

7-6 強誘電強弾性現象とその応用

日立中研 熊田明生

最近、室温を含む広い温度範囲で、強誘電強弾性効果をもつ新結晶 $Gd_2(MoO_4)_3$ が発見され、オプトエレクトロニクスを始め広い分野における新機能素子として、応用が期待されている。強誘電強弾性効果とは、強誘電性と強弾性が完全に結合した効果である。強誘電性と強弾性は相津理論により、厳密に定義されているが、機能素子としての応用を考える立場では、現象論的に次のように理解するとよい。^{*}

強誘電体では

(A) すべての奇数階極性テンソルの性質を電場により変向させることができる。

強弾性体では

(B) すべての偶数階極性テンソルの性質を応力により変向させることができる。

強誘電強弾性体では

(C) すべての極性テンソルの性質を電場によっても応力によっても変向させることができる。

ここで、主な極性テンソルの性質には、次のようなものがある。

1階 自発分極 誘電係数

2階 自発歪み 誘電率 屈折率 複屈折 電気伝導率 熱伝導率 膨張係数

3階 圧電率 一次電気光学係数 光ホニ高調波係数

4階 弾性率 電歪係数 光弾性係数 二次電気光学係数

強誘電強弾性結晶 $Gd_2(MoO_4)_3$ においては、電場または応力により、これらのテンソルの性質がすべて変向する。それゆえ新機能素子として広い応用が期待される。オプトエレクトロニクスへの応用に先立つて、結晶の光学的性質をのべておこう。

$Gd_2(MoO_4)_3$ は、無色透明、密度 4.69 g/cm^3 、融点 1170°C 、非永溶性で酸アルカリにも強い結晶で、 160°C に、キュリー点を有し、高温側では光学的に一軸性で、圧電効果はあるが強誘電性も強弾性ももたない。キュリー温度以下では、強誘電強弾性を持ち、光学的に二軸正号である。屈折率は $n_x = n_y = 1.848$, $n_z = 1.901$ 。複屈折の異方性は大きく、 $\Delta n_x = \Delta n_y = 5 \times 10^{-2}$, $\Delta n_z = 4 \times 10^{-4}$ である。

光軸角は $2V = 10^\circ$ 光軸面は ab 面であるが、電場または応力により、状態が遷移すると結晶の a 軸と b 軸はたがひに入れ替り、光軸面は c 軸に対して 90° 回転する。このとき複屈折 Δn_x は符号をかえる。そこで、 $Gd_2(MoO_4)_3$ の複屈折は $\pm \Delta n_x$ とおいた方がよい。さて、オプトエレクトロニクスへの応用として光シヤッターと色相変調素子を例にとつて考察しよう。

強誘電強弾性効果を用いた光シヤッター

偏光板などを通過して、振動面が一方向だけとなった直線偏光が複屈折結晶に入射すると、結晶内部を進む距離 l に比例して位相差 R を生じ $R = \Delta n \cdot l$ となる。このため、二枚の直交した偏光板の間に複屈折結晶を入れると、複屈折の干渉効果が生じ、透過光の強度 I は

^{*} K. Aizu: J. Phys. Soc. Japan 27 (to be published); 応用物理 38巻 (出版予定)

$I = I_0 \sin^2 R/\lambda_0 \pi$ λ_0 : 波長 η : 正整数 I_0 : 入射光の強度に比例し、結晶と偏光面の関係で決まる。
で表わされ、 $R/\lambda_0 = (2\eta+1)/2$ のときは明るく、 $R/\lambda_0 = \eta$ のときは暗くなる。白色光は可視光の全波長を含まれ、その中心波長 $525 \text{ m}\mu$ を λ_0 とすると、 $R/\lambda_0 = 1/2$ のとき透過光は白色に近く、 $R/\lambda_0 = 3/2 \sim 5/2$ の範囲では、あざやかに色づいて見える。

$\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ 単結晶平板を $R/\lambda_0 = 1/4$ となる厚さ 0.322 mm にみかけ、電極を付けると電圧で位相差 R の符号を変えうる $\pm 1/4$ 波長板板となる。これと、別の $1/4$ 波長板を重ねると、結晶に印加する電圧の符号に応じて $R/\lambda_0 = 0$ or $1/2$ となり、明暗が制御される。制御電圧は約 100 V 、スイッチング時間は結晶の大きさに比例し、たとえば $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ の大きさでは、 1 msec 程度である。それより短い時間巾のパルスでは、結晶内の分域壁と呼ばれる境界面が結晶の中間で停止してしまい、一方側は明るく、他方側は暗くなる。このことを利用すれば、透過光量を分域壁の移動する距離に応じて制御し得る光量自動しぼり素子が得られる。

強誘電弾性効果を用いた色相変調素子

複屈折結晶の厚さをもつと厚くして $R/\lambda_0 = 3/2 \sim 5/2$ とするとあざやかに色づく、二枚の $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ 結晶板と、固定の複屈折体の板とを重ねると、合成の R は

$R = R_0 \pm R_{GI} \pm R_{GII}$ R_0 : 複屈折体の位相差 R_{GI}, R_{GII} : それぞれ $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ 板 I および II の位相差。
 $R_1 = R_0 + R_{GI} + R_{GII} = 1313 \text{ m}\mu$ (緑), $R_2 = R_0 + R_{GI} - R_{GII} = 1138 \text{ m}\mu$ (黄), $R_3 = R_0 - R_{GI} - R_{GII} = 975 \text{ m}\mu$ (赤) になるように、 195μ と 210μ 厚さの $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ 結晶板二枚と、 133μ の水晶板を重ね合わせ、偏光板をサンドウィッチすると、複屈折による緑、黄、赤の干渉色が電圧によって $1/1000$ 秒の速さで変わる三原色色フィルターができる。色は二枚の結晶に印加するパルスの符号の組合せにより選択され、二枚の結晶では、四色中の三色を用いたが、 η 枚を用いて 2^η 色の色相変調素子が作れるはずである。色相変調素子は、カラー映像装置、カラーテレビ撮像素子等に用いられるであろう。

このような用途において、強誘電弾性素子はメモリ機能をもち、パルス信号で駆動できることが一つの大きな特長である。たとえば、 $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ 結晶板の表面に帯状透明電極をマトリックス配置し、多数の光シャッター素子群を独立任意に開閉させ得る光学素子として、光計算機における情報書き込み系、図および数値表示系に於けるオンラインでの使用が期待されている。さらに、多分域状態でのテンソルの性質が見掛け上異常に大きくなる現象などは新技術をひらく新機能になるであろう。

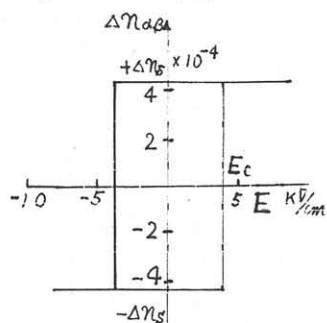


Fig. 1 電場による $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ 単結晶の複屈折の変化

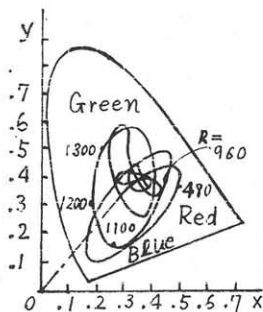


Fig. 2 複屈折の干渉色の R と色度の関係

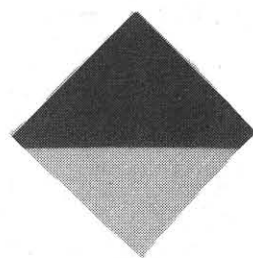


Fig. 3 $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ 単結晶 $1/4$ 波長板の分域壁移動によるシャッター作用

