

微細片もちはり平面導波路を用いた光スイッチの構造設計

小口寿明^{A)}、早瀬仁則^{A)}、初澤毅^{A)}

^{A)}東京工業大学 精密工学研究所

概要

光 MEMS(Optical Micro Electro Mechanical Systems)技術により、小型サイズの光スイッチや光学素子が開発されている。静電駆動型微細片もちはり平面導波路の物理的な接触に基づく光スイッチ^[1]では、静電力によって導波路と片もちほりを物理的に接触するとき、導波路内部に伝播する光エネルギーが片もちはりへと移行した後、基板面外へと散乱される。今回は、本素子の構造設計と駆動結果について報告する。素子構造は、光学的多層膜として近似的に概算した解析結果に基づいて設計を行った。設計された構造を実際に試作して素子の駆動を行ったところ、基板面外へ出力するスイッチング光が観察された。

1 素子の駆動原理

本素子は、図1のように、上部の導波路と静電気力によって駆動する下部の片もちはりより構成される。静電力によって片もちはり平面導波路を物理的に接触させるとき、平面導波路内部に入力光として伝播させた光エネルギーは片もちはりへ移行した後、基板面外へと散乱放出される。このような純機械的な接触を光スイッチング原理へと応用しているため、本素子では高いコントラストが期待できる。また本素子では、平面導波路に伝播された入力光を基板上の二次元的配置出力として、一入力多出力にオンオフすることが可能であり、面出力型の光スイッチや画像表示素子としての応用が期待できる。

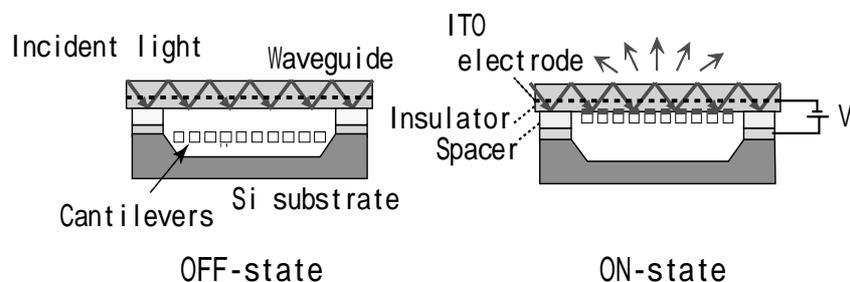


図1. 素子の原理図

2 光学的多層膜による光学特性概算と構造設計

設計に先立ち、導波路と片もちほりの材料は可視光域での応用を考えて、一般的な透明材料である SiO₂ を選択する。また片もちほりの厚さは、プロセス上の要請と低電力駆動のために 2 μ m に固定する。以下、はりに置く ITO 電極層が有効的に使用できることを確認した後、基板導波路の設計指針について述べる。

2.1 エネルギー透過率の算出による ITO 電極層の選定

ここでは図2に示すように、SiO₂製の導波路から同様に SiO₂製の片もちはりへと空気ギャップを介して光エネルギーが透過される光学界面のみを考える。すなわち対象とする界面以外では、媒質を無限大の厚さとする大雑把な多層膜構造を仮定する。この近似によって光学界面におけるエネルギー透過率を概算し、導電性の透明材料である ITO を片もちはり上の電極層として想定し、構造の選定に関する妥当性を確認する。

一般に0層~N層の光学的多層膜ではスネルの法則 $n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1 = \dots = n_N \sin \theta_N$ を満足する。第k層の屈折率 n_k 、厚み d_k をもつ多層膜構造に波長 λ の単色光を入射角 θ_k で入射するとき、エネルギー透過率は

$$T = \frac{4P_0 \operatorname{Re}(P_N)}{|P_0 B + C|^2}, \quad \begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \prod_{k=1}^{N-1} M_k \begin{pmatrix} 1 \\ P_N \end{pmatrix} \quad (1)$$

で与えられる。ここで第k層では、光学的アドミタンス P_k 、位相差 δ_k 、特性行列 M_k は次式で表される。

$$P_k = n_k \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cos \theta_k, \quad \delta_k = \frac{2\pi n_k d_k \cos \theta_k}{\lambda}, \quad M_k = \begin{pmatrix} \cos \delta_k & \frac{i}{P_k} \sin \delta_k \\ iP_k \sin \delta_k & \cos \delta_k \end{pmatrix} \quad (2)$$

上式を用いて透過率を求めるとき、導波路より片もちはりへと空気ギャップを介したエバネセント結合によって光の透過が生じる。図3にTEモード(s偏光)における透過率の計算結果を示す。図3では、静電駆動に必要な片もちはり上のITO電極層がない場合と、ITO層を挿入した計算結果を示す。膜厚50nmまでの結果では、定性的にほぼ類似した透過率を得ることができ、ITO電極層の挿入は、光エネルギーの透過を妨げないことが確認された。またITOは透明材料であるために損失も少ない。以上の結果から、50nm程度の膜厚をもつITOは電極層として有効的に利用できるため、片もちはり上の電極層としてITO電極層を選定する。

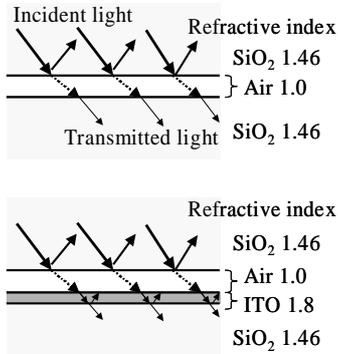


図2. 界面モデル
(上図:ITOなし,下図:ITOあり)

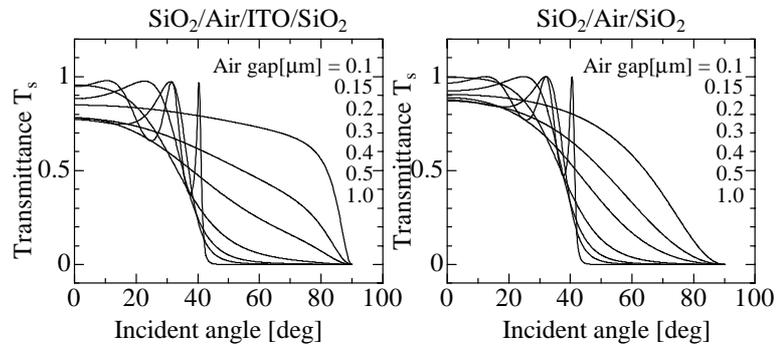


図3. 界面モデルによるエネルギー透過率計算
(左図:ITOあり,右図:ITOなし)

2.2 光導波モード

片もちはりは、図4のように導波路として作用し、結合された光は端面より散乱する。ここでは、片もちはりの電磁界強度を求めることによって、はり内部の導波状態を把握する。以下では、TEモードについて考察する。多層平面導波路の内部を伝播係数 β でz方向に伝播するTEモードの電磁界分布

$$\vec{E} = (0, E_y, 0), \quad \vec{H} = (H_x, 0, H_z) = \frac{\lambda \beta}{2\pi} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} (E_y, 0, \frac{i}{\beta} \frac{\partial E_y}{\partial x}) \quad (3)$$

は、マクスウェル方程式に基づき、

$$\vec{\psi}(x) = F_i(x - x_i) \cdot \vec{\psi}_i \quad (x_{i-1} < x < x_i) \quad (4)$$

により算出できる。ここで x_i は境界面の位置であり、

$$\vec{\psi}(x) = \begin{pmatrix} E_y(x) \\ -i \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} H_z(x) \end{pmatrix}, \quad \vec{\psi}_i = \vec{\psi}(x_i), \quad F_i(x) = \begin{pmatrix} \cos k_i x & \frac{k_0}{k_i} \sin k_i x \\ -\frac{k_i}{k_0} \sin k_i x & \cos k_i x \end{pmatrix}, \quad k_i = \sqrt{(2\pi/\lambda)^2 \cdot n_i^2 - \beta^2} \quad (5)$$

で表される。上式により計算したTE₀、TE₁、TE₆モードの電界分布を図5に示す。図5の上図がITO層を挿入していない場合で、下図が厚さ50nmのITO層を挿入した結果である。ITO層の存在する領域では、電界強度が若干高くなっているが、ITOの膜厚がはりの厚さ2μmに比べて薄いために、ITO層の影響は少ない結果となっている。このため、以下の解析ではITOを無視して導波路間の結合状態を扱う。

2.3 モード結合方程式によるエネルギー移行

導波路と片もちはりの電界などを s, c の添字で表すとき、結合した導波路の電磁界分布は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \vec{E} &= s(z)\vec{E}_s + c(z)\vec{E}_c, & E_s &= A_s \cdot \exp(i(\omega \cdot t - \beta s \cdot z)) \\ \vec{H} &= s(z)\vec{H}_s + c(z)\vec{H}_c, & E_c &= A_c \cdot \exp(i(\omega \cdot t - \beta c \cdot z)) \end{aligned} \quad (6)$$

導波路とはりとの結合状態を表す $s(z), c(z)$ はモード結合方程式によって、表 1 に示す表現を用いて

$$(s(z), c(z)) = \exp\left(i \cdot \frac{\xi_s + \xi_c}{2} \cdot z\right) \cdot \left((\cos(\psi z) + i \frac{\Delta \xi}{\psi} \sin(\psi z)) s(0) - i \frac{k_{sc}}{\psi} \sin(\psi z) c(0), i \frac{k_{sc}}{\psi} \sin(\psi z) s(0) + (\cos(\psi z) - i \frac{\Delta \xi}{\psi} \sin(\psi z)) c(0) \right) \quad (7)$$

$$|s(z)|^2 = 1 - |c(z)|^2 = (\cos^2(\psi z) + \frac{\Delta \xi^2}{\Delta \xi^2 + k_{sc}^2 k_{cs}^2} \cdot \sin^2(\psi z)) |s(0)|^2, \quad |c(z)|^2 = \frac{k_{cs}^2}{\psi^2} \cdot \sin^2(\psi z) \cdot |c(0)|^2 \quad (8)$$

で与えられる。以上より、片もちはりへのエネルギー移行率は伝播方向に対して周期的であり、 (k_{cs}^2/ψ^2) が重要な因子である。図 6 に、 (k_{cs}^2/ψ^2) の計算結果を示す。導波路の厚みは、図 6(左)と図 6(右)でそれぞれ $4\mu\text{m}$ と $200\mu\text{m}$ として計算した。片もちはりは、厚さ $2\mu\text{m}$ の SiO_2 単体材質として近似的に扱う。図 6 の結果より、準連続的な導波モードをもつ導波路の方が、モードの数が多いためにエネルギーの移行が大きいと考えられる。このため、導波路として 0.15mm の厚みをもつカバーガラスを選定する。

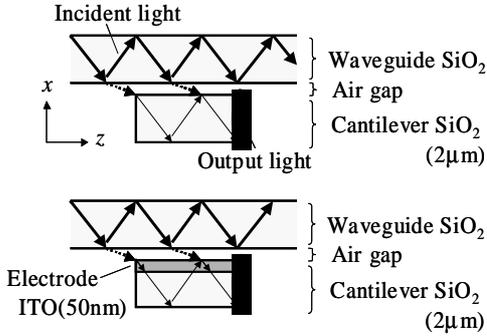


図 4. はりと基板導波路のモード結合
(上図:ITO なし,下図:ITO あり)

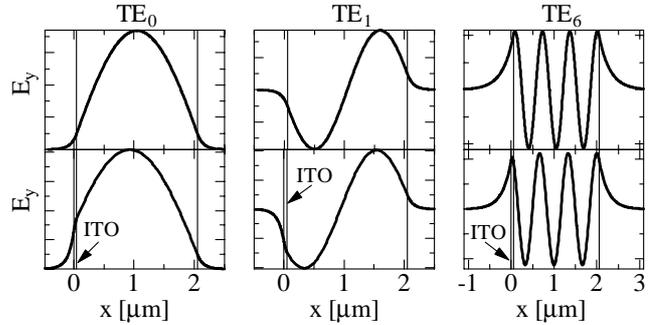


図 5. 片もちはり内部における TE モード電界強度
(上図:ITO なし,下図:ITO あり)

表 1 結合状態を表すパラメータ

$$K_{ij} = \frac{k_0^2}{2\beta_i} \int (n(x)^2 - n_j(x)^2)(E_i \cdot E_j) dx dy, \quad C_{ij} = \frac{\beta_i + \beta_j}{2\beta_i} \int (E_i \cdot E_j) dx dy \quad (i, j = s, c), \quad k_0^2 = \omega^2 \epsilon_0 \mu_0$$

$$\begin{aligned} \psi &= \sqrt{\Delta \xi^2 - k_{sc} \cdot k_{cs}} & \xi_s &= \beta_s + \frac{K_{ss} - C_{sc} \cdot K_{cs}}{1 - C_{sc} \cdot C_{cs}} & k_{sc} &= \frac{K_{sc} - C_{sc} \cdot K_{cc}}{1 - C_{sc} \cdot C_{cs}} \\ \Delta \xi &= \frac{1}{2}(\xi_s - \xi_c) & \xi_c &= \beta_c + \frac{K_{cc} - C_{cs} \cdot K_{cs}}{1 - C_{sc} \cdot C_{cs}} & k_{cs} &= \frac{K_{cc} - C_{cs} \cdot K_{ss}}{1 - C_{sc} \cdot C_{cs}} \end{aligned}$$

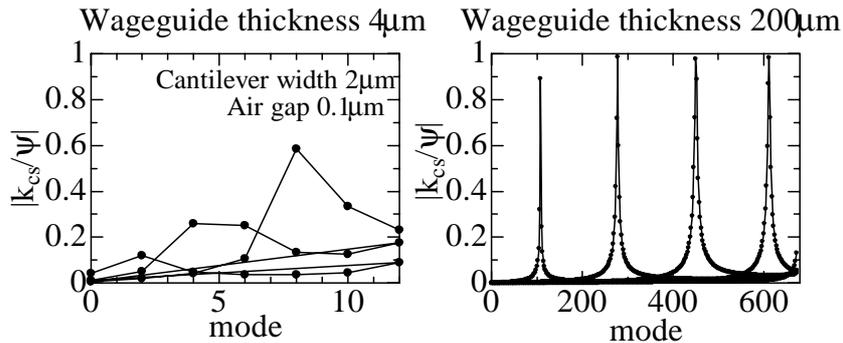


図 6. モード結合による導波路からはりへのエネルギーの移行

3 試料作製

本素子は、図7に示すようにMEMS技術によって作製する。片もちはりは、フォトリソグラフィー、TMAHエッチング、RIEエッチング後、スパッタによりITO伝導層を成膜する。作製した片もちはりのSEM写真を図8に示す。基板電極はガラス基板上にITO電極層をスパッタし、絶縁層としてSiO₂を蒸着する。最後に作製された二つの基板を接着剤によって貼り合わせて素子が完成する。

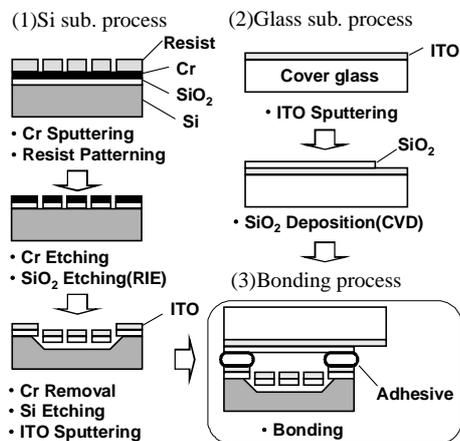


図7. 作製プロセス

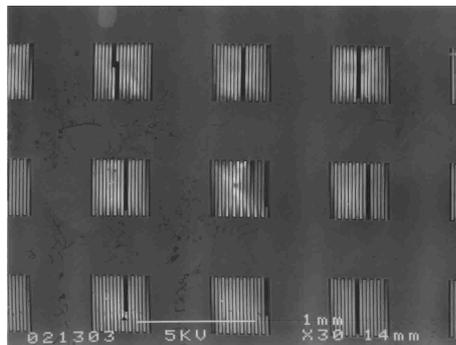


図8. 片もちはりのSEM写真

4 実験結果

作製された素子は顕微鏡、CCDを用いてオンオフ特性を観察した。入射光は、He-Neレーザ光をガラス基板の端面から結合することで入射光を導入する。伝播方向は、はりの長手方向に対して垂直である。図9に静電力を印加しないオフ状態と静電駆動を行ったオン状態の顕微鏡写真を示す。図9の実験結果から、今回の構造設計にもとづいて作製された素子に170Vの電圧を印加することによって、ガラス基板と接触したはりの側端からスイッチング光が観察され、本素子によるオンオフ駆動が確認された。

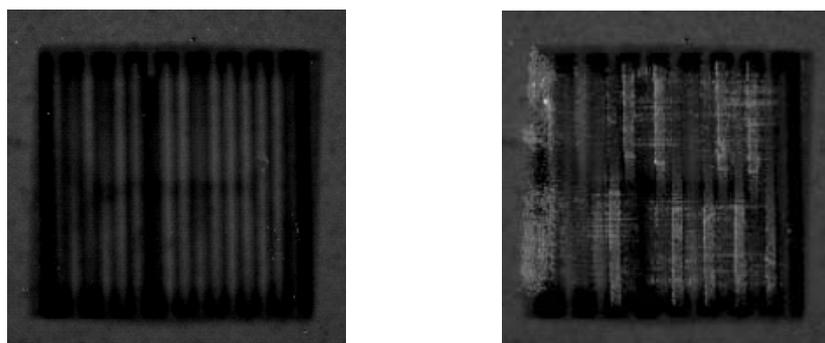


図9. オンオフ状態の顕微鏡写真(左:オフ状態, 右:オン状態)

5 まとめ

静電駆動型片もちはりとは平面導波路の物理的な接触に基づく光スイッチを多層膜近似した計算結果から構造を選定し、実際に素子作製・静電駆動を行ったところ出力光のオンオフスイッチングが確認された。

参考文献

- [1] 小口, 早瀬, 初澤, “平面導波路と静電駆動を用いた光表示素子の研究”, 2003年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, I49, (2003.10.3)