



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	多光波混合によるアップコンバータの視野特性
Author(s)	小柳, 幸次郎; Koyanagi, Kojiro; 岡本, 淳 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 153, 19-26
Issue Date	1990-11-29
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42265
Type	departmental bulletin paper
File Information	153_19-26.pdf



多光波混合によるアップコンバータの視野特性

小柳幸次郎 岡本 淳 三島瑛人

(平成2年8月31日受理)

Acceptance Angles of Upconverter by Multi-Wave Mixing

Kojiro KOYANAGI, Atushi OKAMOTO and Teruhito MISHIMA

(Received August 31, 1990)

Abstract

This paper presents a theoretical study of the acceptance angles of upconverters by optical multi-wave mixing which are classified under forward sum and difference mixing and backward sum and difference mixing. It is found that broad acceptance angles are obtained in upconverter by backward multi-wave difference mixing.

1. ま え が き

非線形光学効果を用いたパラメトリック周波数変換は、波長可変なコヒーレント光発生器、赤外線を可視光に変換することによる赤外線検出器、また最近話題になっている位相共役波発生器¹⁾などに利用されている。赤外線検出器の応用として、赤外線像を直接可視光像に変換する映像アップコンバータ²⁾が考えられる。この方法は、非中心対称性結晶や金属蒸気などの非線形媒質内で、赤外線像からの入力光と大きな強度のポンピング光を相互作用させ、出力の可視光像を得るものである。走査、冷却が不要で、高感度、低雑音、高速応答の可視域検出器を利用できる特長を持っている。この映像アップコンバータの実用化において大事なことは、入力光から出力光への変換効率を高めかつ分解能をあげることである。その為には、非線形光学係数の大きい媒質において位相整合を満たし、かつ広い視野を得る必要がある。筆者らは、3次の非線形光学効果を用いた、前進波型の4光波和周波数変換によるアップコンバータを中心に、視野特性^{3), 4)}を検討してきた。

本論文は、複数個の入力光とポンピング光からなるより一般的な多光波混合によるアップコンバータを考えている。このアップコンバータを、前進波型和及び差周波数変換と後進波型和及び差周波数変換による4つのアップコンバータに分類し、それぞれの視野特性について理論的に比較、検討している。また視野の拡大法について考察している。なお、多光波混合の具体的な一例として、高い変換効率の期待できるセシウム蒸気を用いた2光子共鳴励起形の4光波混合による10 μ m帯の赤外線から可視光へのアップコンバータを考え⁵⁾、視野を数値計算より求めている。その結果、後進波型和周波数変換は普通のバルク結晶では実現化が難しい。高次の後進波型差周波数変換によるアップコンバータにおいて広い視野の得られることが分かった。

2. 多光波混合の視野特性

2.1 発生する波の出力

最初に、図1の2次元の有限な大きさをもつ非線形媒質内の多光波パラメトリック相互作用により発生する波の電界と出力を求める。但し、ここでは、入力光から出力光への変換効率は小さく、強度の十分大きいポンピング光と共に入力光の減衰も無視できるものと仮定し、Hellwarthらの理論^{6),7)}を用いて求める。すなわち、入力光とポンピング光の各入射光平面波電界により、非線形媒質内の座標 $r(x, z)$ に非線形分極波密度 $P_{NL} \exp(-ik_{ps} \cdot r)$ が誘起され、この分極を源として新しい光の球面波(角周波数 ω_s 、波長 λ_s 、波数 k_s)が発生するとし、媒質内の各点からの寄与を加え合わせ、 ϕ_s 方向の遠方の点 (x_0, z_0) の電界 $E(\omega_s)$ を求めると、次式となる。但し、簡単化のため、非線形媒質内と媒質外の屈折率は等しいとする。なお、 k_{ps} は、各光波(入力光とポンピング光)の平面波の波動ベクトルで決まる非線形分極波の波動ベクトルである。

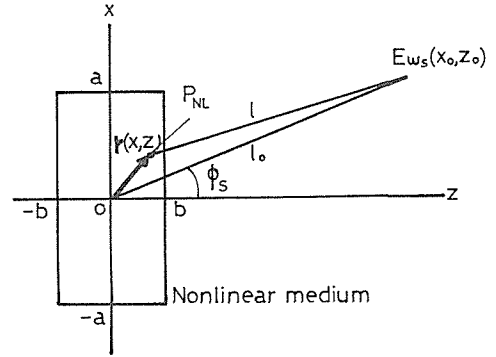


図1 2次元の非線形媒質から発生する波

図1 2次元の非線形媒質から発生する波

$$\begin{aligned}
 E(\omega_s) &\propto \int_{-a}^a \int_{-b}^b \exp(-ik_{ps} \cdot r) \cdot (\exp(-ik_s l/l)) dx dz \\
 &\simeq (\exp(-ik_s l_0/l_0)) \cdot \int_{-a}^a \exp i(k_s \sin \phi_s - k_{psx}) x dx \\
 &\quad \cdot \int_{-b}^b \exp i(k_s \cos \phi_s - k_{psz}) z dz
 \end{aligned} \tag{1}$$

但し、 $l \gg \lambda_s$ 、 $1 \gg 2(x_0 x + z_0 z)/l_0^2 \gg (x^2 + z^2)/l_0^2$ 、 $l_0^2 = x_0^2 + z_0^2$ とし、 $l = ((x_0 - x)^2 + (z_0 - z)^2)^{1/2} \simeq l_0 - \sin \phi_s \cdot x - \cos \phi_s \cdot z$ の近似を用いている。 k_{psx} と k_{psz} は、 k_{ps} の x と z 成分である。電界の絶対値の2乗に比例する出力 $I(\omega_s)$ は次式で与えられる。

$$I(\omega_s) = K_0 \text{sinc}^2(\Delta k_x a) \cdot \text{sinc}^2(\Delta k_z b) \tag{2}$$

$$\Delta k_x = k_s \sin \phi_s - k_{psx} \tag{3}$$

$$\Delta k_z = k_s \cos \phi_s - k_{psz} \tag{4}$$

K_0 は、非線形媒質の大きさ、各光波の出力、非線形感受率などに依存する係数である。なお、発生した遠方の点 (x_0, z_0) における波を、 ϕ_s 方向に伝搬する平面波(波動ベクトル k_s)と考えれば、 Δk_x と Δk_z は、位相不整合量ベクトル $\Delta k = k_s - k_{ps}$ の x と z 成分になる。出力は、各光波の入、出射角度の関数である位相不整合量に強く依存し、 $\Delta k = 0$ ($\Delta k_x = 0$, $\Delta k_z = 0$) の位相整合条件が満たされたとき最大となる。従って、入力光の入射角度に対する出力、すなわち視野特性を検討するには、位相不整合量を各光波の入、出射角度で表す必要がある^{8),9)}。

2.2 位相不整合量

これからは、非線形媒質として、 x 方向の大きさ(2a)が z 方向の大きさ(2b)より非常に大きい場合について考える。この場合は、 x 方向の位相整合条件が、 z 方向の位相整合条件より非常に

きびしく、大きな出力を得るには、 $\Delta k_x = 0 (\sin \phi_s = k_{psx}/k_s)$ の条件を常に満たす必要がある。この条件が満たされている場合の出力は、 z 方向の位相不整合量 Δk_z の関数である次式となる。

$$I(\omega_s) = K_0 \cdot \text{sinc}^2(\Delta k_z b) \tag{5}$$

ここで、多光波混合を前進波型和及び差周波数変換と後進波型和及び差周波数変換による4つの型に分類し、それぞれの位相不整合量 Δk_z を、 $\sin \phi_s = k_{psx}/k_s (\Delta k_x = 0)$ のもとに、各光波の入射角度の関数で表す。

2.2.1 前進波型

入力光と非線形相互作用により発生する出力光がほぼ同方向に伝搬する前進波型について考える。m個の入力光(角周波数 ω_i) と n 個のポンピング光(角周波数 ω_p) による和周波数変換 ($\omega_s = n\omega_p + m\omega_i$) と差周波数変換 ($\omega_s = n\omega_p - m\omega_i$) によるアップコンバータ ($\omega_s > \omega_i$) を考える。多光波混合における各光波の波動ベクトルの角度関係を図2に示す。入力光の波動ベクトル k_i とポンピング光の波動ベクトル k_{pn} と非線形分極波の波動ベクトル k_{ps} の間には、和及び差周波数変換により次の関係がある。

$$k_{ps} = k_{p1} + k_{p2} + \dots + k_{pn} \pm m k_i \tag{6}$$

但し、複号の上は和、下は差周波数変換を表す。m 個の入力光は同方向の入射角度 ϕ_i をもち、n 個のポンピング光は、入射角度 $\phi_{p1}, \phi_{p2}, \dots, \phi_{pn}$ をもつとする。入力光の入射角度 ϕ_i と出力光の出射角度 $\phi_s (\sin \phi_s = k_{psx}/k_s)$ の絶対値が十分1より小さいとすると位相不整合量 Δk_z は、次式で近似できる。

$$\Delta k_z \simeq A(\phi_i - B)^2 + C \tag{7}$$

$$A = \pm m k_i (k_s \mp m k_i) / 2 k_s \tag{8}$$

$$B = k_p (\sin \phi_{p1} + \sin \phi_{p2} + \dots + \sin \phi_{pn}) / (k_s \mp m k_i) \tag{9}$$

$$C = k_s - k_p (\cos \phi_{p1} + \cos \phi_{p2} + \dots + \cos \phi_{pn}) \mp m k_i - k_p^2 (\sin \phi_{p1} + \sin \phi_{p2} + \dots + \sin \phi_{pn})^2 / 2 (k_s \mp m k_i) \tag{10}$$

なお、コリニア ($\phi_i = \phi_{p1} = \phi_{p2} = \dots = \phi_{pn} = \phi_s = 0$) における位相不整合量 Δk_0 は次式となる。

$$\Delta k_0 = k_s - n k_p \mp m k_i \tag{11}$$

この値は、非線形媒質の分散により決まる。

2.2.2 後進波型

入力光と非線形相互作用により発生する出力光がほぼ逆方向に伝搬する後進波型について考える。各光波の波動ベクトルの角度関係を図3に示す。前進波型において k_i を $-k_i$ で置き換えれば、後進波型の和及び差周波数変換における Δk_z の係数 A, B, C 及び Δk_0 が

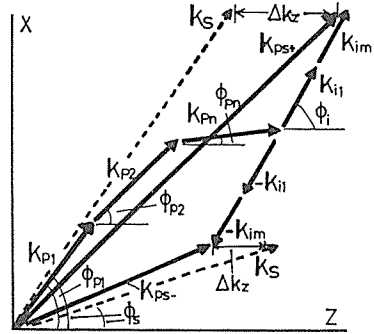


図2 前進波型和および差周波数変換における各光波の波動ベクトルの関係

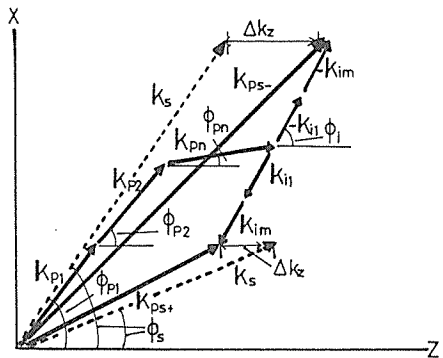


図3 後進波型和および差周波数変換における各光波の波動ベクトルの関係

求まり、次式となる。

$$A = \mp m k_1 (k_s \pm m k_1) / 2 k_s \quad (12)$$

$$B = k_p (\sin \phi_{p1} + \sin \phi_{p2} + \dots + \sin \phi_{pn}) / (k_s \pm m k_1) \quad (13)$$

$$C = k_s - k_p (\cos \phi_{p1} + \cos \phi_{p2} + \dots + \cos \phi_{pn}) \pm m k_1 - k_p^2 (\sin \phi_{p1} + \sin \phi_{p2} + \dots + \sin \phi_{pn})^2 / 2 (k_s \pm m k_1) \quad (14)$$

$$\Delta k_0 = k_s - n k_p \pm m k_1 \quad (15)$$

2.3 視野特性

Δk_z の式 (7) と出力の式 (5) より、A と C の値に応じて次のような視野特性が得られる。

- (1) $AC > 0$ の場合、最大出力が得られる位相整合条件 $\Delta k_z = 0$ を満たす入力光の入射角度 ϕ_1 は存在しない。この状態を視野なしとする。
- (2) $AC < 0$ の場合、 $\Delta k_z = 0$ を満たす入力光の入射角度 ϕ_1 が 2 つ ($\phi_1 = B \pm (-C/A)^{1/2}$) 存在する双峰性の視野となる。
- (3) $C = 0$ の場合、 $\Delta k_z = 0$ を満たす入力光の入射角度 ϕ_1 が 1 つ ($\phi_1 = B$) 存在する接線整合時の視野となり、平坦で広い視野が得られる。映像アップコンバータにおいては、分解能の点から最適な状態となる。この場合、最大出力 ($\Delta k_z = 0$) から零出力 ($\Delta k_z = \pi/b$) までの入射角度幅 $\Delta \phi_0$ は次式で与えられる。

$$\Delta \phi_0 = (\pi/b|A|)^{1/2} \quad (16)$$

|A| の値が小さいほど視野は大きくなる。A が零の場合、視野は無有限大となる。このことは、3 章の視野の拡大法で詳細に検討する。以上の視野特性の概略を図 4 に示す。

従って、 $\Delta k_z = 0$ を満たすポンピング光と入力光の入射角度が存在する (すなわち角度整合が成立する) ためには、 $C = 0$ か $AC < 0$ でなければならない。この状態が得られるかどうかは、非線形媒質の分散と 4 つの型のどれをとるかに依存する。このことについて、次の 4 光波混合の場合において詳細に検討する。

2.3.1 4 光波混合

3 次の非線形光学効果を用いた 4 光波混合 (1 つの入力光と 2 つのポンピング光) における、前進波型和周波数変換 ($\omega_s = 2\omega_p + \omega_1$) と差周波数変換 ($\omega_s = 2\omega_p - \omega_1$) によるアップコンバータ ($\omega_s > \omega_1$) の Δk_z の A, B, C は次式で与えられる。

$$A = \pm k_1 (k_s \mp k_1) / 2 k_s \quad (17)$$

$$B = k_p (\sin \phi_{p1} + \sin \phi_{p2}) / (k_s \mp k_1) \quad (18)$$

$$C = k_s - k_p (\cos \phi_{p1} + \cos \phi_{p2}) \mp k_1 - k_p^2 (\sin \phi_{p1} + \sin \phi_{p2})^2 / 2 (k_s \mp k_1) \quad (19)$$

なおこの結果は、各光波がほぼ同方向に伝搬し、分散が非常に小さい (すなわち $k_s - 2k_p \mp k_1 \approx 0$)

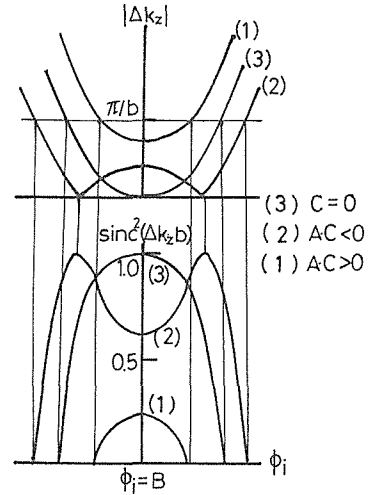


図 4 視野特性

が成立する)とすると、従来の1次元的な扱いによる位相不整合量(非線形分極波の波動ベクトル k_{ps} 方向の位相不整合量)^{3), 8)}と一致する。

ここで、 $\Delta k_z = 0$ を満たす入射角度 ϕ_1 が存在するためのコリニアにおける位相不整合量($\Delta k_0 = k_s - 2k_p \mp k_1$)の条件を求める。和周波数変換の場合 $A > 0$ であるため、 $\Delta k_z = 0$ を満たす入射角度 ϕ_1 が存在するためには、 $C \leq 0$ でなければならない。 $C \leq 0$ の条件を満たすポンピング光の角度が存在するためには、 $\Delta k_0 = k_s - 2k_p - k_1 \leq 0$ でなければならない。この条件は、通常、異常分散の媒質でしか達成できない。差周波数変換の場合は、 $A < 0$ であるから、 $\Delta k_z = 0$ を満たす入射角度 ϕ_1 が存在するためには、 $C \geq 0$ でなければならない。この状態は、 $\Delta k_0 = k_s - 2k_p + k_1$ が負でも正でも、絶対値が余り大きくなければ、ポンピング光の角度調整により達成される。但し、 Δk_0 が正の場合は、双峰性の視野のみであり、 Δk_0 が負の場合は、ポンピング光の角度調整により、接線整合時、双峰性の視野が得られる。前進波型の無分散における Δk_0 は零であるから、差周波数変換の場合は、正常分散の媒質でも角度整合が満たされる可能性がある。

後進波型和周波数変換 ($\omega_s = 2\omega_p + \omega_1$) と差周波数変換 ($\omega_s = 2\omega_p - \omega_1$) によるアップコンバータの Δk_z の A, B, C は次式で与えられる。

$$A = \mp k_1 (k_s \pm k_1) / 2k_s \tag{20}$$

$$B = k_p (\sin \phi_{p1} + \sin \phi_{p2}) / (k_s \pm k_1) \tag{21}$$

$$C = k_s - k_p (\cos \phi_{p1} + \cos \phi_{p2}) \pm k_1 - k_p^2 (\sin \phi_p + \sin \phi_{p2})^2 / 2(k_s \pm k_1) \tag{22}$$

和周波数変換の場合 $A < 0$ であるから、 $\Delta k_z = 0$ を満たす入射角度 ϕ_1 が存在するためには、 $C \geq 0$ でなければならない。この条件は、 $\Delta k_0 = k_s - 2k_p + k_1$ が負でも正でも、絶対値が余り大きくなければ、満たされることになる。しかし、後進波型和周波数変換の無分散における Δk_0 の値は、 $2k_1$ という非常に大きな正の値をとり、通常の非線形媒質では、角度整合はとれない。すなわち視野は存在しない。この対策として、非線形媒質に周期構造をもたせる方法が考えられるが¹¹⁾、詳細は今後の研究課題である。差周波数変換の場合は、 $A > 0$ であるから、角度整合が存在するためには、 $C \leq 0$ でなければならない。このためには、 $\Delta k_0 = k_s - 2k_p - k_1$ が負である必要がある。ところが、

後進波型差周波数変換の無分散における Δk_0 の値は、 $-2k_1$ という非常に大きな負の値をとるため、正常分散の媒質でも、ポンピング光の角度調整により、種々の視野が得られる可能性がある。これらをまとめると表1になる。

表1 4光波混合によるアップコンバータの視野特性の比較

	前進波型		後進波型	
	和周波数変換	差周波数変換	和周波数変換	差周波数変換
A	正	負	負	正
Δk_0 (無分散)	0	0	$2k_1$	$-2k_1$
正常分散	視野なし	双峰性	視野なし	双峰性, 接線整合
異常分散	双峰性, 接線整合		視野なし	双峰性, 接線整合

2.3.2 C_s を用いた4光波混合の視野特性

4光波混合の具体例として、高い変換効率の期待できるセシウム蒸気を用いた2光子共鳴励起形の $10\mu\text{m}$ 帯の赤外線から可視光に変換するアップコンバータを考える^{9), 10)}。式(17) - (19)と式(20) - (22)を用い、前進波型と後進波型における入力光の入射角度 ϕ_1 に対する出力 ($\text{sinc}^2(\Delta k_z b)$)、すなわち視野特性を求めると図5が得られる。但し、入力光の赤外線波長 $\lambda_1 = 10\mu\text{m}$ 、両ポンピング光の波長 $\lambda_p = 0.884\mu\text{m}$ (セシウムの非許容遷移 6s-6d に2光子共鳴)、和周波数光の波長

$\lambda_s = 0.4624 \mu\text{m}$, 差周波数光の波長 $\lambda_s = 0.4233 \mu\text{m}$, $2b = 1\text{cm}$, $\phi_{p1} = 0$, セシウム蒸気温度 600K (原子密度約 $5.8 \times 10^{16} \text{atoms/cm}^3$) とし, 各光波の屈折率は, Miles らの文献¹²⁾ の共鳴波長と振動子強度の値を用いた Sellmeir の式より求めた。 Δk_0 が大きな負の値 (約 $-1.255 \times 10^6 \text{m}^{-1}$) をとる後進波型差周波数変換だけが, ポンピング光の角度調整により種々の視野 (視野なし, 接線整合時の視野, 双峰性の視野) が得られる。 Δk_0 が小さな正の値をとる前進波型では, 差周波数変換 ($\Delta k_0 \approx 1.80 \times 10^3 \text{m}^{-1}$) においては双峰性の視野が得られるが, 和周波数変換 ($\Delta k_0 \approx 1.72 \times 10^3 \text{m}^{-1}$) においては, 最大出力をとる入力光の入射角度 ϕ_i が存在しない視野なしとなる。 Δk_0 が大きな正の値 (約 $1.25 \times 10^6 \text{m}^{-1}$) をとる後進波型和周波数変換では, 出力が非常に小さくなり, 普通の状態では, 実用に適さない。従って, 広い視野の得られる後進波型差周波数変換によるアップコンバータが, 映像変換器として期待される。

3. 視野の拡大法

多光波混合を映像アップコンバータとして用いる場合, 分解能の点から広い視野が要求される。接線整合時には平坦で広い視野が得られることが分かっているが, ここでは, さらに広い視野を得る方法について検討する。位相不整合量 Δk_z の式 (7) より, 視野が規制されないためには, 入力光の入射角度 ϕ_i に関係なく, $\Delta k_z = 0$ が常に満たされる必要がある。そのためには, $A = B = C = 0$ が成立しなければならない。前進波型, 後進波型の A の式 (8) と (12) より, $A = 0$ が満たされる可能性のあるのは, 前進波型和周波数変換と後進波型差周波数変換である。

3.1 高調波発生

前進波型和周波数変換 ($\omega_s = n\omega_p + m\omega_1$) において $A = 0$ を満たすには, $n_s\omega_s = n_1m\omega_1$ が成立しなくてはならない。但し, n_s と n_1 は, 発生する波と入力光の屈折率を表す。上記の条件を満たすには, ポンピング光が存在する場合 $\omega_s \gg m\omega_1$ となり, $n_s \ll n_1$ の媒質を用いなくてはならず, 実現化が難しい。しかし, 入力光だけが存在する場合は, 実現する可能性がある。すなわち, 第 m 高調波発生に相当する。この場合, 入射角度に対して常に, $n_s = n_1$ が満たされれば, 視野は規制されない。但し, この場合, 強度の大きいポンピング光を用いないから, 変換効率の点で, 映

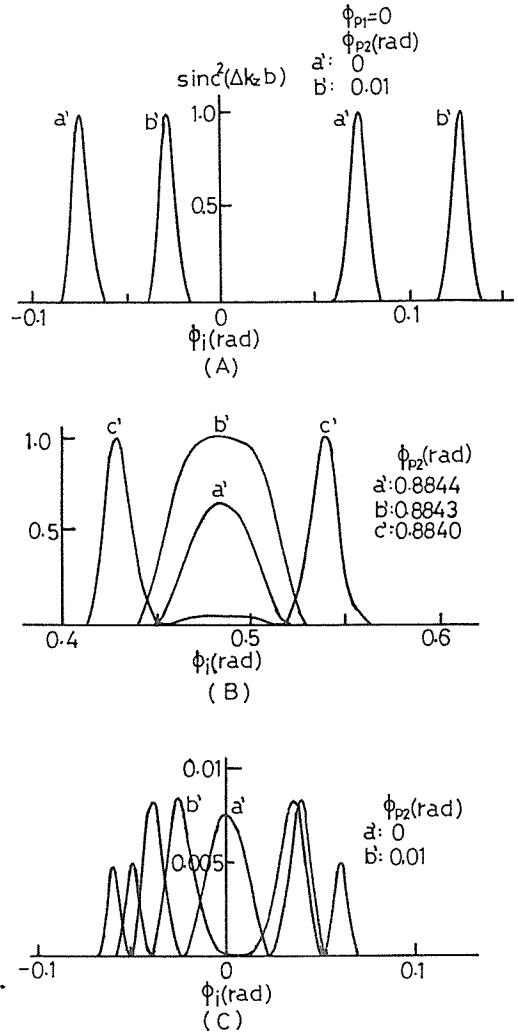


図5 Csを用いた千光波混合の視野特性

- (A) 前進波型差周波数変換
- (B) 後進波型差周波数変換
- (C) 前進波型和周波数変換

像アップコンバータとしては利用できない。

3.2 後進波型差周波数変換

3.2.1 後進波型縮退 4 光波混合

後進波型縮退 4 光波混合による位相共役波発生においては、自動的に位相整合が満たされ、視野が規制されないことが指摘されている¹⁾。すなわち、ここでの後進波型 4 光波差周波数変換 ($\omega_s = 2\omega_p - \omega_i$) において、 $A=B=C=0$ を満たした場合に相当する。 $A=0(k_s = k_i)$, $B=0(\sin\phi_{p1} + \sin\phi_{p2} = 0)$, $C=0(\cos\phi_{p1} + \cos\phi_{p2} = 0)$ より $k_s + k_i = 0$, $k_{p1} + k_{p2} = 0$ を満たさなければならない。これは、各光波の周波数が等しく ($\omega_s = \omega_p = \omega_i$)、両ポンピング光が逆方向に伝搬する後進波型 4 光波差周波数変換による位相共役波発生である。但し、後進波型非縮退 4 光波混合によるアップコンバータの位相共役波発生においては、視野が規制されることが指摘されている^{13), 14), 15)}。

3.2.2 後進波型非縮退 5 光波混合

2つの入力光と2つのポンピング光を考えた、4次の非線形光学効果を用いた後進波型 5 光波差周波数変換 ($\omega_s = 2\omega_p - 2\omega_i$) について考える。視野が規制されないためには、 $A=0(k_s = 2k_i)$, $B=0(\sin\phi_{p1} + \sin\phi_{p2} = 0)$, $C=0(\cos\phi_{p1} + \cos\phi_{p2} = 0)$ より $k_s + 2k_i = 0$, $k_{p1} + k_{p2} = 0$ を満たさなければならない。これらの条件は、両ポンピング光が逆方向に伝搬し、ポンピング光の角周波数 $\omega_p = 2\omega_i$ で、 $n_s = n_i$ であれば成立する。この場合、 ω_i から $\omega_s = 2\omega_i$ に変換されるアップコンバータの位相共役波発生において視野が規制されない。各光波の波動ベクトルの関係を図6に示す。なお、 $n_s = n_i$ の関係が前進波型においても満たされれば、当然2次の非線形光学効果による第2高調波発生が入力光と同方向に得られる。

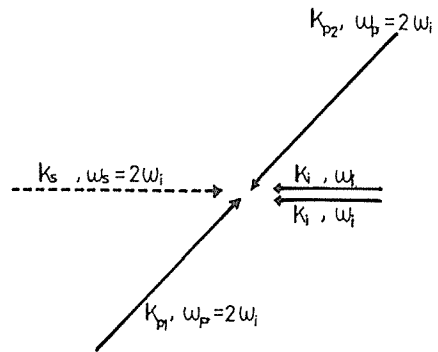


図6 後進波型非縮退 5 光波混合における各光波の波動ベクトルの関係

3.2.3 後進波型非縮退 6 光波混合

同様に、5次の非線形光学効果を用いた後進波型 6 光波差周波数変換について考える。最初に、入力光が3つでポンピング光が2つの場合の後進波型 6 光波差周波数変換 ($\omega_s = 2\omega_p - 3\omega_i$) について検討する。視野が規制されないためには、 $A=0(k_s = 3k_i)$, $B=0(\sin\phi_{p1} + \sin\phi_{p2} = 0)$, $C=0(\cos\phi_{p1} + \cos\phi_{p2} = 0)$ より $k_s + 3k_i = 0$, $k_{p1} + k_{p2} = 0$ を満たさなければならない。従って、 $\omega_p = 3\omega_i$ で、両ポンピング光が逆方向に伝搬し、 $n_s = n_i$ が成立すれば、 ω_i から $\omega_s = 3\omega_i$ に変換される位相共役波発生において、視野が規制されない。次に、入力光が2つでポンピング光が3つの場合の後進波型 6 光波差周波数変換 ($\omega_s = 3\omega_p - 2\omega_i$) について考える。視野が規制されないためには、 $A=0(k_s = 2k_i)$, $B=0(\sin\phi_{p1} + \sin\phi_{p2} + \sin\phi_{p3} = 0)$, $C=0(\cos\phi_{p1} +$

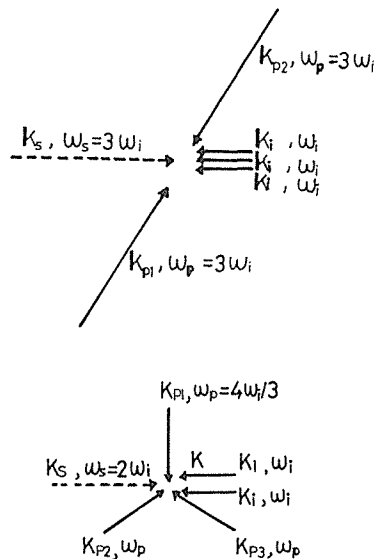


図7 後進波型非縮退 6 光波混合における各光波の波動ベクトルの関係

$\cos\phi_{p2} + \cos\phi_{p3} = 0$ より $k_s + 2k_i = 0$, $k_{p1} + k_{p2} + k_{p3} = 0$ が満たさなければならない。これらの条件は, $\omega_p = (4/3)\omega_1$, $\phi_{p1}, \phi_{p2} = \phi_{p1} + (2/3)\pi$, $\phi_{p3} = \phi_{p1} + (4/3)\pi$ で, $n_s = n_i$ が成立すれば満たされる。この場合, ω_1 から $\omega_s = 2\omega_1$ に変換される位相共役波発生において, 視野が規制されない。これは, Ducloy の提案¹⁶⁾ に対応する。以上の各光波の波動ベクトルの関係を図7に示す。なお, 非線形光学効果は, 一般的には高次になるに従い小さくなる。従って, ここで考えたことを実現させるためには, 共鳴効果などを用いて高次の非線形感受率を大きくする必要がある。

4. む す び

多光波混合によるアップコンバータを, 前進波型, 後進波型, さらに和周波数変換, 差周波数変換に分類し, それぞれの視野特性について検討した。その結果, 次のようなことが分かった。

- (1) コリニアにおける位相不整合量の値と, ポンピング光の入射角度に応じて, 双峰性, 接線整合時の視野, そして視野なしの状態が得られる。
- (2) 差周波数変換は, 正常分散の非線形媒質でも, 角度整合の可能性がある。
- (3) 後進波型和周波数変換の実用化はバルク結晶では難しい。
- (4) 複数個の入力光を考えた高次の後進波型差周波数変換によるアップコンバータにおいて, 広い視野の得られる可能性がある。
- (5) セシウム蒸気を用いた後進波型4光波差周波数変換によるアップコンバータは, 高い変換効率と広い視野から, 赤外線映像変換器として期待される。

これらの結果は, 映像アップコンバータを設計するさい有効となる。今後の研究課題は, 変換効率の大きい場合の視野特性の検討と実験的な考察である。

本研究を行うにあたり, 御指導, 御助言を頂きました北海学園大学工学部電子情報工学科桜庭一郎教授と北海道大学工学部小柴正則教授に感謝致します。

文 献

- 1) A. Yariv and D. M. Pepper: Opt. Lett., 1, (1977), pp. 16-18.
- 2) 桜庭一郎: 光学, 11, (1982), 3, pp. 261-265.
- 3) 小柳幸次郎, 三島瑛人, 桜庭一郎: 信学論(c), J69-c, (昭61), 1, pp. 41-48.
- 4) 小柳幸次郎, 岡本淳, 三島瑛人, 桜庭一郎: 信学論(C), J71-c, (昭63), 7, pp. 1084-1086.
- 5) 三島瑛人, 久留賢治, 桜庭一郎: 信学論(c), J70-c, (昭62), 2, pp. 11-19.
- 6) R. W. Hellwarth: J. Opt. Soc. Am., 67, (1977), 1, pp. 1-3.
- 7) 小柳幸次郎, 関英明, 三島瑛人, 桜庭一郎: 信学論(c), J71-c, (昭63), 6, pp. 965-967.
- 8) 小柳幸次郎, 三島瑛人, 桜庭一郎: 信学論(c), J69-c, (昭61), 8, pp. 1064-1066.
- 9) 小柳幸次郎, 三島瑛人, 桜庭一郎: 信学論(c), J70-c, (昭62), 7, pp. 1103-1105.
- 10) 小柳幸次郎: 信学論(c), J72-c, (1989), 1, pp. 12-19.
- 11) 小柳幸次郎: 信学論(c-1), J72-c-1, (1989), 10, pp. 665-667.
- 12) R. B. Miles and S. E. Hellwarth: IEEE. J. Quantum Electron., QE-9, (1973), pp. 470-484.
- 13) G. Martin and R. W. Hellwarth: Appl. Phys. Lett. 34, (1979), pp. 371-373.
- 14) Y. L. Guo, M. Y. Yao and S. M. Pang: IEEE. J. Quantum Electron., QE-20, (1984), pp. 328-331.
- 15) G. Manneberg: J. Opt. Soc. Am. A, 3, (1986), 12, pp. 2033-2037.
- 16) M. Ducloy: Appl. Phys. Lett. 46, (1985), pp. 1020-1022.