

# 解 説

## 液晶光双安定素子

滝 沢 國 治

NHK 放送技術研究所 〒157 東京都世田谷区砧 1-10-11

(1991年8月12日受理)

### Bistable Optical Devices Using Liquid Crystals

Kuniharu TAKIZAWA

Science and Technical Research Laboratories, Japan Broadcasting Corporation,  
1-10-11, Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo 157

#### 1. ま え が き

光双安定とは、入力光のある状態に対して、出力光が二つの安定な状態（例えば、高出力と低出力状態、あるいは互いに直交する二つの直線偏波状態など）を持ち、かつ入力光の前歴に応じてそのいずれかの状態に落ち着く現象である。

光双安定素子は、図1に示すように素子内部の光パワー $P$ に依存する非線形な光透過特性 $T(P)$ を持つ光素子に、光学的あるいは電気的に正帰還（帰還係数 $A$ ）を施すことにより実現される。

GibbsはFabry-Perot(FP)共振器中にNa蒸気を封入し、その光強度に依存した屈折率特性とFP共振器の帰還作用を組み合わせて、1976年に初めてすべての動作を光のみで行う純光学型の光双安定素子を実現した<sup>1)</sup>。この発表は多くの光エレクトロニクス研究者に大きな衝撃を与え、その後GaAsを用いたFPエタロンの純光学型光双安定素子<sup>2)</sup>、電気光学結晶を用いたFPエタロンあるいは電気光学光変調器と外部電気帰還回路を組み合わせたハイブリッド型光双安定素子<sup>3-5)</sup>、半導体レーザー中に光によって吸収係数が変化する領域を設けた双安定半導体レーザー<sup>6)</sup>、およびpinフォトダイオードの*i*層の一部を多重量子井戸構造にしたSEED(self-electro-optic-effect device)<sup>7)</sup>と呼ばれる素子などの発明をはじめとして、実際に多くのデバイスが提案・試作された。今日では、光双安定現象や素子を中心として国際会議の開催や論文集の発刊などが活発に行われ、光エレクトロニクスの魅力的な分野を形成しつつある。

光双安定素子がこれほど注目を集めるのは、光非線形現象としての物理的興味に加えて、この素子が光の高速性、並列性を保持しつつ、従来の光情報処理技術の壁（演算精度、汎用性）を打ち破る可能性を秘めているからである。すなわち、その非線形な光入出力特性を利用すると、光スイッチング、光メモリー、光増幅、光リミッティング、光単安定、光再生発振、光カオスなどさまざまな機能を並列に行うことが可能になる。

光双安定素子には、化合物半導体、電気光学結晶および液晶などの材料がよく用いられる。化合物半導体は発光可能で高速・小型の光双安定素子に適している。また電気光学結晶は、その光変調特性が物理的に明確であり、光不安定性や光カオスなど、より複雑な光非線形現象の解明に有効である。

しかし、これらの材料にも多くの課題がある。例えば、化合物半導体を用いたデバイスは、①2次元アレイ素子を構成する場合、極めて厳しい製作精度が要求される、②集積密度が向上するにつれ放熱が困難になる、③利用できる光の波長が非常に狭い範囲に限定される、などの問題を持つ。また電気光学結晶は、①2次元アレイ化や集積化が困難、②大きな駆動電圧を必要とする、などの課題を抱えている。

これに対し本稿の主題である液晶は、①屈折率および誘電率の異方性が極めて大きい、②弾性率が著しく小さいため、電場や磁場の印加で液晶分子の配列が容易に変化する、③大面積薄膜を容易に形成できる、④膨大な種類の液晶材料があり、その組合せや液晶分子配列を変えることにより、光学特性や電気特性を多彩に変える

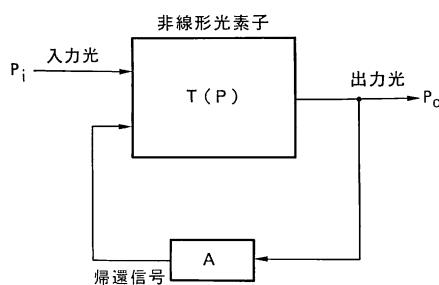


図 1 光双安定素子の等価回路

ことができる、⑤利用できる光の波長領域が広い、など他材料では容易に達成し得ない特徴を備えているため、応答は遅いが光並列処理素子として大きな可能性をもっている。

液晶光双安定素子は他の光双安定素子と同様にハイブリッド型と純光学型に分類される。両者はソ連や米国において精力的に研究され、解析および実験の両面にわたり膨大な報告がある。そこで用いられている液晶の多くはネマティック液晶であり、コレステリック液晶やスマートティック液晶を用いた光双安定素子は非常に少ない。これは、ネマティック液晶が流動性に富み、粘度が小さいことや、多彩な動作モードを有し、最も実用化が進んでいることなどによるものと思われる。したがって、本稿ではネマティック液晶を中心に、実際に試作・実験されたデバイスについて、その構成や動作原理などを紹介する。

## 2. ハイブリッド型液晶光双安定素子

液晶を用いたハイブリッド型光双安定素子は、表1に示すように、液晶光変調素子の出力光の一部を一度光電変換し、この信号を素子に接続された外部回路を介して帰還する外部帰還型素子と、光信号を素子内部で一度電気信号に変換し、外部に信号を取り出すことなく直接帰還する内部帰還型に分類される。前者は素子設計や動作確認が容易であり、後者は画像やパターン化されたデータなどの大量の情報を並列に処理するデジタル光素子に適している。このほか強誘電性液晶やコレステリック

表 1 液晶光双安定素子の分類

|          |   |         |   |       |
|----------|---|---------|---|-------|
| 液晶光双安定素子 | { | ハイブリッド型 | { | 外部帰還型 |
|          |   | 内部帰還型   |   |       |
| 純光学型     | { | 光電界効果型  |   |       |
|          |   | 熱光学効果型  |   |       |

ネマティック相転移型液晶など電気光学的な双安定性を示す液晶材料と光導電材料を組み合わせた素子もハイブリッド型の範疇に入れることができると思われるが、既に幾つかの優れた報告<sup>8,9)</sup>があるため、ここではそれ以外の液晶光双安定素子について述べる。

### 2.1 外部帰還型光双安定素子

前述したように、液晶は屈折率や誘電率の異方性が極めて大きく、液晶に電界が印加されると、その相互作用の結果として液晶分子の配列状態が変化し、光学的性質が変化する。これは液晶の電気光学効果と呼ばれ、液晶相や液晶分子の初期配向状態に応じて、多彩な光変調動作を示す。

代表的な動作モードとしては、2枚の配向層に挟まれた液晶層の液晶分子の長軸が、配向層の間で連続的にねじられたツイステッドネマティック(TN)モードがある。連続的に90°ねじれた配列を90°TNモード、180~270°ねじれた配列をスーパーTN(STN)モードと呼ぶ。また、液晶分子を基板と平行に配列(ホモジニアス配列)したセルに電圧を加え、液晶分子配列を変えてセルを通過する常光と異常光の間のリターダーションを制御する電界制御複屈折(ECB: electrically controlled birefringence)モードや、液晶と光吸収異方性をもつ2色性色素を混合したセルに電圧を加え、液晶分子配列の変化に応じて色素分子の配列を変えることによりセルの透過率を制御するゲストホスト(GH)モードなどもある。最近では、基板にほぼ垂直に配向したtilted perpendicular mode<sup>10)</sup>なども検討されている。ここでは、最もよく知られた90°TNモードを用いた外部帰還型素子の動作を述べる。

素子の構造を図2に示す。この素子の光双安定特性は、90°TN液晶セルと、2枚の偏光板(透過方向は入

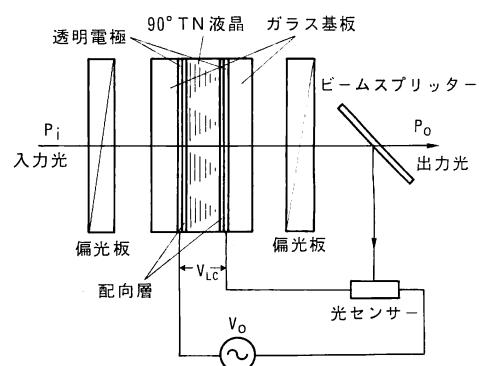


図 2 90° TN 液晶セルを用いた外部帰還型液晶光双安定素子の構成

射側の液晶分子の長軸と平行) からなる光変調素子の非線形な光透過特性と、光センサーの光導電効果の相乘的な帰還作用で発生する。

まず入力光  $P_i$  の強度が小さいときは、TN 液晶の旋光性により偏光板を透過する光  $P_o$  は少なく、光センサーのインピーダンス  $Z_{ps}$  は液晶のインピーダンス  $Z_{LC}$  よりはるかに大きい。したがって液晶と光センサーの間に印加された交流電圧  $V_0$  の大部分は光センサーに集中している。しかし、 $P_i$  の増加に伴って  $P_o$  が増大すると、光導電効果により  $Z_{ps}$  は低下する。その結果、液晶層に印加される交流電圧  $V_{LC}$  が増大する。 $V_{LC}$  の増大に伴い、液晶分子は TN 配列からホメオトロピック配列(液晶分子は基板に対し垂直に配列)に近付き、 $P_o$  はさらに増大する。すなわち、 $P_i$  増加  $\rightarrow P_o$  増加  $\rightarrow Z_{ps}$  低下  $\rightarrow V_{LC}$  増加  $\rightarrow P_o$  増加、という一連の正帰還作用により、 $P_i$  があるレベル ( $P_u$ ) を越えると、 $P_o$  は低レベルから高レベルにジャンプする。

次に  $P_i$  が減少するとき、 $P_o$  は高レベル状態にあるため、 $P_i$  が  $P_u$  まで減少しても大きな正帰還が作用しており、 $P_o$  は高レベルに保持される。 $P_i$  がさらに減少し立下りのしきい値に到達すると、 $P_o$  は低レベルにジャンプする。

TN 液晶セルと偏光板からなる光変調器の光透過特性を  $T(V_{LC})$  とし、 $P_i=0$  のときに液晶セルに印加される電圧を  $V_D$  とすると、光双安定素子の動作は、

$$P_o = \alpha P_i T(V_{LC}) \quad (1)$$

$$V_{LC} = V_D + k P_o \quad (2)$$

で表される。ただし、 $\alpha$  は図2のビームスプリッターの透過率である。また光センサーの光導電効果による電圧変化は、 $P_o$  に比例するものとする( $k$  は比例定数)。上記2式を整理すると、

$$P_o / P_i = \alpha T(V_{LC}) \quad (3)$$

$$P_o / P_i = (V_{LC} - V_D) / k P_i \quad (4)$$

となり、両式を同時に満足する  $P_o$  対  $P_i$  の関係を求めれば、外部帰還型素子の静的光双安定特性を知ることができる。

TN 液晶の  $T(V_{LC})$  を正確に記述することは難しいが、図3に示すように  $T(V_{LC})$  の実測値(破線)と(4)式(実線)の交点を図式的に求めれば、光双安定素子の光入出力特性を容易に得ることができる。 $\alpha \approx 1$  としたときの  $P_o$  対  $P_i$  特性の一例を図4に示す。このほか  $P_o$  対  $V_0$  特性や  $P_o$  対  $f(V_0)$  特性にも光双安定性があることが知られており、これらを利用して AND, OR, NAND などの2値論理演が試算みられている<sup>11)</sup>。

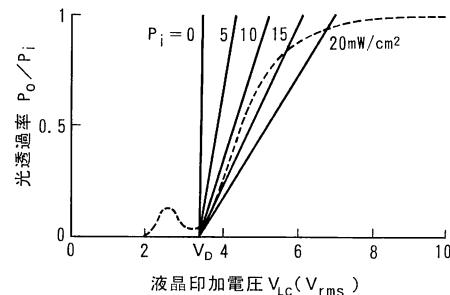


図3 液晶光双安定素子の図式解法

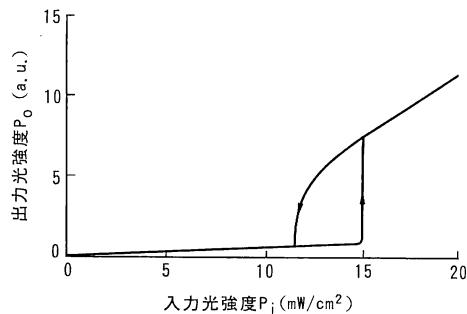


図4 液晶光双安定素子の光入出力特性(計算結果)

ECB 液晶や GH 液晶などを用いた光双安定素子の光入出力特性についても、(3)式の  $T(V_{LC})$  を変えるだけでその動作を容易に知ることができる。特に ECB モードで動作する光変調素子は、周期的な光透過特性を示すため、これを用いた光双安定素子は、多重光双安定特性や光メモリ特性など興味深い動作を示す<sup>12,13)</sup>。

また最近は、応答の遅いネマティック液晶の代わりにポリマー分散液晶(polymer-dispersed liquid crystal)を用いて、高速化を図ることも試みられている<sup>14)</sup>。

これまで述べた外部帰還型素子は、構成が簡単で素子動作を確認するには都合が良いが、光変調素子と光センサーを外部回路を介して接続するため、大規模な集積化には本質的に適していない。そこで画像やデータパターンを並列処理することのできる空間光変調素子を用いて光情報を並列に帰還し、大量のデータを一挙にデジタル処理する2次元の液晶光双安定素子が考案されている<sup>15-17)</sup>。

その一例として、液晶ライトバルブを用いた2次元光双安定素子の構成を図5に示す。液晶ライトバルブは、45° TN 液晶、誘電体多層膜ミラー、光吸収層、CdS 光導電層を順次積層し、その両側に透明電極を持つ構造であるため、液晶層と光センサーを画素ごとに結線することなく、光導電層に書き込まれた光情報を電界強度の空間的变化として液晶層に伝えることができる。この素子と

図2の素子は液晶の動作モードが異なるだけで基本的に同一であり、その動作は容易に理解されるであろう。

また類似のデバイスとして、図6に示すように液晶層とCdS光導電層を合わせて1画素とし、これを2次元アレイ化して出力光の一部をミラーで光導電層に帰還する素子(画素数8×8)<sup>16)</sup>も試作され、中間調をもつ2次元パターンの2値化や光並列論理演算などが試みられている。

光双安定素子の2次元化は、このデバイスが発明されたときからの大きなテーマの一つであり、これらの2次元液晶光双安定素子が提案された時点では、大きな期待が寄せられたが、①出力光パターンを光学系を介して帰還することの煩雑さや非実用性、および、②情報量が増大すると液晶層と光導電層に入射する二つのパターンの位置合わせが困難になる、などの問題があり、その後これららの研究は下火になった。

## 2.2 内部帰還型光双安定素子

これらの問題を解決するため、外部帰還光学系を持たない内部帰還型の2次元液晶光双安定素子が研究されている<sup>18-26)</sup>。Kompanetsらは、1981年、GH液晶とGaAs系光導電材料を積層した内部帰還型の2次元光双安定素子を初めて提案した<sup>18,19)</sup>。この素子は、GH液晶

層から入射する光の強度とGH液晶とGaAs系光導電層の界面での反射光強度との間で、図4に類似した光双安定特性を示し、外部帰還光学系を要しないコンパクトな構成であったが、光損失が大きい、低解像度、応答が遅い、低コントラストなどの問題があり、並列処理に足る性能を得ることはできなかった。

その後電気光学結晶と光導電材料を積層する内部帰還型素子<sup>20,21)</sup>も提案されたが、非常に大きな駆動電圧を必要とする、解像度が低い、などの理由で試作されなかった。

筆者らはKompanetsらの構成をさらに発展させ、基礎的段階ながら実時間で画像をディジタル並列処理できる新しい双安定型空間光変調素子(BSLM:bistable spatial light modulator)<sup>23-26)</sup>を提案・試作した。ここではこの素子の構成や動作について詳しく述べてみたい。

代表的なBSLMは図7に示すように、液晶、偏光フィルム、半透明な光導電層および透明電極で構成される。液晶の配列や入射光の偏波状態を変えると、液晶の光透過特性はさまざまに変化し、それに応じてBSLMの光入出力特性もいっそう多様化する。

ここではまず90°TN液晶セルとBi<sub>12</sub>SiO<sub>20</sub>(BSO)光導電性結晶からなるBSLMについて簡単に述べる。BSO結晶は非常に大きな暗抵抗( $10^{13}\sim10^{14}\Omega\text{cm}$ )を有し、近紫外光から青色光領域にわたり大きな光導電効果を示す。特に、BSO結晶に光照射したときに発生する光电流の波長依存性は、青色光領域に顕著な肩特性を示すため、波長480~520 nm付近の光を入射すれば、出力光をそれほど減衰させることなく、光信号処理を行うことができる。TN液晶とBSO結晶の間に挿入された光偏フィルムは20 μmの厚さを有し、入射側の液晶分子の

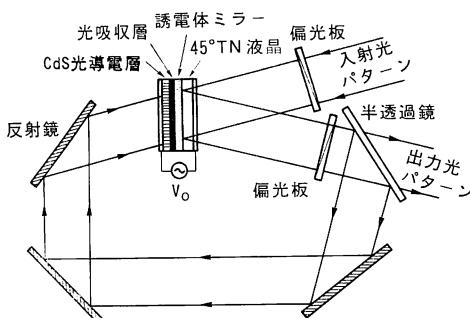


図5 液晶ライトバルブを用いた2次元光双安定素子の構成

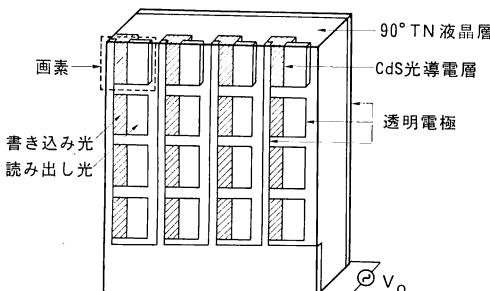


図6 2次元アレイ化された画素をもつ液晶空間光変調素子。読み出し光の一部を光導電層に正帰還すれば光双安定性を示す。

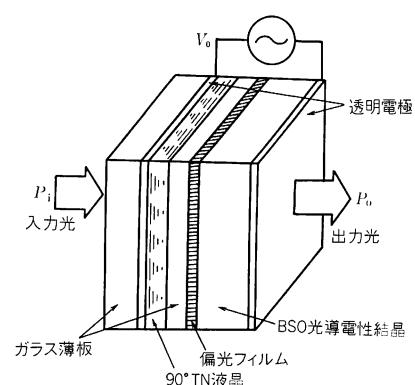


図7 BSLMの構成

長軸と平行な方向に直線偏波した光を通す役割をもつ。

BSLM の動作は前出の外部帰還型素子とほぼ同一であり、2.1 節の記述より容易に類推することができよう。

Ar レーザー光 (488 nm) を入力光としたときの BSLM の光入出力特性の一例を図 8 に示す。立上り、立下りしきい値や履歴ループの大きさは、素子の駆動電圧  $V_0$ 、その周波数  $f$  あるいは BSO 結晶側から入射するバイアス光  $P_B$  により制御される。

この  $P_0$  対  $P_i$  特性と同様に、 $P_0$  対  $V_0$  特性、 $P_0$  対  $f$  特性、 $P_0$  対  $P_B$  特性なども履歴特性を示すことが明らかにされている<sup>25)</sup>。特に  $P_0$  対  $P_B$  特性 (図 9) では 10 dB の光信号増幅動作が観測されており、2 次元光トランジスタに応用できる可能性がある。また  $P_0$  対  $V_0$  特性は単純マトリックス電極駆動で画像メモリ機能を BSLM に付加できることを示唆しており、ディスプレイへの応用が考えられる。

さらに液晶分子の配列方向、入力光の偏波方向あるいは偏光フィルムの透過方向を変えると、この素子はいっ

そうバラエティに富んだ特性を示す。例えば、図 7 の構成において液晶配列はそのままで、偏光フィルムを 45° および入力光の偏波面を 90° それぞれ回転させると、 $P_0$  対  $P_i$  特性は印加電圧の大きさに応じて、直線型、リミッティング、履歴特性などを示す<sup>26)</sup>。また、 $P_0$  対  $P_B$  特性は、反転特性、周期特性および履歴特性などを示す。このほか入力光の偏光方向を変えると複数の光双安定状態や光多安定状態などをもつ光入出力特性を実現することができる<sup>24)</sup>。

BSLM の非線形特性を利用するとさまざまな光並列画像処理を行うことが可能になる。例えば BSLM は入力光に対して半波整流的な出力光特性 (図 8) を示すため、しきい値レベル以下の画像は低レベルに圧縮され、しきい値を越すレベルを持つ画像は、そのまま中間調が再現される。一例として、明るさの異なる画像を BSLM に入射し、駆動電圧  $V_0$  を変えてしきい値以上のレベルをもつ画像を抽出した実験結果を図 10 に示す。同図の出力画像および出力光強度分布は、BSLM の出力光を TV カメラで撮像し、モニターおよびオシロスコープで観測したものであり、 $V_0$  を低電圧から高電圧に変えるだけで、入力光レベルの高い順に画像を半波整流的に選択できることを示している<sup>23)</sup>。さらに、液晶テレビの動画像を BSLM に入射し、しきい値以上のレベルを持つ画像のみをリアルタイムで選択する実験も行われ、良好な結果が得られている。

また 2 色性色素と 90° TN 液晶を混合した GHTN 液晶と光導電性結晶を組み合わせて偏光フィルムを省略した BSLM も試作されている。光導電性結晶として Bi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub> 結晶 (厚さ 1.7 mm) と GHTN 液晶 (厚さ

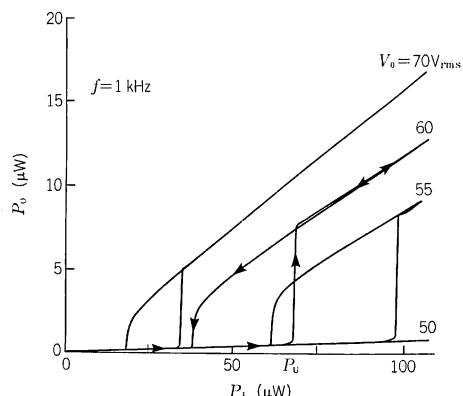


図 8 BSLM の光入出力特性 (実験結果)

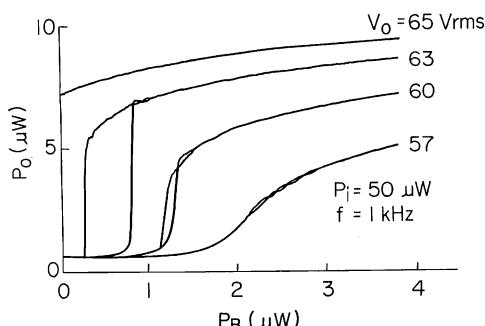


図 9 BSLM のバイアス光 ( $P_B$ ) 対出力光 ( $P_0$ ) 特性 (実験結果)

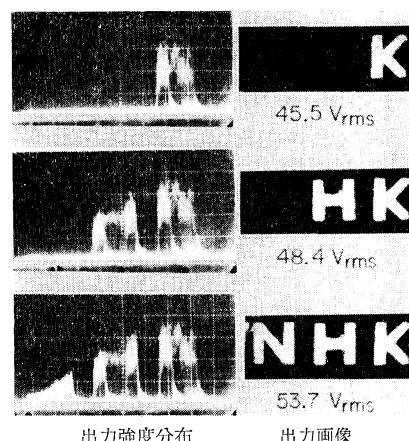


図 10 BSLM で中間調画像を非線形処理した実験結果

$10 \mu\text{m}$ ) からなる BSLM<sup>27)</sup> では、 $16 \text{l}p/\text{mm}$  の限界解像度が得られている。この値は結晶を薄板化することで、大幅に改善されるであろう。この素子を用いて、A, B, A and B, A or B などの肯定系論理演算、 $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ ,  $A \text{ and } B$ ,  $A \text{ or } B$  などの否定系演算および中間調画像の2値化やその反転処理などが実現されている。

### 3. 純光学型光双安定素子

純光学型液晶光双安定素子は、出力光を光電変換することなく液晶と入力光との相互作用だけで非線形特性を示すデバイスであり、光電界が液晶に直接作用するタイプと、光が液晶や色素に吸収されたときに生じる熱エネルギーにより液晶の配列や屈折率が変化して光双安定状態を示すタイプに分類される。ここでは表1に示すように便宜上、前者を光電界効果型および後者を熱光学効果型と呼ぶことにする。

#### 3.1 光電界効果型光双安定素子

液晶は他の材料に比べて光学的および電気的異方性が際立って大きいため、比較的弱い光で液晶分子の配列が変化し、大きな屈折率変化が得られる。特にネマティック液晶は粘度が小さいため  $100 \text{ W/cm}^2$  程度の弱い照射光で大きな屈折率変化 ( $0.01 \sim 0.1$ ) を示す<sup>28)</sup>。これは光電界による液晶分子の再配列 (optical field-induced molecular reorientation) と呼ばれ、Zolot'ko ら<sup>29)</sup> や Durbin ら<sup>30)</sup>の報告をはじめ、ネマティック液晶に関して今までに詳細な研究が行われている<sup>31,32)</sup>。

この液晶分子の再配列機構により、入力光ビームが不均一な空間分布 (例えばガウス分布) をもつ場合、液晶に入射した発散光がある強度を越えると集束する self-focusing 現象や、集束光がある強度に達すると発散する self-defocusing 現象などが発生する<sup>33,34)</sup>。これらの現象は強い非線形特性を有するため、液晶を透過した光の一部を半透過鏡などで帰還すると、光双安定現象が起くる。

Self-focusing 現象を利用した光双安定は、1981年 Bjorkholm らにより Na 蒸気に  $2.6 \text{ kW/cm}^2$  の色素レーザー光を集束することにより、初めて実現された<sup>35)</sup>。Khoo らはこの方法を液晶を取り入れ、図 11 に示すような光学系を用いて光双安定現象を確認した<sup>33)</sup>。この実験に用いられた 5 CB (4-cyano-4-pentylbiphenyl) は大きな屈折率異方性と正の誘電率異方性を持つスタンダードなネマティック液晶である<sup>28)</sup>。同液晶はホメオトロピック配列され、液晶分子長軸と入射光の電界方向とが交差するように配置されている。また液晶セルはレンズ

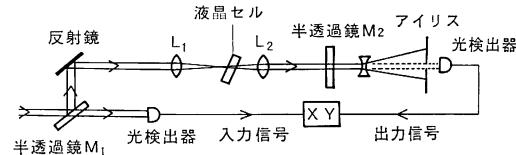


図 11 液晶の self-focusing 現象を利用した光電界効果型光双安定素子の構成

$L_1$  の焦点の後方に設置され、発散光が液晶セルに入射するようになっている。

このデバイスの動作は次のとおりである。入射光強度が弱いとき、レンズ  $L_2$  を通過する光は発散光となり、半透過鏡  $M_2$  で反射して液晶セルに帰還する光量は少ない。したがって光軸付近の光強度は低レベル状態である。次に入射光量が増加して self-focusing 現象が発生すると、 $L_2$  を通過する光は平行ビームに近くなり、 $M_2$  にはほぼ垂直に入射するため、液晶セルに帰還する光量は増大する。この帰還光はさらに集束効果を促し、いっそう強い光が  $M_2$  に入射する。この正帰還作用により、図 8 と同様の反時計回りの光双安定状態が発生する。

Bjorkholm らの実験とほぼ同一の構成で、液晶の self-defocusing 現象を利用した光パワーリミッターを試作した報告もある<sup>32)</sup>。ただし、この素子の立上り応答時間は  $50 \text{ MW/cm}^2$  のパルス光で約 70 ns と見積られており、光電界効果 (応答時間は 1~2 秒) よりも次に述べる熱光学効果が支配的であると考えられる。

#### 3.2 热光学効果型光双安定素子

热光学効果を利用して代表的な光双安定素子としては、液晶層を誘電体多層膜や半透明な金属薄膜で挟んだデバイス (図 12) がある<sup>36-39)</sup>。この素子では 2 枚の薄膜の FP 共振効果と、出射側の金属薄膜の光吸収により生じる熱エネルギーで液晶の屈折率が変化する熱光学効果とが相乗的に作用し、前出の光電界効果型素子に比べて格段に少ない光パワーで数桁以上速い応答を示す。

例えば、ホモジニアス配列した 5 CB 液晶 (厚さ 25  $\mu\text{m}$ ) の場合、波長 633 nm の常光線および異常光線は、それぞれ  $2.6 \text{ mW}/25 \mu\text{m}^2$  (光ビーム直径) および  $0.38 \text{ mW}/25 \mu\text{m}^2$  のパワーで数十 ms 前後の速度でスイッチングされる。両光のパワーの差は、液晶の常屈折率  $n_c$  と異常屈折率  $n_e$  のもつ熱光学係数の違い (室温では  $\partial n_c / \partial T = 4 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ,  $\partial n_e / \partial T = -2 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ) に基づくものである<sup>37)</sup>。

熱光学係数はネマティック-アイソトロピック (N-I) 相転移温度に近付くほど大きくなるため、相転移温度の近傍に液晶セル温度を設定すれば、光パワーを大幅に軽

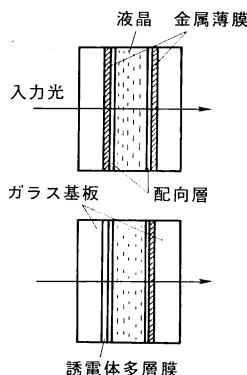


図12 热光学効果型液晶光双安定素子の構成

減することが可能になる。ちなみに上記の5CB液晶の場合、セル温度34.7°Cのとき、 $24\ \mu\text{W}/25\ \mu\text{m}^2$ の光パワーでスイッチング(速度10 m/s)が行われている<sup>39)</sup>。

熱光学効果を利用したFP型光双安定素子としては、このほか90°TN液晶を用いて互いに直交する二つの直線偏光状態の間でスイッチングする素子<sup>37)</sup>、スマートティックA液晶のSA-I相転移を利用する素子およびFP共振器中に液晶セルを傾けて挿入し、さまざまなビームパターンを発生させながら光双安定状態を示す素子<sup>40)</sup>などが提案・試作されている。余談ではあるが、図12に示すFP共振器中の液晶の代わりに水、アルコールあるいはシャンパンやウィスキーなどを注入しても、かなり弱い光パワーで光双安定現象が発生することが実験で確かめられている<sup>36)</sup>。

また、ホメオトロピック配列したネマティック液晶層を誘電体多層膜で挟んだFP共振器構造で、多安定動作や自励発振を実現した報告<sup>41)</sup>もある。自励発振は熱光学効果に伴う液晶屈折率の減少と光電界効果による屈折率増加が、それぞれ異なる時定数で生じることを巧みに利用したものであり興味深い。液晶光双安定素子の不安定性に関しては、Arakelyanの詳細な報告<sup>42)</sup>がある。

FP共振器構造を持たないデバイスとしては、ポリマー分散液晶に2色性色素を混合し、色素の吸収率異方性とネマティック液晶のN-I相転移現象を利用して、光をスイッチングする素子<sup>43)</sup>や、ネマティック液晶と2色性色素をホモジニアス配向したGH液晶に、臨界角よりわずかに大きい角度で光ビームを入射して光強度に応じて全反射状態から透過状態にスイッチングする素子<sup>44)</sup>などが提案されている。このほかスマートティックA液晶で代表されるレーザードレス方式の投射型ディスプレイ用光変調素子(レーザーで局所的に液晶を加熱冷却することによりSA $\leftrightarrow$ N $\leftrightarrow$ I相転移を起こし、光を透

過/散乱するデバイス)も光双安定性を示すが、ここでは省略した。興味のある読者は文献45)を参照されたい。

#### 4. む　す　び

液晶光双安定素子をハイブリッド型と純光学型に分類し、それぞれ代表的なデバイスについて構造と動作原理を中心に簡単に解説した。本稿では、液晶光双安定素子の光コンピューティングや光画像処理技術への応用や、強誘電性液晶を用いた空間光変調素子との比較などについても論ずべきであったが、紙面の都合で割愛せざるを得なかった。機会があれば、これらの話題についてもふれてみたい。

液晶は非発光材料であり応答も遅いなどの欠点はあるが、光、熱、電界、磁界などとの相互作用が極めて大きく、かつ大面積薄膜を容易に形成できるという大きな魅力も有している。化合物半導体や電気光学材料等を用いた光双安定素子の2次元アレイ化の見通しが得られない現在、光画像を並列にディジタル処理できる液晶光双安定素子の存在意義は大きいと言えよう。

液晶光双安定素子の多くは基本動作の確認が行われているにすぎないが、今後、光コンピューティング技術への具体的なアプローチ、実用的な動画像処理あるいはディスプレイへの応用などを試みることが重要になるとと思われる。

#### 文　献

- H. M. Gibbs, S. L. McCall and T. N. C. Venkatesan: "Differential gain and bistability using a sodium-filled Fabry-Perot interferometer," *Phys. Rev. Lett.*, **36** (1976) 1135-1138.
- H. M. Gibbs, S. L. McCall, T. N. C. Venkatesan, A. C. Gossard, A. Passner and W. Wiegmann: "Optical bistability in semiconductors," *Appl. Phys. Lett.*, **35** (1979) 451-453.
- P. W. Smith and E. H. Turner: "A bistable Fabry-Perot resonator," *Appl. Phys. Lett.*, **30** (1977) 280-281.
- E. Garmire, J. H. Marburger and S. D. Allen: "Incoherent mirrorless bistable optical devices," *Appl. Phys. Lett.*, **32** (1978) 320-321.
- M. Okada and K. Takizawa: "Multi-functional electrooptic device with feedback," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **18** (1979) 133-137.
- H. Kawaguchi and G. Iwane: "Bistable operation in semiconductor lasers with inhomogeneous excitation," *Electron. Lett.*, **17** (1981) 167-168.
- D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, W. Wiegmann, T. H. Wood and C. A. Burrus: "Novel hybrid optically bistable switch: the quantum well self-electro-optic effect device," *Appl. Phys. Lett.*, **45** (1984) 13-15.

- 8) 岩城忠雄：“強誘電性液晶ライトバルブとその応用”，光学，**19** (1990) 295-301.
- 9) 黒川隆志：“空間光変調器と並列光演算”，光学，**19** (1990) 417-422.
- 10) R. D. Sterling, R. D. T. Kolste, J. M. Haggerty, T. C. Borah and W. P. Bleha : “Video-rate liquid-crystal light-valve using an amorphous silicon photodiode,” SID 90 Int. Symp. Dig., (1990) pp. 327-329.
- 11) T. Nose and S. Sato : “Optical and electrical logic operations by a liquid crystal bistable optical device,” Int. Top. Meet. Opt. Computing (Kobe) Dig., (1990) pp. 189-190.
- 12) 間多均：“光多値論理デバイス：2次元化の検討”，光学，**16** (1987) 491-496.
- 13) O. G. Sarbei, A. S. Sibashvili and E. K. Frolova : “Multistability in an optoelectronic liquid-crystal system,” Sov. J. Quantum Electron., **19** (1989) 698-700.
- 14) J. Y. Kim and P. Palffy-Muhoray : “Optical power limiting and bistability in polymer-dispersed liquid-crystal films with linear feedback,” J. Appl. Phys., **66** (1989) 362-364.
- 15) U. K. Sengupta, U. H. Gerlach and S. A. Collins : “Bistable optical spatial device using direct optical feedback,” Opt. Lett., **3** (1978) 199-201.
- 16) R. A. Athale and S. H. Lee : “Bistability and thresholding by a new photoconductor-twisted nematic liquid crystal device with optical feedback,” Appl. Opt., **20** (1981) 1424-1432.
- 17) M. A. Vorontsov, D. V. Prudzhe and V. I. Shmal'gauzen : “Analysis of the spatial bistability in a system with optical feedback,” Radiofizika, **32** (1989) 715-721.
- 18) I. N. Kompanets, A. V. Parfenov and Y. M. Popov : “Bistable properties of spatial light modulator with internal feedback,” Opt. Commun., **36** (1981) 415-416.
- 19) I. N. Kompanets, A. V. Parfenov and Y. M. Popov : “Multistability in optical transmittance of spatial light modulators with internal feedback,” Opt. Commun., **36** (1981) 417-418.
- 20) A. P. Yakimovich : “Threshold light modulator for analog-to-digital image conversion,” Sov. J. Quantum Electron., **14** (1984) 464-467.
- 21) A. P. Yakimovich : “Control of the form of the characteristic curve of light modulators by internal electrooptic feedback,” Sov. J. Quantum Electron., **15** (1985) 704-706.
- 22) B. Ya. Zel'dovich and N. V. Tabiryan : “Optical bistability associated with orientational nonlinearity of liquid crystals,” Sov. J. Quantum Electron., **14** (1984) 1599-1604.
- 23) K. Takizawa, M. Okada, H. Kikuchi and T. Aida : “Bistable spatial light modulator using liquid crystal and  $\text{Bi}_2\text{SiO}_5$  crystal layers,” Appl. Phys. Lett., **53** (1988) 2359-2361.
- 24) 滝沢國治：“液晶空間光変調素子”，O plus E, No. 136 (1991) 91-100.
- 25) 滝沢國治, 菊池宏, 藤掛英夫, 岡田正勝：“液晶を用いた並列ディジタル画像処理用素子：双安定型空間光変調素子”, TV 技報, **15** (1991) 25-30.
- 26) 滝沢國治：“液晶空間光変調素子”, 第7回光波センシング技術研究会論文集, LST 7-9 (1991) pp. 59-66.
- 27) H. Fujikake, K. Takizawa, H. Kikuchi and M. Okada : “Bistable spatial light modulator using guest-host liquid crystal and  $\text{Bi}_2\text{GeO}_5$  layers,” Int. Top. Meet. Opt. Computing (Kobe) Dig. (1990) pp. 25-26.
- 28) I. C. Khoo and Y. R. Shen : “Liquid crystals: nonlinear optical properties and processes,” Opt. Eng., **24** (1985) 579-585.
- 29) A. S. Zolot'ko, V. K. Kitaeva, N. Kroo, N. N. Sobolev and L. Chillag : JETP Lett., **32** (1980) 158-160.
- 30) S. D. Durbin, S. M. Arakelian and Y. R. Shen : “Laser-induced diffraction rings from a nematic-liquid-crystal film,” Opt. Lett., **6** (1981) 411-413.
- 31) H. G. Winful : “Nonlinear reflection in cholesteric liquid crystals: mirrorless optical bistability,” Phys. Rev. Lett., **49** (1982) 1179-1182.
- 32) J. J. Wu and S.-H. Chen : “Electric-controlled intrinsic optical bistability in nematic liquid crystals,” J. Appl. Phys., **66** (1989) 1065-1070.
- 33) I. C. Khoo : “Optical bistability in nematic films utilizing self-focusing of light,” Appl. Phys. Lett., **41** (1982) 909-911.
- 34) S. T. Wu : “Voltage-biased liquid crystal optical power limiter,” Proc. SPIE, **648** (1986) 108-112.
- 35) J. E. Bjorkholm, P. W. Smith and W. J. Tomlinson : “Optical bistability based on self-focusing,” Opt. Lett., **6** (1981) 345-347.
- 36) A. D. Lloyd, I. Janossy, H. A. Mackenzie and B. S. Wherrett : “CW optical bistability in non-absorbing liquids and liquid crystals using HeNe and diode lasers,” Opt. Commun., **61** (1987) 339-344.
- 37) A. D. Lloyd : “Polarisation Optical bistability in nematic liquid crystals,” Opt. Commun., **64** (1987) 302-306.
- 38) C. Somerton and D. L. Tunnicliffe : “Observation of optical bistability in smectic A liquid crystals,” Opt. Commun., **65** (1988) 143-145.
- 39) A. D. Lloyd and B. S. Wherrett : “All-optical bistability in nematic liquid crystals at  $20 \mu\text{W}$  power levels,” Appl. Phys. Lett., **53** (1988) 460-461.
- 40) M. Kreuzer, W. Balzer and T. Tschudi : “Formation of spatial structures in bistable optical elements containing nematic liquid crystals,” Appl. Opt., **29** (1990) 579-582.
- 41) M.-M. Cheung, S. D. Durbin and Y. R. Shen : “Optical bistability and self-oscillation of a nonlinear Fabry-Perot interferometer filled with a nematic-liquid-crystal film,” Opt. Lett., **8** (1983) 39-41.
- 42) S. M. Arakelyan : “Optical bistability, multistability, and instabilities in liquid crystals,” Sov. Phys. Usp., **30** (1987) 1041-1064.
- 43) F. Simoni, G. Cipparrone and C. Umeton : “Mirrorless all-optical bistability in polymer dispersed liquid crystals,” Appl. Phys. Lett., **57** (1990) 1949-1951.
- 44) I. C. Khoo : “Optical-thermal induced total internal reflection -to- transmission switching at a glass-liquid crystal interface,” Appl. Phys. Lett., **40** (1982) 645-647.
- 45) 日本学术振興会第142委員会編：“液晶デバイスハンドブック”(日刊工業新聞社, 1989) pp. 372-378.