



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	プルースタイト・アップコンバータ赤外分光計の分解能について
Author(s)	小柳, 幸次郎; 桜庭, 一郎
Citation	北海道大學工學部研究報告, 111, 49-54
Issue Date	1982-10-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41765
Type	departmental bulletin paper
File Information	111_49-54.pdf



プルースタイト・アップコンバータ赤外分光計の 分解能について

小柳幸次郎 桜庭 一郎

(昭和57年 6 月30日受理)

Spectral Resolution of a Proustite Upconverter-Spectrometer

Kojiro KOYANAGI and Ichiro SAKURABA

(Received June 30, 1982)

Abstract

An upconverter-spectrometer system in the $10\ \mu\text{m}$ spectral region, using a proustite crystal and a Nd:YAG laser as the pump, is described.

Experimental results regarding the spectral resolution of the system are also presented.

1. ま え が き

非線形光学結晶を用いたパラメトリック相互作用による、赤外線の見光への和周波数変換は、多くの関心を集めている^{1),2)}この方法は、変換された見光を検出器を冷却する事なく高感度、高速応答で検出できるので、赤外線検出器として有望視されている。この技術の応用として、熱像検出器等の他に、光パラメトリック和周波数変換の特徴である、位相整合条件による周波数の選択性を利用した、高感度、高速応答の赤外分光計が考えられる。M.M.Abbas らは³⁾非線形光学結晶 LiNbO_3 を用いて、温度整合により、 $2.7\ \mu\text{m}\sim 4.5\ \mu\text{m}$ の赤外線波長に対する赤外分光計を考え、測定結果より、アップコンバータ分光計が微弱な赤外線のスペクトル観察に有効である事を示している。ここでは、 $10\ \mu\text{m}$ 付近の赤外線に対する、非線形光学結晶プルースタイト ($\text{Ag}_3\text{As}_2\text{S}_3$) を用いた、角度同調による、プルースタイト・アップコンバータ赤外分光計の分解能について考察し、分解能に影響を及ぼすさまざまな要因について実験的に検討した。

2. 分解能について

アップコンバータによる赤外分光計の原理は、和周波数光出力が位相の不整合量に依存し、その不整合量が赤外線周波数、赤外線入射角度、結晶の光学軸とポンピング光のなす角度(結晶の回転角に対応する)及び結晶の周囲温度等に影響される事を利用したものである。ここでは、周

囲温度一定の状態、ポンピング光に対して一定の角度で入射した赤外線波長に対して、結晶を回転させる事による角度同調の方法を用いて、位相整合の条件を満足させ、発生した和周波数光出力を光電子増倍管で検出し、結晶回転角に対する赤外線波長の関係を求めるものである。最初にアップコンバータ赤外分光計の分解能を求めてみる。パラメトリック和周波数変換における和周波数光出力は次式で与えられる¹⁾

$$P_s(D) = \frac{\omega_s^2 d^2 (\mu_0 / \epsilon_0)^{3/2}}{2 n_{ir} n_s n_p} D^2 \cdot \frac{P_{ir}(0) \cdot P_p}{A} \cdot \sin^2(\Delta k D/2) \quad (1)$$

ただし、 $\Delta k = |K_s - K_{ir} - K_p|$ は位相の不整合量で、 K は波動ベクトル、添字 s, ir, p は和周波数光、赤外線、ポンピング光をそれぞれ表わし、 D は結晶の長さ、 d は非線形光学定数、 P は電力、 A は相互作用の断面積、 n は結晶の屈折率である。式(1)の $\sin^2(\Delta k D/2)$ の項よりわかるように、和周波数光出力は Δk に敏感であり、 $\Delta k = 0$ のとき最大和出力を示し、 Δk の増加と共に出力が減少する。故に赤外線入射角度と周波数に対する和周波数光出力の解析的な理論式は、 Δk を Taylor 展開を用いて、赤外線入射角度と周波数変化に対して現わす次式によって表現する事ができる^{4),5)}

$$\begin{aligned} \Delta k &= k_s(\phi_p + \psi_s, \omega_s + \Delta\omega_{ir}) - k_p(\phi_p, \omega_p) \cos \psi_s \\ &\quad - k_{ir}(\phi_p + \psi_{ir}, \omega_{ir} + \Delta\omega_{ir}) \cos(\psi_{ir} - \psi_s) \\ &= \frac{1}{A} \psi_{ir}^2 + \frac{2}{A} \psi_0 \psi_{ir} + k_0 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 k_0}{\partial \omega^2} \Delta\omega_{ir}^2 \\ &\quad + \frac{\partial k_0}{\partial \omega} \Delta\omega_{ir} + B \cdot \psi_{ir} \cdot \Delta\omega_{ir} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、

$$\begin{aligned} A &= 2k_s^2 \{ k_s \cdot k_p \cdot k_{ir} + k_{ir}^2 [\partial^2 k_s / \partial \phi^2] \phi_p \\ &\quad - k_s^2 [\partial^2 k_{ir} / \partial \phi^2] \phi_p \}^{-1} \\ \psi_0 &= A \{ k_{ir} [\partial k_s / \partial \phi] \phi_p - k_s [\partial k_{ir} / \partial \phi] \phi_p \} / 2k_s \\ k_0 &= k_s(\phi_p, \omega_s) - k_p(\phi_p, \omega_p) - k_{ir}(\phi_p, \omega_{ir}) \\ B &= [\partial^2 k_s / \partial \phi \partial \omega] \phi_p \cdot (k_{ir} / k_s) - [\partial^2 k_{ir} / \partial \phi \partial \omega] \phi_p \omega_{ir} \\ &\quad + (k_{ir} / k_s) [\partial k_s / \partial \phi] \phi_p [\partial k_{ir} / \partial \omega] \omega_{ir} / k_{ir} - [\partial k_s / \partial \omega] \omega_s / k_s \end{aligned}$$

普通の整合状態では、 $(\partial k_0 / \partial \omega) \Delta\omega_{ir} \gg (1/2) \cdot (\partial^2 k_0 / \partial \omega^2) \cdot \Delta\omega_{ir}^2$ であり、又 $B \cdot \psi_{ir} \cdot \Delta\omega_{ir}$ の項は他の項に比較して小さいので、式(2)は次のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta k &= \frac{1}{A} \psi_{ir}^2 + \frac{2}{A} \psi_0 \psi_{ir} + k_0 + \frac{\partial k_0}{\partial \omega} \Delta\omega_{ir} \\ &= \frac{1}{A} (\psi_{ir} + \psi_0)^2 + k_0 - \frac{\psi_0^2}{A} + \frac{\partial k_0}{\partial \omega} \Delta\omega_{ir} \end{aligned} \quad (3)$$

今赤外線の入射方向を $\psi_{ir} = -\psi_0$ とすると式(3)は、

$$\Delta k = k_0 - \frac{\psi_0^2}{A} + \frac{\partial k_0}{\partial \omega} \Delta\omega_{ir} \quad (4)$$

赤外線角周波数 ω_{ir} (波長 λ_{ir}) に対して位相整合条件を満足するように ϕ_p を決めると、

$$\Delta k = k_s(\phi_p, \omega_s) - k_p(\phi_p, \omega_p) - k_{ir}(\phi_p, \omega_{ir}) - \frac{\psi_0^2}{A} = 0 \quad (5)$$

これは、接線整合の条件といわれている。次に赤外線角周波数が $\omega_{ir} + \Delta\omega_{ir}$ に変化した場合、この角周波数に対して位相整合の条件を満足させる光学軸とポンピング光のなす角度を $\phi_p + \Delta\phi_p$

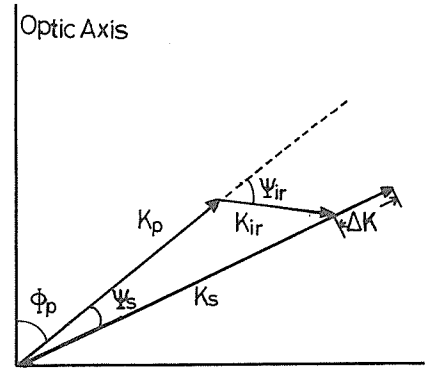


図1. 光学軸と波動ベクトルの関係

とすると次の式が成立する。

$$\Delta k = k_s(\phi_p + \Delta\phi_p, \omega_s + \Delta\omega_{ir}) - k_p(\phi_p + \Delta\phi_p, \omega_p) - k_{ir}(\phi_p + \Delta\phi_p, \omega_{ir}) - \frac{\psi_0^2}{A} = 0 \quad (6)$$

ただし、 ψ_0^2/A の ϕ_p に対する変化は小さいので一定とした。式(5)と式(6)より

$$\Delta\phi_p \left(\frac{\partial k_s}{\partial \phi_p} - \frac{\partial k_p}{\partial \phi_p} - \frac{\partial k_{ir}}{\partial \phi_p} \right) + \Delta\omega_{ir} \left(\frac{\partial k_s}{\partial \omega_s} - \frac{\partial k_{ir}}{\partial \omega_{ir}} \right) = 0 \quad (7)$$

ここで Type I の位相整合の場合について考えると $(\partial k_p / \partial \phi_p) = 0$, $(\partial k_{ir} / \partial \phi_p) = 0$ 故に式(7)よりアップコンバータ赤外分光計の分散は、

$$\frac{\Delta\phi_p}{\Delta\omega_{ir}} = \frac{-[(\partial k_s / \partial \omega_s) - (\partial k_{ir} / \partial \omega_{ir})]}{(\partial k_s / \partial \phi_p)} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta\phi_p}{\Delta\lambda_{ir}} = \frac{2\pi c [(\partial k_s / \partial \omega_s) - (\partial k_{ir} / \partial \omega_{ir})]}{\lambda_{ir}^2 (\partial k_s / \partial \phi_p)} \quad (9)$$

となる。非線形光学結晶プルースタイト (Ag_3AsS_3)⁶⁾ の場合の分散を数値計算すると $\Delta\phi_p / \Delta\lambda_{ir} = -0.013 \times 10^6 \text{ rad/m} = -0.75 \text{ deg}/\mu\text{m}$ の値が得られた。次に分解能について調べる。赤外線角周波数 ω_{ir} が $\psi_{ir} = -\psi_0$ の方向から入射した場合、和周波数光出力を最大値 ($\Delta k = 0$) から出力零 ($\Delta k = \pm 2\pi/D$) まで変化させる ϕ_p の変化量 $\Delta\phi'_p$ は次式から求まる。

$$\Delta k = k_s(\phi_p + \Delta\phi'_p, \omega_s) - k_p(\phi_p + \Delta\phi'_p, \omega_p) - k_{ir}(\phi_p + \Delta\phi'_p, \omega_{ir}) - \frac{\psi_0^2}{A} = \pm \frac{2\pi}{D} \quad (10)$$

$$\Delta\phi'_p = \pm \frac{2\pi}{D(\partial k_s / \partial \phi_p)} \quad (11)$$

故に検知できる最小の赤外線波長変化幅は、レーリーの判定条件より $|\Delta\phi_p| = |\Delta\phi'_p|$ の関係を用いて、

$$|\Delta\lambda_{ir}| = \frac{\lambda_{ir}^2}{c[(\partial k_s / \partial \omega_s) - (\partial k_{ir} / \partial \omega_{ir})] \cdot D} \quad (12)$$

プルースタイト・アップコンバータ赤外分光計の場合について数値計算すると、 $\lambda_{ir} = 10.55 \mu\text{m}$, $D = 9.4 \text{ mm}$ において約 $|\Delta\lambda_{ir}| = 470 \text{ \AA}$ の値が得られた。又分解能は次式で現わされ、

$$\frac{\lambda_{ir}}{|\Delta\lambda_{ir}|} = \frac{c \cdot D}{\lambda_{ir}} \left| \left(\frac{\partial k_s}{\partial \omega_s} - \frac{\partial k_{ir}}{\partial \omega_{ir}} \right) \right| \quad (13)$$

上式より分解能は、結晶の長さ D が大きい程、又結晶の分散 $[(\partial k_s / \partial \omega_s) - (\partial k_{ir} / \partial \omega_{ir})]$ が大きい程良くなる事がわかる。ここでのプルースタイト・アップコンバータ赤外分光計の場合の分解能は、 $\lambda_{ir} = 10.55 \mu\text{m}$, $D = 9.4 \text{ mm}$ で約 2.2×10^2 になる。M.M.Abbas らの非線形光学結晶 LiNbO_3 を用いた、温度整合の場合の分解能は約 2.5×10^3 の値が得られているが、そこでの結晶の長さは $D = 5 \text{ cm}$ である³⁾。

次に周波数分解能に影響を及ぼす要因について考えてみる。ポンピング光の角度広がりによる影響、赤外線の入射角度の変動による影響、そして結晶の周囲温度の変動による影響等が考えられる。ポンピング光に角度広がり $\Delta\phi_{p0}$ がある場合、検知できる最小の赤外線波長変化幅は、式(9)より次式で現わされる。

$$\Delta\lambda_{ir2} = \frac{\lambda_{ir}^2 [(\partial k_s / \partial \phi_p)]}{2\pi c [(\partial k_s / \partial \omega_s) - (\partial k_{ir} / \partial \omega_{ir})]} \Delta\phi_{p0} \quad (14)$$

次に赤外線の入射方向が $\psi_{ir} = -\psi_0$ を中心に ϕ_0 だけはずれた場合の赤外線波長のずれは式(3)より

$$\Delta\lambda_{ir3} = \frac{\lambda_{ir}^2}{2\pi c A [(\partial k_s / \partial \omega_s) - (\partial k_{ir} / \partial \omega_{ir})]} \varphi_0^2 \quad (15)$$

最後に結晶の周囲温度の影響は、三島らの実験結果より次のようなデータが得られている^{7),8)}

$$\Delta\lambda_{ir4}=70\cdot\Delta T[\text{\AA}] \quad (16)$$

ただし、 ΔT は周囲温度の変化量で単位は $^{\circ}\text{C}$ である。なおプルスタイト・アップコンバータ赤外分光計の場合について式(14)、式(15)を数値計算すると、 $\lambda_{ir}=10.55\text{ }\mu\text{m}$ 、 $D=9.4\text{ mm}$ の場合次式となる。

$$\Delta\lambda_{ir2}=4690\cdot\Delta\phi_{p0}'[\text{\AA}] \quad (17)$$

ただし、 $\Delta\phi_{p0}'$ は結晶外でのポンピング光の角度広がり度で、単位は度である。

$$\Delta\lambda_{ir3}=21\cdot\varphi_0^2 \quad [\text{\AA}] \quad (18)$$

φ_0 は結晶外での赤外線入射角度の変動であり、単位は度である。

3. 測定系

測定系の概要を図.2に示す。用いた非線形光学結晶プルスタイト(Ag_3AsS_3)は長さ 9.4 mm である。赤外線光源としては炭酸ガスレーザを用い、波長は $10.51\text{ }\mu\text{m}\sim 10.69\text{ }\mu\text{m}$ の範囲で変化させた。

ポンピング光源は、波長 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ のYAGレーザを使用した。発生する和周波数光は約 $0.97\text{ }\mu\text{m}$ となるので、S-1陰極の光電子増倍管で検出し、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パで変調し、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と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、赤外線を常に入射させながら、赤外線入射角度を変化させる事ができる。なお結晶回転角の変化は、変位計を通してレコーダに書かせた。

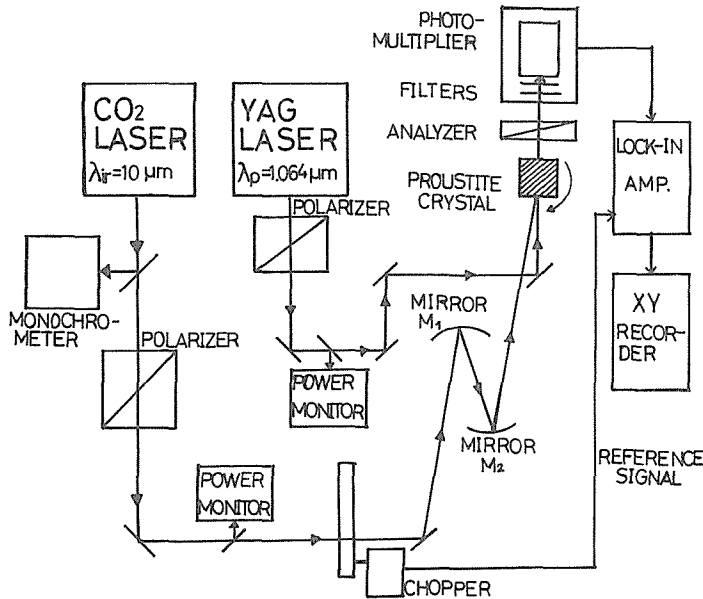


図2. 測定系の概略

4. 測定結果

実験は、結晶の周囲温度を一定とし、ポンピング光の角度広がりパラメータとして、赤外線入射方向一定($\varphi_{ir} = -\psi_0$)の状態において、各赤外線波長に対して、 ϕ_p の変化量(結晶の回転角に対応)に対する和周波数光出力特性を求め、検知できる最小赤外線波長変化幅を導き出した。

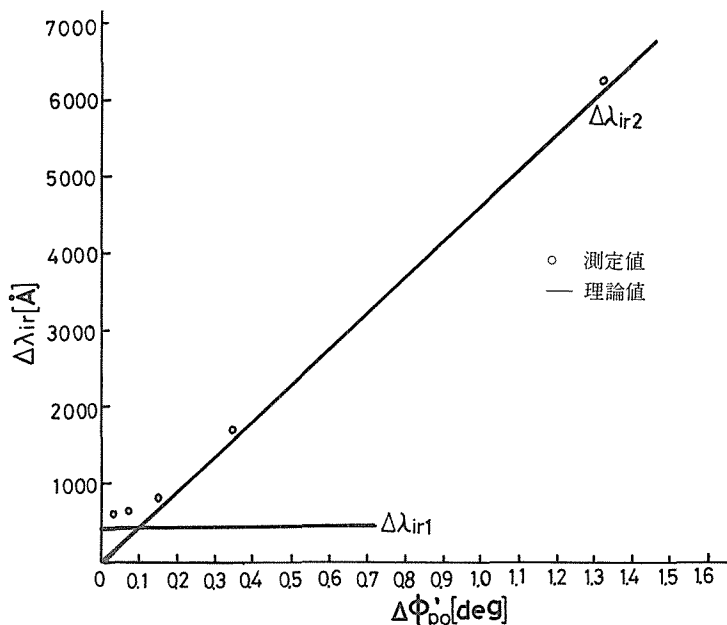


図.3 ポンピング光の角度広がりに対する、検知できる最小赤外線波長幅

測定結果を式(17)の理論式と合わせて図.3に示した。又 ϕ_p を固定しておき、赤外線入射方向の赤外線中心入射角度からの変動に対する、赤外線波長のずれを測定した。赤外線入射角度(結晶外) $\psi'_{ir} = 10.1^\circ$ (接線整合の条件を満足する角度) と、 $\psi'_{ir} = 3^\circ$ の場合についての測定結果を図.4

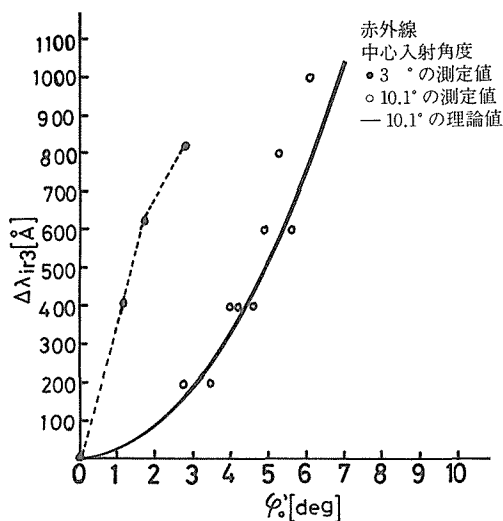


図.4 赤外線入射角度の変動に対する赤外線波長のずれ

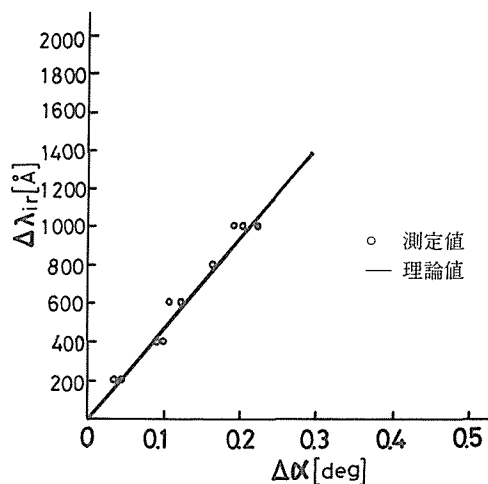


図.5 結晶回転角に対する赤外線波長の変化

に示した。又赤外線入射角度が一定の場合の、結晶回転角に対する最大の和周波数光出力を得る赤外線波長の関係を図.5に測定値と理論値を合わせて示してある。なお赤外線入射方向の違いによる検知できる最小の赤外線波長幅の変化はみられなかった。測定値と理論値の良好一致が得られた。

5. ま と め

プルースタイト・アップコンバータによる $10\mu\text{m}$ 帯の赤外分光計の分解能について基礎的な考察を行なった。その結果、ポンピング光の角度広がりが無視できる場合は、分解能は結晶の長さで分散の状態が決まり、結晶の長さ 9.4mm で約 2.2×10^2 の分解能が得られた。なおポンピング光の角度広がり 0.1 度以上の場合は、分解能はポンピング光の角度広がりだけでほぼ決まってしまう事がわかった。又赤外線の入射方向が変動した場合の影響は、赤外線中心入射角度が接線整合の条件を満たす場合が一番小さく、ほぼ 1 度の変動に対して約 $20\text{\AA}$ の赤外線波長のずれを生ずる。collinear に近い状態では、赤外線入射方向 1 度の変動に対して約 $300\text{\AA}$ の赤外線波長のずれが生ずることがわかった。なお赤外線中心入射角度に対する分解能の変化はみられなかった。結晶の周囲温度の変動による影響は、 1°C で約 $70\text{\AA}$ の赤外線波長のずれをもたらした。以上の結果より、プルースタイト・アップコンバータ赤外分光計は、赤外線波長 $10\mu\text{m}$ 帯の、プリズム分光計と同程度の分解能で、高感度、高速応答の赤外分光計として注目してよさそうである。なお、アップコンバータによる赤外分光計の分解能をあげるためには、一つには、結晶の長くて、分散の大きいものを使用する事であるが、これからは、さらに高分解能にするための方法を検討してみたい。

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, Part B, p.703, Academic Press(1975).
- 2) F.L.Schow, A.Riazi, O.P.Gandhi, and R.W.Grow; "Spatial resolution of an intracavity image upconverter," Appl.Phys.Lett., Vol.38 No.10, p.757(1981).
- 3) M.M.Abbas, T.Kostiuk, and K.W.Ogilvie; "Infrared upconversion for astronomical applications", Appl.Optics, Vol.15, No.4, p.961(1976).
- 4) 小柳幸次郎, 桜庭一郎; "プルースタイト・アップコンバータにおける赤外線入射角と周波数に対する和出力", 電子通信学会総合全国大会, 815 (昭56-4).
- 5) 小柳幸次郎, 桜庭一郎; "アップコンバータ赤外分光計の分解能", 電子通信学会総合全国大会, 919(昭57-3).
- 6) Hobden, M.V.; "The dispersion of the refractive indices of Proustite(Ag_3AsS_3)", Opto-electronics, Vol.1, 3, p.159(1969).
- 7) 三島瑛人, 小柳幸次郎, 平山裕光, 桜庭一郎; "プ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", 信学論(C), Vol.J62-C, 7, p.529 (昭54-07).
- 8) 平山裕光, 小柳幸次郎, 三島瑛人, 桜庭一郎; "プルースタイト・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.J63-C, 5, p.311(昭55-05).