アモルファスシリコンを用いた 強誘電性液晶ライトバルブ

正員 高橋 信一 (慶応大)
 非会員 国岡 聡 (慶応大)
 非会員 久野 嘉則 (慶応大)
 非会員 浅田 秀樹 (慶応大)
 正員 栗田 正一 (慶応大)
 非会員 栗山 博之 (三洋電機)

1. はじめに

近年、光による演算処理の高速性・並列性に着目して画像信号などの種々の情報を光学的に並列同時処理できるシステム、いわゆる光コンピュータ⁽¹⁾を実現しようとする機運が高まってきている。そのシステムの基本的構成要素である空間光変調素子の代表的なものとして、液晶ライトバルブがある。これは光センサとして光伝導材料を用い、これらと液晶セルを組合せることにより、画像信号を演算・記憶・増幅する機能をもたせたものである。1970年代の初めより多くの研究がなされ^{(2)~(4)}、ディスプレイ応用ばかりでなく、光ゲートや光フリップ・フロップ回路など光コンピュータのシステムを考えた応用例も多く報告されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

最近、高抵抗シリコンを光センサとした液晶ライトバルブが開発され、高い分解能と感度、コントラス

ト比が示された⁽⁷⁾。しかし応答速度の点についてみると、ほとんどの場合、数msのオーダにとどまっている。その原因の大半は液晶材料としてネマティック液晶を用い、光センサとしてCdSなどの光伝導材料を用いていることに由来する⁽⁸⁾。著者らは、この両者を強誘電性スメクティック液晶およびアモルファスシリコン *p-i-n* 光センサに置換える新しい構造の液晶ライトバルブを提案し、試作した⁽⁹⁾。スメクティック液晶の強誘電性と高速応答性は、1975年にMeyerらによって見いだされた⁽¹⁰⁾。1980年にはClarkらによってSSFLC(Surface Stabilized Ferroelectric Liquid Crystal)セルと名づけられた厚さ1 μ m程度の極めて薄いセルにより1 μ s程度の高速応答性が実証された⁽¹¹⁾。液晶ディスプレイの実現を目指した開発も盛んである。一方、アモルファスシリコンは太陽電池として開発が進んでいるが⁽¹²⁾、液晶セルに通常用いられるガラス基板上に比較的簡単な工程で、低コストでかつ大面積の薄膜として形成することができる特徴を有する。このため、各種の機能素子への応用が期待できる。応答時間は単結晶シリコンに近い数百ns~数十 μ sが得られる。著者らは、この両者の利点を生かした素子を試作し、駆動電圧5Vにおいて400 μ sの応答を実現した⁽⁹⁾。

本論文では、アモルファスシリコン光センサを用いた強誘電性液晶ライトバルブの構造と動作原理、作製方法を詳細に述べる。次いで、単一セグメント素子の動作を精密に評価して、今回駆動電圧5Vにおいて250 μ sの高速応答を得た結果を示す。また、SSFLCセルに付随するメモリー効果による光双安定動作を確認した結果についても述べる。

Ferroelectric Liquid Crystal Light Valve Using Amorphous Silicon. By Shin-ichi Takahashi, Member, Satoshi Kunioka, Non-member, Yoshinori Kuno, Non-member, Hideki Asada, Non-member, Shoichi Kurita, Member (Faculty of Science and Technology, Keio University) & Hiroyuki Kuriyama, Non-member (Functional Materials Research Center, SANYO Electric Co., Ltd.).

高橋信一：正員、慶応義塾大学理工学部電気工学科
 国岡 聡：非会員、慶応義塾大学理工学部電気工学科 [現在、(株)東芝]

久野嘉則：非会員、慶応義塾大学理工学部電気工学科
 浅田秀樹：非会員、慶応義塾大学理工学部電気工学科 [現在、日本電気(株)光エレクトロニクス研究所]

栗田正一：正員、慶応義塾大学理工学部電気工学科
 栗山博之：非会員、三洋電機(株)研究開発本部機能材料研究所

2. 構造と作製方法

図1に強誘電性液晶ライトバルブF-LCLV(Ferroelectric Liquid Crystal Light Valve)の基本構造を示す。本素子の特徴を挙げると次のようになる。

(1) 液晶材料として強誘電性スメクティックSmC*液晶を用いている。従来から使われてきたネマティック液晶やコレステリック液晶と異なり、自発分極に直接電界が作用してスイッチングが起こるので、理想的には数 μ sからそれ以下の応答も実現可能である。

(2) 光センサとして、アモルファスシリコン薄膜*a-Si:H*ダイオードを用いている。従来液晶ライトバルブにはCdS, ZnS, ZnO, Seなどの光伝導性薄膜が使われてきたが、数十～数msと極めて応答性が悪く、SmC*液晶の高速性を生かすことができない。アモルファスシリコンは単結晶シリコンの応答に匹敵するばかりでなく、薄膜作製が容易で、可視光波長域で高感度かつ高空間解像度を有する。

(3) 駆動回路が従来の液晶ライトバルブの構成の仕方と異なっている。動作原理は次章で述べるが、図1に示すように、書き込み光の入力オン・オフによって液晶セルに印加される電界の方向が反転するように構成されている。

(4) 書き込み情報の読出しは反射形で行う。

素子の作製は、まず光センサの部分から行う。 In_2O_3 :Sn(ITO)透明導電膜をコーティングしたパイレックスガラス基板上に、連続分離形成法を用いたプラズ

マCVD(Chemical Vapor Deposition)法により*p*層(厚さ約100Å), *i*層(約6,000Å), *n*層(約300Å)の順にアモルファスシリコン(*a-Si:H*)薄膜を積層した⁽¹³⁾。形成した光センサの感度波長域は350～700nmで、ピーク波長は540nmである。更に、書き込み光の*a-Si:H*薄膜内への吸収を向上させ、読出し光の書き込み側への透過を防ぐAg-Ti反射膜および SnO_2 電極を真空蒸着した。 SnO_2 は液晶セルの電極の非対称性を緩和するためのものである。液晶材料にはチッソ社から提供いただいた常温強誘電性SmC*液晶CS-1011を用いた。これは0～56°Cと広い温度範囲で強誘電性を現す。液晶注入は*a-Si:H*基板とITO基板を重ね合わせてホットプレートに乗せ、100°C以上の等方液体相で行った。電極間の短絡を防ぎ、液晶層の厚さの均一性を保つため、厚さ1.5 μ mのスペーサ(東洋レーヨン製、ルミラ)を用いている。自然冷却により等方相からコレステリック(Ch)相を経てSmA相とし、この温度範囲(60～65°C)においてシェアリングを行って均一配向を施した⁽¹⁴⁾。*a-Si:H*基板およびITO基板へのラビングは行っていない。その後、室温(SmC*相)まで自然冷却し、エポキシ系接着剤で両基板を固定した。リード線はセラソルザ接着装置(旭硝子製、ラボマスタCLM-III)を用いて融着した。図2に作製した単一セグメント素子の外観写真を示す。*a-Si:H*光センサのセル面積は1 $\times$ 1 cm^2 、液晶セルは0.5 $\times$ 1 cm^2 で、液晶の厚さはおよそ2～3 μ mである。バイアス電源には独立した2台の直流電源を用い、同じ電圧になるように調節して使用した。

図1 強誘電性液晶ライトバルブの構造
Fig. 1. Schematic diagram of a ferroelectric liquid crystal light valve.

図 2 強誘電性液晶ライトバルブの外観
Fig. 2. Photograph of a ferroelectric liquid crystal light valve.

3. 動作原理

図 3 に本素子の等価回路を示す。液晶層の並列抵抗 R_{LC} は $500\text{M}\Omega$ 以上、 $\alpha\text{-Si:H}$ 光センサの暗時の並列抵抗 R_P は約 $1\text{M}\Omega$ 、直列抵抗 R_S は約 200Ω である。光センサの端子間容量 C は約 $0.02\text{ }\mu\text{F}$ あるが、セル面積を小さくすることで大幅に下げることができる。液晶セルの容量 C_{LC} は厚さによるが $400\sim 800\text{ pF}$ と測定された。光起電力形 $\alpha\text{-Si:H}$ 光センサを用いた F-LCLV の動作原理は、液晶層の抵抗 R_{LC} が回路に挿入したバイアス抵抗 R_B に比較して十分大きい ($R_{LC} \gg R_B$) 条件の下で、光センサの電圧-電流特性と R_B の負荷直線によって説明できる。図 4 に光センサの暗状態と光照射下(明状態)における電圧-電流特性を模式的に示した。光センサに接続される負荷は R_{LC} と R_B の並列合成抵抗と考えられるが、ここでは $R_{LC} \gg R_B$ により、負荷抵抗として R_B のみを考える。まず、光入力がないとき、動作点は D 点にあり、光センサの端子電圧 V_{Si} はほぼ $2V_B(\text{V})$ となる。このとき、図 3 において R_B にかかる電圧 V_{RB} は $\sim 0\text{ V}$ となるので、液晶セルには $V_{LC} = \sim +V_B(\text{V})$ が加わることになる。次いで、書き込み光による光照射が行われると、動作点に変化する。このとき、あらかじめ動作点が P 点に移るようにバイアス抵抗 R_B を調節しておく。すると、 $V_{Si} = \sim 0\text{ V}$ となり $V_{RB} = \sim 2V_B(\text{V})$ となる。従って、 $V_{LC} = \sim -V_B(\text{V})$ となって液晶セルに加わる電界の方向は反転される。Clark らによれば、SSFLC セルにおいては液晶分子の長軸方向に垂直な自発分極の向きを一樣にそろえることができることが知られている⁽¹¹⁾。このような状態の液晶層に電界を加えると、すべての液晶分子がその自発分極が電界方向を向くような位置に回転する。電界の方向を逆にするとも自発分極の方向もそろって逆転し、液晶分子の長軸方向は電界の反転により 2θ (チルト角 θ) 回転する。F-LCLV ではこの現象を利用して読出し光のスイッチングを行

図 3 強誘電性液晶ライトバルブの等価回路

Fig. 3. Equivalent circuit of ferroelectric liquid crystal light valve.

図 4 $\alpha\text{-Si}$ 光センサの電圧-電流特性
Fig. 4. I - V characteristics for $\alpha\text{-Si}$ photosensor.

うものである。図 1 に示したように、読出し光 I_r は偏光方向を直交させて配置した 2 枚の偏光板の間に置かれた F-LCLV に入射して液晶層を通過し、 Ag-Ti 膜によって反射され、書き込まれた情報を読出すことになる。例えば、光入力がない(暗)状態において液晶分子の長軸方向と偏光子の偏光方向が一致しているときは、反射光 I_{out} は検光子を透過できず、オフ状態となる。光入力がある(明)状態では前述のように液晶分子が 2θ 回転し、液晶層を通過する光は直線偏光からずれているため、検光子を透過する偏光成分を生じる。このオン状態における読出し光の反射光強度 I_{out} は、読出し用の入射光強度 I_i に対して次式で書ける⁽¹⁵⁾。

$$I_{out} = \eta I_r \sin^2 2\phi \sin^2 \delta / 2 \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 η : 偏光板の透過率および反射膜の
反射率に依存する係数、 $\phi = 2\theta$

また、 δ は次式で表され、

$$\delta = (2\pi \Delta n d) / \lambda \quad \cdots \cdots (2)$$

$\phi = \pi/4$ かつ $\delta = \pi$ のとき、コントラストは最大となる。 d は液晶層の厚さ、 λ は読出し光の波長、 Δn は屈折率異方性を表す。こうして光入力のみ・暗状態によって強誘電性液晶に加わる電圧の極性を制御することができ、F-LCLV が動作可能となる。

これに対して、最近 Model らは、著者らと同様の観点から F-LCLV (彼らは空間光変調器と呼んでいる) の提案を行った⁽⁸⁾。彼らのデバイスではフォトダイオードと強誘電性液晶が直列接続されており、通常逆バイアスされたフォトダイオードに書き込み光が照射されてオン状態となる。電極は二端子で構成され、従来の光伝導体を利用したライトバルブと同様の構造である。読出しは著者らの F-LCLV と同様、反射形である。オフ状態へのスイッチングは全体に順バイアスを加えることによって行う。構造が単純でホトダイオードと強誘電性液晶のアレイを構成して空間光変調器を実現する際に、各画素ごとの分離の必要がなく、デバイス製作上極めて有利である特徴があるが、アモルファスシリコンダイオード特有のリーク電流のため、逆バイアス時にも光が当たらない状態で強誘電性液晶に電圧が加わり、オフ状態の劣化が起こるという問題がある⁽¹⁶⁾。一方、著者らの F-LCLV では、図 1 でわか

るように三端子の電極構成をとっており、アレイ化においては各画素を独立させ、それぞれにバイアス抵抗を取付けなければならないため、パターン化のためにかなり複雑な微細加工技術を要する。この点は今後の技術的課題として残し、光入力のオン・オフにより高速なスイッチングが安定して得られる利点を本論文では追求することにする。

4. 実験結果

〈4・1〉 応答速度 図 5 に F-LCLV の応答特性の測定系を示す。書き込み光および読出し光の光源には波長 632.8 nm の He-Ne レーザを用い、必要に応じて ND フィルタにより強度を変えた。前章で述べたように F-LCLV はバイアス抵抗 R_B がバイアス電圧 V_B と α -Si:H 光センサの光電流、言い換えれば書き込み入力光の強度によって変わってくる。そこで、デバイスとして動作させる前に、あらかじめ R_B - V_B の関係を知っておく必要がある。F-LCLV をスイッチングするのに最適な R_B は図 4 より、

$$R_B = (2V_B) / I_{sc} \quad \cdots \cdots (3)$$

で与えられ、光センサの短絡光電流 I_{sc} で決まる。 I_{sc} は書き込み入力光強度 I_{in} に比例して増加するので R_B は I_{in} に反比例し、入力光が微弱なときは R_B を大きくする必要が生じる。図 6 に光センサの電圧-電流特性の光入力強度依存性より求めた R_B の光入力強度依存性をバイアス電圧 V_B をパラメータとして示す。同図より、F-LCLV の感度が光センサの感度に依存し

図 5 応答特性の測定系
Fig. 5. Schematic diagram of experimental apparatus.

図 6 最適バイアス抵抗と入力光強度の関係
Fig. 6. Optimum bias resistance as a function of input light intensity.

図 7 スクリーン上へ投影したライトバルブ像

Fig. 7. Light valve images projected onto a screen.

ていることがわかり、 R_B が F-LCLV の応答速度に影響を与える可能性を考えると、 I_{sc} の向上が F-LCLV の性能向上に重要な意味をもってくる。次に、F-LCLV のスイッチング状態を観察するために、図 5 の測定系の読出し光 I_r の位置に He-Ne レーザに換えてハロゲンランプを置き、F-LCLV を照明してレンズで I_{out} の位置に置いたスクリーン上に投影した。図 7 にその投影写真を示す。(a) 図は書き込み入力光がない暗状態を示し、(b) 図は He-Ne レーザを書込み光として照射した明状態を示す。矢印は配向不良により、光のオン・オフによっても液晶状態が変化し

図 8 応答時間のバイアス電圧依存性
Fig. 8. Response time of light valve as a function of bias voltage.

ないと、これを除けばほぼ $1\text{cm} \times 5\text{mm}$ の範囲で均一に液晶分子が配向し、SSFLC 状態を保持していることがわかる。図 7 のデバイスの配置から回転ステージを 2θ 回転することにより、オン・オフの状態を逆転できることも確認した。

次に、図 5 の測定系を用いた応答時間の測定について述べる。書き込み入力光には 5mW He-Ne レーザを用い、チョッパを通して F-LCLV に入力させた。その一部の反射光を $p-i-n$ ホトダイオードで検知し、メモリスコープでモニタした。読出し光には 2mW He-Ne レーザを用い、F-LCLV からの反射光を同じくホトダイオードで検知し、メモリスコープに記録した。その応答波形は入力波形に滑らかに追従していた。読出し光強度の最大値と最小値の比で定義したコントラストは $8:1$ となり、反射膜に Al を使った場合⁽⁹⁾の $20:1$ に比べ悪かった。応答時間は読出し光強度の最大値と最小値の間の 10% から 90% まで変化するのに要する時間を立上り時間、90% から 10% まで減少するのに要する時間を立下り時間と定義する。書き込み入力光の応答時間は $30\text{ }\mu\text{s}$ で F-LCLV の応答には今のところ、影響は少ない。図 8 に 52°C で測定した F-LCLV の応答時間のバイアス電圧依存性を示す。暗状態から明状態への立上り時間について示してある。バイアス抵抗 R_B はバイアス電圧 V_B を変える都度、図 6 から求めた最適値に設定して測定した。図 8 には R_B の端子間電圧の応答波形から求めた光センサの立上り時間と F-LCLV の応答時間測定とは別

に、液晶セルの端子間にパルス発生器を用いて正負パルス電圧を印加したときの液晶セル本来の応答時間も併せて示してある。これらのデータから V_B の増加と共に F-LCLV の応答時間が減少し、液晶自体の応答時間に接近することがわかる。 $V_B=5\text{ V}$ では約 $250\text{ }\mu\text{s}$ と、従来のネマティック液晶ライトバルブより 1～2 けたの高速性が得られた。 $V_B>20\text{ V}$ では $100\text{ }\mu\text{s}$ 以下の応答も望めるが、現段階では光センサの逆方向耐圧が $15\sim 25\text{ V}$ と低いので限界がある。光センサの応答時間は V_B と共に増加するが、これは光センサからの光電流の応答が R_B と光センサの容量に依存しているためである。第 3 章で述べたように試作したデバイスではセル面積が極めて大きく光センサの容量が大ききいっている。 V_B の増加は R_B の設定値を増加させるので、結果的に光センサの応答時間も増加する。

$V_B=4\text{ V}$ 以上では光センサの応答より F-LCLV の立上り時間が早くなっているが、これは液晶セルにかかる電圧が V_B に到達しなくても、液晶の反転しきい値電圧を超えれば F-LCLV がスイッチングすることを示している。1 セグメントの面積を $1/1,000$ 以下の空間光変調素子として使えるところまで小さくし、デバイスを最適化すれば、応答時間の速い適当な強誘電性スメクティック液晶を用いて数十～数 μs の応答も可能と考えられる。図 9 に F-LCLV の応答時間の温度依存性を示す。同図から、明状態から暗状態への立下り時間のほうが遅いことがわかる。これは、液晶分子の配向状態や SnO_2 電極面と ITO 基板表面の界面力の違いによるものと思われる。応答の対称性を改善す

る技術的改良が必要である。また、応答時間は温度の上昇と共に速くなるが、これは液晶分子の応答速度 τ の電界依存の式によって説明される。 τ は近似的に次式で表される⁽¹⁷⁾。

$$\tau = \gamma / (PE) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 γ ：液晶の回転粘性係数、 P ：液晶の自発分極密度、 E ：印加電界強度

γ は温度上昇と共に減少し、 τ は減少する。また τ は E の増加と共に減少することから、図 8、図 9 の結果が裏づけられる。今後の課題として、F-LCLV の応答速度を上げるためには、(4)式から液晶材料として自発分極が大きく回転粘性率の小さいものが必要であることがわかる。また、均一配向の技術の向上と、更に薄い SSFLC セルの作製も必要である。光センサについては前述したが、感度の向上が応答速度の向上につながると考えられる。

〈4・2〉 光双安定動作 これまで SSFLC セルのもつ特徴の一つを生かした F-LCLV の高速応答性について述べてきたが、ここではもう一つの特徴であるメモリー効果の光双安定動作への適用について検討する。SSFLC セルにある方向に十分強い電界を印加すると、自発分極はセル全体にわたり電界の方向にそろうが、この状態で電界を取除いても自発分極の向きは一つの安定状態を保持し続けることができる。このメモリー効果の大きさは、加えた電界の強度と時間幅(パルス幅)に依存する⁽¹⁴⁾。また、表面処理による配向状態やセル厚にも強く依存する。Clark らによれば、セル厚はラセンピッチと同程度か、それ以下にする必要がある⁽¹¹⁾、ここで作製した F-LCLV の場合の液晶セルでは必ずしも十分薄いとは言えない。しかし、光双安定動作の確認は光メモリーへの応用上意義があると考え。図 10 に F-LCLV を光双安定素子として用いる場合の動作原理を図式解法で示した。(a)図の立面図は液晶セルのメモリー効果による液晶にかかる電圧 V_{LC} に対する読出し光の反射強度 I_{out} のヒステリシス曲線を表している。ここで、 V_{LC} を正から負へ連続的に変化していく ($A \rightarrow B$) と、 $V_{LC}=0\text{ V}$ を超えても I_{out} は暗状態を保持し続ける(メモリー効果)。 V_{LC} を更に変化させると、ある負のしきい値電圧において明状態に遷移する ($B \rightarrow C$)。逆に V_{LC} を負から正に連続的に変化させていくと、 I_{out} の状態は $C \rightarrow D \rightarrow A$ の経路をたどって変化する。光センサの光電流 I_{sc} が書込み入力光の強度 I_{in} に比例し、 V_{LC} は図 4 の負荷直線上を I_{in} に応じて変化するので $I_{in}-V_{LC}$ 特性は、(a)図の平面図に示されるように線形とな

図 9 応答時間の温度依存性
Fig. 9. Response time of light valve as a function of temperature.

図 10 光双安定素子の入出力特性の図式解法

Fig. 10. Graphical solution of light input-output characteristics of optical bistable device.

図 11 測定されたライトバルブの光入出力特性

Fig. 11. Measured light input-output characteristics of light valve.

る。

以上により、光入力 I_{in} と光出力 I_{out} の関係は (b) 図に示すように光双安定状態をとることができる。この現象には、光および電気的なフィードバックを必要としないという特徴がある。また、回転ステージを 2θ だけ回転すると、明状態と暗状態が反転する逆ヒステリシス状態を得ることができる。実際の測定には図 5 の測定系を用い、書き込み入力光の強度を円形リニアウェッジ ND フィルタにより変化させて行った。

図 11 に光双安定特性を示すヒステリシス曲線の測定例を示す。これから作製した F-LCLV がメモリー性を有することがわかった。ヒステリシスの幅および I_{out} が急増するしきい値光入力強度はバイアス抵抗 R_B によって変えることができ、 R_B を減らすとヒステリシス幅を増すことができる。また、メモリー効果を有しない F-LCLV を作製すれば、微分特性をもつデバイスも可能と考えられ、光メモリーと合せて光演算回路の構成に应用が期待できる。今後の課題は低入力光強度域での応答速度の改善と出力光のコントラストの向上を図りながら、二次元アレイ化を実現して空間光変調素子を作製することである。バイアス電源をパルス駆動に切換えることにより、メモリー効果を利用した階調表示の可能性についての検討も行っている。本節で述べたようにメモリー効果とは電圧を切っても逆方向電界が加わらない限り、液晶がオンあるいはオフの状態を保持し続けることを言うが、この効果を生じるためにはある値以上の電界がある時間以上加わる必要がある⁽¹⁴⁾。そこで、これまで直流電源を用いていた F-LCLV をパルス電圧駆動にすると、パルス幅がある程度狭い場合には書き込み入力光の強度が小さいとパルス電圧が十分液晶に加わらない状態を作り出すことができる。このとき、読出し光の強度は入力の中間の強度を反映し、駆動条件の制御によって階調表示を可能にすると考えられる。

5. むすび

a-Si・p-i-n 接合ダイオード薄膜を光センサとし、

強誘電性スメクティック液晶を用いた液晶ライトバルブの構造原理と動作特性について報告した。試作した素子の応答特性を測定して、その高速応答性を実証した。立上り時間約 250 μ s は従来のネマティック液晶と光伝導体を組合せた液晶ライトバルブに比べて大幅な改善を示し、二次元アレイ化を進めれば、液晶を用いた高速の空間光変調素子を実現できる可能性が見いだされた。また、メモリー効果を利用したフィードバックのいない光双安定状態が確認された。

本研究を進めるにあたり、終始御協力をいただいた三洋電機(株)研究開発本部 桑野幸徳、中野昭一両博士に感謝いたします。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金(一般研究)の助成を受けて行われた。

(昭和 63 年 5 月 10 受付, 同 63 年 8 月 25 日再受付)

文 献

- (1) 稲葉 編: 光コンピュータ (昭 60) オーム社
- (2) J. D. Margerum, J. Nimoy & S. Y. Wong: "Reversible Ultraviolet Imaging with Liquid Crystals", *Appl. Phys. Letters*, **17**, 51 (1970)
- (3) D. L. White & M. Feldman: "Liquid-Crystal Light Valves", *Electron. Lett.*, **6**, 837 (1970)
- (4) W. P. Bleha, L. T. Lipton, E. Wiener-Avneer, J. Grinberg, P. G. Reif, D. Casasent, H. B. Brown & B. V. Markovitch: "Application of the Liquid Crystal Light Valve to Real-Time Optical Data Processing", *Optical Engng*, **17**, 371 (1978)
- (5) M. T. Fatehi, K. C. Wasmundt & S. A. Collins, Jr.: "Optical Logic Gates Using Liquid Crystal Light Valve: Implementation and Application Example", *Appl. Opt.* **20**, 2250 (1981)
- (6) M. T. Fatehi, K. C. Wasmundt & S. A. Collins, Jr.: "Optical Flip-Flops and Sequential Logic Circuits Using a Liquid Crystal Light Valve", *ibid.*, **23**, 2163 (1984)
- (7) U. Efron, J. Grinberg, P. O. Braatz, M. J. Little, P. G. Reif & R. N. Schwartz: "The Silicon Liquid-Crystal Light Valve", *J. Appl. Phys.*, **57**, 1356 (1985)
- (8) G. Moddel, K. M. Johnson & M. A. Handschy: "Photoaddressing of High Speed Liquid Crystal Spatial Light Modulators", *Proc. SPIE*, **754**, "Optical and Digital Pattern Recognition", p. 207 (1987)
- (9) N. S. Takahashi, H. Asada, M. Miyahara, S. Kurita & H. Kuriyama: "High-Speed Light Valve Using an Amorphous Silicon Photosensor and Ferroelectric Liquid Crystals", *Appl. Phys. Letters*, **51**, 1233 (1987)
- (10) R. B. Meyer, L. Liebert, L. Strzelecki & P. Keller: "Ferroelectric Liquid Crystals", *J. Phys. Letters*, **36**, L 69 (1975)
- (11) N. A. Clark & S. T. Lagerwall: "Submicrosecond Bistable Electro-Optic Switching in Liquid Crystals", *Appl. Phys. Letters*, **36**, 899 (1980)
- (12) D. E. Carlson & C. R. Wronski: "Amorphous Silicon Solar Cell", *ibid.*, **28**, 671 (1976)
- (13) Y. Kuwano, M. Ohnishi, S. Tsuda, Y. Nakashima & N. Nakamura: "Preparation and Properties of Amorphous Silicon Produced by a Consecutive, Separated Reaction Chamber Method", *Japan. J. Appl. Phys.*, **21**, 413 (1982)
- (14) M. Abe, M. Hiram, H. Asada, N. Furukawa & S. Kurita: "Monodomain Cells of Ferroelectric Liquid Crystals Oriented by Shear Technique and Electro-Optical Effect", *Proc. Society for Information Display*, **28**, 183 (1987)
- (15) R. A. Soref & M. J. Rafuse: "Electrically Controlled Birefringence of Thin Nematic Films", *J. Appl. Phys.*, **43**, 2029 (1972)
- (16) G. Moddel, K. M. Johnson, C. T. Kuo, W. Li & C. M. Walker: "Optical Addressing of High Speed Spatial Light Modulators with α -Si:H", *Abstracts of 1988 Spring Meeting of Materials Research Society*, **E7**, 4, p. 75 (1988)
- (17) N. A. Clark & S. T. Lagerwall: "Physics of Ferroelectric Fluids: The Discovery of a High-Speed Electro-Optic Switching Process in Liquid Crystals", *Recent Developments in Condensed Matter Physics*, Vol. 4, J. T. Devreese, L. F. Lemmens, V. E. Van Doren & J. Van Royen, Ed. p. 309 (1981) Plenum, New York