



強誘電性液晶ライトバルブとその応用

岩城 忠雄

セイコー電子工業(株) 〒271 松戸市高塚新田 563

(1989年12月28日受理)

Ferroelectric Liquid Crystal Light Valve and Its Applications

Tadao IWAKI

Research and Development Department, Seiko Instruments Inc.,
563, Takatsukashinden, Matsudo 271

1. はじめに

近年、光情報処理、とくに、光コンピューティングの研究が活発になるにつれて、それに用いられる空間光変調器の研究も盛んに行われるようになった¹⁾。空間光変調器は、その名のごとく光の空間的な質を能動的に変えるために用いられるデバイスであり、光の空間的並列性を最大限利用して高速に大容量の情報を処理しようとする光コンピューティングには欠かすことのできないキーデバイスの一つである。

空間光変調器の研究動向としてとくに最近注目されるものの一つは、強誘電性液晶を用いた光書込み型空間光変調器すなわち強誘電性液晶ライトバルブである。

従来から、液晶を光変調材料に用いた液晶ライトバルブは数多く研究されてきた。これらの液晶ライトバルブに用いられてきた代表的な液晶材料として、ツイストネマチック液晶 (TN 液晶) やスメクチック A 液晶 (SmA 液晶) があげられる。TN 液晶は取扱いが容易なうえ、階調表現が可能であるため、最も早くから用いられてきた光変調材料である²⁾。これを用いた代表的な液晶ライトバルブとして、ヒューズ・エアクラフト社の LCLV が有名である³⁾。また、SmA 液晶を用いた液晶ライトバルブは、きわめて高い解像度と2値メモリ性をもっているため、レーザースキャナ等を情報入力手段として用いたプロジェクタ等のディスプレイ装置、画像メモリあるいはホログラムメモリとしての応用を目指した研究が行われてきた⁴⁾。しかし、これらの液晶ライトバルブは、いずれも応答速度が遅いため、高速大容量情報処理を

めとした光情報処理で用いるには不向きであった。

これに対して、強誘電性液晶ライトバルブは、応答速度が速く、2値メモリ性を有しているうえに、解像度とコントラストを従来の液晶ライトバルブよりも高くできるため、光情報処理、とくに、光コンピューティングに適用するのにきわめて適した空間光変調器といえよう。

ここでは、強誘電性液晶ライトバルブの特徴およびその開発動向と、光コンピューティングへの応用について解説する。

2. 強誘電性液晶ライトバルブの特徴

強誘電性液晶ライトバルブの代表的な構造を図1に示す。強誘電性液晶ライトバルブは、光アドレス材料として光導電体を用い、光変調材料として強誘電性液晶を用いている。これらの多くは誘電体ミラーを組み合わせた反射型のものを目指した研究がなされているが、公表されているものは誘電体ミラーを有していないものも多い。このデバイスは従来のものに比べて、光変調材料である強誘電性液晶の層が $1\sim 2\mu\text{m}$ と薄いことが特徴となっている。また、光導電体としても単結晶 Si, アモルファス Se, CdSe, GaAs, アモルファス Si などさまざまな材料が検討されている⁵⁻⁷⁾。

強誘電性液晶ライトバルブの簡略化した等価回路を図2に示す。これまで発表されている液晶ライトバルブの多くは、この等価回路で動作説明ができる。強誘電性液晶ライトバルブを動作させるには、通常、駆動電圧として交流電圧と直流電圧を重畳させたものを用いるか、パルス状電圧を用いる。光導電体に光が照射されていない

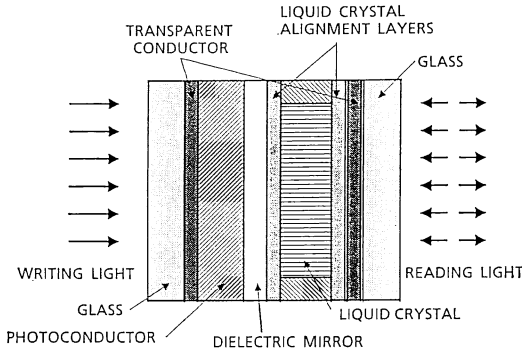


図1 液晶ライトバルブの一般構成

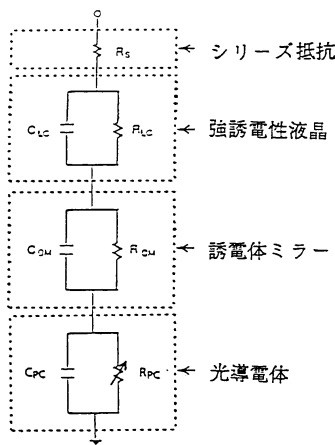


図2 液晶ライトバルブの等価回路

ときは、光導電体は高抵抗状態にある。したがって、強誘電性液晶に分圧される電圧は、その反転閾値電圧よりも低くなっているため、液晶分子の配向状態は変化しない。ところが、光導電体に書き込み光が照射されると、光導電体の光が照射された部分の抵抗は大きく低下する。そのため、駆動電圧のほとんどが強誘電性液晶に分圧されるようになり、その値は液晶分子を反転させるのに必要な閾値電圧を越えるようになる。このようにして、光導電体に書き込み光が照射された部分だけ液晶分子の反転が起こり、強誘電性液晶ライトバルブには光情報が並列的に記録できるわけである。このように、強誘電性液晶ライトバルブを製作するときは、光導電体、誘電体ミラーおよび強誘電性液晶のインピーダンス整合が重要となってくる¹⁾。

また、図3に示すように、強誘電性液晶ライトバルブは、駆動電圧と光反射率の間に双安定ヒステリシスをもつ。これは、強誘電性液晶の配向状態が2状態しかとれないためである。この双安定ヒステリシスはきわめて角

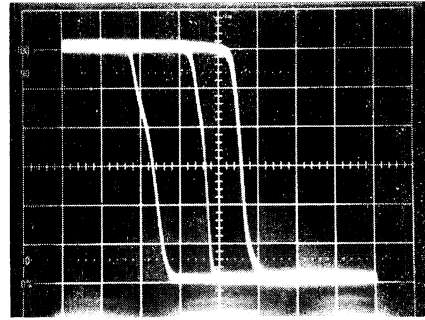


図3 強誘電性液晶ライトバルブの双安定ヒステリシス (縦軸：光反射率、横軸：印加電圧)

型性が良いため、強誘電性液晶ライトバルブには2値画像記録しか行えない⁸⁾。

強誘電性液晶ライトバルブの最も大きな特徴の一つは、その高速応答性にある。応答速度は、光アドレス時間、立上り応答時間(遅延時間+立上り時間)、処理時間、立下り応答時間(遅延時間+立下り時間)によって規制される。光アドレス時間は、何秒間光を照射すれば液晶を反転させるのに十分な電圧が液晶に印加されるようになるかという時間であり、光アドレス材料の電荷易動度、膜厚および印加電圧と照射光強度によって規制される。立上り応答時間と立下り応答時間は、用いられている強誘電性液晶材料とその配向状態および印加電圧によって決まる。処理時間は強誘電性液晶ライトバルブの応用システムの仕様とメモリ性の大きさに依存する。強誘電性液晶ライトバルブの応答速度は、TN液晶ライトバルブの応答速度よりも1~3桁速い。公表されている応答速度の値は、上で説明した区別を厳密に行っていない場合が多いので、特性比較をする場合は注意を要する。

次に、強誘電性液晶ライトバルブの解像度の高さを説明するために、強誘電性液晶ライトバルブに記録されたUSAFテストターゲット(United States Air Force Test Target)および2光束干渉縞イメージを図4(a)、(b)に示す。USAFテストターゲットの記録はハロゲン光源からの白色光を用い、2光束干渉縞の記録は波長514nmのアルゴンイオンレーザー光を用いて行っている。この図には、白色光記録で解像度80lp/mm、干渉縞記録の場合は解像度120lp/mmのイメージが示されている⁹⁾。これらの値は、TN液晶ライトバルブの約2~3倍の性能である。さらに、記録された画像は2値化されていることもわかる。

コントラストは、単色光源と消光比のよい偏光子を用いれば、均一な液晶配向がなされている場合、1000程度まで上げることが可能である¹⁰⁾。

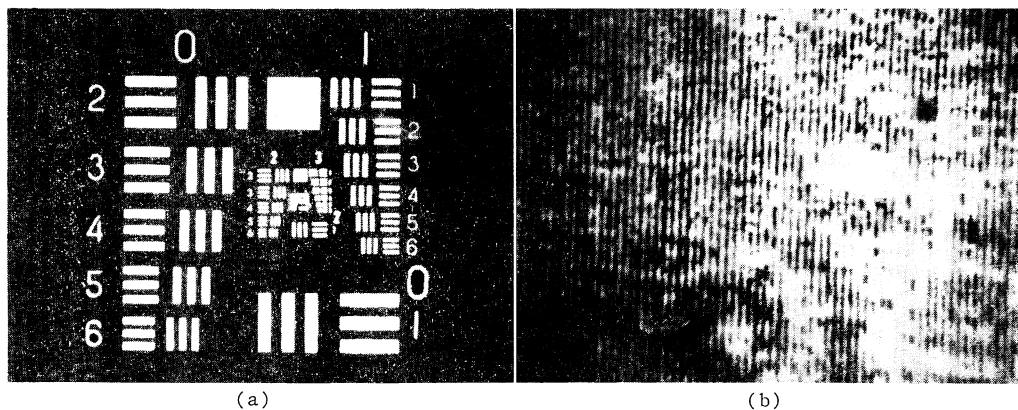


図 4 記録イメージ
 (a) USAF テストターゲット, 80lp/mm, (b) 2 光束干渉縞, 120 lp/mm⁹⁾

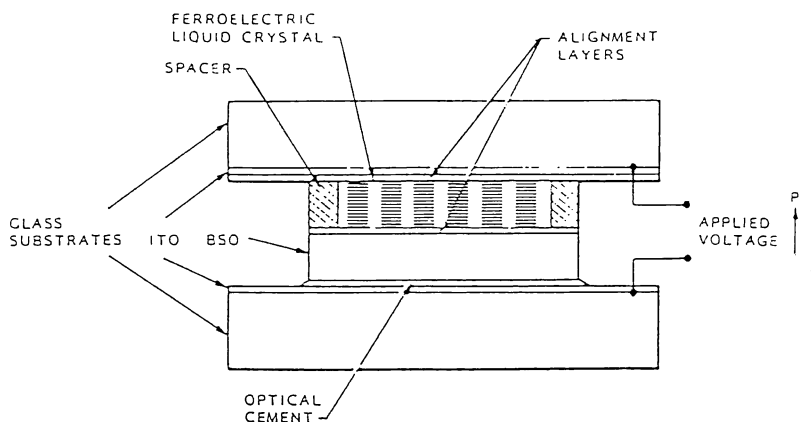


図 5 BSO-SSFLC の構造⁵⁾

3. 強誘電性液晶ライトバルブの開発動向

強誘電性液晶ライトバルブの研究は、1986 年にコロラド大学の Clark らとロッキード社の Armitage らによって始められた。彼らの当初の研究は、図 5 に示すように光アドレス材料としてケイ酸ビスマス単結晶 ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$) を用い、光変調材料として強誘電性液晶混合物を用いている。そのときの結果は、どうにか画像が書き込める程度のものであった。彼らは、光アドレス材料をアモルファス Se, CdSe, 単結晶 Si, 単結晶 GaAs などに変えた強誘電性液晶ライトバルブをも作製し、その特性を評価している。とくに、光アドレス材料として単結晶 Si を用いたものでは、解像度 10lp/mm 以上を得ている⁵⁾。

その後、急激に強誘電性液晶ライトバルブの研究が活発化するようになった。表 1 にそれらの特性と従来の液晶ライトバルブの特性とが比較して示してある。この表

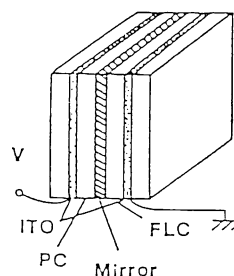


図 6 強誘電性液晶ライトバルブの構造⁶⁾

からも強誘電性液晶ライトバルブは、解像度、コントラスト、応答速度のいずれにおいても、従来の液晶ライトバルブより優れていることがわかる。以下、これらの中から代表的なものを抽出して説明する。

図 6 に示す強誘電性液晶ライトバルブは、光導電層、誘電体ミラー、強誘電性液晶を積層して構成されている。光導電層としては、アモルファス Si が用いられている。消去には負電圧パルス、書込みには正電圧パルス

表 1 TN 液晶ライトバルブと強誘電性液晶ライトバルブの比較

	Device	Active size length or diameter (mm)	Resolution at 50% MTF (lp/mm)	Cycle time (ms)	Optical switching energy* (pJ)
TN 液晶	Hughes LCLV ³⁾	25.00	16.00	100.000	50.00
	Hoechst Celanese ²¹⁾	40.00	38.00	25.000	36.00
	a-Si:H/nematic ²²⁾	38.00	>35.00	100.000	2.00
	a-Si/nematic ¹⁰⁾	25.00	5.00	1.400	2.50
強誘電性液晶	a-Si/FLC ²³⁾	40.00	28.00	0.500	0.20
	a-Si:H/FLC ⁸⁾	10.0	38.00	0.300	0.11
	a-Si:H/FLC (LAPS) ⁹⁾	(25×30)	>100	0.800	0.03
	TFT-LCLV ¹²⁾	(40×40)	330 μm□	8.000	—
	FLC-SLM ¹¹⁾	20	>20	>0.1	6.25
	BSO-SSFLC ⁵⁾	—	—	>0.1	0.008

* Optical switching energy per bit ≡ intensity × [write-time / (2 × resolution)²].

を用いており、これらのパルス極性を逆転させることによって、ポジ画像読出しとネガ画像読出しを切り換えることができる。書込み光強度は 0.1 mW/cm² 以上、立ち上がり時間は約 100 μs が得られている。また、画像をメモリした状態でのコントラストは 60、解像度は 20 lp/mm 以上である¹¹⁾。

また、アモルファス Si 光導電体と抵抗からなる分圧

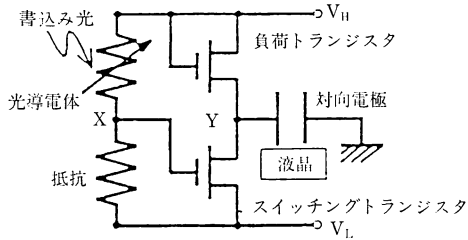


図 7 TFT 駆動型強誘電性液晶ライトバルブの構造⁷⁾

回路と、2個の TFT からなるインバータ回路から構成される TFT 駆動型強誘電性液晶ライトバルブが報告されている。この等価回路を図 7 に示す。この強誘電性液晶ライトバルブは画素分割されており、寸法 330 μm の画素が 120×120 個配列されている。コントラストは約 5、He-Ne レーザー光を 250 μW/cm² で照射したときの光応答は 125 Hz である。この光応答は、決して速くはないが、その原因は回路の RC 時定数の整合が十分とれていないため、これを最適化することによって、さらに高速化が可能である。より柔軟性の高い駆動方式を用いた強誘電性液晶ライトバルブとして、今後の展開が期待される¹²⁾。

図 8 の強誘電性液晶ライトバルブは、導電性グリッド電極と書込み面側の ITO 電極との間に順電圧を印加しながら書込み光を照射して書込みを行い、これらの電極間に逆電圧を印加することによって電氣的に記録像を消去するものである。このとき、強誘電性液晶には実質的

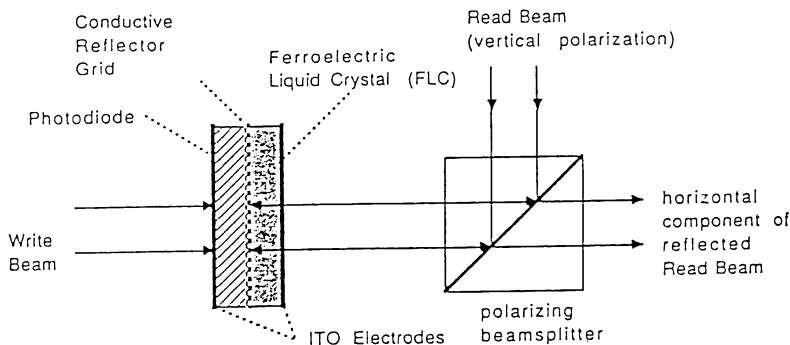


図 8 導電性グリッド電極を有する強誘電性液晶ライトバルブの構造¹³⁾

に電圧がかからないようになっており、液晶は明状態あるいは暗状態のいずれかの状態にメモリされている。しかし、強誘電性液晶に全く電圧がかからないようにすることはできないため、そのメモリ状態はしだいに消失していく。したがって、この強誘電性液晶ライトバルブは、半導体の MOS メモリと同様に、周期的に順次情報を書き換えてリフレッシュしてやる必要がある。書換え時間は MOS メモリと同程度のミリ秒オーダーになるものと考えられている¹³⁾。

4. 応 用

強誘電性液晶ライトバルブは、いまだ研究途上のデバイスであり、商品として販売されているものはないため、その応用例は少ない。現在発表されている応用としては、やはり光コンピューティングへの応用が多くを占めている。

強誘電性液晶ライトバルブの光コンピューティングへの応用としては、デジタル光演算法としての並列光加算プロセッサがよく知られている¹⁴⁾。これは図9に示されるような、加減算を並列的に実行することができる光プロセッサモジュールである。ここでは、強誘電性液晶ライトバルブの光入出力特性が、読出しに用いる光の偏光状態とそのときの液晶配向状態によって、AND および NOR 論理を実行できることを巧みに応用したものである。強誘電性液晶ライトバルブは、図6に示したものを2個用いている。印加パルスの極性を変えることに

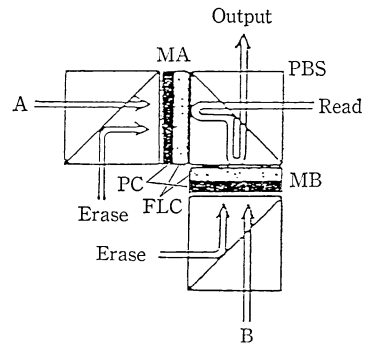


図9 デジタル光加減算モジュールへの応用¹⁵⁾

より、ポジ画像読出し、ネガ画像読出しが選択できるため、その組合せにより入力A, Bに対し AB , $A\bar{B}$, $\bar{A}B$, $\bar{A}\bar{B}$ の各論理が実行できる。強誘電性液晶にはメモリ性があるため、演算では書き込み信号が保持され、消去パルスと消去光によって初期化できる。この応用例で作製されたモジュールは、 $48 \times 48 \times 30$ mm と非常に小型のものとなっている。これは、強誘電性液晶ライトバルブが、情報の高速処理を可能にするだけでなく、系を小型軽量化することに対しても適したデバイスであることを示している¹⁵⁾。

また、図8に示した強誘電性液晶ライトバルブを用いた光メモリの提案もなされている。その構成を図10に示す。このメモリには、ライトバルブのリフレッシュと情報更新のために二つの強誘電性液晶ライトバルブが用

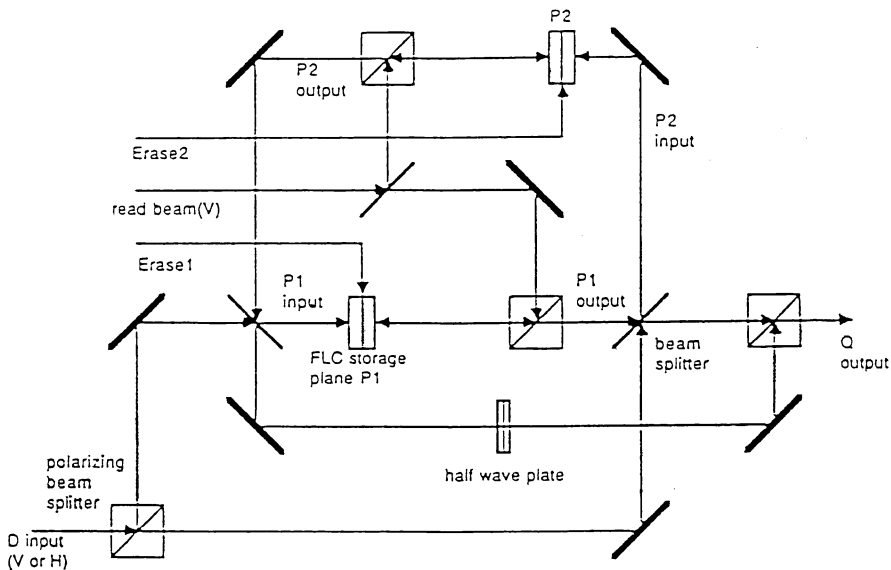
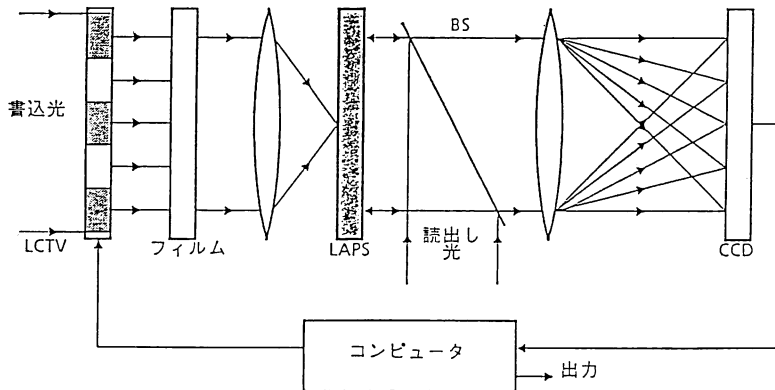


図10 デジタル並列光メモリへの応用¹³⁾

図 11 アナログ光相関器への応用¹⁹⁾

いられている。これらの強誘電性液晶ライトバルブは互いの情報を逐次変換する光フリップフロップ回路を構成している。書換えデータは入力Dからリフレッシュタイミングに同期させて強誘電性液晶ライトバルブ P2 に書き込まれ、情報を更新する。2値データ 1, 0 は書き込み光の偏光方向が垂直か平行かによって決められる。このとき強誘電性液晶ライトバルブに書き込まれるデータは、それぞれ互いのネガデータになっている。情報の読出しを位相で行う場合は、P2 側の読出し光を半波長板を通すことによって、P1 側の読出し光の位相状態とそろえてQから読み出す。強度情報として読み出す場合は、読出し光をそのまま偏光子に通せばよい。この光メモリは並列デジタル光メモリとして動作するため、たとえば $n \times m$ ピクセルの2値データを並列に記録再生でき、並列高速性を目的とした光コンピューティングには欠かすことができないものといえよう¹³⁾。

デジタル光演算はアナログ光演算に比べてノイズに強く精度が高いこと、プログラマビリティを付与しやすいことなどの点で優れた演算法である。しかも、強誘電性液晶ライトバルブは高速応答可能な2値デバイスであるため、まさにデジタル光演算のためのデバイスといえよう。

次に、少し視点を変え、強誘電性液晶ライトバルブの解像度の高さに注目した応用として、アナログ光相関器による光文字認識について説明する。アナログ光相関器は、光のもつ“波”としての本質的な量である振幅や位相を最大限利用し、またレンズのフーリエ変換能力をうまく使った古典的なアナログ光演算系である。

アナログ光相関器としては、マッチド空間フィルタを用いた光相関器とジョイント変換相関器 (joint transform correlator; JTC) がよく知られている。JTC は、

信号画像と参照画像を同時にフーリエ変換し、その干渉縞強度分布を空間光変調器に記録したものを空間フィルタとして用い、それを再フーリエ変換して光学相関を得る方法である。そのため、フィルタの光軸の調整が容易であるうえに、1プロセスで空間フィルタを作製することができるため、実時間相関処理にきわめて適した系であるといえよう。

JTC においては、空間光変調器に記録するフーリエ変換干渉縞を2値化することにより、得られる光相関ピークはより鋭く鮮明になる¹⁶⁾。しかし参照画像を増やしていき、フーリエ変換の干渉多重度を大きくしていくにつれて、そのフーリエ変換干渉縞のビジビリティが低下していくため、これを2値化するとその搬送波成分が潰されて相関出力にノイズが増加し、誤った認識をするようになる。このようにアナログ光相関器では、取り扱う情報量が増えるにつれてノイズが増加し、エラーが発生するという問題がある^{17,18)}。

強誘電性液晶ライトバルブは前述したように2値デバイスであるため、これを JTC のフーリエ変換干渉縞強度分布を記録する空間光変調器として用いれば、この2値化の効果がでてくる。このような問題を避けるため図 11 に示すように処理系にフィードバックループを設け、系の冗長性を上げたフィードバック型の JTC が構成され、その文字認識特性が調べられた。参照画像として 13 文字のアルファベットを用いてフィードバックを繰り返すと、ノイズが減少していき明瞭な相関ピークが得られるようになる。このように、アナログ光相関器に2値デバイスとしての強誘電性液晶ライトバルブを適用しても、系に冗長性をもたせることによって優れた機能を発揮させることができる¹⁹⁾。

さらに、マッチド空間フィルタを用いたフィードバック

ク型アナログ光相関器の相関出力面に、強誘電性液晶ライトバルブのような閾値デバイスを適用することによって光連想メモリを作ることにも提案されている²⁰⁾。

5. おわりに

以上述べたように、強誘電性液晶ライトバルブは、高解像度、高コントラスト、高速応答の優れた空間光変調器であり、デジタル光演算や光メモリのみならずアナログ光相関器においても優れた機能を果すことがわかった。しかし、強誘電性液晶ライトバルブはまだ開発途上のデバイスであり、その配向制御をどうするか、あるいは、熱的にも機械的衝撃にも安定なデバイスにいかにして仕上げるかといった事項に対しては多くの問題をかかえている。その応用に関しても、現在研究対象の中心となっている光コンピューティング自体の方向付けが明確でないため、強誘電性液晶ライトバルブの目標仕様が定まらないという問題を含んでいる。

これまで明らかになった強誘電性液晶ライトバルブの優れた性能をこれからどのように生かしていくか、あるいは、これからどのような新たな性能を引き出ししていくかが、これからの重要な課題である。今後、強誘電性液晶ライトバルブとその応用についての新たな展開に期待したい。

文 献

1) 間多 均: 光学, 18 (1989) 350-351.

- 2) S. T. Wu, *et al.*: Proc. SPIE, **684** (1986) 69-76.
- 3) C. S. Sexton: Proc. SPIE, **684** (1986) 96-100.
- 4) 長江慶治, ほか: 第 11 回液晶討論会講演予稿集 (1985) pp. 42-43.
- 5) D. Armitage, *et al.*: Mol. Cryst. Liq. Cryst., **144** (1987) 309-316.
- 6) K. Sayyah, *et al.*: Appl. Opt., **28** (1989) 4748-4756.
- 7) I. Abdulhalim, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **55** (1989) 1603-1605.
- 8) G. Moddel, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **55** (1989) 537-539.
- 9) 加藤直樹, ほか: 第 50 回応用物理学会学術講演会(1989) p. 742.
- 10) D. Armitage, *et al.*: Proc. SPIE, **825** (1987) 32-40.
- 11) 松尾慎治, ほか: 第 50 回応用物理学会学術講演会(1989) 764.
- 12) 辻川 晋, ほか: 第 50 回応用物理学会学術講演会(1989) 763.
- 13) R. A. Schmidt: Opt. Eng., **28** (1989) 410-416.
- 14) 黒川隆志: 光学, **18** (1989) 343-349.
- 15) 福島誠治, ほか: 第 50 回応用物理学会学術講演会(1989) 791.
- 16) B. Javidi: Opt. Eng., **28** (1989) 267-272.
- 17) F. T. S. Yu: Appl. Opt., **28** (1989) 2988-2990.
- 18) 岩城忠雄, ほか: 第 50 回応用物理学会学術講演会(1989) p. 742.
- 19) 岩城忠雄, ほか: 第 50 回応用物理学会学術講演会(1989) p. 743.
- 20) E. G. Paek, *et al.*: Opt. Eng., **26** (1987) 428-433.
- 21) S. G. Latham, *et al.*: GEC J. Res., **4** (1986) 219.
- 22) P. R. Ashley, *et al.*: Appl. Opt., **26** (1987) 241.
- 23) D. Williams, *et al.*: J. Phys. D.: Appl. Phys., **21** (1988) S156.