

誘電体ホログラムの異波長光による再生像に関する研究

多 田 紘 二*・岡 本 武 志**

Reconstructing volume holograms with use of a dual wavelength method

Koji Tada and Takeshi Okamoto

The reconstruction of volume holograms at wavelengths different from that of hologram formation, especially with low energy of photon is studied. We used spherical waves to reconstruct holograms to study the fidelity of reconstructed images.

1. はじめに

近年、誘電体単結晶を利用したホログラムメモリの研究は高密度デジタルメモリとしての応用が注視され基礎および開発研究が盛んとなってきている。本研究では誘電体結晶として特に鉄ドーパされたニオブ酸リチウム結晶 ($\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$) に関し実用化における諸問題を明らかにし、将来の展開に寄与することを目的とする。本報告では、これまでの研究過程において、誘電体結晶のデジタルホログラムメモリ記録材料としての適合性の評価および経過とともに明らかとなったデータ再生時の記録データの劣化に対する対応策として、より記録感度の低い波長の光による再生法⁽¹⁾⁽²⁾の基礎検討を行ったのでこれらの結果についてまとめた。

2. 理論

2-1 単一波長の記録・再生

誘電体結晶において2つの可干渉性光波が交叉すると干渉縞による光強度の変動に対応して、フォトリフラクティブ効果といわれる、電荷密度分布—空間電場分布—屈折率分布（屈折格子）が生じる。電荷分布はニオブ酸リチウムの場合、微量に添加された鉄イオンの価数変化、 Fe^{2+} , Fe^{3+} が光励起によって生ずる結果である。特に、光強度が 100 W/cm^2 以下のいわゆる、低光強度では、鉄不純物の1準位モデルによって、充分説明できることが明らかとなっている。⁽³⁾これらの不純物準位は伝導帯から約 1.3 eV とされているが、光の波長や強度によって励起状態は変化する。ホログラム記録材料として用いる場合、一方の光束に例えば振幅透過率が変化する画像を挿入し、他方に同じ波長の参照光を用いると、振幅の異なった様々な屈折格子が残存することになる（記録過程）再生時には参照光のみを照射すれば屈折格子によって回折された光波は画像光を生成し、再生することができる。すなわち屈折格子によるブラッグ回折の1次回折光が再生画像光である。

図1にはホログラム記録・再生における、ブラッグ回折過程を示す。

誘電体単結晶中に図のような座標軸を考え、 $y-z$ 面を入射面とし、入射平面波（画像光）および入射平面

* 電気電子工学科 ** 電気工学専攻大学院生

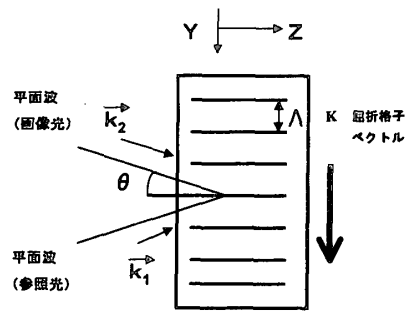


図1 平面波による屈折格子の形成

波（参照光）の波数ベクトルをそれぞれ k_1 、 k_2 とする。各ベクトルの z 軸となす角を θ とすると、干渉パターンによる光強度変化は、フォトリフラクティブ効果によって、空間電荷分布が生じ、電気光学効果によって、屈折格子が形成される。屈折格子の周期は $\Lambda = \lambda / (2n \sin \theta)$ 、ここで λ は入射平面波の波長である。、 n は誘電体の屈折率である。いま屈折格子ベクトルを K とすると、 $K = k_2 - k_1$ で与えられる。ホログラムにおいては、画像光は平面波ではあるが、位相、振幅は変調を受けており、波数ベクトル k_1 は大きさは一定 ($2\pi n/\lambda$) である。図2 (a) にはホログラムの記録・再生の2次元的光学系を示す。誘電体結晶は中心が $y-z$ 軸の原点にあり、誘電体結晶板は y が $-Y$ および Y とする。いま画像光は一旦レンズによって集光され、画像光源 S からの球面波とする。

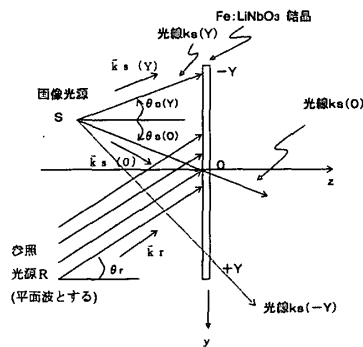


図2 (a) 画像光と参照平面波によるホログラムの形成

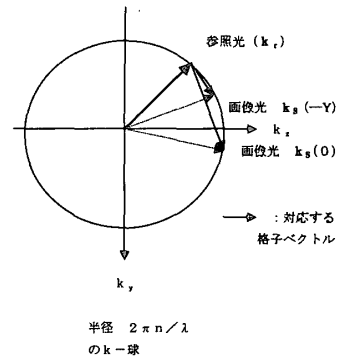


図2 (b) 波数ベクトル空間と屈折格子ベクトルの分布

画像光の波長はフォトリフラクティブ効果の顕著な λ (514 nm) とする。 S から $y = -Y$ および 0 に向かう光線の波数ベクトルをそれぞれ $k_s(-Y)$ および $k_s(0)$ 、またそれぞれの光線が z 軸となす角を $\theta_s(-Y)$ および $\theta_s(0)$ とする。記録時と同じ波長の平面波を参照光とし、その波数ベクトルおよび z 軸となす角を k_r および θ_r とする。すべての画像光線は画像光源 S からの球面波に含まれるので、上記の角度範囲を考えれば充分である。図2 (b) に示すように、結晶中に記録される屈折格子は、 $k_s(-Y)$ と $k_s(0)$ が参照光の波数ベクトル k_r とで形成される屈折格子ベクトル K の分布で与えられる。

ここでそれぞれの画像光の波数ベクトルは、 $k_s - k_r = K$ の関係を満たす。

このように記録された場合、ホログラムに参照光のみを照射すると、図 2 (b) のようにすべての屈折格子ベクトルに対応する回折光が生じ、特にブラッグ一次回折光は画像光を忠実に再現する。

2-2 異波長光によるホログラムの再生

図 3 (a) には波長の異なった場合の記録・再生の配置図を示す。記録時の波長を λ 、再生時の波長を λ' とする。点線で示す画像光および参照光の波数ベクトルを \mathbf{k}_s および \mathbf{k}_r とすると、 $\mathbf{k}_r = \mathbf{k}_s = 2\pi\mathbf{n}/\lambda$ である。屈折格子ベクトル \mathbf{K} をとすると、 $\mathbf{K} = \mathbf{k}_s - \mathbf{k}_r$ である。いま異なった波長 λ' で再生する場合参照光を図のように波数ベクトル \mathbf{k}_r' をもつ平面波を照射する。この入射角 θ_r' は、屈折格子ベクトル \mathbf{K} によって回折されるためには、 $\theta_r' = (\theta_r + \theta_s)/2 + \sin^{-1}\{\lambda \cdot \lambda'^{-1} \sin(\theta_r - \theta_s)/2\}$ である。(図 3 (b)) したがって、画像光が単一の平面波であれば、上記の条件を満たす入射平面波であれば、回折され、出射光は波数ベクトル \mathbf{k}_s' をもつ。図 3 (b) には、 \mathbf{k} 空間の関係を示す。

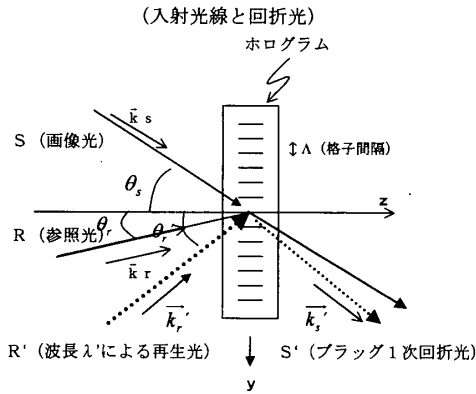


図 3 (a) 波長 λ および λ' のブラッグ回折

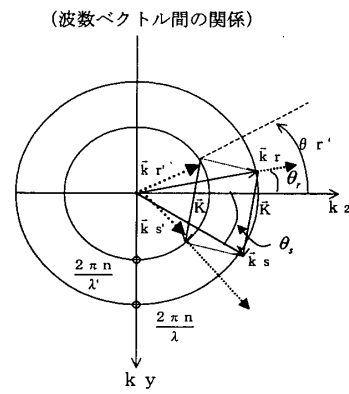


図 3 (b) 波長 λ および λ' のブラッグ回折 (\mathbf{k} 空間)

異波長光による参照光の波長が λ' の場合、各格子ベクトルとブラッグ回折条件を満たすためには、平面波ではなく、波数ベクトルの広がりに対応する球面波を用いる必要がある。図 4 (a) のように点光源 R' から放射される球面波の広がり角 $\rho_r' = \theta_r'(-Y) - \theta_r'(0)$ とする。ここで $\theta_r'(-Y)$ および $\theta_r'(0)$ はそれぞれのブラッグ回折条件から決まる球面波の光線である。従って、波長が異なる光で再生する場合は球面波によってはじめて可能であるといえる。幾何学的な関係から、 $\theta_r'(-Y)$ および $\theta_r'(0)$ に対して、次式が成立する。

$$\theta_r'(-Y) = \{(\theta_r + \theta_s(-Y))/2\} + \sin^{-1}((K/K') \sin\{\theta_r - \theta_s(-Y)\}/2)$$

$$\theta_r'(0) = \{(\theta_r + \theta_s(0))/2\} + \sin^{-1}((K/K') \sin\{\theta_r - \theta_s(0)\}/2)$$

ここで、 $K' = 2\pi n/\lambda'$ である。入射球面波の広がり角度 ρ_r' は $\theta_r'(-Y) - \theta_r'(0)$ で与えられる。図 4 (b) は \mathbf{k} 空間での関係を示す。

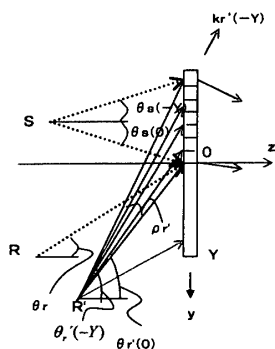


図4 (a) 異なった波長の球面波による像再生

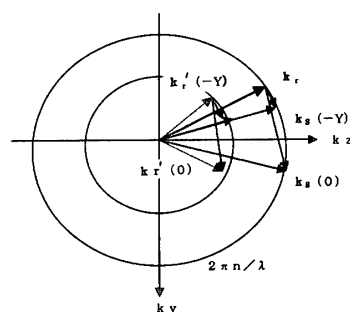
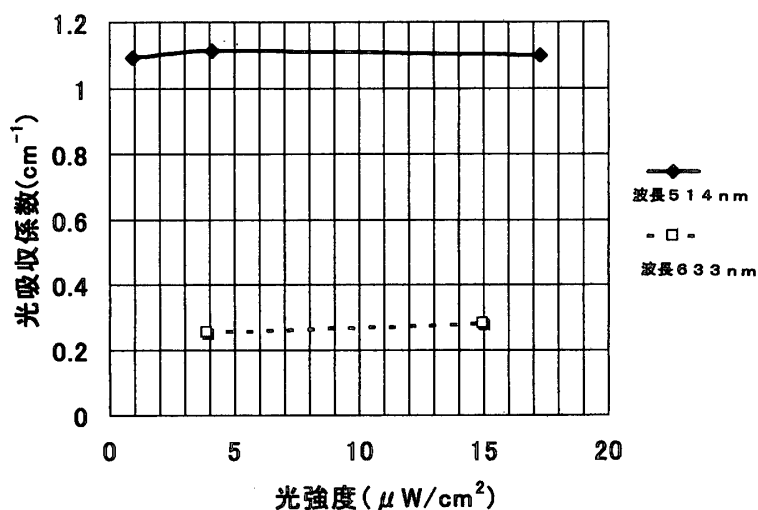


図4 (b) k空間における異波長光によるブラッグ回折

3. 実験方法・結果

3-1 光吸収係数

フォトリフラクティブ効果の波長依存性を測定するため鉄不純物が添加された LiNbO_3 単結晶の波長 514 nm (Ar レーザ) および 633 nm (He-Ne レーザ) の光吸収係数を測定した。結晶サイズは $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ 、入射面は結晶の b 面であった。図 5 にその結果を示す。光強度が $5 \sim 15 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ では吸収係数は一定であり、Ar レーザに対し 1.1 cm^{-1} 、He-Ne レーザに対しては 0.3 cm^{-1} と約 $1/3$ である。フォトリフラクティブ効果においても感度の差は大きく再生時の像消失は少ないことが期待できる。結晶は鉄が 0.1 w% 添加された等濃度組成 (congruent composition) LiNbO_3 単結晶である。


 図5 Fe:LiNbO₃結晶 (10mm厚) の各波長の光吸収係数

3-2 ホログラム記録および再生

図 6 (a) に、ホログラムの記録のための光学系を示す。ホログラム記録・再生実験では、b 面が $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 、一辺が c 軸にとってある。b 方向の厚さは 2 mm である。使用した光源はアルゴンレーザー (波長 514 nm、最大出力 50 mW) およびヘリウムネオンレーザー (波長 633 nm、最大出力 20 mW) である。偏光方向は c-b 面に平行な p 偏光とした。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 テストパターンを用いた。図 6 (b) には波長 633 nm の光線による再生系

を示す。波長 514 nm では、平面波近似として並行光束（直径約 8 mm ）を、波長 633 nm の場合はレンズで光束を収束させて球面波に近い光束として

（結晶部で直径約 10 mm ）用いた。図 6（b）中、点線で示す光線は波長 514 nm の記録光、実線で示したのは波長 633 nm の再生光である。ホログラム記録においては、波長 514 nm のレーザー光強度は画像光が結晶入射直前で約 $1\text{ mW}/\text{cm}^2$ ，参照光は約 $11\text{ mW}/\text{cm}^2$ であった。露光時間は約 5 分 とした。

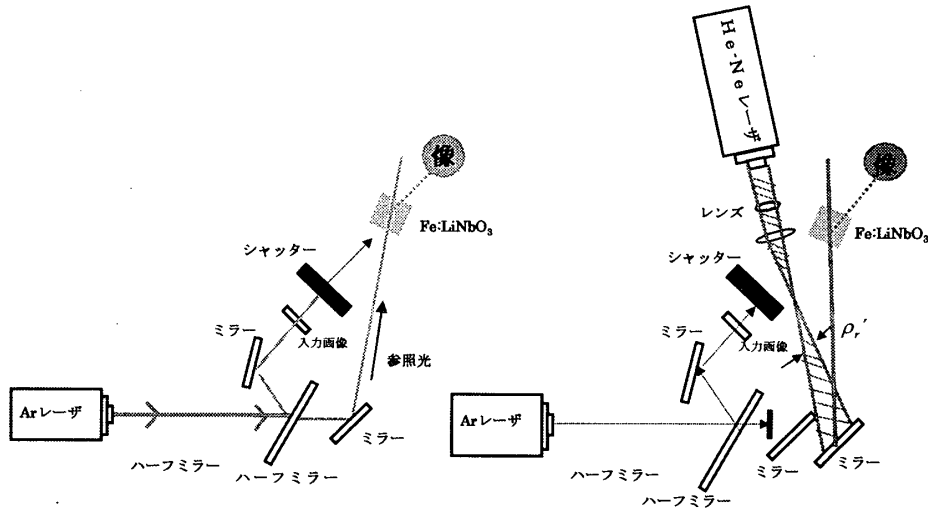


図 6（a） 再生光学系（Ar レーザによる記録・再生）

図 6（b） 再生光学系（He-Ne レーザによる再生）

図 7 にはテストパターンを入力画像とし、特にパターンの線巾が 0.5 mm の近辺を中心に投影した結果を示す。図には原画像、Ar レーザによる再生像および球面波を用いた He-Ne レーザによる再生像の結果を示す。He-Ne レーザの場合でも、やや暗い画像であるが、 0.5 mm 程度のパターンの識別が可能であることがわかる。

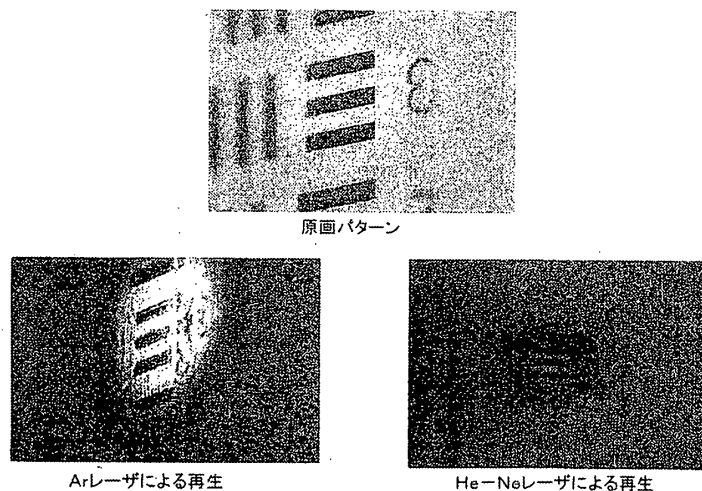


図 7 原画パターンと各レーザによる再生画像

4. 検討

ホログラムの再生法として、記録時とは異なった波長、特にフォトリフラクティブ効果が生じにくい波長を使用することにより、記録データの保存性を向上させることが可能である。ただし、異なった波長の場合、ブラッグ回折条件を満足することが必要であり、再生時の入射光として、球面波を用いることを検討した。 k 空間では波長が異なった場合、それぞれの球半径が $R = 2\pi n / \lambda$ 、 $R' = 2\pi n / \lambda'$ であり、図8のように球の交差線上の一点を始点とし、交差線上に終点をもつ K ベクトル（格子ベクトル）に対しすべてブラッグ条件を満足する。ここで太線で示す k_r は波長 λ の参照光、点線で示す k_r' は波長 λ' の再生光である。しかし、記録された格子ベクトルは半径 R の球面上に終点をもち、半径 R' の球面との交差線上に終点をもつ、太い実線で示すベクトルは波長 λ' の光に対してもブラッグ条件をみたす。しかし角度 $\Delta\theta_{so}$ だけずれたベクトル（図中一点鎖線）は波長 λ' の光に対してはブラッグ条件に不整合となる。この場合ブラッグ不整合分が Δk （ z 成分 Δk_z ）とすると、不整合ベクトルをもつ光が回折されるとき、回折光強度 I_{diff} は $I_{diff} \sim \text{sinc}^2((L/2\pi)\Delta k_z)$ で表される。⁽²⁾

ここで、 L は結晶の z 方向の厚さである。 I_{diff} の関数形から中心波数帯域の部分のみが回折されるとすると、 Δk_z の許容最大値は $2\pi/L$ となり、また λ 、 λ' は結晶厚 L に比べて充分小であるので、ブラッグ回折角からのずれの許容角 $\Delta\theta_{so}$ は次式で与えられる。⁽²⁾

$$\sin(\Delta\theta_{so}) = \lambda \cos\theta_s' / \{L \sin(\theta_r' - \theta_r)\}$$

$\Delta\theta_{so}$ は記録画像の波数ベクトル成分が、再生時にブラッグ条件の不整合によってぼやけることになるが、その広がりやどの程度になるかの目安を与えるものである。結晶厚 L は小さいほど記録画像の再生時におけるぼやけ方が減少することがわかる。すなわち、ホログラムの多重記録における有効帯域巾が向上する。しかし、結晶の厚さの低減は、回折光強度の低減に関連し、最適化が必要であることがわかる。

次に異波長光による再生像の忠実度に関し考察する。 k 空間において参照光 k_r に対し、干渉する画像光は広がりをもち、分布しており形成される屈折格子ベクトルに対し、再生光 k_r' も分布をもっていれば、再生像の忠実度は向上するものと考えられる。図9には $y-z$ 2次元面での k_r' を求めるための作図を示す。 k_r を点 O を始点、 O' を終点とするベクトルであるとする。 O' は半径 R の円上にある。 O' を中心とする半径 R' の円周上の各点に点 S_1, S_2, \dots を始点とし、 O' を終点とする波数ベクトル k_r' の光線によって対応する屈折格子ベクトルとブラッグ回折する再生像が得られる。

このような再生光は例えば2次元内で限定すれば、点 O' に向かって収束する光線によって得られる。円 O' の円周上に始点をもった多くの k_r' ベクトルによって再生像の忠実度は向上するが、具体的な光学系の実現に関しては今後の検討課題である。

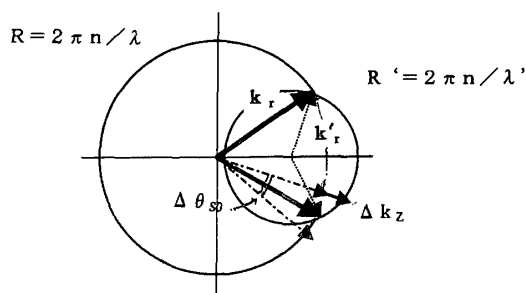
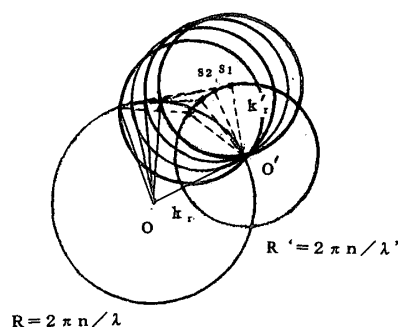

 図8 k 空間におけるブラッグ回折および不整合回折


図9 多点光源による再生像の高忠実度化の試み

5. 結言

Fe:LiNbO₃単結晶のフォトリフラクティブ効果を用いたホログラム記録の記録時とは異なった波長光による再生について検討した。特に、再生時の光照射によって生じる記録データの劣化を防止するため、フォトリフラクティブ効果の感度が小なる波長の再生光を使用し、再生像の忠実度に関し、実験・理論を通して検討をおこなった。記録画像の多重化における許容される多重度は結晶の寸法や、記録再生時の波長やおよび幾何光学的条件によって影響をうけるが、その最適化は今後の課題である。

参考文献 (1) H. C. Kulich, APPLIED OPTICS, 30, 2850 (1991)

(2) E. Chuang and D. Psaltis APPLIED OPTICS, 36, 8445 (1997)

(3) Pochi Yeh, "Introduction to Photorefractive Nolinear Optics", Mruzen&Wiley (1993)

(平成16年12月7日受理)