



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ホトリフラクティブ結晶における透過型回折格子の応答時間に対する光強度の影響
Author(s)	高山, 佳久; Takayama, Yoshihisa; 岡本, 淳 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 169, 29-39
Issue Date	1994-06-28
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42423
Type	departmental bulletin paper
File Information	169_29-40.pdf



ホトリフラクティブ結晶における透過型回折格子の 応答時間に対する光強度の影響

高山 佳久 岡本 淳 三島 瑛人

(平成 5 年 12 月 21 日受理)

Effect of incident beam power on response time of transmission grating in photorefractive crystal

YOSHIHISA TAKAYAMA, ATSUSHI OKAMOTO and TERUHITO MISHIMA

(Received December 21, 1993)

Abstract

Effect of incident beam power on response time of transmission grating in photorefractive crystal is analyzed. Temporal variation of coupling strength of four-wave mixing by a photorefractive crystal is derived with physical parameters of the crystal. The time dependent coupling strength is applied to the phase conjugate reflectivity in the case of transmission grating. The calculation of the reflectivities is made and the reflection properties are shown as a function of time.

Experiment on generating the phase conjugate beam via four-wave mixing by a BaTiO₃ crystal is performed. The response time of the phase conjugate beam is measured and shown at several beam intensities. The results fit an approximate function and are compared with theoretical ones.

1. ま え が き

最近, ホトリフラクティブ結晶を用いた位相共役光の発生およびその応用について多数の研究が報告されている。位相共役光は, 位相歪補正作用や乗算機能を有するため, 各種光情報処理デバイスへの応用が期待されている¹⁾⁻⁴⁾。

ホトリフラクティブ効果の応答時間を利用したデバイスを設計する場合, 4波混合における位相共役反射率の時間応答特性を検討する必要がある^{5),6)}。これまでの研究では, 定常状態における位相共役反射率の解析結果が主流であった⁷⁾⁻⁹⁾。また, 時定数を含む結合波動方程式を用いて, 位相共役光の時間応答特性が解析されているが, この時定数と結晶の物性パラメータとの関係は明確にされていなかった¹⁰⁾。これに対して, 結晶の物性パラメータと非線形屈折率の時間的変化の関係が, Kukhtarev の方程式より導かれている¹¹⁾。しかし, 位相共役光の発生に不可欠なホトリフラクティブ回折格子の形成による光強度の変化, 並びに, ホトリフラクティブ効果の変調度と光強度分布の相互関係は考慮されていない。また, 4波混合における位相共役反射率の時間応答特

性は得られていない。一方、位相共役光の応答時間が実験によって測定され、結晶に入射する光強度の増加に伴い、位相共役光の応答時間が早くなることが報告されている¹²⁾。しかし、この現象の定量的な解析はされていない。

本報告では、ホトリフラクティブ結晶の物性パラメータを考慮した4波混合における位相共役反射率を導出し、その時間応答特性を数値計算によって解析する。特に、前進ポンプ光と後進ポンプ光の強度比であるポンプ比を変化させた場合、およびポンプ比を一定にして全光電力を変化させた場合について、それぞれ新たに応答時間の定量的な比較を行う。また、BaTiO₃結晶を用いて位相共役光発生の実験を行い、本解析結果の妥当性を示す。

まず、2波混合における光強度変化を考慮して得られる変調度と、Kukhtarevの方程式より得られる結合係数の時間的変化を用いて、4波混合における時間応答特性を新たに解析する。4波混合に寄与する全光電力とポンプ比が、位相共役反射率の応答時間に及ぼす影響を初めて明らかにする。次に、BaTiO₃結晶を用いた位相共役光発生の実験を行う。結晶に入射する全光電力を変化させた場合、およびポンプ比を変化させた場合における位相共役光電力の時間応答波形を測定する。最後に、位相共役光の定常値と応答時間の観点から、測定結果と計算結果を比較検討する。

以下の解析においては、ホトリフラクティブ効果によるポンプ光の強度変化を考慮する。BaTiO₃結晶内での吸収損失は十分小さく、結晶への外部印加電界は存在しない場合を仮定する。また、結晶内には、互いにコヒーレントな前進ポンプ光とプローブ光によって透過型回折格子が発生する場合を仮定する。本報告は、動画像抽出処理系などの位相共役光の時間応答を応用したデバイスの設計に有効な指針を与えるものである。

2. 位相共役反射率の時間応答

4波混合におけるホトリフラクティブ結晶とビームの配置を図1に示す。 A_1 、 A_2 は前進および後進ポンプ光、 A_3 は位相共役光、 A_4 はプローブ光の電界振幅をそれぞれ表す。前進ポンプ光とプローブ光の結晶入射面を $z=0$ 、後進ポンプ光の結晶入射面を $z=L$ とする。

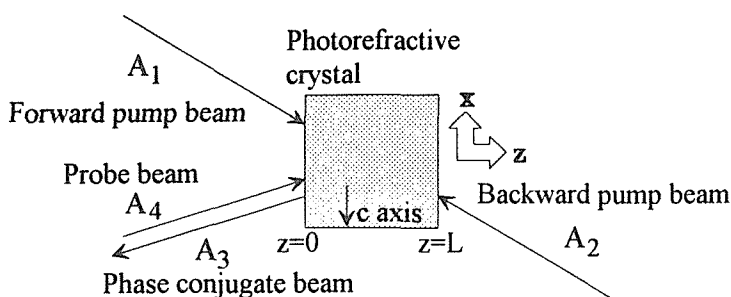


図1 4波混合による位相共役器の構成

以下においては、前進ポンプ光 A_1 とプローブ光 A_4 により、結晶内に透過型回折格子のみが発生している場合を仮定して解析を行う。実際には、前進ポンプ光とプローブ光のコヒーレンスを維持し、これらの光路よりも後進ポンプ光の光路を十分長く取ることで、透過型回折格子のみを発生させることができる。また、ホトリフラクティブ効果によるポンプ光の強度変化を考慮し、結晶中の吸収損失は無視できる場合を仮定する。更に、BaTiO₃結晶に対して外部から電界を印加しないため、ホトリフラクティブ効果の結合係数は実数として取り扱う。

2. 1 変調度

結晶内の透過型回折格子による4波混合過程を記述する結合波動方程式は、

$$\frac{dA_1}{dz} = -\frac{\gamma(t)}{I_0}(A_1A_4^* + A_2^*A_3)A_4 \quad (1a)$$

$$\frac{dA_2^*}{dz} = -\frac{\gamma(t)}{I_0}(A_1A_4^* + A_2^*A_3)A_3^* \quad (1b)$$

$$\frac{dA_3}{dz} = \frac{\gamma(t)}{I_0}(A_1A_4^* + A_2^*A_3)A_2 \quad (1c)$$

$$\frac{dA_4^*}{dz} = \frac{\gamma(t)}{I_0}(A_1A_4^* + A_2^*A_3)A_1^* \quad (1d)$$

で与えられる。ここで、 t は時間、 z は結晶の c 軸に垂直な方向である。また、電界の添字である $j=1,2,3,4$ に対して $I_j(z)=|A_j(z)|^2$ とおき、全光強度に比例した定数 I_0 として

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \quad (2)$$

を用いる。変数 $\gamma(t)$ はホトリフラクティブ相互作用における結合係数であり、時間的変化を伴う。通常の解析手順に従って、各光電界振幅を

$$A_j = \sqrt{I_j} \exp(i\varphi_j) \quad (3)$$

とおくと、結晶内における全光強度分布は、

$$I(x,t) = \frac{\varepsilon_{opt}}{2} I_0 + \frac{1}{2} [I_a(t) \exp\{i(k_g x + \varphi_g)\} + c.c.] \quad (4)$$

と表される。但し、光強度の回折格子成分 $I_a(t)$ と変調度 $m(t)$ は、

$$I_a(t) = m(t) \frac{\varepsilon_{opt} I_0}{2} \quad (5)$$

および

$$m(t) = \frac{2(\sqrt{I_1 I_4} + \sqrt{I_2 I_3})}{I_0} \quad (6)$$

で与えられる。ここで、 ε_{opt} は光周波数に対する結晶の誘電率、 k_g はホトリフラクティブ効果によって生じる回折格子の波数ベクトルの大きさ、 φ_g はその初期位相であり $\varphi_1 - \varphi_4 - \varphi_2 + \varphi_3$ に等しい。また、 i は虚数単位、 $c.c.$ は直前の項の複素共役を表す。式(6)の変調度 $m(t)$ は、透過型回折格子の場合は z に関して一定である。図1に示す4波混合の光線配置では、後進ポンプ光の結晶入射面 $z=L$ において位相共役光は存在せず、

$$I_3(L) = 0 \quad (7)$$

が成立する。従って、式(6)より、

$$m(t) = \frac{2\sqrt{I_1(L)I_4(L)}}{I_0} \quad (8)$$

が得られる。式(8)を用いると、変調度は全強度 I_0 と後進ポンプ光の結晶入射面 $z=L$ における前進ポンプ光およびプローブ光の光強度で与えることができる。

結晶内の透過型回折格子は、前進ポンプ光とプローブ光の相互作用によって発生する。4波混合においては、後進ポンプ光が回折格子発生に与える影響は実用上十分に小さいと考えられるた

め、この相互作用は、前進ポンプ光とプローブ光による2波混合で記述することができる。この場合、各光波の強度と位相の変化は、

$$I_1(z) = \frac{I_1(0)\{I_1(0) + I_4(0)\}}{I_1(0) + I_4(0)\exp\{2\gamma(t)z\}} \quad (9a)$$

$$I_4(z) = \frac{I_4(0)\{I_1(0) + I_4(0)\}}{I_4(0) + I_1(0)\exp\{-2\gamma(t)z\}} \quad (9b)$$

および

$$\varphi_1(z) = \varphi_1(0) - \frac{1}{2} \frac{\text{Im}\{\gamma(t)\}}{\text{Re}\{\gamma(t)\}} \ln \left[\frac{I_1(0) + I_4(0)}{I_1(0) + I_4(0)\exp\{2\text{Re}\{\gamma(t)z\}\}} \right] \quad (10a)$$

$$\varphi_4(z) = \varphi_4(0) + \frac{1}{2} \frac{\text{Im}\{\gamma(t)\}}{\text{Re}\{\gamma(t)\}} \ln \left[\frac{I_1(0) + I_4(0)}{I_4(0) + I_1(0)\exp\{-2\text{Re}\{\gamma(t)z\}\}} \right] \quad (10b)$$

で与えられる¹²⁾。式(9)は、結晶の*c*軸が図1に示す方向の場合、結合係数 $\gamma(t)$ の値が負となるため、2波混合によってプローブ光が前進ポンプ光を増幅することを意味している。本解析ではBaTiO₃結晶への外部印加電界が存在しない場合を考えているため、結合係数 $\gamma(t)$ は実数となり、式(10)より位相 φ_1 および φ_4 は定数となる。

2. 2 結合強度

Banerjeeらは、ホトリフラクティブ結晶の物性パラメータを用いて、イオン化ドナ密度の時間的変化を導いている。しかし、回折格子形成に寄与する光の強度変化の影響については明確に取り扱われていない。また、変調度 $m(t)$ と結晶内における全光強度分布 $I(x,t)$ の関係は考慮されていない。以下においては、これらの点を新たに考慮した結合係数の時間応答を導出する。

まず、ホトリフラクティブ効果を表すKukhtarevの方程式は、

$$\frac{\partial J}{\partial x} = e \frac{\partial N_{Di}}{\partial t} \quad (11a)$$

$$\frac{\partial N_{Di}}{\partial t} = sIN_D - r_R \rho N_{Di} \quad (11b)$$

$$J = e\mu\rho E - k_B T \mu \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (11c)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{e}{\epsilon} (N_A - N_{Di}) \quad (11d)$$

である。ここで、 J は電流密度、 N_D はドナ密度、 N_{Di} はイオン化ドナ密度、 N_A はアクセプタ密度、 s はイオン化断面積、 r_R は電子の再結合率、 ρ は電子密度分布、 μ は電子の移動度、 E はホトリフラクティブ電界、 T は温度、 ϵ はホトリフラクティブ電界に対する結晶の誘電率である。また、 e は素電荷、 k_B はボルツマン定数を表す。次に、上記方程式の解を

$$N_{Di}(x,t) = N_{D0} + \frac{1}{2} \{N_{Da}(t)\exp(ik_g x) + c.c.\} \quad (12a)$$

$$\rho(x,t) = \rho_0 + \frac{1}{2} \{\rho_a(t)\exp(ik_g x) + c.c.\} \quad (12b)$$

$$J(x,t) = J_0 + \frac{1}{2} \{J_a(t)\exp(ik_g x) + c.c.\} \quad (12c)$$

$$E(x,t) = \frac{1}{2} \{E_a(t)\exp(ik_g x) + c.c.\} \quad (12d)$$

とおく。各変数の添字 0 は定常成分，添字 a は回折格子成分を表す。結晶への外部印加電界は存在しないので，電界 E は定常成分を含まない。式(11)に式(4)および式(12)を代入すると，

$$N_{D0} = N_A \quad (13a)$$

$$\rho_0 = \frac{s\varepsilon_{opt} I_0 N_D}{2r_R N_A} \quad (13b)$$

$$J_0 = 0 \quad (13c)$$

$$E_a(t) = i \frac{eN_{Da}(t)}{k_g \varepsilon} \quad (13d)$$

$$\rho_a(t) = \frac{sI_a(t)N_D + c_2 N_{Da}(t)}{c_1} \quad (13e)$$

$$\frac{dN_{Da}(t)}{dt} = -\frac{N_{Da}(t)}{\tau_0} + \xi(t) \quad (13f)$$

が得られる。但し， c_1 ， c_2 および τ_0 は定数であり，

$$c_1 = r_R N_A + \frac{\mu k_B T k_g^2}{e} \quad (14a)$$

$$c_2 = \rho_0 \left(\frac{e\mu}{\varepsilon} - r_R \right) \quad (14b)$$

$$\tau_0 = \frac{1}{r_R} \left(\rho_0 + \frac{c_2 N_A}{c_1} \right)^{-1} \quad (14c)$$

とおいた。また，式(13f)右辺に含まれる関数 $\xi(t)$ を

$$\xi(t) = sN_D I_a(t) \left(1 - \frac{r_R N_A}{c_1} \right) \quad (15)$$

を与えた。イオン化ドナ密度の回折格子成分 $N_{Da}(t)$ を表す式(13f)に式(15)代入して積分すると，

$$N_{Da}(t) = \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right) \int_0^t \exp\left(\frac{t'}{\tau_0}\right) \xi(t') dt' \quad (16)$$

が得られる。ここで，時刻 $t=0$ において全ての光を同時に入射する場合を仮定した。BaTiO₃ 結晶の場合，式(16)右辺における $\xi(t')$ は $\exp(t'/\tau_0)$ に比べて非常に変化量が小さい。従って，実用上，

$$\int_0^t \exp\left(\frac{t'}{\tau_0}\right) \xi(t') dt' \cong \tau_0 \xi(0) \left\{ \exp\left(\frac{t}{\tau_0}\right) - 1 \right\} \quad (17)$$

と近似できる。式(17)を式(16)に代入すると，

$$N_{Da}(t) = \tau_0 \xi(0) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right) \right\} \quad (18)$$

が得られる。結合係数とイオン化ドナ密度の関係は，既に Feinberg らによって求められているが¹²⁾，これらを時間の関数として取り扱うと，結合係数 $\gamma(t)$ は，

$$\gamma(t) = \frac{1 + \{k_g/k_s(\infty)\}^2}{1 + \{k_g/k_s(t)\}^2} \gamma_\infty \quad (19)$$

となる。但し， γ_∞ は結合係数の定常値 $\gamma(\infty)$ に等しく，結晶の物性パラメータの時間依存性は，

$$k_s(t) = \sqrt{\frac{e^2 N_{Da}(t) \{N_D - N_{Da}(t)\}}{\varepsilon k_B T N_D}} \quad (20)$$

に含まれる。

2. 3 位相共役反射率

4波混合における位相共役反射率はプローブ光の入射強度と発生する位相共役光の強度比，すなわち， $R \equiv I_3(0)/I_4(0)$ で定義される。図1に示す対向伝搬型4波混合の場合，前進ポンプ光，後進ポンプ光およびプローブ光の結晶への入射強度すなわち $I_1(0)$ ， $I_2(L)$ および $I_4(0)$ は既知である。これに加えて位相共役光の境界条件である式(7)を式(1)の結合波動方程式に適用し，時間的変化を伴う結合係数 $\gamma(t)$ を用いると，位相共役反射率として，

$$R(t) = \frac{4|c|^2 \tanh^2\{a\gamma(t)L/(2I_0)\}}{[\Delta \tanh\{a\gamma(t)L/(2I_0)\} + a]^2} \quad (21)$$

が得られる。ここで， $a = \sqrt{\Delta^2 + 4|c|^2}$ ， $c = A_1A_2 + A_3A_4$ ， $\Delta = I_2 + I_3 - (I_1 + I_4)$ であり， $\gamma(t)L$ は結合強度と呼ばれる。式(21)の位相共役反射率は，複数の結合強度の値に対してピーク値を示す。また，位相共役反射率の定常値は入射光の全強度にほとんど依存しないが，プローブ光および前進ポンプ光の強度に対して，後進ポンプ光の強度が著しく高い場合，後進ポンプ光による回折格子の消去作用が現れ，反射率が低下することもある。式(20)の各パラメータの値を計算し，式(19)を式(21)に代入すれば，位相共役反射率の時間的変化が得られる。

3. 数値計算結果

結晶内には透過型回折格子のみが生じ，前進ポンプ光，後進ポンプ光およびプローブ光を時刻 $t=0$ に同時に入射した場合に発生する位相共役光の時間応答を数値計算する。前進ポンプ光と後進ポンプ光の結晶入射面における強度比としてポンプ比

$$p = \frac{I_2(L)}{I_1(0)} \quad (22a)$$

を用いる。前進および後進ポンプ光の入射強度の和とプローブ光の入射強度の比をプローブ比

$$q = \frac{I_4(0)}{I_1(0) + I_2(L)} \quad (22b)$$

で表す。数値計算においては，プローブ比 $q=0.1$ ，定常状態における結合強度 $\gamma_\infty L = -3$ ，BaTiO₃結晶は5 mm角であり，物性パラメータは表1に示す数値を用いた^{(13),(14)}。光源の波長を514.5 nm，前進ポンプ光とプローブ光に対する結晶内の交差角度を3°とすると，ホトリフラクティブ効果による回折格子の波数ベクトルの大きさは $k_g = 1.25 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$ となる。また，温度 $T = 290 \text{ K}$ とおいた。式(5)と式(8)より回折格子成分 $I_a(t)$ を求めて式(15)に代入し，式(18)の $N_{Da}(t)$ の値を得る。これと式(19)–(21)を用いると，位相共役反射率の時間的変化が導かれる。

表1 BaTiO₃結晶のパラメータ

イオン化断面積	S	$5.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{J}$
アクセプタ密度	N_A	$2 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$
ドナ密度	N_D	$5 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$
移動度	μ	$5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{Vs}$
再結合率	r_R	$5 \times 10^{-14} \text{ m}^3/\text{s}$
誘電率	ϵ	$1.49 \times 10^{-9} \text{ F/m}$

4波混合に寄与する全光電力を 12.5 mW とおき、異なるポンプ比 p に対して位相共役反射率の時間応答を数値計算した。位相共役反射率曲線をその定常値で規格化した結果を図 2 に示す。ポンプ比 $p=9$ および $p=0.111$ の場合、反射率が定常値の 1/2 に達する時間はそれぞれ約 4.5 秒および約 1.5 秒であり、 $p=0.111$ の場合は $p=9$ の場合よりも約 3 倍早い。

4波混合に寄与する全光電力を 25 mW とおき、図 2 の場合と同様の数値計算結果を図 3 に示す。ポンプ比 $p=9$ および $p=0.111$ の場合、反射率が定常値の 1/2 に達する時間はそれぞれ約 2 秒および約 0.5 秒であり、 $p=0.111$ の場合は $p=9$ の場合よりも約 4 倍早い。

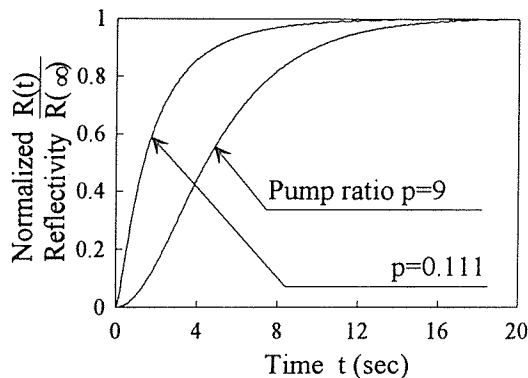


図 2 全光電力が 12.5 mW の場合における規格化した位相共役反射率の時間応答曲線

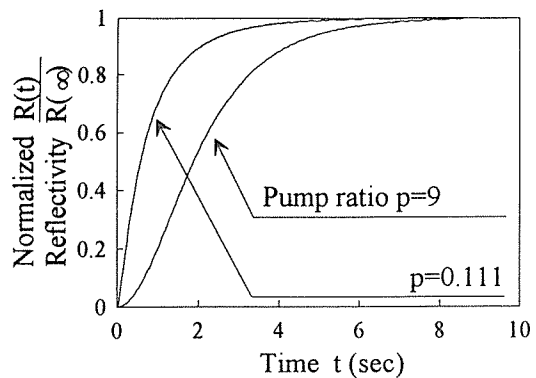


図 3 全光電力が 25 mW の場合における規格化した位相共役反射率の時間応答曲線

図 2 および図 3 より、4波混合に寄与する全光強度が一定の条件下では、ポンプ比が大きい、すなわち前進ポンプ光よりも後進ポンプ光が強い場合は、高い反射率の定常値が得られるが、応答時間は遅くなる。また、ポンプ比が小さい、すなわち後進ポンプ光よりも前進ポンプ光が強い場合は、位相共役反射率が早く定常値に達するが、その定常値は低くなる。一方、ポンプ比が一定の条件下では、位相共役反射率の定常値は全光電力の値にほとんど影響を受けない。また、位相共役反射率が定常状態に至る時間は、全光電力が大きい場合に早くなる。

4波混合に寄与する全光電力が一定の条件下では、透過型回折格子発生に寄与する前進ポンプ光が強い場合、回折格子の振幅は早く定常状態に達する。しかし、この場合、後進ポンプ光の強度は小さく、その回折光である位相共役光は弱くなる。一方、前進ポンプ光が弱い場合、回折格子の振幅が定常状態に達する時間は遅い。しかし、後進ポンプ光の強度は大きく、位相共役光は強くなる。また、ポンプ比が一定の条件下では、4波混合に寄与する全光強度が大きくなると、各光の絶対的な強度が大きくなるので、回折格子の振幅は早く定常状態に達し、位相共役光の定常値も大きくなる。しかし、位相共役反射率は、プローブ光と位相共役光の強度比で定義されるため、ほとんど変化しない。以上の理由から、上記計算結果が得られたものと考えられる。

4. 実験および考察

本論文における理論解析を検証するために実験による位相共役光電力の測定を行った。実験に用いた光学系を図 4 に示す。光学系は、光源である波長 514.5 nm のアルゴンイオンレーザ、ホトリフラクティブ結晶である Sanders 社製の 5 mm 角の BaTiO₃ 結晶、半波長板 (HWP)、ビームスプリッタ (BS)、偏光ビームスプリッタ (PBS)、および光検出器 (PD) で構成される。HWP

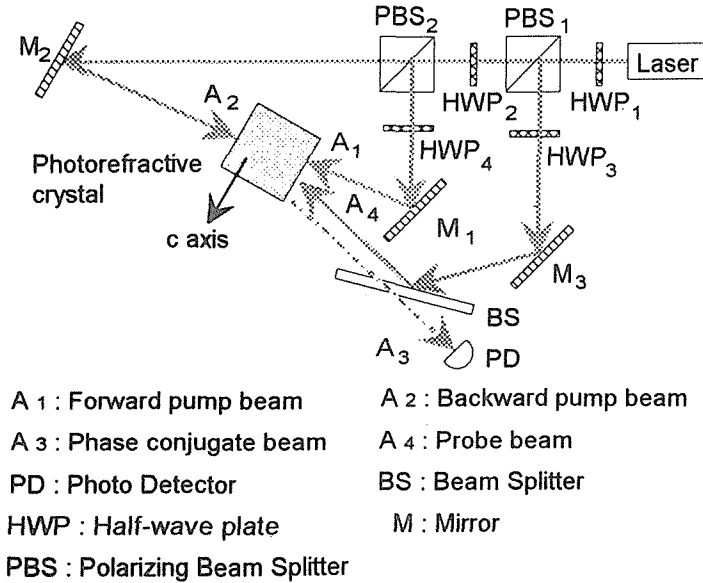


図4 実験の光学系

と PBS は、結晶に入射する全光電力は一定で、ポンプ比およびプローブ比を任意に変化させるために用いた。

まず、レーザ光は、HWP₁ を通過した後、PBS₁ で 2 方向に分けられる。PBS₁ を透過した光は、HWP₂ により偏光されて PBS₂ に入射する。この時、PBS₂ で反射された光は、HWP₄ を透過後、前進ポンプ光 A₁ としてホトリフラクティブ結晶に入射する。一方、PBS₂ を透過した光は、後進ポンプ光 A₂ として結晶に入射する。また、PBS₁ で反射された光は、HWP₃ を透過後、プローブ光 A₄ として結晶に入射する。前進ポンプ光、後進ポンプ光およびプローブ光はそれぞれ異常光線として結晶に入射する。発生した位相共役光 A₃ は BS を透過後、PD で検出される。ここで、BS の透過光と反射光の強度比は約 1 : 1 であるため、PD で検出した位相共役光電力の約 2 倍の値が、発生した位相共役光の正味の値となる。また、ホトリフラクティブ結晶の c 軸は、2 波混合における相互作用によりプローブ光が前進ポンプ光を増幅する方向に取った。これは、式(9)において、結合係数 $\gamma(t)$ の値が負であることに相当する。

HWP₂ を用いて、前進ポンプ光と後進ポンプ光の結晶への入射強度を調節し、位相共役光電力が定常状態に達する時間とその定常値を測定した。HWP₁ によってプローブ比を約 0.1 とし、前進ポンプ光とプローブ光の結晶内の交差角度を約 3° にした。また、透過型回折格子のみを結晶内に生じさせるため、後進ポンプ光の光路を十分長く取り、前進ポンプ光およびプローブ光が後進ポンプ光と干渉しない光学系を用いた。

BaTiO₃ 結晶に入射する光の全電力を約 23.5 mW として位相共役光電力を測定した結果を図 5 (a), (b) に示す。図 5 (a) はポンプ比 $k \cong 9$ の場合であり、図 5 (b) はポンプ比 $k \cong 0.111$ の場合である。また、結晶に入射する光の全電力を約 47 mW として位相共役光電力を測定した結果を図 6 (a), (b) に示す。図 6 (a) はポンプ比 $k \cong 9$ の場合であり、図 6 (b) はポンプ比 $k \cong 0.111$ の場合である。ここで、実験で用いた各光電力の約 50% が結晶端面反射などで失われると仮定すると、相互作用に寄与する電力は数値計算に用いた値とほぼ一致する。

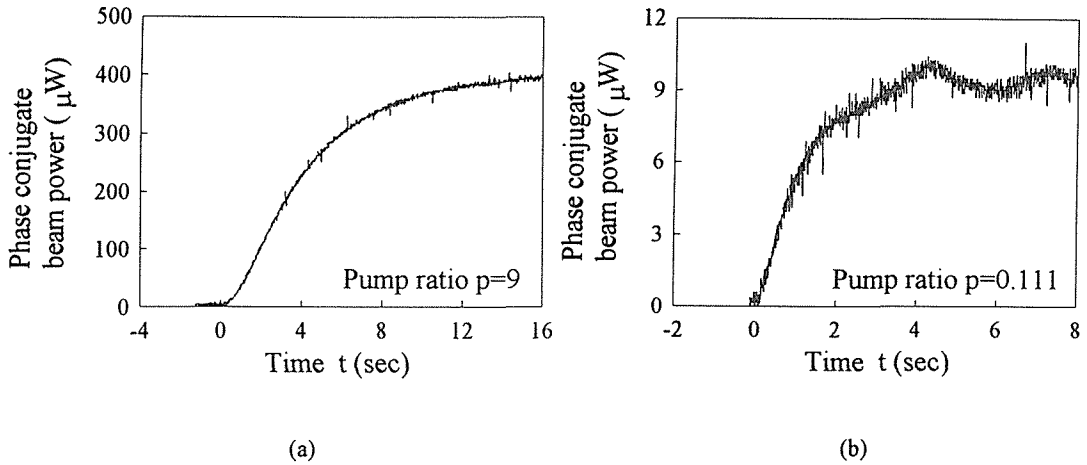


図5 結晶に入射する全光電力が約 23.5 mW の場合における位相共役光電力

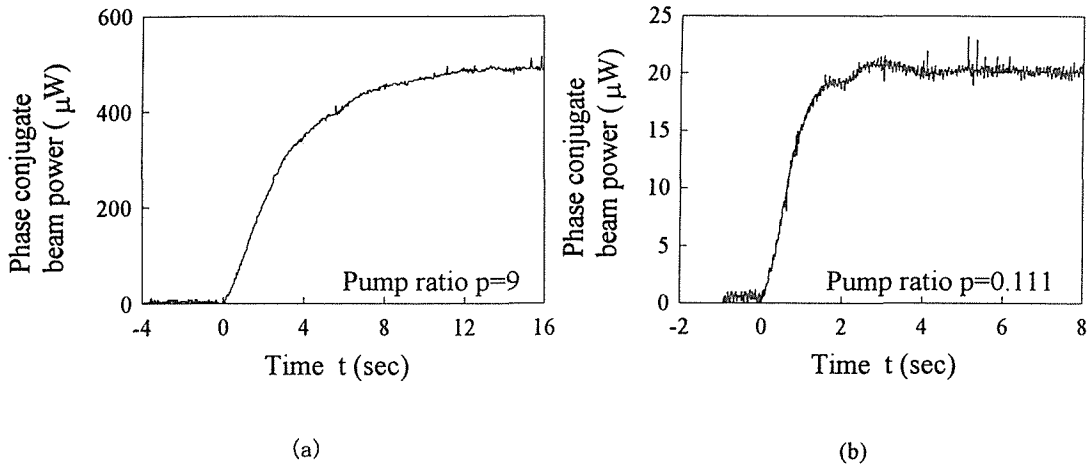


図6 結晶に入射する全光電力が約 47 mW の場合における位相共役光電力

実験結果より計算結果の妥当性を示すため、図2、図3および図5、図6を用いて、計算結果と測定結果の定量的な比較を行う。但し、図5及び図6の各測定波形に対しては、次式の関数

$$I_{conj} = \alpha \{1 - \exp(-t/\tau)\} \tag{23}$$

を用いて非線形最小二乗法によるフィッティングを行い、その結果を用いる。ここで、 α は位相共役光電力の定常値、 τ は定常値に達する時間を表す時定数である。図5(a)、(b)に対する定常値 α と時定数 τ を求めると、それぞれ $\alpha = 398.3, 9.23(\mu W)$ および $\tau = 4.12, 0.88(sec)$ であった。従って、測定結果より、ポンプ比 $p \cong 0.111$ の場合は、 $p \cong 9$ の場合に比べて約4.7倍早く定常状態に達すると考えられる。計算結果においては、約3倍早い。

図6(a)、(b)に対する定常値 α と時定数 τ を求めると、それぞれ $\alpha = 487.1, 19.4(\mu W)$ および $\tau = 3.79, 0.86(sec)$ であった。従って、測定結果より、ポンプ比 $p \cong 0.111$ の場合は、 $p \cong 9$ の場合に比べて約4.4倍早く定常状態に達すると考えられる。計算結果においては、約4倍早い。

4波混合に寄与する全光電力が一定の条件下では、ポンプ比 p が小さい、すなわち透過型回折格

子の発生に寄与する前進ポンプ光が強い場合、回折格子の振幅は早く定常状態に達する。しかし、この場合、後進ポンプ光の強度は小さく、その回折光である位相共役光も弱くなる。一方、ポンプ比 p が大きい、すなわち前進ポンプ光が弱い場合、回折格子の振幅が定常状態に達するには時間がかかる。しかし、後進ポンプ光の強度は大きく、その回折光である位相共役光も強くなる。また、ポンプ比が一定の条件下では、全光電力が強くなると、回折格子形成に寄与する光および回折されて位相共役光となる光の絶対的な強度が増加する。従って、位相共役光の応答時間は早く、その定常値は高くなる。以上の比較において、計算結果と測定結果は定性的に一致する。

計算結果と実験結果の間に定量的な差異が生じている理由として、以下に述べる原因が考えられる。まず、BaTiO₃結晶の持つ各種パラメータの値が正確に判っておらず、特に、ドナ密度やイオン化断面積についてはおおよその桁のみが与えられているにすぎない。また、測定に用いる結晶によってパラメータの数値は異なる。従って、表1に示すBaTiO₃結晶の数値と、本実験に用いた結晶のパラメータの値とは差異があると考えられる。次に、実験においては、結晶内の限定された領域が相互作用に寄与しているものと考えられる。通常、相互作用領域が結晶全体に渡っていると仮定して計算した結合強度は、実験における結合強度よりも大きくなる。これらの他に、結晶内における各光電界の吸収損失や光の散乱などが、実際の光強度と計算に用いた光強度の差異を生じたと考えられる。

5. む す び

本報告では、ホトリフラクティブ結晶を用いた4波混合における位相共役反射率の時間応答特性について、理論解析および実験による測定を行った。

まず、理論解析においては、結晶内に透過型回折格子が生じている場合を仮定し、ホトリフラクティブ効果による光強度の変化と結晶の物性パラメータを考慮した位相共役反射率を初めて導出した。次に、4波混合に寄与する全光電力およびポンプ比が、位相共役反射率の応答時間および定常値に及ぼす影響を数値計算によって明らかにした。4波混合に寄与する全光強度が一定の条件下では、後進ポンプ光が前進ポンプ光よりも強い場合、位相共役反射率の定常値は高いが定常状態に達するまでの時間は遅い。一方、前進ポンプ光が後進ポンプ光よりも強い場合、位相共役反射率の定常値は低いが定常状態に達する時間は早い。また、ポンプ比が一定の条件下では、全光強度が強くなると、定常値は高くなり、応答時間は早くなる。この特性を定量的に導くことによって、4波混合において前進ポンプ光と後進ポンプ光の果たす役割が一層明確となった。

更に、BaTiO₃結晶を用いて位相共役光発生の実験を行い、位相共役光電力の定常値と応答時間を測定した。計算結果と測定結果より、全光電力が一定の条件下では、ポンプ比 $p=9$ の場合は $p=0.111$ の場合に比べて、高い位相共役反射率の定常値が得られた。また、応答時間を比較すると、ポンプ比 $p=9$ の場合は $p=0.111$ の場合に対して、遅くなった。一方、ポンプ比が一定の条件下では、全光電力が強くなると、位相共役光の定常値は高くなり、応答時間も早くなった。これらの比較より、計算結果と実験結果の定性的な一致を確認した。

以上の結果は、位相共役光を応用した各種デバイス、特に、位相共役光の応答時間を応用する光動画像抽出処理系の設計およびその特性解析に極めて有用である。今後の課題として、自己励起型位相共役器の特性解析および入射光にパルス波形を用いた場合の時間応答解析が考えられる。

謝辞 本研究を行うに当たり、御指導、御助言を頂きました北海道大学工学部電子工学科固体電

子工学講座の武笠幸一教授，北海学園大学工学部電子情報工学科の佐藤邦宏助教授，ならびに同大学工学部長の桜庭一郎教授に深く感謝いたします。また，校正を手伝って下さいました圓佛晃次氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) J. B. Norman : "Phase-conjugate Michelson interferometers for all-optical image processing and computing", *Am. J. Phys.*, 60, 3, pp. 212–220 (1992).
- 2) A. Okamoto, T. Mishima, I. Sakuraba : "Optical transfer function and longitudinal image spread of phase conjugation owing to finite frequency bandwidth and finite medium thickness", *J. Opt. Soc. Am. A*, 9, 8, pp. 1285–1288 (1992).
- 3) N. A. Vainos, J. A. Khoury and R. W. Eason : "Real-time parallel optical logic in photorefractive bismuth silicon oxide", *Opt. Lett.*, 13, 6, pp. 503–505 (1988).
- 4) M. A. Neifeld and D. Psaltis : "Programmable image associative memory using an optical disk and a photorefractive crystal", *Appl. Opt.* 32, 23, pp. 4398–4410 (1993).
- 5) 高山佳久，岡本 淳，佐藤邦宏，三島瑛人，桜庭一郎 : "フォトリフラクティブ結晶を用いた 4 波混合における時間応答特性"，電子情報通信学会技術研究報告，OQE 93–41 (1993–07)。
- 6) 高山佳久，岡本 淳，佐藤邦宏，三島瑛人，桜庭一郎 : "フォトリフラクティブ結晶を用いた 4 波混合における時間応答特性の解析と実験"，電子情報通信学会論文誌 (投稿中)。
- 7) M. Cronin-Golomb, B. Fischer, J. O. White and A. Yariv : "Theory and applications of four-wave mixing in photorefractive media", *IEEE J. Quantum Electron.*, QE–20, 1, pp. 12–30 (1984).
- 8) 高山佳久，岡本 淳，三島瑛人 : "反射型回折格子による自己励起型位相共役器の反射率"，信学論 C–I, J 77–C–I, 1, pp. 30–32 (1994)。
- 9) T. K. Das, K. Singh : "Multivalued phase conjugate reflectivity in the reflection-type photorefractive four wave mixing ; strong coupling regime", *Opt. Quantum Electron.*, 23, pp. 411–425 (1991).
- 10) W. Krolikowski, K. D. Shaw and M. Cronin-Golomb : "Stability analysis and temporal behavior of four-wave mixing in photorefractive crystals", *J. Opt. Soc. Am. B*, 6, 10, pp. 1828–1833 (1989).
- 11) P. P. Banerjee, Q. W. Song and J. J. Liu : "Perturbation analysis of transient diffraction efficiency of photorefractive materials", *Opt. Commun.*, 83, 1, 2, pp. 195–202 (1991).
- 12) P. Günter and J. -P. Huignard, ed. : "Photorefractive materials and their applications II", Springer-Verlag, Berlin, pp. 151–203 (1989).
- 13) T. Hirao and T. Sawada : "On the dependence of photorefractive response time on index grating spacing", *Opt. Commun.*, 82, 1, 2, pp. 83–88 (1991).
- 14) G. C. Valley : "Short-pulse grating formation in photorefractive materials", *IEEE J. Quantum Electron.*, 19, 11, pp. 1637–1645 (1983).