



四波混合法による位相共役波の異常反射率の発現条件

伊藤 進一*・石 光隆**・上江洲由晃**

* 東京工芸大学工学部光工学科 〒243-02 厚木市飯山 1583

** 早稲田大学理工学部物理学科 〒169 東京都新宿区大久保 3-4-1

(1994年9月29日受付, 1995年3月4日受理)

Appearance Conditions of the Anomalous Reflectivity of Phase Conjugate Waves in the Four-Wave Mixing Technique

Shin-ichi ITOH,* Mitsutaka ISHI** and Yoshiaki UESU**

* Department of Photo-optic Engineering, Faculty of Engineering,
Tokyo Institute of Polytechnics, 1583, Iiyama, Atsugi 243-02

** Department of Physics, Waseda University,
3-4-1, Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169

(Received September 29, 1994; Accepted March 4, 1995)

The conditions required for the appearance of multivalued conjugate reflectivities in a practical crystal was investigated by computer simulation. First we experimentally determined the intrinsic coupling constant and the phase shift of the photorefractive crystal $\text{KNbO}_3:\text{Fe}$ by using both two- and four-wave mixing techniques. Reflectivities obtained by experiment were compared with theory and quantitative agreement was found. Using the values of the coupling constant and phase shift obtained from experiment the simulation study was performed. The application of external electric field of 6 kV/cm was assumed in the simulation in order to obtain large coupling strength and small phase shift. By using moving grating technique we found the transition from singlevalued regions to multivalued regions in (K_2, K_4) space, where K_2 and K_4 are the intensity ratios of counter-pump beam to pump beam and probe beam to pump beam, respectively.

1. 序

フォトリフレクティブ効果を利用した位相共役波発生法は、低出力レーザー光で可能なこと、また応答時間が3次の非線形光学過程などの電子過程に比して1秒前後と非常に長い点で、特徴のある非線形光学現象である。この特徴を生かした応用分野の開拓が活発に行われている^{1,2)}。

フォトリフレクティブ結晶における位相共役波発生法の一つは縮退四波混合法であり、定常状態においては時間に依存しない非線形結合方程式によって記述される。特に透過形回折格子の場合は Cronin-Golomb ら³⁾により解析的な解が与えられている。この解析解のなかで興味深いのは、パラメータのある領域で位相共役波が複数

の反射率(多重解)をもつ可能性を示したことである。パラメータとは、位相シフト、結合強度、光強度比等である。一例として位相共役波反射率の結合強度依存性の計算結果を Fig. 1 に示す。この図は位相シフトが0度のときを示しているが、反射率についていくつかの解があることがわかる^{3,4)}。もし、この解が安定ならば、パラメータの変化に対してある種のヒステリシスを示す可能性がある⁴⁾。しかし一方で、時間を含む非線形方程式の解析によって多重解のあるものは不安定であることを指摘する理論的研究も行われている⁵⁾。このような反射率の多重性または不安定性を反射率の異常と呼ぶことにする。

これらの理論と実験との比較は現在までのところ不十分である。筆者らの知る唯一の実験は動格子法を併用し

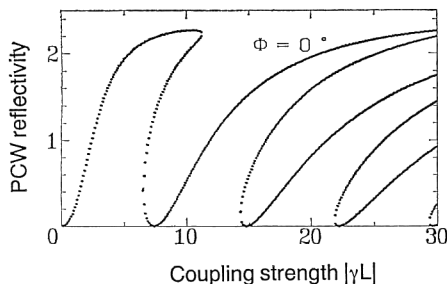


Fig. 1 Dependence of PCW reflectivity on coupling strength $|\gamma L|$. The calculation was carried out under the condition of $\phi = 0^\circ$, $K_2 = 1$ and $K_4 = 0.4$. Multiple solutions of the reflectivity appear at specific values of $|\gamma L|$.

て反射率の測定を行い、Cronin-Golombらの結果に基づいて解析した、MacDonaldら⁶⁾による研究である。しかし、この実験は単一解領域でなされている。このため反射率異常の領域において同様な実験を行い、その領域で実際にどのような現象が生じているか確認することが位相共役波発生の上で本質的に重要であると考えられる。

本研究の目的は、このような実験の有効な指針となるように、異常発現の条件を現実の結晶を想定して計算機シミュレーションにより調べることである。すなわち、まず筆者らが所有する結晶のフォトリフラクティブ効果に関する定数を実験的に決定した。これをもとに強度比空間において動格子法^{7,8)}を併用したときに、単一解と多重解の出現する領域を区別して表示した状態図をシミュレーションにより作成した。また、この状態図の代表的な値での位相シフトに対する位相共役波の挙動の例を示した。多重解を得るために筆者らは動格子法による位相制御を提案している。一方、Cronin-Golombらは位相シフト90度(実数結合定数)の場合において多重解が強度比を変えることによって出現することを指摘している⁹⁾。このときの強度比は 10^4 程度であり、実験的には実現が困難である。しかし、動格子法で位相シフトを制御できれば適当な強度比で多重解領域の実験をすることができる。これが位相シフト法が本質的に有利な点である。

2. 理 論

四波混合法および動格子法の理論を概説する。**Fig. 2**は四波混合法における四つの光波の状態を示している。まず、ポンプ光 I_1 とプローブ光 I_4 は**Fig. 2**の実線で示された干渉縞をフォトリフラクティブ結晶中につくる。この干渉縞の強度分布により電気光学効果を通して、図

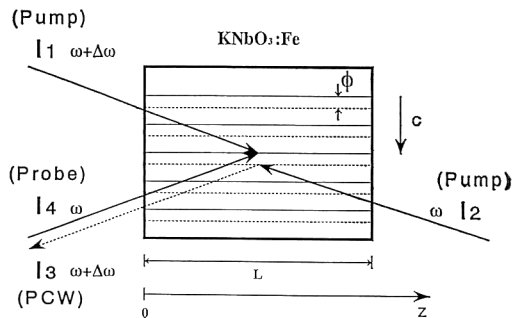


Fig. 2 Schematic illustration of the four-wave mixing. I_1 denotes pump beam, I_2 counter-pump beam, I_3 phase-conjugate wave and I_4 probe beam. On operation of the moving grating technique, frequencies of I_1 and I_3 differ from those of I_2 and I_4 by $\Delta\omega$. ϕ is the phase shift between the interference fringe and the refractive index grating.

の点線の透過形屈折率格子が生じる。干渉縞と屈折率格子の間にはある位相シフト ϕ が存在し、この位相シフトの大きさは屈折率格子の形成機構、すなわち光励起された電子の輸送過程に依存する。

この状態に第2のポンプ光 I_2 が入射すると、この屈折率格子により回折されて I_4 と反対方向に進行する位相共役波(PCW) I_3 となる。

屈折率格子形成にはある時間を要する。この時間より十分長い時間が経過後、四波混合過程は時間に無関係になり、光波 $E_i = A_i \exp\{i(\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r} - \omega t)\} + c.c.$ ($c.c.$ は、複素共役を表す)の振幅 A_i に関する次の結合方程式によって記述される：

$$\begin{aligned} \frac{dA_1}{dz} &= -D \cdot A_4 \\ \frac{dA_2^*}{dz} &= -D \cdot A_3^* \\ \frac{dA_3}{dz} &= +D \cdot A_2 \\ \frac{dA_4^*}{dz} &= +D \cdot A_1^* \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、

$$D = \frac{\gamma}{I_0} (A_1 A_4^* + A_2^* A_3)$$

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

ここで、 γ は結合定数であり、次式で与えられる。

$$\gamma = i \frac{\omega \cdot \Delta n \cdot \exp(i\phi)}{2c \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

ω = 角振動数, Δn = 屈折率変化

$\theta = I_1$ と I_4 の交差角, c = 真空中の光速

式(1)の導出には、振幅 A_i は z 座標にのみ依存する

近軸近似 (z 軸は, Fig. 2 を参照) と波長に比して空間的に十分になだらかに変化しているとする近似を用いている. また, 結晶の吸収は無視している. $I_i(z) = |A_i(z)|^2$ は, 時間平均光強度である.

式(1)から三つの保存量

$$\begin{aligned} C &= A_1 A_2 + A_3 A_4 \\ d_1 &= I_1 + I_4 \\ d_2 &= I_2 + I_3 \end{aligned} \quad (3)$$

が導かれる. これらを利用して式(1)は, 解析的に解かれた⁹⁾. 位相共役波の反射率 R は, 次式で与えられる.

$$R = \frac{I_3(0)}{I_4(0)} = \frac{(r^2 - \Delta^2) |T|^2}{|\Delta T + r|^2} \quad (4)$$

ただし, r は, 次の方程式の根である:

$$\begin{aligned} &\{(r^2 - \Delta^2)/4 - I_1(0)I_2(L)\} \cdot |\Delta T + r|^2 \\ &+ (r^2 - \Delta^2)I_4(0)I_2(L) |T|^2 \\ &+ r(r^2 - \Delta^2)I_4(0)(T + T^*)/2 \\ &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

ここで,

$$\begin{aligned} \Delta &= d_2 - d_1, \quad T = \tanh(\mu L), \\ \mu &= \gamma r / (2I_0) \end{aligned}$$

L は, 相互作用長である (Fig. 2). 多重的反射率は式(5)が複数の根をもつときに生じる.

反射率 R は, 位相シフト, 結合強度 $|\gamma L|$, 強度比 $K_2 = I_2(L)/I_1(0)$, $K_4 = I_4(0)/I_1(0)$ 等に依存する. Fig. 3 に, 式(4), (5)を用いて, $(\phi, |\gamma L|)$ 空間における等反射率曲線の例が描かれている. ここで, $K_2 = 1, K_4 = 0.4$ である. Fig. 1 は, この図の $\phi = 0^\circ$ での断面図を示している. これからわかるように, 多重解は, $\phi = 0^\circ$ または 180° 近傍で現れている.

次に, 実験的に制御可能な量について考える. 光強度

比 K_2, K_4 は, 広範囲にわたり自由に設定できる. 位相シフト ϕ と結合定数 γ も固有の値から外部電場および動格子法により変化させることができる. 電場 E が印加されたときの光波の振舞いは, 式(1), 式(2)の ϕ, γ の代わりに ϕ_E, γ_E で置き換えた式で記述できる.

位相制御は動格子法でも行うことができる. すなわち, 光波 1 の振動数を光波 2, 4 の振動数からわずかに Δf だけ変化させる. この結果, 干渉縞は速度 v で移動する. 速度 v は干渉縞間隔 Λ と Δf により $v = \Lambda \cdot \Delta f$ で与えられる. そのとき格子形成の時間 τ が有限であるために, 結合定数は次のように変化する⁹⁾.

$$\gamma = i \frac{|\gamma_E| \exp(i\phi_E)}{1 - i2\pi \cdot \Delta f \cdot \tau} \quad (6)$$

ここで, 動格子法で誘起された位相シフト ϕ_m は,

$$\tan \phi_m = \Delta\omega \cdot \tau, \quad \Delta\omega = 2\pi \cdot \Delta f \quad (7)$$

で与えられるので, 式(2)の結合定数は次のように書き換えられる.

$$\gamma = i |\gamma_E| \cos \phi_m \cdot \exp \{i(\phi_E + \phi_m)\} \quad (8)$$

したがって, 動格子法を使用したときの全位相シフト量

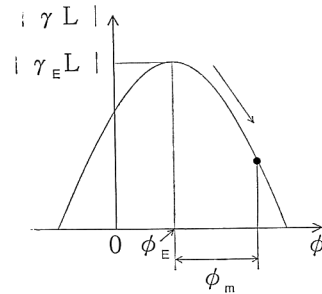


Fig. 4 Trajectory of the moving grating technique in $(\phi, |\gamma L|)$ space.

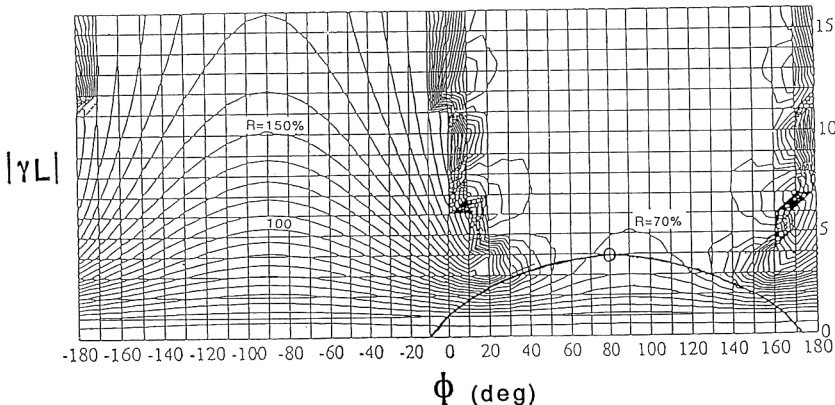


Fig. 3 PCW reflectivity contour in $(\phi, |\gamma L|)$ space. Parameters $K_2 = 1$ and $K_4 = 0.4$ were used in the calculation. Multiple solution regions exist near $\phi = 0^\circ$ and 180° .

は,

$$\phi = \phi_E + \phi_m \tag{9}$$

また, 結合定数の大きさは,

$$|\gamma| = |\gamma_E| \cos \phi_m \tag{10}$$

で与えられる. 動格子法を作動したときの $(\phi, |\gamma L|)$ 空間の軌跡を Fig. 4 に示す. この軌跡に対応する位相共役波反射率は Fig. 3 より求められる.

3. 実験

外部電場のないときの結晶の固有の結合定数 γ_0 と固有の位相シフト ϕ_0 を決定するために, 動格子法を併用した四光波混合および二光波混合の実験を行った. 四光波混合の実験は反射率の安定な挙動を示すと期待される単一解領域で行った. Fig. 5 に四光波混合の実験装置を示す.

使用した結晶は, $\text{KNbO}_3 : \text{Fe}$ (以下 KN と略記する. Fe の含有量は 600 ppm, 還元処理済み) である. Fig. 2 に各光線の配置と KN 結晶の c 軸の方向を示す. レーザーはマルチ縦モードの Ar イオンレーザーを波長 514.5 nm で使用した. 透過形屈折率格子を作るために, 光波 I_1 と光波 I_4 だけが干渉になるように光波間の光路差が調整されている¹⁰⁾.

動格子法は, PZT ピエゾ素子で駆動したミラー(ピエゾミラー)を用いて行った. ピエゾミラーは鋸歯状波の変位を行い, ドップラー効果により振動数変化 Δf を生じる. このとき鋸歯状波の跳びによっても干渉縞が一樣運動するように, ピエゾミラーの振幅が光の半波長になるように調整されている¹¹⁾. また, 過渡現象による影響を除去するために立上がり時間の掃引から十分時間が経過し

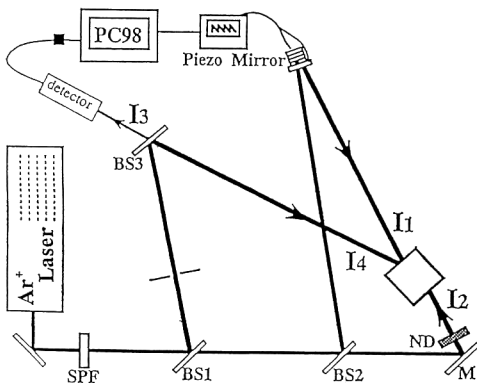


Fig. 5 Experimental setup of the four-wave mixing process with the moving grating technique. Here BS denotes beam splitter, SPF spatial filter, NB neutral density filter and M mirror.

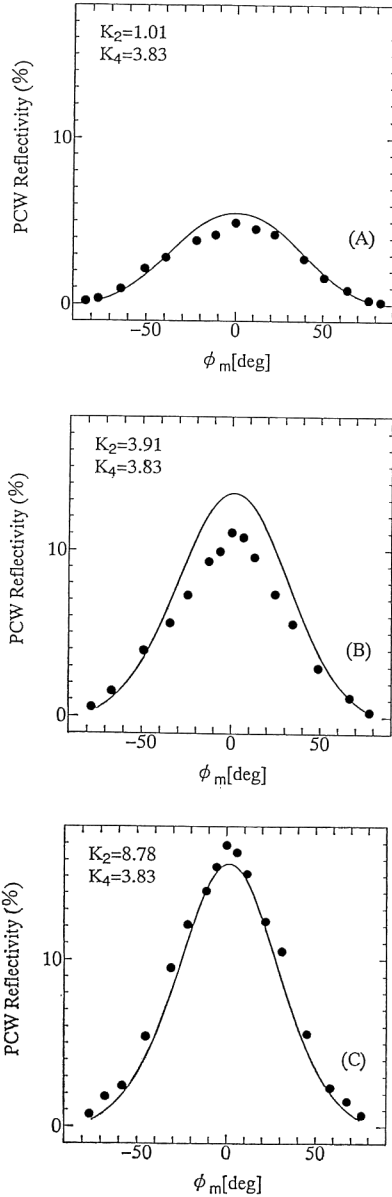


Fig. 6 Relation between PCW reflectivity and phase shift ϕ in $\text{KNbO}_3 : \text{Fe}$. Solid circles indicate experimental values obtained by the moving grating technique and the solid line indicates theoretical values. (a) represents the case where $K_2=1.01$ and $K_4=3.83$, (b) $K_2=3.91$, $K_4=3.83$, (c) $K_2=8.78$, $K_4=3.83$. In the calculation, ϕ_a and $|\gamma L|$ were fixed as 85.9° and 1.1, respectively.

た後のデータを採用している.

まず, 動格子法を併用した四波混合の実験の結果を述べる. 位相共役波反射率の位相シフト依存性の測定結果を Fig. 6 (A)~(C) に示す. 光強度 I_1 および光強度比

K_4 は一定で, $K_4 \doteq 3.83$ である. 一方, 光強度比 K_2 はそれぞれ 1.01, 3.91, 8.73 である.

計算機により解析した結果, 各反射率は理論式と 20% 程度の精度で良い一致を示した. 若干の不一致の原因の一つとして, 理論では結晶の吸収を無視していることが考えられる. このとき $|\gamma_0 L| \doteq 1.1$, $\phi_0 \doteq 85.9$ 度を得た. 緩和時間 τ は K_2 の増加とともに減少していて, $K_2 \doteq 1.01, 3.91, 8.73$ に対して, それぞれ $\tau \doteq 1.04, 0.62, 0.51$ 秒である.

次いで, 四光波混合で得た値を確認するために二光波混合の実験を行った. 結果だけを簡単に述べる. この実験は Fig. 2 から対向ポンプ光 I_2 を取り除いて行われ, 固有の位相シフト ϕ_0 および Γ_0 を求めた¹²⁾. Γ_0 は光強度に関する結合方程式中の結合定数であり, $\Gamma_0 = \gamma_0 + \gamma_0^*$ の関係がある. 得られた値は $\Gamma_0 \doteq 3.54 \text{ cm}^{-1}$ および $\phi_0 \doteq 85.9$ 度である. また, 相互作用長すなわち結晶の長さ $L \doteq 5.8 \text{ mm}$ から, 結合強度 $|\gamma_0 L| \doteq 1.03$ が得られた. これらの値は四光波による実験値と良い一致を示している.

4. シミュレーションによる状態図

前節の結晶を用いてさらに進んだ実験, すなわち多重解や不安定性の異常を示す領域での実験の指針となる状態図を計算機シミュレーションにより作成した.

シミュレーションは定常方程式の解析解³⁾ を利用して行うが, 多重解領域では, 位相共役波反射率は序で述べたように不安定になる可能性も存在する. 解の不安定性については, 理論的には次のように判定がなされている. 時間を含む結合方程式を定常解のまわりで線形化した方程式の振幅のフーリエ成分が, $\text{Im}(\omega) > 0$ に極をもてば不安定である. あるいは, 非線形方程式を直接数値積分することで強度のゆらぎが現れれば不安定である. ただし, これらの理論に基づくシミュレーションは結合定数が実数の場合にしか行われていない.

結合定数が複素数の場合, 解の安定性の判定はそれほど簡単ではない. しかしこの場合にも定常理論の多重解領域で解の不安定性が現れる可能性があり, このことは例えば, 光双安定の応用を考えるときに重要な因子となる. またこの領域で光カオス観測の可能性もあり, 今回作成した状態図は実験の指針としては有用であると考えられる.

非線形現象は各種パラメータの変化により敏感に様相を変える. 今回対象としている実験のパラメータは, 位相シフト ϕ_0 , 結合強度 $|\gamma_0 L|$, 光強度比 K_2 と K_4 , ま

た外部電界強度 E , および干渉縞間隔 Λ である. これら多数のパラメータの組合せは非常に大きくなるので, あらかじめこれらのパラメータ空間のどの領域で現象が発現するか計算機シミュレーションによって予想を立てておくことが, 所期の実験を行うためには必要である.

状態図は (K_2, K_4) 空間で作成した. 範囲は $1/16 \leq K_2 \leq 16, 1/16 \leq K_4 \leq 16$ である. ある K_2, K_4 の組合せに対して動格子法を作動して, ϕ_m を -90 度 $< \phi_m < 90$ 度の範囲で変化させ, 位相共役波反射率のグラフを求める. このときいずれかの ϕ_m で, 反射率の多重解が現れればこれを多重反射率の状態と呼び, そうでなければ単一反射率の状態と呼ぶことにする.

シミュレーションに用いる各種パラメータは実現可能な値を採用する必要がある. ところが, 多重解実現のためには実験で用いた KN 結晶の固有の結合定数はそのままでは小さすぎる. また, KN 結晶の固有の位相シフトはほぼ 90 度であるが, この値ではやはり異常な振舞いは期待しにくい^{3,4)}. しかし, 結晶に電界を加えると大きな結合定数が得られ, 同時に位相シフトが 90 度から大きく変化する^{9,13)}. そこで電界下での実験を想定した.

このときの結合定数 γ_E と位相シフト ϕ_E は, Kukhtarev らにより次式で与えられている⁹⁾.

$$\gamma_E = i \frac{\omega n_0^3 \cdot r_{\text{eff}} \cdot E_m \exp(\phi_E)}{2c \cdot \cos \theta} \quad (11)$$

$$\phi_E = \tan^{-1} \frac{E^2 + E_d(E_d + E_q)}{EE_q} \quad (12)$$

ただし,

$$E_d = \frac{2\pi k_B T}{e\Lambda}, \quad E_q = \frac{N_A \Lambda}{2\pi\epsilon} \quad (13)$$

$$E_m = -E_q \sqrt{\frac{E^2 + E_d^2}{E^2 + (E_d + E_q)^2}} \quad (14)$$

ここで,

n_0 = 結晶の屈折率, r_{eff} = 実効電気光学定数

k_B = ボルツマン定数, N_A = トラップ密度

T = 絶対温度, ϵ = 結晶の低周波誘電率

である (N_A の決定法については, 文献 10) を参照).

上式と前節の実験での値, $E = 0 \text{ kV/cm}$, $\Lambda = 0.68 \mu\text{m}$, $|\gamma_0 L| = 1.1$ を基準値として採用すると, 任意の電界 E および干渉縞間隔 Λ に対して位相シフト ϕ_E と結合強度 $|\gamma_E L|$ が決まる. Fig. 7 にいくつかの E と Λ に対する位相シフトと結合強度の関係を示した.

Fig. 7 より, 大きな結合強度と小さな位相シフトは $E = 6 \text{ kV/cm}$, $\Lambda = 5 \mu\text{m}$ で得ることができる. この条件下で, 動格子法を作動したときの反射率を (K_2, K_4) 空間で求め, 状態図を作成した (Fig. 8). ここで, $|\gamma_E L| =$

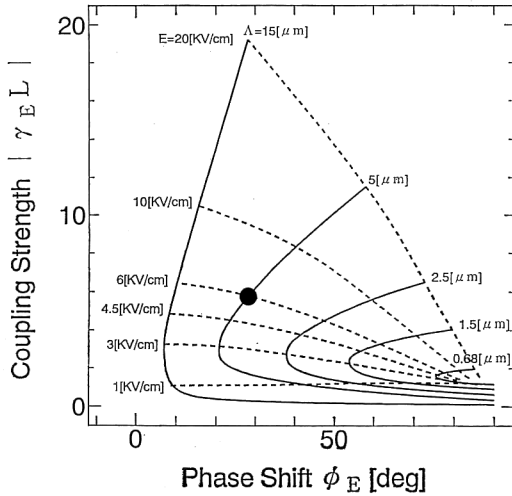


Fig. 7 Relation between phase shift ϕ_E and coupling strength $|\gamma_E L|$ in $\text{KNbO}_3:\text{Fe}$ used in the present experiment, for various values of electric field E and grating spacing Λ . The simulation was performed by using values of E and Λ indicated by the solid circle in the figure.

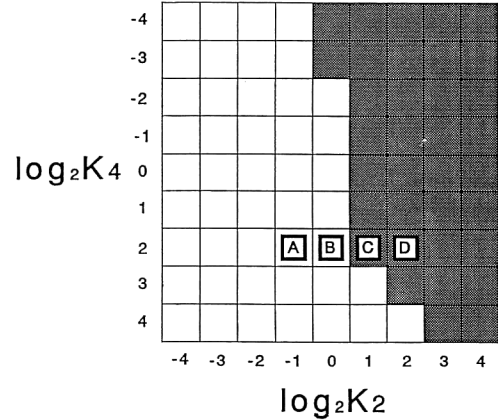


Fig. 8 Singlevalued and multivalued regions of the PCW reflectivity in the (K_2, K_4) space. The dark area indicates the multivalued region, while the open area indicates the singlevalued one.

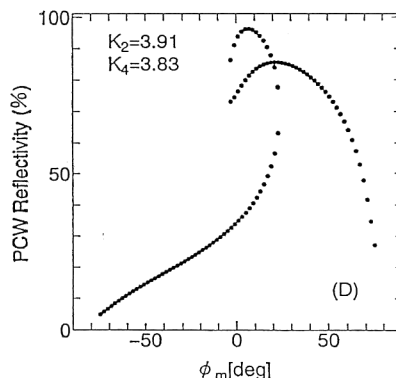
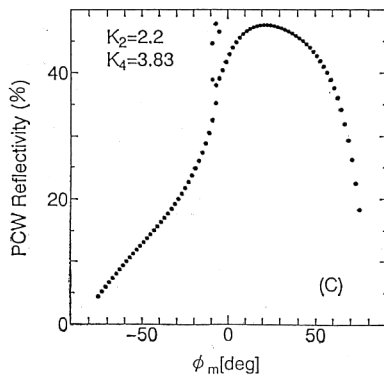
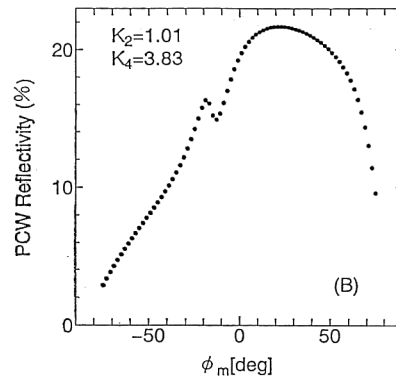
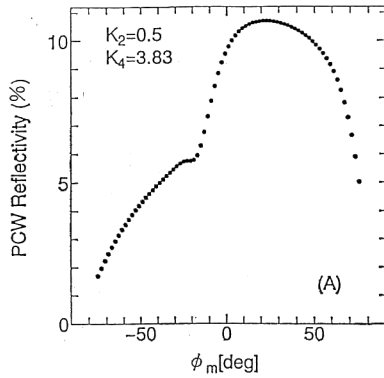


Fig. 9 Calculated relation between the PCW reflectivity and phase shift. Parameters used in the simulation are (A) $K_2=0.5, K_4=3.83$, (B) $K_2=1.01, K_4=3.83$, (C) $K_2=2.2, K_4=3.83$, and (D) $K_2=3.91, K_4=3.83$. ϕ_E and $|\gamma_E L|$ are fixed as 28.1° and 5.8 , respectively.

5.8, $\phi_E = 28.1$ 度である。計算は図の各正方形の領域の中央の値で行い、その結果でその領域を代表させた。多重解は図の黒い部分で、単一解は白い部分で出現する。

光強度比 K_4 を固定し、 K_2 を変化させたときの単一解から多重解へ変化する様子を Fig. 9 (A)~(D) に示す。ここで K_4 は一定値 3.83 に固定し、一方 K_2 は 0.5, 1.01, 2.2, 3.91 と変化させた。(A) では ϕ_m の全領域で反射率は一意的である。(B) では一意的だが小さな二つ目の極大が現れている。(C) ではこの極大が変化して多重的反射率が非常に狭い領域で出現している。したがって、このときの $K_2 = 2.2$ がほぼ二つの状態の境界値を与える。(D) では多重的反射率の領域がさらに拡大している。

5. 結 論

以上の研究の結果は、次のように要約できる。

(1) 動格子法を併用した単一解領域における四光波混合法による KN 結晶の位相共役波反射率は、結合方程式の Cronin-Golomb らの解析解により定量的に説明できた。

(2) KN 結晶の固有位相シフト ϕ_0 と結合強度 $|r_0 L|$ が二光波および四光波混合法により実験的に決定された。

(3) これらの値を用いたシミュレーションにより、実際の KN 結晶において動格子法使用時の単一解と多重解反射率の領域が (K_2, K_4) 空間において決定された。このとき、シミュレーションは多重解を発現させるために結合強度を増大させ、位相シフトを小さくする効果をもつ外部電場印加の条件下で行われた。

現在、シミュレーションの結果を検証する実験の準備を行っている。このとき特に注意すべきことは、装置自身の不安定性に起因する見かけ上の反射率のゆらぎを徹底的に除去することである。前述の安定領域と考えられる実験でもはじめはかなりのゆらぎがみられた。これは大部分光路内の空気の温度ゆらぎによるものであることを確認してその対策を施した。しかし、ある程度のゆらぎは依然として残っているのでその他の要因についても再検討している。最終的な実験結果については、別の機会に発表したい。

シミュレーションと実験の一部を担当していただいた

早稲田大学学生坂井浩之君と吉原俊之君に感謝します。

文 献

- 1) 左貝潤一: 位相共役光学 (朝倉書店, 1990).
- 2) P. Yeh: *Introduction to Photorefractive Nonlinear Optics* (John Wiley & Sons, New York, 1993).
- 3) M. Cronin-Golomb, J.O. White, B. Fisher and A. Yariv: "Exact solution of a nonlinear model of four-wave mixing and phase conjugation," *Opt. Lett.*, **7** (1982) 313-315; M. Cronin-Golomb, B. Fisher, J.O. White and A. Yariv: "Theory and applications of four-wave mixing in photorefractive media," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-20** (1984) 12-30.
- 4) S. Itoh and Y. Uesu: "Simulation study of phase-shift dependence of the phase conjugate wave intensity in a photorefractive medium," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32** (1993) 4300-4302.
- 5) V. Krolikowski, K.D. Shaw, M. Cronin-Golomb and A. Bledowski: "Stability analysis and temporal behavior of four-wave mixing in photorefractive crystals," *J. Opt. Soc. Am. B*, **8** (1989) 1828-1833.
- 6) K.R. MacDonald and J. Feinberg: "Enhanced four-wave mixing by use of frequency-shifted optical waves in photorefractive BaTiO_3 ," *Phys. Rev. Lett.*, **55** (1985) 821-824.
- 7) J.P. Huignard and A. Manakchi: "Coherent signal beam amplification in two-wave mixing experiments with photorefractive $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystals," *Opt. Commun.*, **38** (1981) 249-254.
- 8) T. Yoshiwara, J. Iba, Y. Uesu, K. Hikita and H. Iizuka: "Enhancement of optical wave mixing characteristics of photorefractive $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystal by moving grating method," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31** (1992) 3205-3208.
- 9) N.V. Kukhtarev, V.B. Markov, S.G. Odoulov, M.S. Soskin and V.L. Vinetukii: "Holographic strage in electrooptic crystals," *Ferroelectrics*, **22** (1979) 949-964.
- 10) N. Horiuchi, K. Isoda, J. Iba, S. Kurimura and Y. Uesu: "Discrimination of the optical phase-conjugate waves from large and small gratings formed in photorefractive $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystal," *Proceedings of IEEE 7th International Symposium on Applications of Ferroelectrics* (1990) pp. 112-114.
- 11) T. Yoshihara, Y. Uesu, K. Hikita and H. Iizuka: "Photorefractive response characteristics and generation of phase-conjugate wave in $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ and $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystals," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32** (1993) 4296-4299.
- 12) 吉原俊幸, 坂井浩之, 上江洲由晃, 瀬尾 巖: "近縮退 2 光波混合による $\text{KNbO}_3 : \text{Fe}$ の光誘起屈折率格子の位相差の測定", 第 41 回応用物理学関係連合講演会, 30 PD/III-15 (1994).
- 13) P. Gunter: "Coherent image amplification and optical phase conjugation with photorefractive materials," *Proc. SPIE*, **369** (1981) 230-236.