

■9 群 (電子材料・デバイス) - 6 編 (受動・機能デバイス)

6 章 微小光学素子

【本章の構成】

本章では以下について解説する.

- 6-1 微小光学
- 6-2 光走査デバイス
- 6-3 サブ波長回折格子
- 6-4 光 MEMS

■9 群-6 編-6 章

6-1 微小光学

■9 群-6 編-6 章

6-2 光走査デバイス

(執筆者：八木生剛) [2011年10月 受領]

光の進行方向をアクティブに変化させる素子のことである。ポリゴンミラー (Polygon Mirror)、ガルバノミラー (Galvano-Mirror)、光 MEMS のように反射鏡の角度変化を利用する機械駆動式と、音波による光の回折を利用した音響光学偏向器 (AOD: Acousto-Optic Deflector) や電気光学効果による屈折角変化を利用した電気光学偏向器 (EOD: Electro-Optic Deflector) などの固体素子に大別される。

光走査デバイスの性能は、解像点数や掃引速度という基本性能以外に、用途に応じてランダムアクセス性、波長分散、耐光強度性能などによっても評価される。

解像点数 (N_{res}) とは、最大偏向角 (全角: θ [rad]) を光ビーム拡がり角で割ったもので、偏向に伴う波面擾乱がない場合、光ビーム断面の偏向方向の幅 (B) と波長 (λ) を用いて、 $N_{res} = (B/\lambda) \tan(\theta/2)$ で表され、断面積が大きいくほど、また、最大偏向角が大きいくほど有利である (ただし、レンズ集光時のビームスポット径を開口数 NA に対して λ/NA としている。各用途に応じて、適切な係数を乗じられたい)。一般に、解像点数と波長分散は、波長分散を持たない反射鏡を持ち、その断面と最大偏向角を大きくしやすい機械駆動式の方が、固体素子に比べて有利である。一方、掃引速度やランダムアクセス性など、速度に関する性能は、質量を持つ反射鏡を駆動しなければならない機械駆動式に比べて、固体素子の方が有利である。

機械駆動式であっても、動かすべき反射鏡の質量が極めて小さな光 MEMS では高速性が改善するが、詳しくは 6-4 節に譲る。

ポリゴンミラー (図 2-1) は、 M 枚の反射鏡からなる多面鏡を回転させて反射光の方向を周期的に変化させるものである。構造が簡単であるために、バーコードリーダー、レーザープリンターやデジタルコピー機など、ランダムアクセスを要求しない用途に広く用いられている。回転数と素子サイズを固定して反射鏡数を増すと、掃引速度は反射鏡数に比例して増加するが、入射ビームが同時に 2 つの反射面に入射してはならないため、相対的にデッドタイムが増える。解像点数は反射鏡数の 2 乗に反比例して減少 (多面鏡の外接円の半径を R とし、 $N_{res} = 10R\lambda^{-1}M^{-2}$) することを考慮した設計が必要である。典型例として、 $R = 20$ mm, 回転数 5000 rpm, 反射鏡数 8 枚, 波長 $1 \mu\text{m}$ の場合、掃引周波数は 666 Hz, 解像点数は $N_{res} = 3100$ に達する。掃引速度に関しては、空気軸受を利用した数万 rpm の回転数により、典型例の 1 桁高速の製品も市販されている。

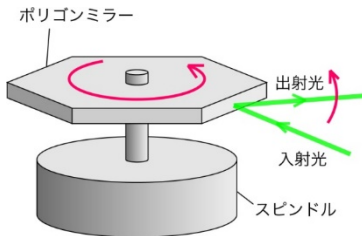


図 2-1 ポリゴンミラーの構成

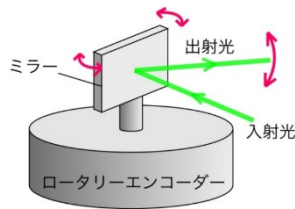


図 2-2 ガルバノミラーの構成

ガルバノミラー (図 2・2) は、反射鏡をロータリーエンコーダなどによって回転角を制御することにより、単なるビーム掃引のみでなく、ランダムアクセスを可能としており、レーザー加工機やレーザー顕微鏡などのレーザースポット位置制御に用いられている。数 mm から数 10 mm のビーム径で、最大偏向角は数 10 度の偏向角が実現されている。典型例として、 $B = 10$ mm、 $\theta = 0.35$ rad ($= 20^\circ$)、波長 $1 \mu\text{m}$ の場合、解像点数は $N_{\text{res}} = 1760$ に達する。速度に関しては、偏向角に落ち着くまでの時間はサブミリ秒、掃引速度は高々数 kHz 程度に限られているが、ミラーの回転を機械共振にて行う共振型ガルバノミラーでは、原理上ランダムアクセスができなくなるものの、掃引周波数が 10 kHz 程度までの製品が市販されている。

音響光学偏向器 (図 2・3) は、 TeO_2 、 LiNbO_3 、 GaP などの媒質中を伝搬する超音波が作る回折格子による光の回折を動作原理とするもので、高速性、ランダムアクセス性に優れ、レーザー顕微鏡やレーザーマスタリング装置などに使用されている¹⁾。媒質に接着された超音波トランスデューサによって媒質内に超音波を誘起するが、超音波は媒質中で回折格子として働く。超音波の周波数を変更することで、回折格子の周期が変化し、回折角即ち偏向角が変化することになる。回折による偏向であるために偏向角の波長分散は大きく、複数の波長を含む場合や、短パルスを用いる場合には偏向されたビームが発散光となるために使用には注意が必要である。超音波の帯域を Δf [Hz]、媒質内の音速を v [m/s] とし、最大偏向角は $\theta = \lambda \Delta f / v$ で与えられる。典型例として、媒質に TeO_2 を用い、音速 4200 m/s にて、帯域 200 MHz、 $\lambda = 633$ [nm] とすると、 $\theta = 30$ [mrad] ($= 1.7^\circ$) である。偏向角の変更には、回折格子間隔の変更時間、すなわち、ビーム径分の距離を超音波が横切る時間が必要である。 $B = 9$ [mm] とし、解像点数 $N_{\text{res}} = 210$ 、ランダムアクセスに要する時間は $2.1 \mu\text{s}$ となる。ランダムアクセス時間と解像点数はトレードオフの関係にあるために、より高速性を求めてビーム径を小さくした場合、解像点数は速度に反比例して減少する。

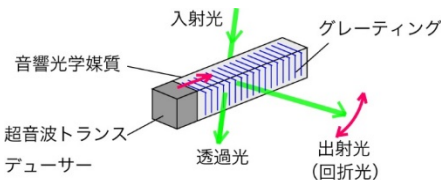


図 2・3 音響光学偏向器の構成

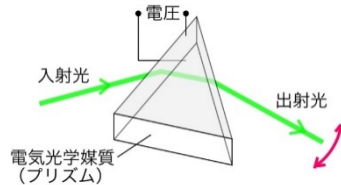


図 2・4 電気光学偏向器の基本構成

電気光学偏向器 (図 2・4) は、 LiNbO_3 などのポッケルス効果を持つ電気光学結晶で作られたプリズムの電圧印加時の屈折率変化に伴う屈折角を利用している²⁾。解像点数が小さく、しかも、高圧電源が必要であるという欠点にも関わらず、数 ns の短時間で偏向方向を変化させられるため、レーザーパルスピッカやレーザーマスタリング装置などに使われている。単独のプリズムでは偏向角が小さいので、複数のプリズムをタンデムに組み合わせて偏向角を増大させている。典型例として、1 mm 径のビームを 1 kV の印加電圧により 5 mrad 偏向させるデバイスが市販されている。 $\lambda = 1 \mu\text{m}$ にて、解像点数は $N_{\text{res}} = 2.5$ となる。なお、回折に基づく音響光学偏向器ほど大きくはないが、透過型デバイスであるために電気光学結晶の屈折率及び電気光学効果の波長分散の影響を受け、偏向角に波長分散が存在する。

最後に、電気光学効果を用いているが、 $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ 結晶を用いた新規な原理に基づく KTN 光偏向器について説明する³⁾。KTN は中心対称性を持つ結晶であり、最低次の電気光学効果は屈折率変化が電界の 2 乗に比例するカー効果である。KTN 内にトラップされた一様電荷によりガウスの定理に従って形成された電界は、カー効果を通じて結晶内に凸レンズを形成する。電圧印加は凸レンズを電界方向にシフトさせることと等価であり、凸レンズ効果を補償する凹レンズと組み合わせて用いれば、高速な電気光学偏向器として動作する。凹レンズによる補償前の偏向角は、屈折率、電荷密度、電極間距離、誘電率をそれぞれ、 n , ρ , d , ε として、波長 633 nm にて、 $\delta\theta = -0.136n^3\rho L\varepsilon V/d$ で与えられる。

■参考文献

- 1) A. Yariv : "Interaction of Light and Sound," in "Optical Electronics 4th edition," Saunders College Publishing, pp.461-478, 1991.
- 2) D.A. Scrymgeour, Y. Barad, V. Gopalan, K.T. Gahagan, Q. Jia, T.E. Mitchell, and J.M. Robinson : "Large-angle electro-optic laser scanner on LiTaO_3 fabricated by in situ monitoring of ferroelectric-domain micropatterning," Appl. Opt., vol.40, no.34, pp.6236-6241, Dec. 2001.
- 3) J. Miyazu, T. Imai, S. Toyoda, M. Sasaura, S. Yagi, K. Kato, Y. Sasaki, and K. Fujiura : "New Beam Scanning Model for High-Speed Operation Using $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ Crystals," Applied Physics Express, vol.4, no.11, Article No.111501, Oct. 2011.

■9 群-6 編-6 章

6-3 サブ波長回折格子

■9 群-6 編-6 章

6-4 光 MEMS

(執筆者：年吉 洋) [2011 年 11 月 受領]

6-4-1 MEMS 技術の微小光学応用

半導体微細加工技術を応用してシリコン基板上に機械的に駆動可能な微細構造を構築する MEMS 技術 (Micro Electro Mechanical Systems Technology) と微小光学との整合性は高く、MEMS という用語が生まれる前から既に、電子ビームでアドレッシング可能なマイクロミラーアレイ型の電光掲示板を構成した研究例が報告されており¹⁾²⁾、これが現在の CMOS 回路上のマイクロミラーアレイを用いた DLP 型の画像プロジェクタへと発展している³⁾。また、近年では光ファイバ通信の発展に伴い、大小規模の MEMS 型光ファイバコンポーネントが開発されている。現在では、数十チャネルから 1000×1000 以上の光クロスコネクタの開発が進んでおり、一部はすでに実用化されている⁴⁾。また、機械式光ファイバスイッチのような受動素子だけでなく、波長可変レーザーなどの能動素子にも MEMS 型の光学部品が応用されている。

6-4-2 機械的動作による光変調

図 4・1 に、機械的な動作に基づいた光学変調や空間光変調方式の一覧を示す。最も古典的な幾何光学においては、光の反射をマイクロミラーで制御してディスプレイや光スイッチに応用

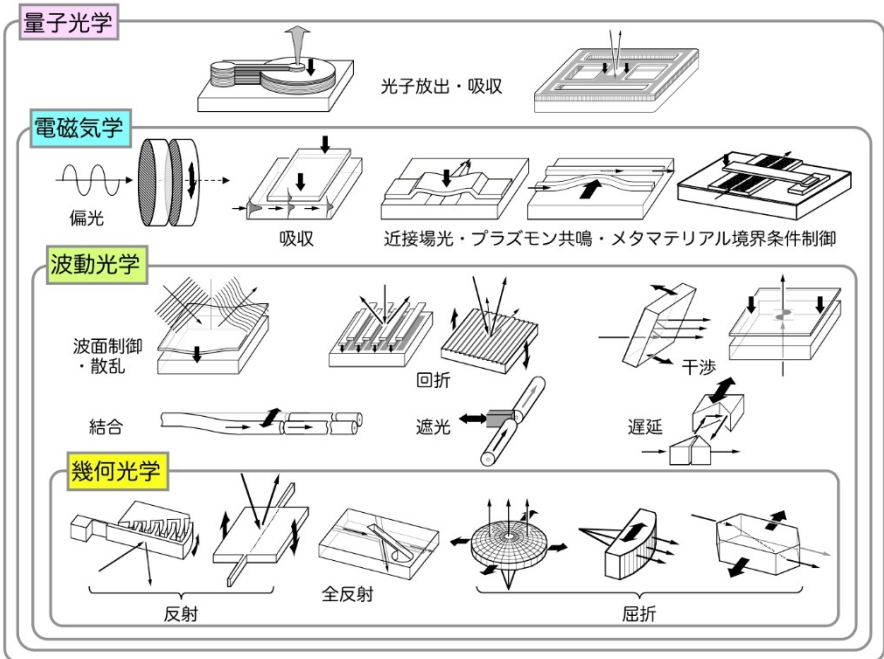


図 4・1 機械的動作による光変調方式

した例が知られている^{3),5)6)}。ほかにも、マイクロ流体チャネルを光導波路と組み合わせ、導波路のギャップ部分に屈折率整合液を出し入れすることで全反射条件を制御する方法や⁷⁾、レンズの光軸をずらして空間変調する $f-\theta$ レンズが知られている。

光を波（ガウシアンビーム）として取り扱う波動光学においては、光ファイバを直接操作してそれらの結合効率を制御する方法や、変形するメンブレン（膜）型のミラーを用いて反射光の波面を制御し、それによって望遠鏡などの収差を補正する MEMS 素子が開発されている。また、回折格子を回転させて波長ごとの回折方向を制御する方法や、リボン状の回折格子を個々に変形して回折光の強度変調することも可能である⁸⁾。光の波長はたかだか $1\ \mu\text{m}$ 程度であるため、MEMS 素子を用いて容易にキャビティー長を制御可能であり、波長選択素子にも応用可能である。

更に、光を電磁波として取り扱う電磁気学の領域では、微小な偏光板を機械的に回転して遮光状態を制御する方法や、透過光の色味を制御する方法が検討されている。また、近接場領域において光を吸収する物体を機械的に駆動することで、導波路中を伝搬する光に強度変調（吸収）や位相変調をかけることもできる。特に後者は、数十ナノメートルの微小な機械的変位によって大きな光学変調をかけられるため、光集積回路の小型化を目指して、シリコンフォトニクス分野のリング共振子やディスク共振子の変調原理として取り入れられている⁹⁾。

光と電子が相互作用する量子光学の領域においては、半導体レーザーの共振器長を機械的に制御するマイクロ機構が波長可変型の光源に応用されており、また、同様の機構が波長追従型のフォトダイオードにも利用されている。

以上のいずれの例においても、微小な機械的変化（歪み、角度、間隔）が光学的に大きな効果をもたらすという点で、MEMS アクチュエータ（駆動機構）との整合性が高い。また、MEMS 技術による光システム部品の製造は、光学部品製造のコストの大部分を占める光軸合せ工程を大幅に低減できる点で産業的価値が期待されている。

6-4-3 MEMS 駆動方式

微小なミラーやレンズ、回折格子を機械的に操作するアクチュエータとして、印加電圧によるクーロン引力を利用した静電駆動方式が最も広く用いられている。近年ではシリコンの高アスペクト比ドライエッチング技術の進歩により、幅数 μm 、深さ数十 μm 以上のトレンチ状のエッチングが可能となっている。この加工技術を用いて櫛歯型の電極を形成し、それによってマイクロミラーを基板面外方向に励振する光スキャナが多数報告されている（図 4-2(a)）⁴⁾。また、静電駆動アクチュエータは原理的にキャパシタ型の負荷であるため消費電力が小さく、また、個別の素子を集積回路でアドレッシングしやすいというメリットがあるため、マイクロミラーを多数集積化した画像ディスプレイ用のライトバルブとしても利用されている。

デバイスのフットプリント（占有面積）当たりの発生力（発生トルク）で比較すると、静電駆動力よりも強力な駆動機構として、マイクロコイルと永久磁石間の相互作用を利用した電磁駆動型のアクチュエータもまた、光 MEMS 分野ではよく用いられている（図 4-2(b)）⁵⁾。静電駆動型に比べてマイクロコイルを形成するプロセスが複雑になるが、大角度で振れる光スキャナとして、レーザー走査顕微鏡やレーザー画像プロジェクタの走査機構として実用化されている。

同様に、面積当たりの発生力が大きな駆動機構として、マイクロヒータを用いた発熱によ

て、線膨張係数の異なる材料を貼り合わせた部材の反り量を制御するユニモルフ型のアクチュエータが報告されている (図 4・2(c))¹⁰⁾。ただし、MEMS 技術によって構造が小型化されてはいても構造体の熱容量は有限であるため、駆動の高速化に難がある。

これを解決する手段として、PZT などの圧電材料と金属電極材料をシリコン梁の上に薄膜形成し、圧電効果によって高速にユニモルフ変形を発生する手法が開発されており¹¹⁾、画像ディスプレイ用の走査機構への応用が検討されている (図 4・2(d))。

このほかにも、光照射による発熱から直接歪みを発生する光歪素子や、油圧/水圧を用いた焦点可変レンズ、気液界面の表面張力を印加電圧の静電引力によって制御する EWOD (Electrowetting on Dielectric) を用いた可変プリズム・レンズなどのアクチュエータ機構も報告されている¹²⁾。

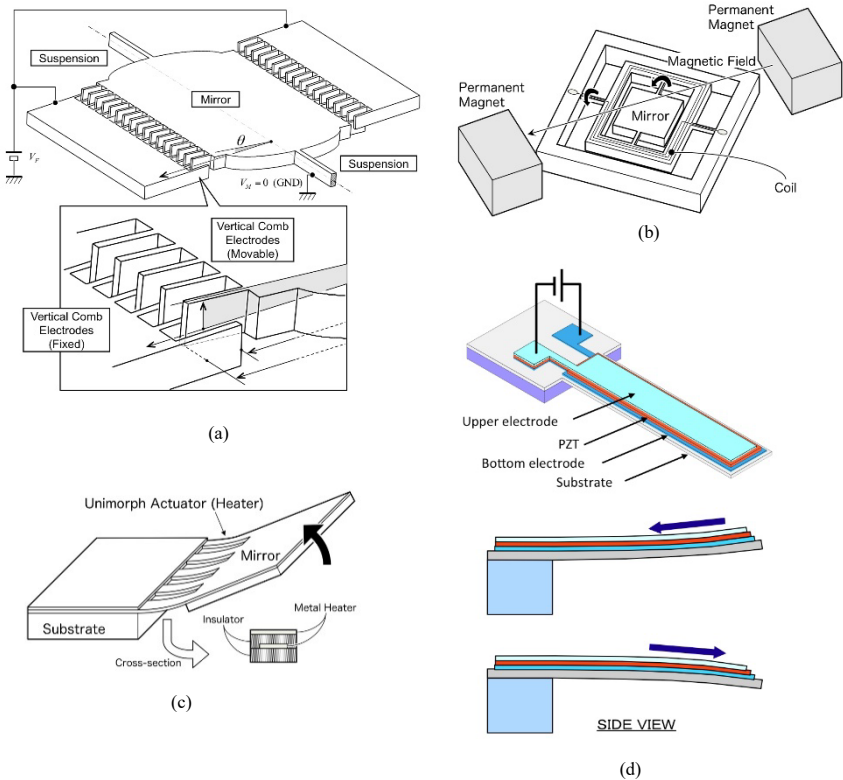


図 4・2 MEMS アクチュエータの駆動原理

6-4-4 MEMS アクチュエータ・センサの応用例

光 MEMS の応用デバイスとして、上記で説明した画像ディスプレイ用の走査機構やライトバルブ以外にも、最近では幅広い開発例が IEEE Int. Conf. on Optical MEMS and Nanophotonics などの国際会議でも活潑に報告されている。その一部を列举すると、クロスコネクットのほか、

可変減衰器、緊急遮断スイッチ、波長選択型光ファイバスイッチ、波長等価器（波長多重のチャネル間の光強度を調整）などの光ファイバ応用や、半導体レーザーの外部変調器、光ファイバ内視鏡の走査機構、レーザー顕微鏡の走査機構、光学検査機器の可変マルチスリット、分光器の可変スリット、ウェアラブルディスプレイの光走査機構、携帯電話カメラ用の可変焦点レンズなどがある。また、MEMS アクチュエータ以外にも、マイクロ加工技術を応用して受光部分の熱絶縁を改善し、受光感度を高めた赤外線ボロメータなどのセンサ応用も報告されている。

6-4-5 光 MEMS の開発課題

半導体シリコンマイクロマシニング技術の発展のお陰で、最近では比較的容易に光 MEMS 構造を製作できる技術的環境が整いつつある。このため、現在では光 MEMS 素子は駆動原理や機能の新規さよりも、システムに組み込まれたときの性能で評価されることが多い。例えば光スキャナの場合には、一定電圧（電力）のもとで光ビームの回折拡がりを抑えつつ、振れ角を大きくするための設計・製作方法や、使用環境の温度変化や電荷の蓄積（チャージアップ）による特性ドリフトの低減、動作中の固着現象（スティクション）の回避、外界からの衝撃に対するロバスト性、光の反射率（光照射による損傷）などが開発課題となっている¹³⁾。

■参考文献

- 1) R.N. Thomas, J. Guldberg, H.C. Nathanson, and P.R. Malmberg : "The mirror-matrix tube: A novel light valve for projection displays," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-22, no.9, pp.765-775, 1975.
- 2) K.E. Petersen : "Silicon as a Mechanical Material," Proc. IEEE, vol.70, no.5, pp.420-457, 1982.
- 3) P.F. Van Kessel, L.J. Hornbeck, R.E. Meier, and M.R. Douglass : "A MEMS-Based Projection Display," Proc. IEEE, vol.86, no.8, pp.1687-1704, 1998.
- 4) M. Yano, F. Yamagishi, and T. Tsuda : "Optical MEMS for Photonic Switching - Compact and Stable Optical Crossconnect Switches for Simple, Fast, and Flexible Wavelength Applications in Recent Photonic Networks," IEEE J. Selec. Topics. in Quant. Elec., vol.11, no.2, pp.383-394, 2005.
- 5) A.D. Yalcinkaya, H. Urey, D. Brown, T. Montague, and R. Sprague : "Two-Axes Electromagnetic Microscanner for High Resolution Display," J. Microelectromech. Syst., vol.15, no.4, pp.786-794, 2006.
- 6) J. Kim, C.J. Nuzman, B. Kumar, D.F. Lieuwen, J.S. Kraus, A. Weiss, C.P. Lichtenwalner, A.R. Papazian, R.E. Frahm, N.R. Basavanahally, D.A. Ramsey, V.A. Aksyuk, F. Pardo, M.E. Simon, V. Lifton, H.B. Chan, M. Hauweis, A. Gasparyan, H.R. Shea, S. Arney, C.A. Bolle, P.R. Kolodner, R. Ryf, D.T. Neilson, and J.V. Gates : "1100×1100 Port MEMS-Based Optical Crossconnect with 4-dB Maximum Loss," IEEE Photon. Tech. Lett., vol.15, no.11, pp.1537-1539, 2003.
- 7) J.E. Fouquet : "Compact optical cross-connect switch based on total internal reflection in a fluid-containing planar lightwave circuit," in Proc. OFC Conf., vol.1, pp.204-206, 2000.
- 8) Y. Ito, K. Saruta, H. Kasai, M. Nishida, M. Yamaguchi, K. Yamashita, A. Taguchi, K. Oniki, and H. Tamada : "High- Performance Blazed GxL Device for Large-Area Laser Projector," SPIE Proc., vol.6114, 2006.
- 9) M.-C.M. Lee, M.C. Wu : "Tunable coupling regimes of silicon microdisk resonators using MEMS actuators," Optic Express, vol.14, no.11, pp.4703-4712, May. 2006.
- 10) A. Jain and H. Xie : "An electrothermal SCS micromirror for large bi-directional 2-D scanning," in Proc. 13th Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 05), Seoul, Korea, pp.988-991, Jun. 5-9, 2005.
- 11) 谷 雅直, 赤松雅洋, 安田喜昭, 藤田博之, 年吉 洋 : "圧電 MEMS 光スキャナによる画像ディスプレイ," レーザー研究, 第 36 巻, 4 号, pp.183-189, 2008.
- 12) J. Heikenfeld, K. Zhou, E. Kreit, et al. : "Electrofluidic displays using Young-Laplace transposition of brilliant pigment dispersions," Nat. Photonics, vol.3, pp.292-296, May 2009.
- 13) O. Tabata and T. Tsuchiya (Eds.) : "Reliability of MEMS," Wiley-VCH, 2007.