

フォトリフラクティブ結晶を用いるホログラム記録

東京理科大学応用物理学元教授
理化学研究所光量子制御技術開発チーム研究嘱託
石井行弘 ISHII, Yukihiro

光技術コンタクト誌 59 巻 2 号誌(2021)にホログラムメモリーの特集記事がありました。その記事で、ホログラム記録は高感度で安定なフォトポリマーが用いられている。本焦点欄を利用して、メモリーに応用できるフォトリフラクティブ (PR) 結晶であるニオブ酸リチウム (LN) を用いるホログラム記録再生過程を紹介したいと思います。実験データの出典を示す論文は、Y. Komori and Y. Ishii: Proc. SPIE 7781, 1-7, 2010 である。

PR 効果は、不純物に起因する深いトラップ準位を有する電気光学結晶にレーザー光を照射しイオン化され生成された自由電子が、拡散、外部電界、光起電力効果により移動したのち、不純物アクセプター準位にトラップされ再結合する。その結果、ホログラム干渉縞強度分布に対応した電子濃度の正弦波状の分布が生ずる。この電子濃度分布により生ずる電界に比例した屈折率分布が現われ、位相型ホログラムとして記録される。厚い LN 結晶により体積型の記録が可能となり、鋭い角度、波長選択性を示し多くのページ (画像) が記録される。

図 1 は、ホログラム記録に用いた Fe, Mn をドープした LN 結晶 ($\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Mn}$) のエネルギーバンド図である。青の 405 nm のレーザー光に吸収される深い準位の Mn と緑の 532 nm のレーザー光に吸収される浅い準位の Fe の不純物をもつ LN 結晶で、2 色書き込み法による不揮発性のホログラム記録ができる結晶である。この 2 種類の深さの異なる準位を使用して、2 色レーザー光による沢山の画像の角度多重ホログラム記録を行い、再生光としてこれらの 2 色レーザー光を用い、角度多重されたホログラムからのクロストークのない再生像を示す。この場合、不揮発性の特性はない。

図 1 の 2 種類の不純物準位の吸収波長で光励起された電子は、電子密度の高い干渉縞の明るい部分から両側にある電子密度の低い暗の部分へ拡散現象として流れる。明部に正電荷、暗部に負電荷が生じそれによる空間電界による電流と拡散電流が互いに反対方向に流れ、電子の移動が止み定常状態となる。縞の明部と暗部の中間部で電気電界が最大となり、電界に比例した屈折率格子が形成される。よって屈折率格子は露光干渉縞と 90° の位相ずれが生じている。屈折率格子の格子間隔は、干渉縞の暗部に流れ込む電子をトラップするアクセプター密度の三乗根で与えられ $0.1\sim 1\mu\text{m}$ となり、最大の干渉縞空間周波数を要求する体積型ホログラムの記録が可能となる。

信号光と参照光を PR 結晶に同時照射する 2 光波混合の実験を行い、結晶の上部から見ていると、数分の記録時定数で、信号光の回折光強度が参照光の

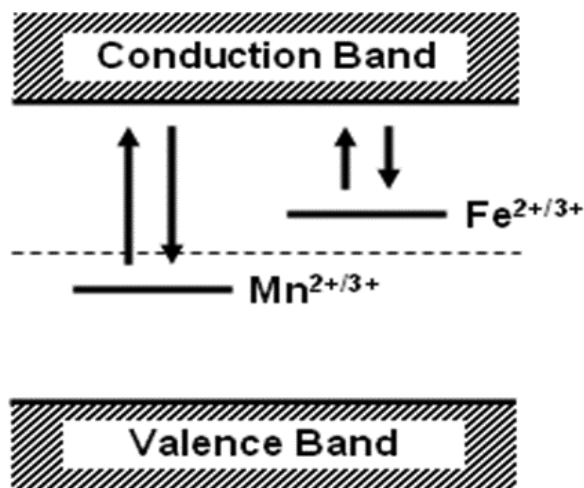


図 1 LN 結晶のエネルギーバンド図

エネルギーを受け取り強くなることが見て取れる。この現象は、2 光束干渉縞から 90° の位相がずれた屈折率格子の格子ベクトル方向に屈折率勾配が生じており、勾配の大きい方向に参照光から光が移動し信号光のエネルギーが増幅される。この 2 光波混合の増幅特性は、トンネル壁面の打音検査の代わりに 2 光波混合を用いるレーザー超音波計測法に用いられており、超音波周波数に応答し屈折率格子を高速に書き換えられる強誘電性液晶(T. Sasaki and Y. Naka, Opt. Rev., 21, 99-109, 2014)が PR 結晶として利用されている。

拡散以外に電子は外部電界と光起電力効果により移動する。LN 結晶は、外部電界を用いずドリフト電界は生じないので、光起電力効果による電流を考える必要がある。LN 結晶は、結晶構造から反像対称性を有さない結晶であり、3 階の光起電力係数テンソル β_{ijk} があり光起電力効果による電流が生ずる。 i 方向の電流密度 $(J_{ph})_i$ は $(J_{ph})_i = \beta_{ijk} E_j E_k^*$ と書ける。 $E_j E_k^*$ は偏光が同一方向なら光強度を表し、結晶中の電流は干渉縞強度分布に比例することになる。ここで、 E_k^* は光電界の複素共役を表す。電流密度 $(J_{ph})_i$ は、光電界の方向である偏光に依存して i 方向 (結晶の c 軸方向にとる) に流れる。電流は結晶の伝導率を介して電気電界に変換され、ポッケルス効果により屈折率分布が生ずる。LN 結晶の c 軸方向と格子ベクトルが平行な場合、屈折率変化量はホログラム干渉縞の可視度に比例することから、物体光と参照光の交差角に依存せず高い可視度が得られる s 偏光でのホログラム記録が勧められる。しかし、実験では p 偏光で記録し、 p 偏光で再生したほうが高い回折効率が得られている。偏光に依存して発現する光起電力効果を考慮する必要がある。

外部電界によるドリフト電流と光起電力効果による電流は、 c 軸方向に沿って一方向に流れるので、屈折率格子の位相ずれは生じない。たとえば $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO) 結晶は、ドリフト電流の効果が支配的で、2 光波混合の増幅率を増加させたい場合、拡散電流の振る舞いを模すため、交流電圧 (5 KV, 33Hz) を BTO 結晶に印加し電子を高速に干渉縞最大位置から両側に動かし、2 光波混合の信号光の増幅作用を実現する。(A. Kamshilin et al., JOSA B. 14, 2331-2338, 1997; R. Onodera et al., Opt. Rev., 5, 105-108, 1998)

図 2 は、青色レーザーダイオードとグリーンレーザーによる 2 種類のホログラムの記録・再生光学系を示す。単一波長の記録に比べ 2 倍の記録容量となる。2 種類の露光スケジュールに従い記録を行う。青のレーザーの露光スケジュールに従い、物体の表示装置の SLM に漢字「祇」を表示し参照光となす角度 30° の配置で記録する。次に緑のレーザーの露光スケジュールに従い、緑のレーザーを用い次の物体「園」を記録する。

その後、ホログラムを 0.8° 回転して、この露光スケジュールを繰り返す。角度 11.2° で 15 回繰り返したのち露光スケジュールは終了した。図 3 は、0.8° ずつホログラムを回転し青と緑のレーザー光を用い再生したおのおの 15 枚の再生像で、2 色合計で 30 枚である。青と緑の露光ス

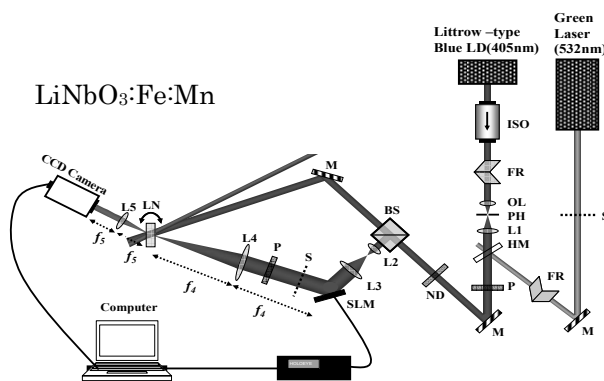


図 2 LN 結晶を用いる 2 色ホログラム記録・再生光学系

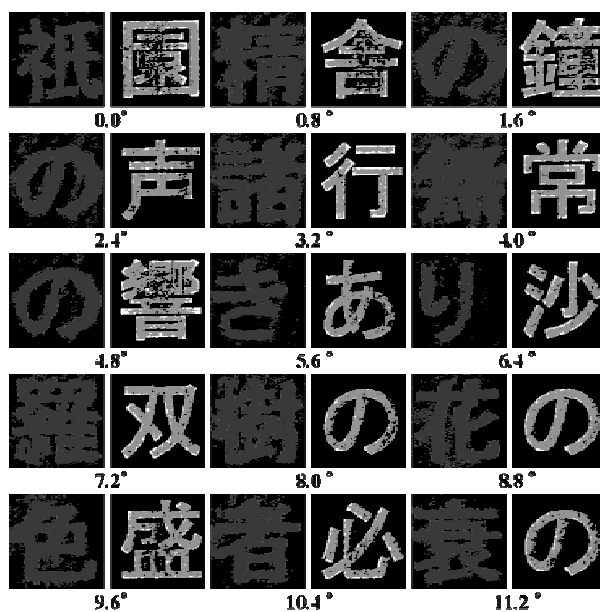


図 3 角度多重 2 色ホログラムの再生像

ケジュールは、各々の回折効率が等しくなるようになっている。青のレーザーの露光スケジュールの等しい平均回折効率は 0.53% で、緑のレーザーのそれは 0.13% である。浅い準位である Fe 準位にトラップしていた電子が深い準位の Mn 準位にトラップされているので、緑のレーザーに対する感度が減少し回折効率が低くなっている。

これら多重の物体のホログラム記録は、メモリーと同様に 3 次元像再生技術に用いられている。PR ポリマーは、固体の結晶に比べ可撓性に優れ大画面の PR ポリマーが製作でき、高速に書き換えができる特性を持ち 3 次元アニメーション像の展示に利用されている。(P. Blanche et al., Nature **468**, 80-83, 2010)