

解 説

光 双 安 定 素 子

梅 垣 真 祐

東京大学工学部物理工学科 〒113 東京都文京区本郷 7-3-1

(1984 年 11 月 7 日受理)

Bistable Optical Devices

Shinsuke UMEGAKI

Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, University of Tokyo,
7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

1. は じ め に

光双安定は、光学系・光学素子への一つの入力光状態に対して、出力光が二つの安定状態・双安定状態のうちのいずれかをとる現象である。光双安定素子 (bistable optical device, BOD) は、光変調素子あるいは光強度に対する非線形応答素子と、これらの素子の透過率または反射率をその出力光自身で変化させる帰還機構とで構成される。光双安定素子の出力光強度は、入力光強度の増減に対して、光履歴現象 (optical hysteresis) に代表されるさまざまな特性を示す。光履歴現象の典型的な例が光双安定で、入力光強度の増大時と減少時とでは、出力光強度は二つの異なる値を示すのである。

帰還機構としては、出力光を検出器で受け、電気信号に変換して変調素子に帰還する方法と、出力光を直接、鏡等で非線形応答素子に帰還する方法が用いられる。前者は、電気回路を介在させて動作させるので混成型光双安定素子 (hybrid BOD)，後者は動作に光のみが用いられるので真性型光双安定素子 (intrinsic BOD, または, all-optical BOD) と呼ばれる。真性型 BOD は、非線形応答として、媒質の屈折率の光強度依存を利用する分散型 (dispersive) BOD と、吸収係数の光強度依存を利用する吸収型 (absorptive) BOD とに大別される。

光双安定素子の研究は、ファブリー・ペロー共振器内に非線形媒質を挿入した真性型 BOD を用いて始められた。1969年, Szöke ら¹⁾が、非線形媒質として可飽和吸収媒質を用いた吸収型 BOD の解析において、初めて「光双安定」の語を使い、1976年 Gibbs ら²⁾が Na 蒸気

を用いて分散型 BOD を実現した。1977年には、Smith ら³⁾が、ファブリー・ペロー共振器内に電気光学結晶を配した変調器による混成型 BOD の動作を報告し、翌年 Garmire ら⁴⁾が、ファブリー・ペロー共振器を用いない、インコヒーレント光でも動作可能な混成型 BOD の研究を行なった。これらを端緒として、真性型、混成型を問わず、光双安定素子の研究は活発になった。真性型 BOD については、過渡応答特性を中心にして理論的な解析および非線形光学材料の探索、混成型 BOD については、さまざまな構成を取りやすいことから応用的な素子開発が現在も盛んに続けられている。

光双安定素子が注目されるのは、光双安定素子を用いると、電気回路における各種素子を光学素子によって実現できるためである。光信号を光信号のまま処理できる光学素子として、光双安定素子は、たとえば光通信の分野では大いに有用である。一方、光コンピュータの分野で光双安定素子がいかに使われるか、逆に、光双安定素子を用いた光コンピュータはどのような目的に使われるか、これらの疑問に対する回答を考えることは、それ自体、一つのテーマとなりうるというのが現状である。ただ、デジタル論理演算に必要なさまざまな能動素子が、光双安定素子を用いて着々と開発されている現況に鑑み、本解説では、とくにその動作の制御が容易な混成型 BOD を中心にして紹介し、真性型 BOD も含めて将来の展望を試みる。

2. 動 作 原 理

既述のように、光双安定は分散型 BOD を用いて初め

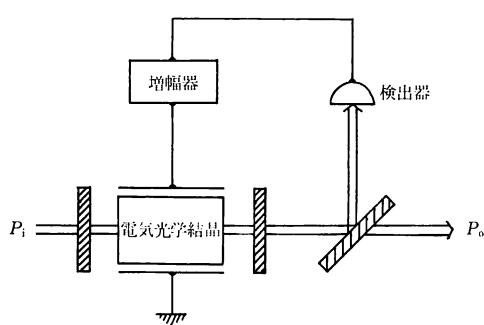


図1 ファブリー・ペロー共振器を用いた混成型光双安定素子

て観測されたのであるが、定常的な動作の理解しやすい混成型BODについて、その動作原理を説明する。

2.1 混成型光双安定素子

図1は、その屈折率を印加電圧により変えることができる電気光学結晶をファブリー・ペロー共振器中に置き、透過光強度に比例した電圧を帰還、印加する混成型BODの構成⁵⁾である。

ファブリー・ペロー共振器の強度透過率 τ は、エアリーの式で表わされる。

$$\tau = P_o/P_i = (1-R)^2 / [(1-R)^2 + 4R \sin \delta] \quad (1)$$

ここで、 P_i, P_o は入・出力光強度、 R は共振器の2枚の鏡の振幅反射率の積、 δ は共振器光路長に対する位相である。帰還電圧無印加、印加時における位相を δ_0 、 ϕ とすると、 δ は、

$$\delta = \delta_0 + \phi \quad (2)$$

で与えられ、 ϕ は、出力光強度に比例して結晶の屈折率が変えられるので、

$$\phi = KP_o. \quad (3)$$

となる。ここで、 K は、帰還電気回路利得、一次の電気光学係数等に比例する定数である。この帰還回路を設けたファブリー・ペロー共振器における入・出力光強度 P_i, P_o の間の関係は、(1)～(3)式を同時に満たす解として得られ、グラフを用いて以下のように理解される。

(1)～(3)式を用いると、透過率 τ と位相 δ の関係は、入力光強度 P_i をパラメータとして、

$$\tau = (\delta - \delta_0)/KP_i \quad (4)$$

と書き直され、もう一つの τ と δ の関係式(1)と連立して、パラメータ P_i に対する τ を求めれば、 P_i に対する P_o のふるまいがわかる。図2(a)は、横軸を δ 、縦軸を τ にとり、傾き $1/KP_i$ の直線(4)と、曲線(1)を描いたもので、その交点から τ が求められる。

P_i の増・減に応じて直線(4)の傾きは減・増するが、交点に対応する動作点は同じ経路をたどらない。 P_i を増大させていくと、実現される共有点はAからCへ連続的に動き、C点で接してDへ不連続に飛ぶ。ファブリー・ペロー共振器は、低透過率状態から高透過率状態に変化したのである。高透過率状態Eから P_i を減少させていくと、実現される共有点は高透過率状態Fまで連続的に動き、F点で接して、元の低透過率状態に戻る。横軸を P_i 、縦軸を P_o にとって、以上の変化を見ると、図2(b)のよう光履歴曲線が得られる。なお、図2(a)

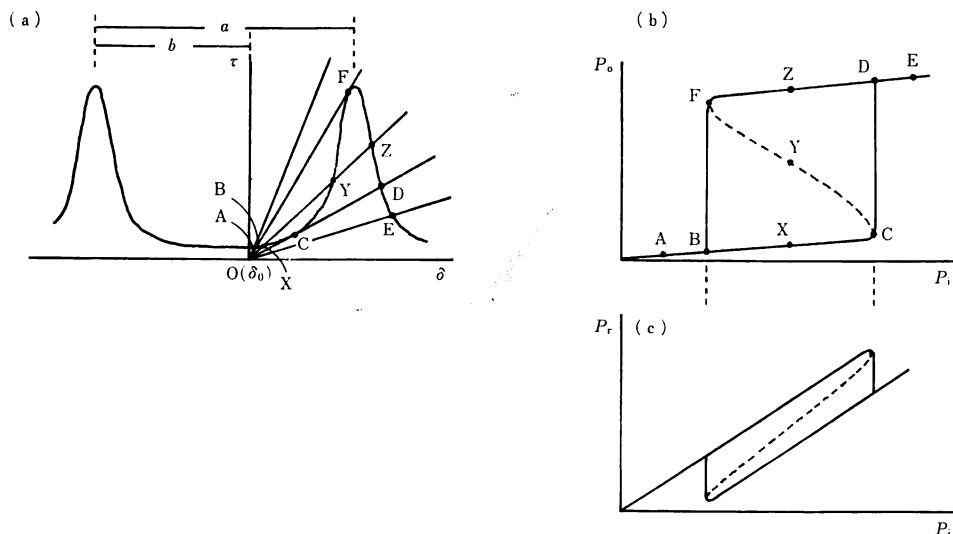


図2 混成型光双安定素子の動作原理

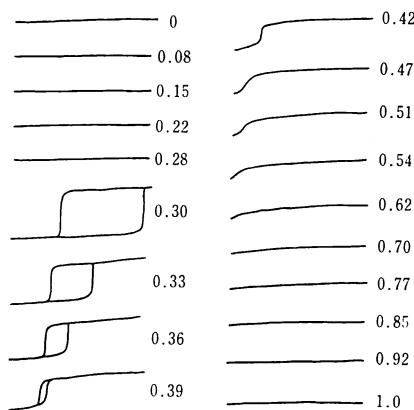


図 3 種々の特性曲線(実験結果⁵⁾
(©1978 IEEE)

中、直線 OZ は曲線と三つの共有点 X, Y, Z をもつが、Y は過渡応答に対し不安定で、定常状態としては実現されない。図 2(c) は、入射光強度 P_i に対する反射光強度 P_r を表わしたもので、図 2(b) と相補的な履歴曲線となる。

ファブリー・ペロー共振器に対する同調量 δ_0 を変えると光履歴現象を含めさまざまな特性曲線が得られる。 δ_0 は、たとえば、帰還電圧以外にさらにバイアス電圧を印加して変えることができる。図 2(a)におけるフリースペクトルレンジ a に対する同調位置 b を変えて実験的に得られた特性曲線³⁾ を図 3 に示す。

b/a の値が、0.3 から 0.4 においては双安定性を示す光履歴現象、0.42 では $dP_r/dP_i > 1$ となる微分利得特性が現われている。光双安定は、ファブリー・ペロー共振器からの反射光強度に比例した帰還電圧を用いても観測される⁶⁾。

ファブリー・ペロー共振器を用いた変調器を用いる場合、光源として单一モードレーザーが必要であるし、光学系の調整が厄介である。そこで、偏光子、検光子の間に電気光学素子⁴⁾ や磁気光学素子⁷⁾ を配した変調器を利用して、インコヒーレント光でも動作する混成型 BOD が実現されているし、光導波路においては、種々の変調原理を用いた混成型 BOD が考えられている。これらの変調曲線は(1)式と異なり、基本的には正弦曲線となるが、動作原理は上記と同様である。変調曲線が変曲点をもてば双安定を示す可能性があり、周期的であれば多重安定性が得られる⁸⁾。

2.2 真性型光双安定素子

真性型 BOD は、光強度に対して非線形な応答を示す媒質をファブリー・ペロー共振器またはリング共振器中

に置き、光を再び媒質中に帰還入射させる構成をとるものが大部分である。

分散型 BOD における定常双安定動作は、混成型 BOD のそれとまったく同様である。非線形応答媒質として、光強度により屈折率の変化するカーメ媒質を用いる場合、媒質の屈折率 n は、光強度を I として、

$$n = n_0 + n_2 I \quad (5)$$

で表わされる。 n_0 は線形分極に対応する屈折率、 n_2 は三次の非線形分極に対応する非線形屈折率である。真性型 BOD でファブリー・ペロー共振器を用いる場合は、たんに共振器内に非線形応答媒質を置くだけでよい。共振器内光強度を I 、出力側鏡の透過率を T とすると、(4)式に対応して

$$\tau = \lambda T(\delta - \delta_0)/2\pi n_2 P_i \quad (6)$$

が得られるので、 P_i をパラメータとして、(1)、(6)式の共有点を調べるのは、混成型 BOD の場合と同様である。真性型 BOD 用の非線形応答としては、カーポロ効果のほか、媒質の二準位間の遷移の飽和に基づく屈折率や吸収係数の光強度依存が利用される。前者の屈折率の光強度依存は近似的に(5)式となり、定常動作は上記のとおりであるが、分散と吸収が絡み合っている場合や過渡応答特性を記述する場合は、グラフによる解法を適用するのが困難である。

二準位系媒質を含むファブリー・ペロー共振器、リング共振器の動作解析には、マックスウェル・プロッホの方程式が用いられる⁹⁾。二準位電子系の電子の運動を双極子近似の下で密度行列を用いて記述し、巨視的分極と結びつけ、巨視的分極から生じる光の電場の振舞をマックスウェルの波動方程式で求める。密度行列の各要素、巨視的分極、光の電場の変化がゆっくりであるという仮定や、回転波近似の下でまとめたものがマックスウェル・プロッホの方程式である。ファブリー・ペロー共振器、リング共振器に応じた境界条件の下で、光双安定現象における定常動作および過渡応答特性を論じることができる。真性型双安定現象観測の端緒となった吸収型 BOD の解析¹⁰⁾を始めとして、分散型 BOD の解析¹¹⁾、これらの素子における過渡応答特性の解析が行なわれている。過渡応答特性^{12, 13)}のなかには、低透過率状態から高透過率状態に移行する瞬間、あるいはその逆の瞬間ににおける入力光強度近辺では、振動の大きさが小さくなるにつれてその減衰時間が長くなる critical slowing down¹⁴⁾や、定常入力光に対して再生発振などの不安定性が起る self-pulsing 等の現象¹⁵⁻¹⁷⁾がある。また、不安定性の極限として chaos 状態も予測され¹⁸⁾、混成

型、真性型 BOD により実際に観測されている¹⁹⁻²¹。二準位間の遷移の飽和を利用した分散型 BOD としては、Na 蒸気のD線を用いて双安定現象が観測された²²のをはじめとして、GaAs²², CdS²³の励起子準位、InSb^{24,25}のバンド間遷移、GaAs と GaAlAs の人工的な超格子構造²⁶を利用した観測などが報告されている。

その他、共振器を用いない真性型 BOD としては、媒質のカ一効果によるガウスビームの自己集束を利用したもの²⁷や、光強度依存屈折率変化に伴う非線形媒質の境界面での反射率変化を利用したもの²⁸⁻³⁰などが考えられている。真性型 BOD についての理論、実験の詳細は各文献を参照されたい。

3. 光双安定素子を用いた各種素子

図3に示したさまざまな特性曲線を用いて、BOD の光回路への応用が種々考えられている。とくに、その特性の制御が容易で、素子の結合、組合せにおいて柔軟性のある混成型 BOD について可能性が検討されている^{5,31,32}。光コンピュータ用の素子として、将来、利用できるか否か判定することは困難であるが、少なくとも現在の二値論理演算を用いた計算機で使用される各種素子は、単一素子としては実現されているものが多い。提案だけの素子も、製作すれば容易に動作するものと思われる。

3.1 光記憶素子

光双安定現象において最も特徴的な履歴曲線図4(a)を用いると光記憶素子となる³³。

通常は、入力光強度を P_i に保持しておき、これに入力信号光パルスを重ねると A から B に、 P_o を瞬間に遮断すると B から A に出力状態を変えることができる³⁴。記憶素子としては、多数個の素子の集積化、集積化したときの保持入力光エネルギーが、実用上問題となろう。

3.2 光パルス整形、光リミター

微分利得特性図4(b)は、光パルスの整形に利用できる⁵。臨界入力光強度 P_c を越えないパルスは切り捨てられ、 P_c を越えたパルスは尖頭値が一定となる。また、図4(a), (b)ともに上の安定状態を用いれば、入力光

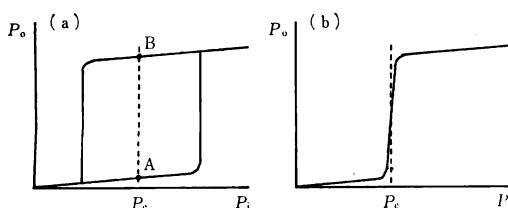


図4 光履歴曲線と微分利得特性の利用

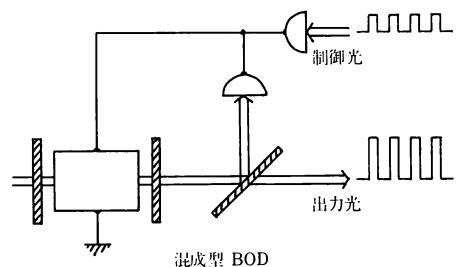


図5 光三極管

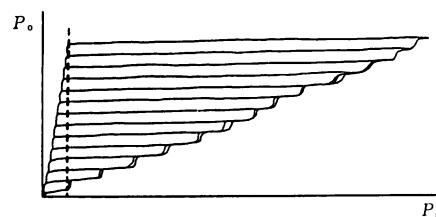


図6 多重安定性 (実験結果⁵) (©1978 IEEE)

強度のゆらぎを抑えることができるので、光源の強度安定化に利用できる³⁵。

3.3 微分増幅、光トランジスター

微分利得特性図4(b)の P_o に重量させた微小な交流入力光信号を增幅して出力光信号とすることができる。ただし、出力光エネルギーが入力光エネルギーを上回るわけではない。

図5に示すように、混成型 BOD の帰還系に、さらに制御光信号を加える。図4(b)の P_o に動作点を設定しておくと、一定入力光強度に対して制御光の強度を増幅した出力光信号強度が得られる。

光導波路方向性結合器を用いた混成型 BOD において、類似の構成でこの光トランジスター、光三極管動作が得られている³⁴。

3.4 A/D 変換素子

図6に示す多重安定性⁵は、定入力光強度を点線部に設定しておくことによって、A/D 変換素子として働く³¹。

3.5 光論理素子

微分利得特性の立ち上り部分での閾値作用を利用して図7に示すような AND ゲート、OR ゲート動作を得ることが可能である。二つの信号 P_A, P_B は、単一 BOD の一つの入力端子に重ねて入力される。

また、図8(a)のように、光双安定素子の他に、二つの入力端子を付加することによって、図8(b)に示すような NAND ゲート、NOR ゲート動作を得ることがで

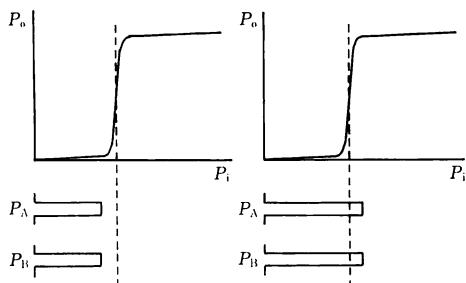


図 7 AND, OR ゲート

きる。

これらの素子の実験例はないが、素子を構成して動作させることは容易である。動作原理は異なるが、光双安定半導体レーザー³⁶⁻³⁸⁾を用いて、インバーター、負論理 AND ゲート³⁹⁾が実現されている。

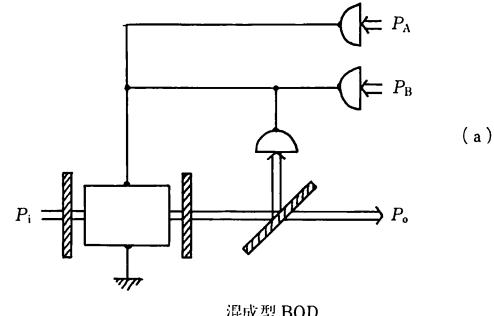
3.6 再生発振、光マルチバイブレーター、光フリップフロップ

光双安定発光ダイオードの帰還系に広帯域バンドパスフィルターを挿入した素子による自励発振・単安定動作⁴⁰⁾、マッハ・ツェンダー型光導波路干渉計を用いた二つの BOD を電気回路と同様に配置した素子による非安定、双安定、単安定動作⁴¹⁾、二つの異なる時間遅れをもった帰還電圧を印加する電気光学変調器による再生発振、単安定動作^{42,43)}、二つの BOD を直列に配し、相補的な二つの履歴曲線を利用した光フリップフロップ動作⁴⁴⁾などが得られている。

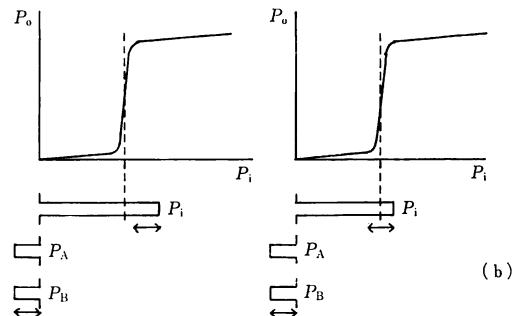
また、前述の真性型 BOD の動作とは異なるが、光による光のスイッチが可能な液晶ライトバルブ (Liquid Crystal Light Valve, LCLV) を用いた BOD により光フリップフロップ動作が得られている^{45,46)}。LCLV は光信号の二次元並列処理に適しており、最近、これを用いた光コンピュータの基本的な構成単位である加算器、シフトレジスター、積分器などの提案がなされた⁴⁷⁾。

4. スイッチングに要する時間と光エネルギー

光双安定素子が有効に用いられるためには、スイッチ



混成型 BOD



(b)

P_A	P_B	P_o	P_A	P_B	P_o
0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	1
0	1	0	0	1	1
1	1	1	1	1	1

NAND NOR

図 8 NAND, NOR ゲート

ングに要する時間と光エネルギーはできる限り小さいほどよい。スイッチング時間を決める要因の一つは、ファブリー・ペロー共振器を用いない変調方式の場合は光が素子を通過する時間、用いる場合はフィネスと共振器長で決まるモードの形成時間である。この素子寸法に依存する時間を小さくするには、素子の微小化、複合素子の集積化が必要となる。

混成型 BOD においては、導波路化による小型・微小化の試みが数多く行なわれている。導波路化によりスイッチング速度の向上が図れるばかりでなく、光学系と電気系の一体化、集積化が容易になり、帰還駆動電圧の低減化が可能となる。導波路化された素子を例挙すると、Ti 拡散 LiNbO₃ 導波路のへき開面を二つの共振器鏡とするファブリー・ペロー共振器型素子⁴⁸⁾、さらに、帰還電圧印加のための光検出素子を太陽電池で置き換えた外部電源不要の素子⁴⁹⁾、光導波路内に分岐部・合波部をもつマッハ・ツェンダー二光束干渉素子⁴¹⁾、複数個の素子の集積化に適している四端子を有する方向性結合スイッ

チ型素子^{18,50)}, LiNbO₃基板上の櫛型電極への印加電圧により周期的な屈折率分布を設けた回折格子型素子⁵¹⁾などがある。また、面発光半導体レーザーを光双安定半導体レーザーとすれば、集積化も可能で二次元情報処理などの機能を果たすこと期待できる⁵²⁾。

真性型 BODにおいては、半導体を用いたものが微小化できるほか、ファブリー・ペロー共振器の代りに分布型ブリッジ反射器(DBR)を用いる⁵³⁾, InSb 基板上にリング共振器をチャンネル型導波路として作成する⁵⁴⁾などの提案もある。

スイッチング時間を決めるもう一つの要因は、混成型 BOD では帰還電気系の応答時間、真性型 BOD では非線形媒質の応答時間である。導波路化した混成型 BOD の場合、応答の速い検出器と一体化できれば、スイッチング時間は数十 ps になると予想されている一方、半導体を用いた微小 BOD の場合は、光で誘起される屈折率変化の応答は ps のオーダーでも、数 ns 以上あるキャリアの再結合時間がスイッチング時間を律速するのは避けがたい。

一般に、各素子におけるスイッチング時間とスイッチング光強度は反比例する。混成型 BOD では、検出器の応答を速くするため微小化すると十分な起電力を生じさせるための大きな光強度が必要となるし、真性型 BOD では、応答を速くするため光路長を短くすると十分な屈折率変化を得るための大きな光強度が必要となる。

図9に、Smith ら⁵⁵⁾によるスイッチングに要する時間、光パワー、光エネルギーの限界に対する予測を示す。

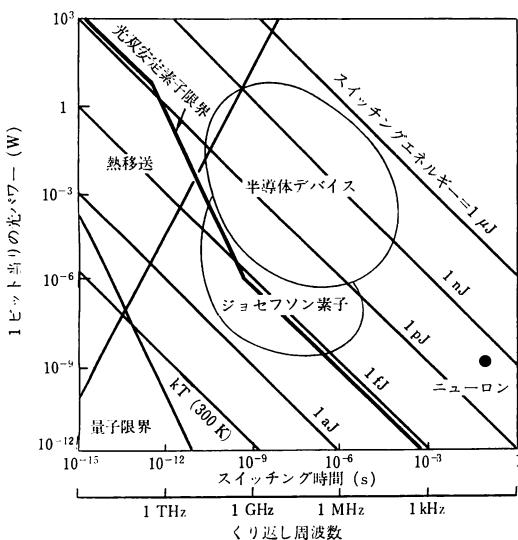


図9 光双安定素子の動作限界⁵⁵⁾ (©1981 IEEE)

す。電子デバイス中で、最も応答の速いジョセフソン素子等と比較してある。図中、「量子限界」は、スイッチング時間を t 、プランクの定数を \hbar として不確定性の要請から \hbar/t 以下のエネルギーではスイッチできないとして求められ、「熱移送」は吸収型 BOD に対して、繰り返し周波数が増大するにつれて吸収されたエネルギーによる素子の温度上昇を避けるため、使用可能な入力光パワーの上限が下がってくることを意味する。

スイッチングのための光強度を問題にしなければ、スイッチング時間 $10^{-12} \sim 10^{-14}$ s で動作可能な素子（たとえば、最近注目を集めている有機非線形光学材料中で三次の非線形性の大きい PTS など）があるが、液晶ライトバルブを用いた BOD は、応答速度は遅くても大容量の二次元集積化によって十分に補えるものと考えられている。最初の光コンピュータのひな形は、液晶ライトバルブ BOD を用いて実現される可能性がある。

5. あとがき

将来、光コンピュータが実現されたとき、そのなかで使用される可能性が少なからずある光双安定素子について紹介した。光双安定素子の詳細については、他の優れた総合報告^{9,31,45,55-58)}等もあわせて参照していただきたい。

文 献

- 1) A. Szoke, V. Danau, J. Goldhar and N. A. Kurnit: Bistable optical element and its applications. *Appl. Phys. Lett.*, **15** (1969) 376.
- 2) H. M. Gibbs, S. L. McCall and V. N. C. Venkatesan: Differential gain and bistability using a sodium-filled Fabry-Perot interferometer. *Phys. Rev. Lett.*, **36** (1976) 1135.
- 3) P. W. Smith and E. H. Turner: A bistable Fabry-Perot resonator. *Appl. Phys. Lett.*, **30** (1977) 280.
- 4) E. Garmire, J. H. Marburger and S. D. Allen: Incoherent mirrorless bistable optical devices. *Appl. Phys. Lett.*, **32** (1978) 320.
- 5) P. W. Smith, E. H. Turner and P. J. Maloney: Electrooptic nonlinear Fabry-Perot devices: IEEE J. Quantum Electron., **QE-14** (1978) 207.
- 6) P. W. Smith, E. H. Turner and B. B. Mumford: Nonlinear electrooptic Fabry-Perot devices using reflected-light feedback. *Opt. Lett.*, **2** (1978) 55.
- 7) S. Umegaki, H. Inoue and T. Yoshino: Optical bistability using a magneto-optic modulator. *Appl. Phys. Lett.*, **38** (1981) 752.
- 8) M. Okada and K. Takizawa: Optical multistability in the mirrorless electrooptic device with feedback. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-15** (1979) 82.
- 9) E. Abraham and S. D. Smith: Optical bistability and related devices. *Rep. Prog. Phys.*, **45** (1982) 815.
- 10) S. L. McCall: Instabilities in continuous-wave light propagation in absorbing media. *Phys. Rev. A*, **9**

- (1974) 1515.
- 11) E. Abraham, S.S. Hassan and R.K. Bullough: Dispersive optical bistability in a Fabry-Perot cavity. *Opt. Commun.*, **33** (1980) 93.
 - 12) R. Bonifacio and L.A. Lugiato: Optical bistability and cooperative effects in resonance fluorescence. *Phys. Rev. A*, **18** (1978) 1129.
 - 13) E. Abraham, R.K. Bullough and S.S. Hassan: Space and time-dependent effects in optical bistability. *Opt. Commun.*, **29** (1979) 109.
 - 14) R. Bonifacio and P. Meystre: Critical slowing down in optical bistability. *Opt. Commun.*, **29** (1979) 131.
 - 15) S.L. McCall: Instability and regenerative pulsation phenomena in Fabry-Perot nonlinear optical media devices. *Appl. Phys. Lett.*, **32** (1978) 284.
 - 16) L.A. Lugiato: Self-pulsing in dispersive optical bistability. *Opt. Commun.*, **33** (1980) 108.
 - 17) M. Gronchi, V. Benza, L.A. Lugiato, P. Meystre and M. Sargent, III: Analysis of self-pulsing in absorptive optical bistability. *Phys. Rev. A*, **24** (1981) 1419.
 - 18) K. Ikeda, H. Daido and O. Akimoto: Optical turbulence: chaotic behavior of transmitted light from a ring cavity. *Phys. Rev. Lett.*, **45** (1980) 709.
 - 19) H.M. Gibbs, F.A. Hopf, D.L. Kaplan and R.L. Shoemaker: Observation of chaos in optical bistability. *Phys. Rev. Lett.*, **46** (1981) 474.
 - 20) H. Nakatsuka, S. Asaka, H. Itoh, K. Ikeda and M. Matsuo: Observation of bifurcation to chaos in an all-optical bistable system. *Phys. Rev. Lett.*, **50** (1983) 109.
 - 21) F. Mitschke and N. Flugge: Chaotic behavior of a hybrid optical bistable system without a time delay. *Appl. Phys. B*, **35** (1984) 59.
 - 22) H.M. Gibbs, S.L. McCall, T.N.C. Venkatesan, A.C. Gossard, A. Passner and W. Wiegman: Optical bistability in semiconductors. *Appl. Phys. Lett.*, **35** (1979) 451.
 - 23) M. Dagenais and W.F. Sharfin: Cavityless optical bistability due to light-induced absorption in cadmium sulfide. *Appl. Phys. Lett.*, **45** (1984) 210.
 - 24) D.A.B. Miller, S.D. Smith and A. Johnston: Optical bistability and signal amplification in a semiconductor crystal: Applications of new low-power nonlinear effects in InSb. *Appl. Phys. Lett.*, **35** (1979) 658.
 - 25) A.K. Kar, J.G.H. Mathew, S.D. Smith, B. Davis and W. Prettl: Optical bistability in InSb at room temperature with two-photon excitation. *Appl. Phys. Lett.*, **42** (1983) 334.
 - 26) H.M. Gibbs, S.S. Targ, J.L. Jewell, D.A. Weinberger, K. Tai, A.C. Gossard, S.L. McCall, A. Passner and W. Wiegman: Room-temperature excitonic optical bistability in a GaAs-GaAlAs superlattice etalon. *Appl. Phys. Lett.*, **41** (1982) 221.
 - 27) I.C. Khoo: Optical bistability in nematic films utilizing self-focusing of light. *Appl. Phys. Lett.*, **41** (1982) 909.
 - 28) P.W. Smith, J.P. Hermann, W.J. Tomlinson and P.J. Maloney: Optical bistability at a nonlinear interface. *Appl. Phys. Lett.*, **35** (1979) 846.
 - 29) A.E. Kaplan: Bistable reflection of light by an electrooptically driven interface. *Appl. Phys. Lett.*, **38** (1981) 67.
 - 30) P.W. Smith, W.J. Tomlinson, P.J. Maloney and A.E. Kaplan: Bistability at an electrooptic interface. *Opt. Lett.*, **7** (1982) 57.
 - 31) P.W. Smith: Hybrid bistable optical devices. *Opt. Eng.*, **19** (1980) 456.
 - 32) M. Okada: Static and dynamic characteristics of electrooptic bistable devices. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **23** (1984) 789.
 - 33) F.A. Hopf and P. Meystre: Numerical studies of the switching of a bistable optical memory. *Opt. Commun.*, **29** (1979) 235.
 - 34) S. Tarucha, M. Minakata and J. Noda: Complementary optical bistable switching and triode operation using LiNbO₃ directional coupler. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-17** (1981) 321.
 - 35) T. Yoshino, S. Umegaki, H. Inoue and K. Kurosawa: Light intensity stabilization using highly-efficient Faraday rotator. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **21** (1982) 612.
 - 36) Y. Ogawa, H. Ito and H. Inaba: New bistable optical device using semiconductor laser diode. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20** (1981) L 646.
 - 37) Y. Ogawa, H. Ito and H. Inaba: Bistable optical device using a light emitting diode. *Appl. Opt.*, **21** (1982) 1878.
 - 38) C. Harder, K.Y. Lau and A. Yariv: Bistability and pulsations in semiconductor lasers with inhomogeneous current injection. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18** (1982) 1351.
 - 39) 奥村謙一郎, 小川洋, 伊藤弘昌, 稲場文男: 光双安定半導体レーザおよび発光ダイオードの多機能化. 電子通信学会誌, **J66-C** (1983) 393.
 - 40) 奥村謙一郎, 小川洋, 伊藤弘昌, 稲場文男: 光双安定発光ダイオードの自励発振および单安定動作. 電子通信学会誌, **J66-C** (1983) 401.
 - 41) H. Ito, Y. Ogawa and H. Inaba: Analyses and experiments on integrated optical multivibrators using electrooptically controlled bistable optical devices. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-17** (1981) 325.
 - 42) M. Okada and K. Takizawa: Optical regenerative oscillation and monostable pulse generation in electrooptic bistable devices. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-16** (1980) 770.
 - 43) M. Okada and K. Takizawa: Instability and transient responses of an electrooptic bistable device. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-17** (1981) 517.
 - 44) S. Umegaki, S. Tanaka and K. Inoue: Optical flip-flop with simple configuration of bistable optical devices. *The 13th ICO Conf. Digest* (1984) p. 446.
 - 45) S.A. Collins, Jr. and K.C. Wasmundt: Optical feedback and bistability: a review. *Opt. Eng.*, **19** (1980) 478.
 - 46) U.H. Gerlach, U.K. Sengupta and S.A. Collins, Jr.: Single spatial light modulator bistable optical matrix device using optical feedback. *Opt. Eng.*, **19** (1980) 452.
 - 47) M.T. Fatehi, K.C. Wasmundt and S.A. Collins, Jr.: Optical flip-flops and sequential logic circuits using a liquid crystal light valve. *Appl. Opt.*, **23** (1984) 2163.
 - 48) P.W. Smith, I.P. Kaminow, P.J. Maloney and L.E. Stulz: Integrated bistable optical devices. *Appl. Phys. Lett.*, **33** (1978) 24.
 - 49) P.W. Smith, I.P. Kaminow, P.J. Maloney and L.E.

- Stutz: Self-contained integrated bistable optical devices. *Appl. Phys. Lett.*, **34** (1979) 62.
- 50) A. Schnapper, M. Papuchon and C. Puech: Remotely controlled integrated directional coupler switch. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-17** (1981) 336.
- 51) J. Yumoto, H. Yajima, S. Ishihara, Y. Sekiguchi and K. Yamaya: Blocking oscillation of optical bistable devices using dc drift phenomena of LiNbO₃ waveguide. *Appl. Phys. Lett.*, **42** (1983) 780.
- 52) 伊藤弘昌:半導体レーザ. *数理科学*, 5月号 (1983) 49.
- 53) M. Okuda, K. Onaka and K. Sakai: Transient behavior of a saturable optical resonator with distributed Bragg-reflectors. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **17** (1978) 2123.
- 54) D. Sarid: Analysis of bistability in a ring-channel waveguide. *Opt. Lett.*, **6** (1981) 552.
- 55) P. W. Smith and M. J. Tomlinson: Bistable optical devices promise subpicosecond switching. *IEEE Spectrum*, June (1981) 26.
- 56) H. M. Gibbs, S. L. McCall and T. N. C. Venkatesan: Optical bistable devices: The basic components of all-optical systems?. *Opt. Eng.*, **19** (1980) 463.
- 57) D. A. B. Miller: Bistable optical devices: Physics and operating characteristics. *Laser Focus*, **18** (1982) 79.
- 58) 岡田正勝:光双安定素子. *光学*, **11** (1982) 163.