

## 誘電体光ホログラムメモリの位相共役波による再生に関する研究

多 田 紘 二\*・内 藤 進一郎\*\*

### Phase-conjugate Read out Holographic Optical Memory in Dielectric Single Crystal

Koji Tada and Shinichiro Naito

We demonstrate phase-conjugate read-out method in holographic optical memory using Fe:LiNbO<sub>3</sub> single crystal. In comparison with the conventional read-out by the reference optical beam, reconstructed images by phase-conjugate read-out method have higher fidelity and quality. It may be applied to the high density optical data storage with  $10^{12}$  bits of information.

#### 1. はじめに

近年、誘電体単結晶 Fe:LiNbO<sub>3</sub> のフォトリフラクティブ効果を利用したホログラムはその潜在的な高密度記録材料として着目され、記録データの大容量化の研究は着実に進展している。大容量化に際し、参照光の角度変化<sup>(1)</sup>、位相<sup>(2)</sup>、波長<sup>(3)</sup>等による多重化およびホログラムの結晶内での微小領域への局在化が重要である。既に 256 Mbit RAM を凌ぐ、1 Tbit ( $10^{12}$  Bit) 級を目標に検討が進められている。本研究では画像の忠実な再生を目的に、位相共役波の利用の検討<sup>(4)</sup>を試み、将来の大容量化のための実現手段として有用な方法であることが判明したので、その結果を報告する。

#### 2. 理論

##### 2-1 フォトリフラクティブ効果

フォトリフラクティブ効果はある波長の光が結晶に照射されると、その部分の屈折率が変化するという現象であり、多くは不純物が添加された電気光学結晶でみられる。図1に示すように<sup>(5)</sup>互いにコヒーレントな2つの光ビームが結晶中で交差するとき光の強度分布 ( $I$ ) が干渉によって生ずる。

結晶中にドナーまたはアクセプター不純物が均一に分布していると、占有しているキャリアは伝導体に光励起され、移動し、拡散や内部電荷の効果によって空いた捕獲中心に捉えられ

---

\* 電気電子工学科 \*\* 電気工学専攻大学院生

図1 (a) では2つの光波は $A_1$ および $A_2$ であり、励起された電子および放出した正イオンのドナーを示す。図1 (b) は平衡状態でのキャリア分布を示し、この結果空間電界 ( $E_{sc}$ も周期的に変化する。電気光学結晶では電界によってポッケルス効果によって、屈折率変化 $\Delta n = r E_{sc}$ が生ずる。

$r$ は電気光学定数である。図1 (c) には $E_{sc}$ および $\Delta n$ の分布を示す。光強度と屈折格子は一般に位相が $\phi$ だけずれており、拡散のみで移動するとき $\phi = \pi/2$ となる。電気光学結晶 $LiNbO_3$ は鉄不純物を約0.05%添加することにより顕著な屈折率変化すなわちフォトリフラクティブ効果を示すことが知られている。電気光学係数はテンソル量であり、結晶方位や電界方向および光波の偏光方向によって屈折率変化の大きさが異なる。図2は結晶軸と偏光との関係を示すが、偏光が結晶の $z$ または $c$ 軸に平行ならば空間電界 $E$ が $z$ 方向の場合、屈折率 $\Delta n = -n_o^3 r_{33} E_z / 2$ 、 $x$ または $a$ 軸に平行ならば $\Delta n = -n_o^3 r_{13} E_z / 2$ で与えられる。 $LiNbO_3$ 結晶では $r_{33} = 30.9 \times 10^{-12} V/m$ であり、 $r_{13} = 9.6 \times 10^{-12} V/m$ である。通常前者が用いられる。 $n_o = 2.200$ 、 $n_e = 2.286$ である。

## 2-2 位相共役波の発生理論

図3に示すように誘電体等媒質に物体光波 $A_1$ および参照光波 $A_2$ を交叉させると干渉により光強度の分布が生じ、フォトリフラクティブ効果によって、屈折率分布が記録される。再生過程では $A_2$ と対向するプローブ光波 $A_3$ を交叉点に向けて照射する。このとき再生波 $A_4$ が物体光波の位相共役波である。それぞれの光波の電界を次式で表す。

$$E_1 = A_1 \exp [i (\omega t - k_1 \cdot r)]$$

$$E_2 = A_2 \exp [i (\omega t - k_2 \cdot r)]$$

干渉の結果、光強度 $I$ は

$$I = |A_1|^2 + |A_2|^2 + A_2 A_1^* e^{-iK \cdot r} + A_2^* A_1 e^{iK \cdot r}$$

ここで、 $K = k_2 - k_1$ である。 $k_1, k_2$ は波数ベクトルで

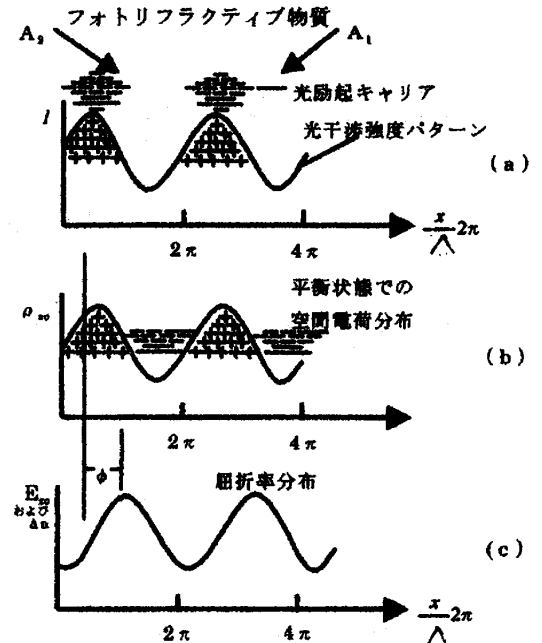


図1 フォトリフラクティブ効果のメカニズム

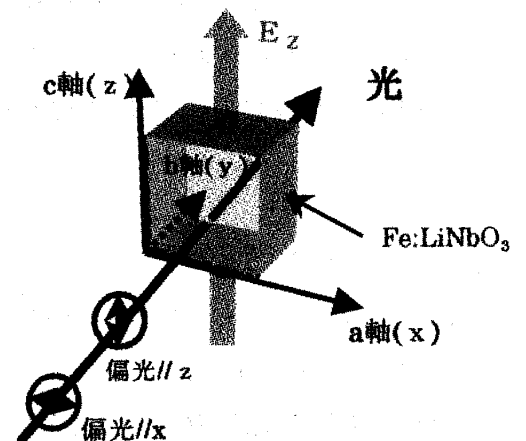


図2  $Fe:LiNbO_3$  結晶の電界による屈折率変化

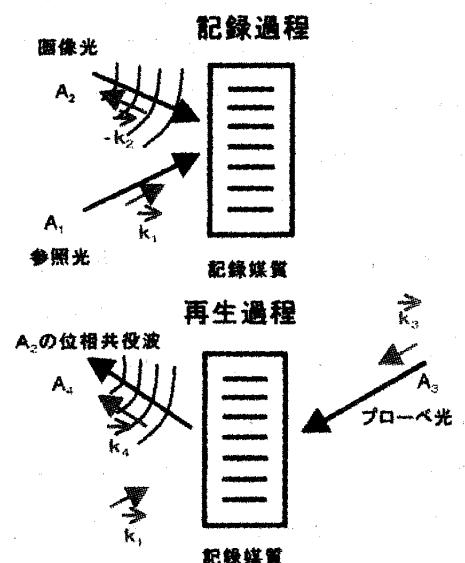


図3 ホログラム記録と位相共役波の発生

ある。

フォトリフラクティブ結晶の場合、記録後の屈折率変化は

$$\Delta n = (1/2) n_1 A_1^* A_2 e^{-i K \cdot r} / (|A_1|^2 + |A_2|^2) + c. c$$

与えられ、 $|A_1|^2$  が  $|A_2|^2$  よりも充分小さければ  $\Delta n$  は  $A_1^* A_2 e^{-i K \cdot r}$  に比例する。いま、図のように媒質に平面波  $A_3$  を通すと媒質中の分極  $P$  は

$$P = \epsilon_0 \chi E$$

与えられるので、屈折率分布  $\Delta n$  によって、媒質中の分極は次の項  $P'$  を含むことになる。

$$P' = n n_1 \epsilon_0 [A_1 A_2^* A_3 e^{-i(K+k_3) \cdot r} + A_2 A_1^* A_3 e^{i(K-k_3) \cdot r}] e^{i\omega t} + c. c.$$

この振動する分極項により、光が放射されるが、 $k_3 = -k_1$  であれば、 $K = k_1 - k_2$  なので  $P'$  第1項において  $K + k_3 = -k_2$  である。すなわち、この項は  $c n_1 (A_1 A_3) A_2^* e^{i(\omega t + k_2 \cdot r)}$  となり、放射光の電界  $E_4$  は  $E_4 \propto A_2^* e^{i(\omega t + k_2 \cdot r)}$  で与えられる。すなわち、先に述べた画像光波の電界  $E_4 = A_2 e^{i(\omega t - k_2 \cdot r)}$  の位相共役波となる。

### 2-3 位相共役波の特徴

図4に示すように、屈折率分布が生じた擾乱媒質

(Fe:LiNbO<sub>3</sub>結晶)に平面波を透過させると位相が空間的に乱れた光波がでてくる。平面波として、振幅変調された光波の場合、もし対向波(プローベ光)によって入力波の位相共役波が発生できれば、図のように逆進し、忠実に再生された入力像が得られる。2-2で記述した光

波混合の結果、入力波の位相共役波は、理論的に生成できこれを再生画像として利用することができる。

## 3. 実験方法

### 3-1 Fe:LiNbO<sub>3</sub>結晶の屈折率変化

誘電体結晶は Fe:LiNbO<sub>3</sub> (鉄イオン 0.1w%添加) で結晶軸 a,b,c を各片とする 1 cm<sup>3</sup> の立方体である。図5に外観を示す。入射および出射面には波長 514nm に対し AR コートを施した。使用したレーザは波長 514nm の Ar レーザである。ビーム径を約 1 mm とし、照射時間を変え照射エネルギーによる損傷の影響を調べた。12~80 J/cm<sup>2</sup> の範囲で照射エネルギーの増大とともに損傷は大きくなるが、He-Ne レーザによる回折像の観察から確認できた。この結果、以下で示すホログラムの記録に際し、露光エネルギーは数百 J/cm<sup>2</sup> とした。結晶の c 軸は常に入射面に平行と

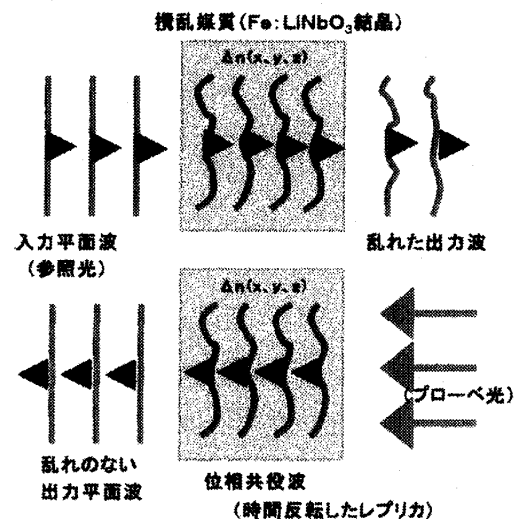
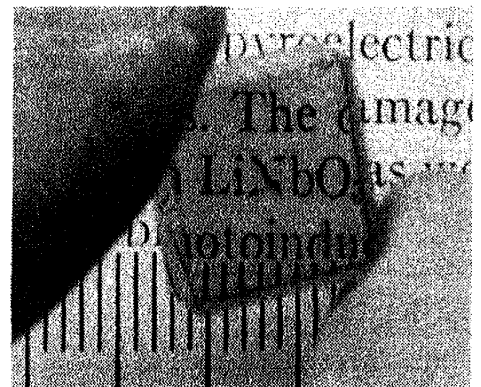


図4 位相共役波による再生像の特徴



誘電体結晶、ニオブ酸リチウム単結晶  
(鉄0.1w%添加)の写真  
(1目盛りは1mm)

図5 Fe:LiNbO<sub>3</sub>結晶の概観

し、a または b 面に垂直に入射させた。入射面に平行な偏波を p 偏光、垂直な偏波を s 偏光とする。

### 3-2 屈折格子の記録

交差する Ar レーザ光による結晶中の屈折格子形成を

確認するため図 6 に示すような光学系で記録および屈折格子による Bragg 回折の実験を行った。レーザ光の偏光は p および s 偏光を用いた。ビーム径は結晶中で約 5 mm、照射時間は 1 時間、露光エネルギーは  $239.5 \text{ J/cm}^2$ 、交差角は結晶に入射する前で  $2\theta = 24.5^\circ$  とした。屈折格子による Bragg 回折は He-Ne レーザの波長  $633 \text{ nm}$  を用い結晶を微調節できる回転ステージにのせ Bragg 1 次回折光の方向と強度を測定した。

### 3-3 再生光の回折効率およびホログラムによる画像

#### 記録・再生実験

図 7(a) にはホログラフィック画像記録の光学系を示す。

Ar レーザ光は通常は p 偏光を用い、この光学系における回折効率の評価を行うにあたっては s 偏光も用いた。Ar レーザの出力は  $50 \text{ mW}$ 、 $514 \text{ nm}$  波長の single line である。Ar レーザから出た光束は  $\lambda/2$  を通り 2 枚の焦点距離の異なるレンズで拡大され、光束約  $8 \text{ mm}$  の平行光束となる。光束は約 50% 反射のハーフミラーによって分離され、透過光はさらに約 50% 反射のハーフミラーで分離され画像光および参照光となる。画像光は透過型入力画像を通過し図 7(b) のようにレンズで絞り、約  $1 \text{ mm}$  径のスポットとし、結晶中に導く。画像光と参照光は結晶内で交差させる。画像光の入力画像直前の光強度は  $0.143 \text{ mW/cm}^2$ 、参照光は  $0.592 \text{ mW/cm}^2$  であった。

画像再生実験では、図 8 には、位相共役波による再生過程の光学系を示す。記録過程の光学系で述べた最初のハーフ

ミラーによって反射された光は 2 枚のミラーで反射され参照光と対向するよう調整され、

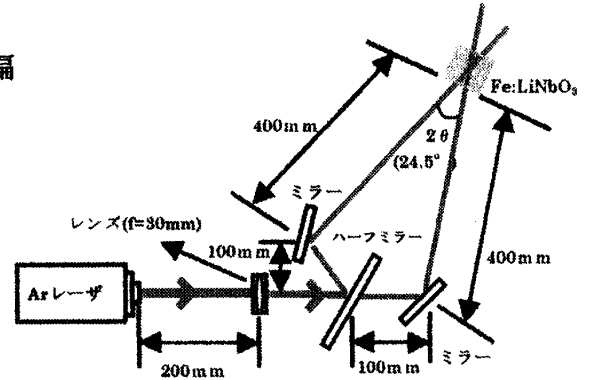


図 6 干渉レーザ光による屈折格子記録の光学系

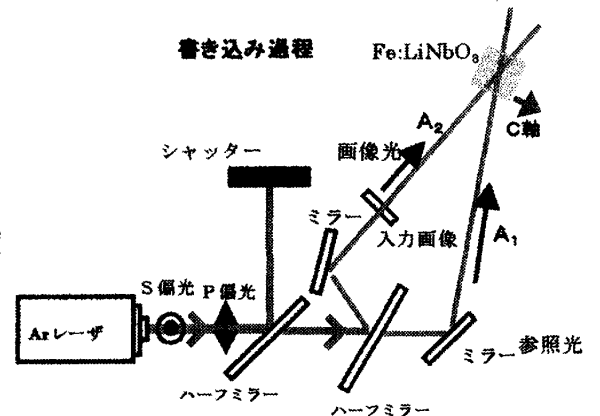


図 7(a) ホログラフィック記録の光学系

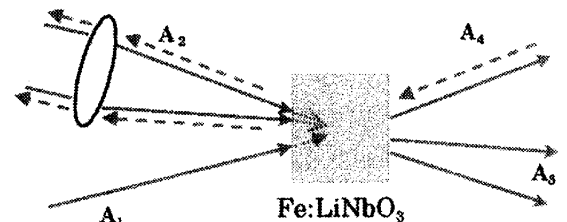


図 7(b) 画像光および再生光の縮小と拡大

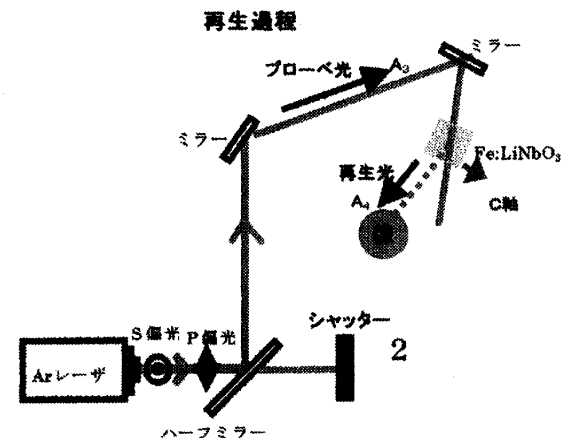


図 8 位相共役波光による画像再生の光学系

プローベ光となる。再生画像は、画像光および参照光を遮断し、プローベ光のみ結晶に照射することによって、入力画像の方向に出力される。入力画像のところにスクリーンを置き、投影された出力画像を顕微鏡のCCDモニターで観察する。結晶通過後新たにハーフミラーを置き、出力画像を取り出すことも可能である。通常の参照光による再生過程はこの光学系において、プローベ光および画像光を遮断し、参照光のみ結晶に照射することによって、結晶通過後、もとの画像光の方向に置かれたスクリーンに出力される。入力画像としては、スライドガラスにクロム蒸着されたU.S.A.Fテストパターンを使用した。

#### 4. 実験結果および検討

##### 4-1 屈折格子の記録

交差するレーザ光は入射前で $\theta_i = 12.25^\circ$ である。LiNbO<sub>3</sub>結晶の屈折率は $n = 2.29$ でありスネルの法則から結晶中の交差角 $\theta_t = 5.31^\circ$ となる。屈折格子は干渉縞によって生じその格子間隔 $\Lambda$ は $\Lambda = \lambda / (2 \sin \theta_t \cdot n)$ で与えられ、 $\lambda = 514 \text{ nm}$ とすると $\Lambda = 1.21 \mu\text{m}$ である。He-Neレーザの場合波長 $\lambda' = 633 \text{ nm}$ であり、Bragg回折角 $\theta_B = 15.2^\circ$ である。1次回折光のBragg角は $\theta_B$  (実験値)  $= 17.3^\circ$ と比較的良好一致を得た。屈折格子が記録されていることが確認できた。

入射光強度を $p$ および $s$ 偏光に対しそれぞれ $0.203$ および $0.023 \text{ mW}$ とすると、回折効率(=1次回折光強度/入射光強度)は、 $0.387\%$ および $0.0265\%$ である。

##### 4-2 ホログラム画像記録・再生における回折効率

図5の光学系で、画像を入力しない場合について、結晶に回折格子を記録し、位相共役波による回折効率を求めた。図9および図10に $p$ および $s$ 偏光の場合について、回折効率 $\eta$ と記録時間の結果を示した。 $p$ 偏光の場合、回折効率 $\eta$ は $0.01 \sim 0.04\%$ であり、 $s$ 偏光では $0.001 \sim 0.003\%$ であった。 $p$ 偏光の方が短時間で高い回折効率を得られることがわかる。通常ホログラム再生法である、参照光による再生時の場合と比較すると差はほとんどなかった。

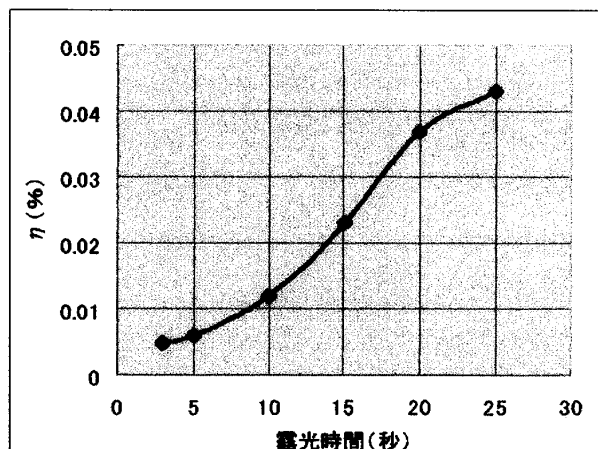


図9 再生光の回折効率 (P 偏光)

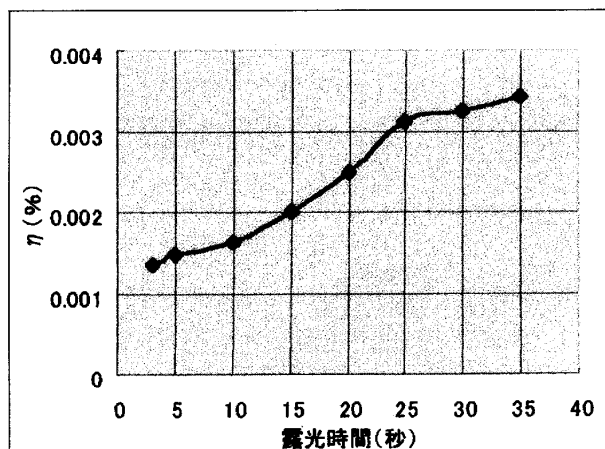


図10 再生光の回折効率 (S 偏光)

## 4-2 画像再生

図11に原画像のテストパターンの一部がレーザ光で照射された状態を示す。3.2 line-pair/mmの近辺が照射されている。光束径は約8mmである。図12にはP偏光による記録後の再生画像の結果を通常の参照光および位相共役波による再生画像を比較して示す。参照光による再生ではレンズや結晶による種々の回折によって画像の乱れが顕著である。しかし位相共役波の場合、画質は明らかに良く、図のように0.22mm巾のストライプが再現されていることがわかる。参照光の画質低下は、参照光の結晶通過後、結晶入射前の収束レンズと同等のレンズを用い、平行光束としてクリーンに投影しても改善されなかった。前焦点での高次回折パターンの除去が画質向上のため必要であると考えられる。

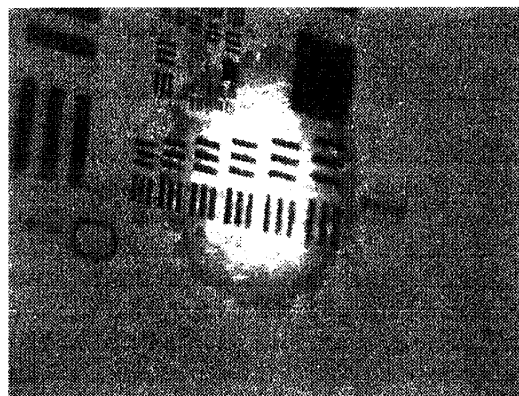


図11 現画像のテストパターン

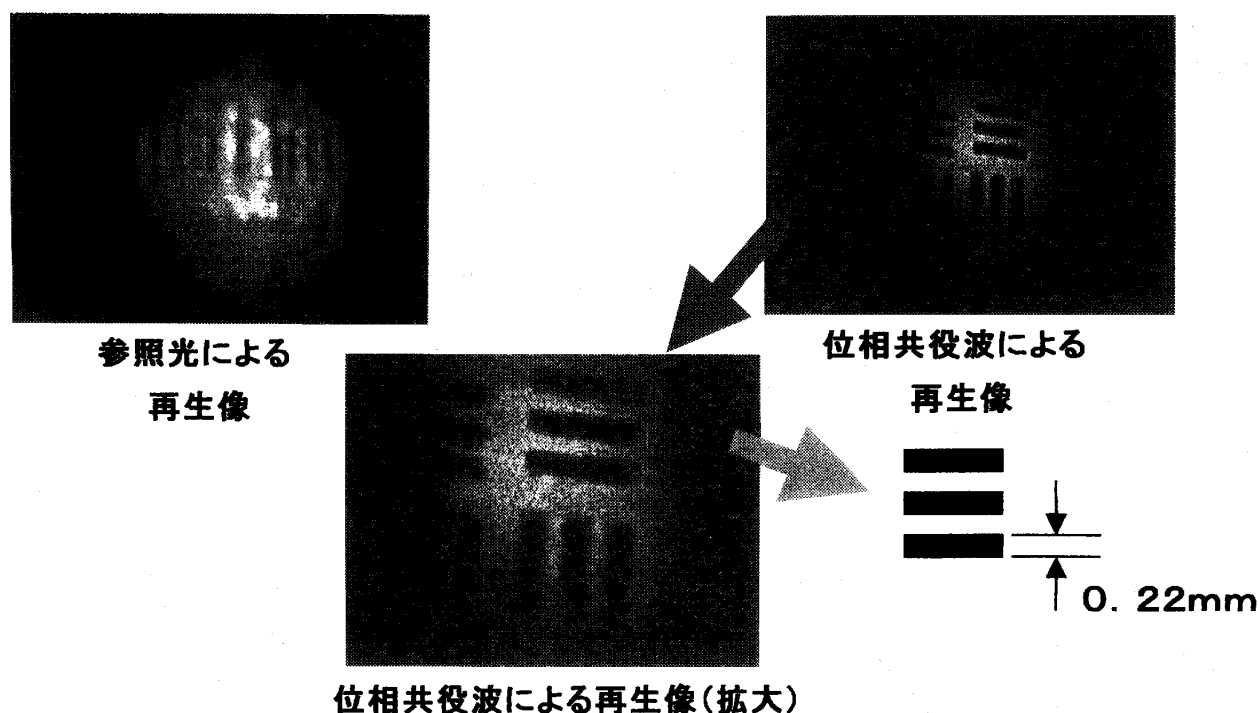


図12 P偏光による記録後の再生画像の結果

位相共役波による再生は、高次回折パターンの除去は必要ではなくより簡便なホログラム再生法であることが判明した。<sup>(7)</sup>

位相共役波の再生法では画像の歪みの原因は2で記述した記録後の屈折率変化の式から推定できる。すなわち、フォトリフラクティブ結晶では、屈折率変化 $\Delta n$ は、

$$\Delta n = n_1 e^{i\phi} A_1^* A_2 e^{-iK r} / (|A_1|^2 + |A_2|^2) + c. c.$$

分母の  $|A_1|^2$  が強度変化が顕著で、 $|A_2|^2$  に比べて大きいと記録されたホログラムと再生される位相共役波は  $A_1^*$  に比例しないので、再生時に歪みやノイズが入る。(6) 従って画像面内での  $|A_1|^2$  の強度変化が  $|A_1|^2 + |A_2|^2$  に比し大きいことが高忠実画像の再生に必要な条件である。

位相共役波による再生では、記録過程で、再生像に乱れを生ずることなく、画像光をレンズによって収束できるので、光強度は大きくとれる。フォトリフラクティブ効果は光強度に依存するので画像光が弱くても記録時間の短縮化が可能であるという利点が考えられる。

## 5. 結言

フォトリフラクティブ効果を持つ誘電体結晶  $\text{Fe} : \text{LiNbO}_3$  を用いたホログラムメモリの画像記録および位相共役波による再生を理論および実験によって検討を試みた。位相共役波による再生画像は原画像に対しより忠実であり、メモリの大容量化において重要な手段であると考えられる。すなわちデジタル化された画像の記録および再生において、ビットエラーの低減に寄与できるものである。また画像光の収束による記録時間の短縮化はシステムとしての実用化において必要であり、位相共役波による再生法はこれを可能とする。

1 T b i t 級メモリの実現のためには、多重化による記録密度の向上やデジタルシステムにおける画像入力システム等の検討が今後の課題として残されている。

## 参考文献

- (1) F. Mok, D. Psaltis and G. Burr, Proc. SPIE, 1773c, 1 (1992)
- (2) L. Hesselink, M. C. Bahaw, Optical and Quantum Electronics, 25s611 (1993)
- (3) D. Lande and F. Heanne, Optics Letters, 21, 1780 (1996)
- (4) F. Zhao and K. Sayano, Optics Letters, 21, 1295 (1996)
- (5) Amnon Yariv, "Optical Electronics in Modern Communications Fifth Edition", Oxford University Press, Inc. (1997)
- (6) Pochi Yeh, "Introduction to Photorefractive Nonlinear Optics", Maruzen & Wiley (1993)
- (7) 多田、内藤、平成 14 年度電気関係学会北陸支部連合大会講演予稿集 p321 (2002)

(平成 14 年 12 月 9 日受理)