

# 導波路形光双安定素子

東京工業大学 工学部 電子物理工学科 水本 哲弥



## Waveguide Optical Bistable Devices

T. Mizumoto

Department of Physical Electronics, Faculty of Engineering,  
Tokyo Institute of Technology.

### Abstract

Waveguide optical bistable devices are discussed. An optical waveguide resonator in which the third-order nonlinear material is involved brings about the bistability in transmission characteristics. From theoretical considerations, it becomes clear that the DFB structure is preferable to achieve higher transmission in a high output state comparing to DBR one. Also, the preliminary experimental results of waveguide bistable devices using  $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$  doped glass substrates are demonstrated together with their fabrication processes.

### 1. はじめに

光によって光信号を制御する光制御形光機能素子は、全光学的作号処理システムを構築するためには必要不可欠である。入射光強度に対して高低2つの安定な出力状態をとり得る光双安定素子は、動作点を変化させることで履歴特性や微分特性を実現することができ、これを用いて光制御形光スイッチ、光メモリ、光論理演算素子等が実現可能である<sup>1)</sup>。光双安定素子は光強度に比例して屈折率が変化するカーブ形非線形媒質を光共振器中に入れることで構成することができ、半導体ドープガラス、ZnS等をエタロン中に挿入したバルク形素子で動作が実証されている<sup>2) 3)</sup>。

一方、導波路形の光双安定素子は、光波のエネルギーを狭い領域に閉じ込めて動作に必要な光パワーを低減することが可能であり、他の光機能素子と集積化も期待できる。これまで先駆的

な研究として GaAs/GaAlAs MQW 導波路における双安定動作の報告がある<sup>4)</sup>。しかしこの素子では、へき開によってファブリペロ共振器を形成しているため、他の光素子との集積化に難点がある。分布反射器を用いる方が、集積化に適している。

大きな三次非線形効果を示す媒質として、半導体や半導体ドープガラス、有機非線形材料などが知られているが、この中で半導体  $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$  ドープガラスは応答速度も比較的速く、イオン交換法によって低損失な光導波路が形成可能であり、導波路形双安定素子を製作するのに適している<sup>5)~7)</sup>。

本稿では、まず DBR/DFB 形導波路双安定素子の特性計算結果について述べ、次いで半導体ドープガラス基板を用いた素子の試作ならびに実験結果について述べる。

### 2. 理論解析

導波路形双安定素子は、光を横方向に閉じ込め

るチャネル導波路と光のフィードバックを与える分布反射器で、Fig. 1 のように構成される。 $L_1$ ,  $L_2$  は分布反射器の伝搬長を、 $L$  は反射器によって挟まれた均一な導波路からなる共振器長を表し、 $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$  は各分布反射器における前進波と後退波の結合係数である。ここでは、 $L \neq 0$  の場合を DBR 形とよび、分布反射器のみで共振器が形成されている  $L = 0$  の場合を DFB 形とよぶことにする。以下の解析では、チャネル導波路をステップ状屈折率分布をもつ 2 次元導波路で近似している。

実際に半導体ドープガラスを用いて素子を製作することを考えて、分布反射領域中でも光強度に依存した屈折率変化が生ずることを考慮して解析する必要がある。また、DFB 形非線形共振器の出入力特性を議論するためには、分布反射領域内で生ずる非線形屈折率変化を考慮することが必須である<sup>8)</sup>。ここではこれを考慮した解析を行っている。以下の計算例においては導波モードの実効屈折率を  $n_0 = 1.510$  とし、動作光の波長  $\lambda = 532$  nm に対して分布反射器のグレーティング周期を  $\lambda / (2n_0)$  とする。光強度依存屈折率変化を表す係数は  $n_2 = -3.0 \times 10^{-11} \text{ cm}^2 / \text{W}$  と仮定している<sup>9)</sup>。さらに、干渉露光によってウエハ全面に形成したグレーティングパターンにより分布反射器

を製作することを想定し、入射側のグレーティングと出射側のグレーティングの位相は連続であると仮定している。

DBR 形双安定素子の解析結果の一例を Fig. 2 に示す。分布反射器の結合係数  $\kappa = \kappa_1 = \kappa_2$  をパラメータとして変化させている。仮定した(線形)吸収係数  $\alpha = 2 \text{ cm}^{-1}$  は、後に述べる素子試作に用いた材料の実測値である。 $\kappa$  を適当に選ぶと、入射光強度が増加する場合に高出力状態へ移る光強度(しきい値 1)と入射光強度が減少する場合に低出力状態に遷移する光強度(しきい値 2)が異なる履歴特性をもつ双安定動作が得られる。また  $\kappa$  の値によっては微分特性を示す。

これらの動作は、Fig. 3 に示す光共振器の共振特性を用いて説明できる。透過係数(縦軸)と位相変化(横軸: 図では屈折率変化で表現)を関係づける直線と、共振器の共振特性を表す曲線の交点が出力点になる。共振器中の光強度に比例して屈折率が変化する非線形効果により、入射光強度が増加するにつれてこの直線の傾きは小さくなる。 $\kappa = 50 \text{ cm}^{-1}$  の場合で示すように、しきい値 1 は図中 a 点で接する直線の傾きで、また遷移後の高状態の出力は b 点の透過係数で決まる。さらに、しきい値 2 は c 点で接する直線の傾きによって決ま

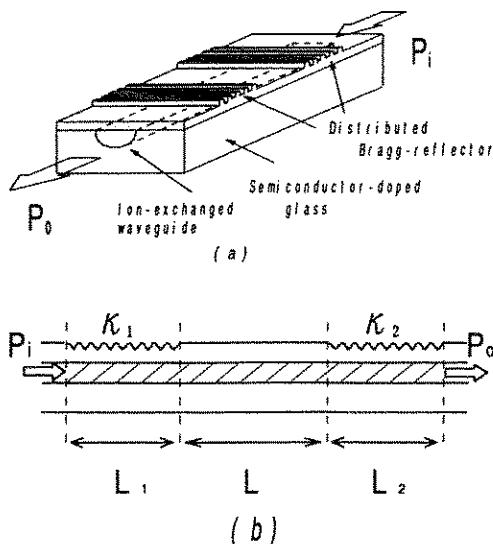


Fig. 1 (a) The structure of waveguide bistable device, and (b) its analytical model.

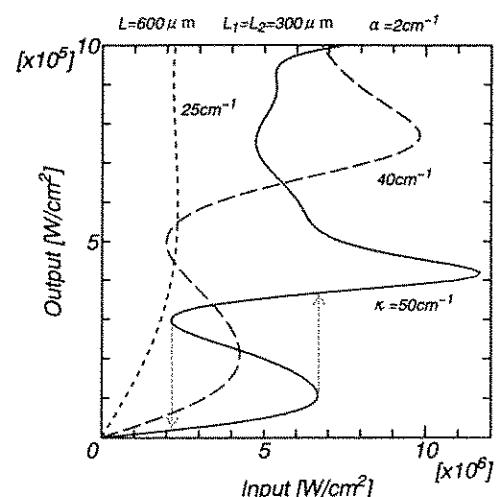


Fig. 2 Calculated input-output characteristics of DBR structures.

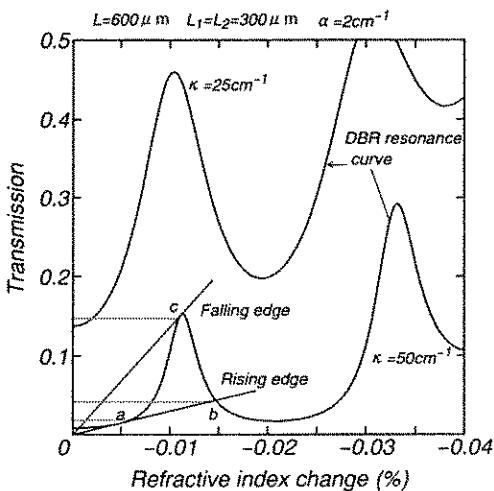
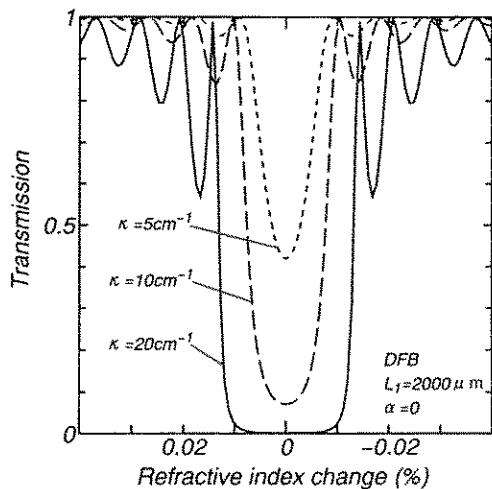


Fig. 3 The transmission characteristics of DBR resonators.

る、また共振器の実効屈折率を変化させると、動作点を決定する直線の原点が移動するためしきい値を変化させることができる。

ところで、高状態で大きな出力を得るために、しきい値1で遷移後のb点と、しきい値2で遷移前のc点における透過係数が大きいことが条件になる。共振器をDFB構造とすると、Fig. 4(a)に示すようにこれに近い共振特性が実現できる。結合係数 $\kappa$ を大きくするにつれて低状態の透過係数が減少し、低状態と高状態のコントラストが大きくなり、DBR形に比べれば大きな透過係数が得られ双安定動作にとってより望ましい共振器特性に近づいている。なお、この図では分布反射器の長さは2000 μmで、媒質の吸収は無いと仮定している。サイドロープを抑制することによって、より理想的な特性に近づく。Fig. 4(b)は図(a)の $x$ に対応する光入出力特性を表している。なお $\kappa = 20 \text{ cm}^{-1}$ の場合には、導波路の実効屈折率 $n$ を $n_0$ から変化させて  $\Delta n / n_0 = (n - n_0) / n_0 = -0.01\%$ のデチューニングを与えることによって、しきい値1を小さくしている。

上述の入出力特性は、いわば静的(定常的)な解析によって得られた結果である。光波の伝搬に対応した屈折率変化の時間応答を考慮して動的な解析を行うと、ある条件下ではCW光を入射させて



(a)

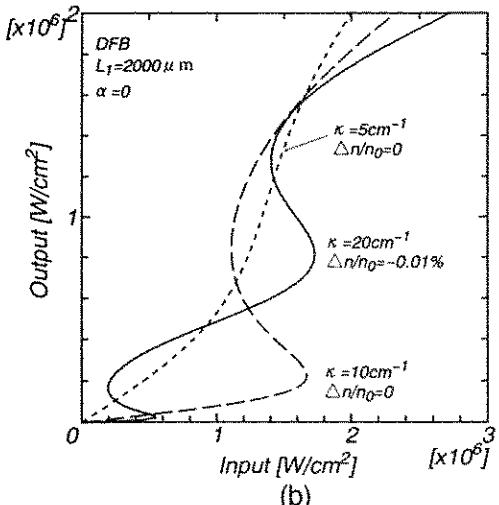


Fig. 4 The calculated (a) resonance and (b) input-output characteristics of DFB structures.

も出力がパルス光となるself-pulsationが発生することが指摘されている<sup>9) 10)</sup>。しかし、共振器のデチューニングがある値以上である場合には、self-pulsationの発生が抑圧され、上述の静的な解析結果と同様の動作が得られる<sup>10)</sup>。このself-pulsationを抑圧するのに必要なデチューニング量は、分布反射器の結合係数 $\kappa$ によって変化し、 $\kappa$ が大きいほど大きなデチューニング量が必要となる。Fig. 4で $\kappa = 20 \text{ cm}^{-1}$ の場合には、 $|\Delta n / n_0| = 0.01\%$ のデチューニングでself-pulsationが抑

圧される。今後、非線形な吸収変化も含めて、媒質の光学的特性を全て考慮にいれたモデル化を行い、議論する必要がある。

### 3. 導波路形光双安定素子の製作と非線形応答の観測

バルクのファブリペロエタロンで双安定な入出力特性が観測されているが<sup>2)3)</sup>、導波路形は素子の製作も難しく、動作実証の報告例が少ない<sup>11)12)</sup>。以下に、筆者らが行った実験の内容を述べる。

市販のシャープカットフィルタを基板として用い、 $L = 600 \mu\text{m}$ ,  $L_1 = L_2 = 300 \mu\text{m}$  の DBR 形素子を製作した。Na<sup>+</sup> / K<sup>+</sup> イオン交換によりチャネル導波路を形成した基板上に Corning 7059 ガラスをクラッド層として堆積し、CHF<sub>3</sub> 反応性イオンエッチングで分布反射器を形成する。グレーティングのマスクは He-Cd レーザ干渉露光で製作した。

CW-Q スイッチ YAG レーザの 2 倍波 ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ) を光源として透過特性を測定した。約 0.3 msec 間隔で繰り返し発生する半値全幅 130 nsec の光パルス(ピークパワー約 360 W)の立ち上がりで入射光強度が増大するときの特性を、立ち下がりで入射光強度が減少するときの特性を測定した。素子はペルチェ素子によって温度制御されて

いる。入射光の一部と、素子からの出射光パルスの時間波形は、Si の PIN-PD とディジタイジングオシロスコープを用いて観測している。

まず、導波路の形成されていない基板中に光を透過させた場合の測定結果を Fig. 5 に示す。図(a)は入射光と出射光パルスの時間軸プロファイルを表している。横軸に入射光強度を縦軸に出射光強度をとった図(b)を見ると、出射光強度は入射光強度に比例して変化しており、測定系における二つの光検出器間の時間遅延や特性のばらつきは無視できるといえる。

これに対して、共振器が形成された導波路に光を入射させた場合の結果を Fig. 6 に示す。図(b)に示すように、光入出力特性において履歴特性が観測されている。すなわち入射光強度が増加する場合と減少する場合とでは、透過特性が異なっている。導波路以外を透過した光(Fig. 5)に対してはこのような特性が観測されないことから、光共振器でのフィードバックによりこのような結果が得られたと考えられる。また、素子の温度を制御し実効屈折率を変化させると、共振器のデチューニング変化とともに透過特性の変化が観測された。

導波路への結合効率が測定されていないため、計算結果との比較や定量的な議論がなされて

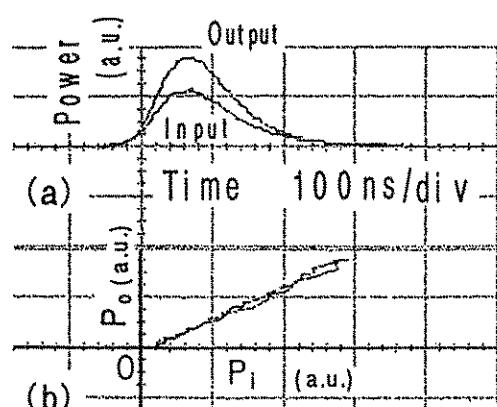


Fig. 5 Measured results for lightwave incident on the substrate. (a) The temporal profiles of input and output pulses. (b) Input ( $P_i$ ) vs. output ( $P_o$ ) characteristics.

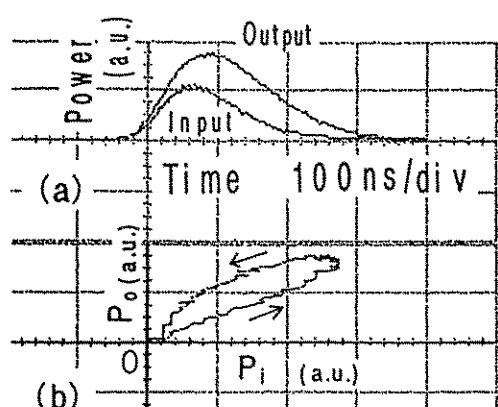


Fig. 6 Measured results for lightwave incident on the DBR nonlinear resonator. (a) the temporal profiles of input and output pulses. (b) Input ( $P_i$ ) vs. output ( $P_o$ ) characteristics.

いない。しかし、光共振器の形成された導波路で非線形な入出力特性が観測されているのは興味深く、今後さらに実験を進める必要がある。

#### 4. おわりに

三次光学非線形性を利用した導波路形光双安定素子について、計算による特性解析結果と非線形応答の観測について述べた。高出力状態で大きな透過係数を得るためにDFB構造の共振器が有利である。

今後、素子個体の動作実証を進めることはもちろんのこと、実際にシステムに組み込まれることを想定して、動作光電力の低減、多段接続性(cascadability)等の問題を解決するなど、多くの研究課題が残されている。

#### 謝辞

日頃ご指導いただいく本学工学部・内藤喜之教授に感謝申し上げます。また、本稿の内容の多くは、本学大学院生、森田逸郎君、指宿康弘君、中原克己君らの研究成果であることを記して謝意を表します。本研究の一部は、財團法人日本板硝子材料工学助成会の研究助成を受けて行われた。

#### 参考文献

- 1) S. D. Smith : Phil. Trans. R. Soc. Lond., A 313 (1984) 195.
- 2) J. Yumoto, S. Fukushima and K. Kubodera : Opt. Lett., 12 (1987) 832.
- 3) H. Tsuda and T. Korokawa : IEEE Photon. Technol. Lett., 1 (1989) 449.
- 4) P. Li Kam Wa, P. N. Robson J. P. R. David, G. Hill, P. Mistry, M. A. Pate, J. S. Roberts : Electron. Lett., 22 (1986) 1129.
- 5) R. K. Jain and R. C. Lind : J. Opt. Soc. Am., 73 (1983) 647.
- 6) T. J. Cullen, C. N. Ironside, C. T. Seaton, and G. I. Stegeman : Appl. Phys. Lett., 49 (1986) 1403.
- 7) K. Shimomura, H. Murata, M. Izutsu and T. Sueta : Jpn. J. Appl. Phys., 32 (1979) 379.
- 8) H. G. Winful, J. H. Marburger and E. Garmire : Appl. Phys. Lett., 35 (1979) 379.
- 9) H. G. Winful and G. D. Cooperman : Appl. Phys. Lett., 40 (1982) 298.
- 10) C. Martijn de Sterke and J. E. Sipe : Physical Review A, 42 (1990) 2858.
- 11) T. Mizumoto, I. Morita, Y. Ibusuki and Y. Naito : Technical Digest of 4-th Optoelectronics Conference, Makuhari, July, 1992, 116.
- 12) X. Mai, A. Ning, Z. Jie and L. Yan : Technical Digest of European Conference on Integrated Optics, Neuchatel, April, 1993.