

今回はフォトリフラクティブ (photorefractive: PR) 効果の発現のメカニズムとおもな材料の特徴について紹介しました。今回は、フォトリフラクティブ効果を利用したいくつかの応用例について紹介したいと思います。

1. 光増幅 (二光波混合ゲイン)

2本のコヒーレントなビームをPR結晶内で交差するように入射させると、干渉縞に沿って屈折率格子が形成されます。このとき干渉縞と屈折率格子は空間的に同位相ではなく、屈折率格子は干渉縞とある位相差 ϕ をもって形成されます。これはガウスの法則 $\nabla \cdot E = \rho / \epsilon$ からわかるとおり、電荷分布と空間電場の間には空間的な位相差 $\pi/2$ がつくことに起因しています。この空間位相差 ϕ により、一方のビームからもう一方のビームへとエネルギーが移動するという現象がおきます。この現象は、図1のように屈折率格子によって回折された回折光と結晶をそのまま透過してくる透過光の干渉の結果として理解することができます。すなわち、一方では、透過光と回折光が互いに強めあうように干渉し、他方では打ち消しあうように干渉しているため、一方では光が増幅し、他方では光が減衰したように観測されます。またどちらのビームが増幅されるかは、空間位相差 ϕ の符号により決まり、 $\phi = 0, \pi$ のとき (すなわち同位相、または逆位相のとき) には、エネルギーの移動は起きません。ちなみにこの ϕ の符号はキャリアの種類 (電子またはホール) と電気光学定数の符号により決まります。

このような二光波混合による光増幅の特性を生か

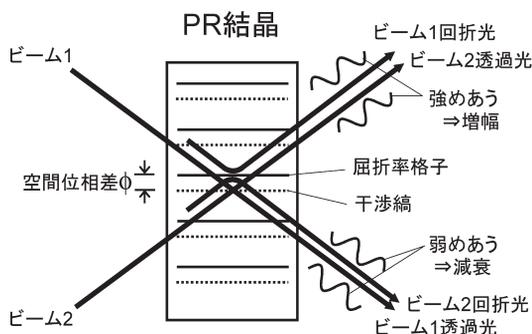


図1 フォトリフラクティブ二光波混合。

して、画像のエッジ抽出¹⁾や、画像の中で変化した部分のみを取り出すノベルティフィルター²⁾などの画像処理も可能となります。

2. 微小振動計測

PR効果を用いると、ナノメートルオーダーの微小な振動を非接触で測定することができます。その測定原理を図2に示します。まず振動面からの反射光と参照光をPR材料内で干渉させます。これにより振動面の振動は干渉縞の振動としてPR材料に伝わります。PR効果によって屈折率格子が形成されるまでにはある一定の時間がかかるため、たとえば振動物体の振動周波数がPR効果の応答速度よりも速い場合、屈折率格子の形成が追いつかず、PR材料は振動の時間平均を感じて定常的な屈折率格子を形成します。すると屈折率格子と干渉縞との空間位相差が振動とともに変化することになり、前述の二光波混合の原理によってその振動は透過光の光強度の変化として検出することができます。

この手法の大きな特徴は、振動面が鏡面である必要がなく、粗面でも計測可能であるという点です。通常このような干渉計測では検出器上でフリンジのない状態 (ヌルフリンジ) にしなければならないため、信号光と参照光の波面が同じである必要がありますが、PR効果を利用した干渉計はホログラフィックな干渉計であり、参照光からの回折光は常に信号光と同じ波面をもっているため、任意の信号光波面において自動的にヌルフリンジの状態となっています。

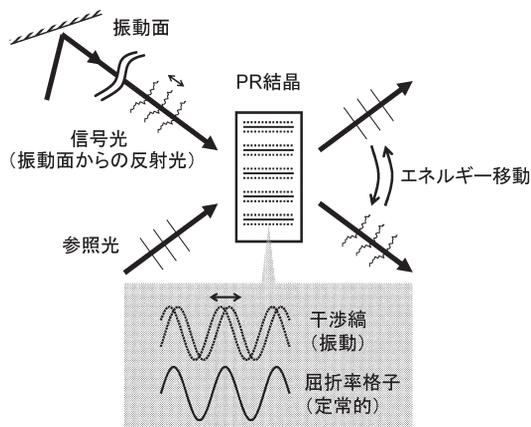


図2 PR効果を利用した振動測定の原理。

また、振動周波数の原理的測定限界が、高周波数側ではなく低周波数側にあるというのも大きな特徴のひとつです。これは、PR 効果の応答速度よりも遅い周波数の振動は屈折率格子の形成（書き換え）が追従し、空間位相差 ϕ が変化しないためです。このハイパスフィルターの特性を利用すれば、測定上のノイズとなる大気の揺らぎなど比較的低い周波数成分の振動をカットし、高周波数の信号だけを検出することができます。

3. 自己励起型位相共役波発生³⁾

位相共役波とは、波面が同じで進行方向が逆の波を指します。例えばある点から広がっていく球面波の位相共役波とはその点に絞られていく球面波を指します。この位相共役波は、位相物体を通ることによって乱れてしまった波面を元に戻す位相補正作用があることで知られています。この位相共役波の発生には通常四光波混合が用いられますが、BaTiO₃ など二光波混合ゲインの大きな PR 結晶を用いると、1本のビームを入射させるだけで、特に外部からポンプ光を入射しなくても位相共役波を自動的に発生させることができます。これを自己励起型位相共役鏡とよびます。図3は BaTiO₃ 結晶における自己励起型位相共役波発生の様子です。写真の下側からビームが入射し、結晶内でビームが曲がっているように観測されますが、これは散乱光と入射光によって作られた回折格子によって入射光が回折しているためです。この回折光は結晶端で2回反射して四光波混合における後進ポンプ光として再び回折格子に入射し、位相共役波が発生すると考えられています。

4. ホログラフィックメモリー

PR 効果では屈折率変化の起源は PR 中心の電荷分布であるため、光照射を止めたあとも電荷の分布がある限り誘起された屈折率格子は保持されます。そのため PR 結晶をホログラフィックメモリーの記録媒体として用いることができ、しかも記録したホログラムは何度でも書き換えることができます。これは PR 効果の発現のプロセスが「PR 中心の光イオン化」という可逆的な過程により起こっていることに由来しており、現在ホログラム記録媒体として

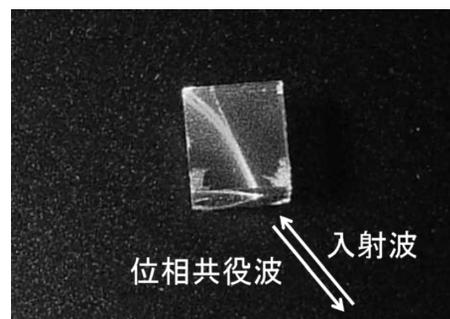


図3 自己励起型位相共役波発生 (BaTiO₃)。

最も有望視されているフォトポリマーが光重合という非可逆過程によって屈折率変化が起こっていることは対照的です。ところが、PR 結晶では書き換えが可能であることに起因して、ホログラム再生時に過去に記録したホログラムが徐々に消えていく「再生劣化」という問題があります。そのためなんらかの方法（熱定着⁴⁾や2色書き込み法⁵⁾などによりホログラムを消えないように定着させる必要があります。

前回と今回の2回にわたり、PR 効果の材料とその応用についてご紹介しました。ここでは最も典型的な応用例をご紹介しましたが、近年では、生体計測や“optical nose”とよばれるガスセンサー (<http://dza.colorado.edu/~AOPy/>) など興味深い応用も提案されています。

(東大生研 藤村隆史)

文 献

- 1) J. Feinberg: "Real-time edge enhancement using the photorefractive effect," *Opt. Lett.*, **5** (1980) 330-332.
- 2) J. E. Ford, Y. Fainman and S. H. Lee: "Time-integrating interferometry using photorefractive fanout," *Opt. Lett.*, **13** (1988) 856-858.
- 3) J. Feinberg: "Self-pumped, continuous-wave phase conjugator using internal reflection," *Opt. Lett.*, **7** (1982) 486-488.
- 4) J. J. Amodei and D. L. Staebler: "Holographic pattern fixing in electro-optic crystals," *Appl. Phys. Lett.*, **18** (1971) 540-542.
- 5) K. Buse, A. Adibi and D. Psaltis: "Non-volatile holographic storage in doubly doped lithium niobate crystals," *Nature*, **393** (1998) 665-668.