した θ_{ia} との関係は、結晶回転角を α とすれば次のようになる。

$$i = \theta_{ia} + \alpha \quad (14)$$

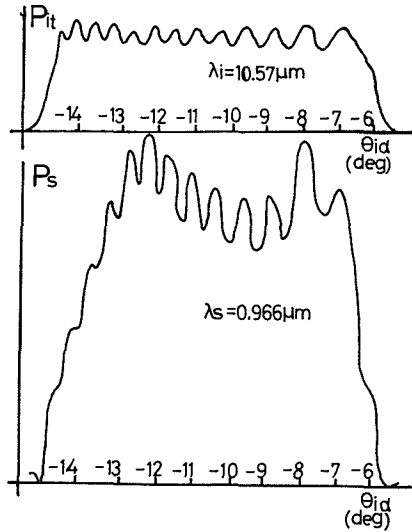


図9 赤外線入射角に対する和周波数光出力と赤外線の結晶透過光出力

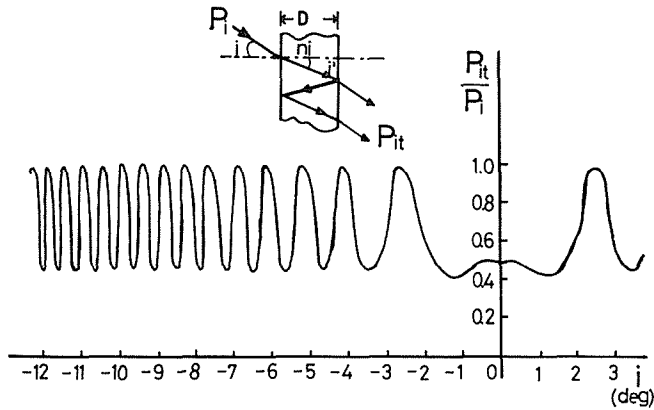


図10 赤外線入射角度に対する繰返し反射干渉による透過光出力

従ってこれら多くのピークが発生する原因は、結晶内における赤外線の繰返し反射による干渉効果であろうと考えられる。しかし最大出力に対する脈流分の割合は、理論値が約二倍程度大きい。これは赤外線の結晶内における減衰の影響を式(13)の理論値計算では考慮していないためと思われる。損失を考慮した透過光出力の理論式を求めてみると次式のようになる。

$$|T|^2 = \frac{(1-r^2)^2 e^{-\alpha_0 D / \cos i'}}{(1-r^2 e^{-\alpha_0 D / \cos i'})^2 + 4r^2 e^{-\alpha_0 D / \cos i'} \cdot \sin^2(2\pi n D \cos i' / \lambda_i)} \quad (15)$$

ただし α_0 は電力損失係数である。使用した結晶の赤外線に対する損失を、赤外線が結晶を通過するたびに e^{-1} に出力が落ちると仮定した場合、すなわち $\alpha_0 D = 1$ として損失を考慮した理論式(15)を計算すると、脈流分の割合もおおよそ一致することがわかった。

さらにポンピング光の結晶回転角に対する干渉効果も観測されている。和周波数光の結晶内における多重反射による干渉効果も考えられ、赤外線視野角特性に種々の影響を及ぼしているようである。

5. む す び

Type I の位相整合を用い、波長 $1.064 \mu\text{m}$ のポンピング光を加えたプルスタイト・アップコンバータにおいて、赤外線(波長 $10.6 \mu\text{m}$)を和周波数光(波長 $0.97 \mu\text{m}$)に変換する場合の二次元的視野角を測定した。得られた結果を要約すると次のようになる。

理論的には予想されていたが、広い円形の二次元的視野を得るためには、接線整合の状態で使用しなければならないことが、実験的に確認された。又接線整合から collinear の方向にずれた場合、リング状の視野を示すこともあわせて確認された。今回の実験において、接線整合時の場合に、ほぼ 7° 前後の円形の広い視野が得られたが、さらに広い視野角の要求に対しては、像の解像度も考慮したうえ、今後実験的に検討していきたい。

次に赤外線入射角に対する和周波数光出力に周期性を持った多くのピークが発生するのは、赤外線の結晶内における多重反射の干渉効果であることがわかった。この効果は屈折率の大きい結晶においては必然的なものと考えられるので、映像変換の場合大きな問題点になると思われる。これらに対する対策としては、接線整合の場合の赤外線入射角度と結晶の表面の法線方向とを近づけるように結晶を切り出す方法や、多層膜による無反射コーティングが考えられるが、今後の課題としたい。

おわりに測定について助言して下さった福田長重助手ならびに実験に協力された平山裕光工学博士（現在日本電気株式会社勤務）に感謝する。

参 考 文 献

- (1) Warner, J. ; "Difference frequency generation and up-conversion", Quantum Electronics, Edited by H. Rabin and C. L.Tang, Vol. 1, PartB, p. 703, Academic Press (1975).
- (2) 三島瑛人, 小柳幸次郎, 平山裕光, 桜庭一郎; "ブルースタイトを用いたパラメトリック和周波数変換における位相整合角の温度依存性", 進学論(C), Vol. J 62-C, 7, p. 529 (昭和 54-07)。
- (3) 平山裕光, 小柳幸次郎, 三島瑛人, 桜庭一郎; "ブルースタイト・アップコンバータにおける接線整合の温度依存性", 信学論(C), Vol. J 63-C, 5, p. 311 (昭和 55-05)。
- (4) 佐々木慎也, 三島瑛人, 桜庭一郎; "2 光子共鳴励起媒質を用いる映像アップコンバータの結像式", 信学論(C), Vol. J 63-C, 8, 印刷中。
- (5) 佐々木慎也, 三島瑛人, 桜庭一郎; "2 光子共鳴励起型映像アップコンバータにおける媒質厚さによる収差", 信学論(C), Vol J63-C, 9, 印刷中。
- (6) 佐藤邦宏, 佐々木慎也, 三島瑛人, 桜庭一郎; "2 光子共鳴励起型映像アップコンバータの色収差", 信学報, OQE80-33 (1980-06)。
- (7) Warner,J. ; "Phase-matching for optical upconversion with maximum angular aperture —— theory and practice", Opto-electronics, Vol. 1, 1, p. 25 (1969).
- (8) 小柳幸次郎, 三島瑛人, 桜庭一郎; "ブルースタイトを用いたパラメトリック和周波数変換(第一報)", 電気四学会支部連大, 150 (昭 51-10)。
- (9) 小柳幸次郎, 平山裕光, 三島瑛人, 桜庭一郎; "ブルースタイトを用いたパラメトリック和周波数変換(第二報)", 電気四学会支部連大, 29 (昭 53-10)。
- (10) 小柳幸次郎, 平山裕光, 三島瑛人, 桜庭一郎; "ブルースタイトを用いたパラメトリック和周波数変換における視野角", 信学技報, OQE80-34 (1980-06)。
- (11) Hobden,M.V. ; "The dispersion of the refractive indices of Proustite (Ag_3AsS_3)", Opto-electronics, Vol. 1, 3, p. 159 (1969).
- (12) 鴻上明彦; "パラメトリック映像変換器におけるコントラストのしきい値", 北大工学研究科電子工学専攻, 修士論文 (1979)。
- (13) Klinger, Y. ; "Infrared 10.6 micron CW up-conversion in Proustite using an Nd : YAG laser pump", Proc. IEEE, Vol. 57, 10, p. 1797 (1969).
- (14) 桜庭一郎; "量子電子工学", p.28, 森北出版 (1975)。