レーザーエコー

液晶空間光変調器とそのコヒーレント光データ処理応用

Liquid Crystal Light Valves

J. Grinberg*, W. P. Bleha*, P. O. Braatz*, U. Efron*, N. W. Goodwin*
and M. J. Little*

(訳) 栖 原 敏 明**

要 約

ヒューズ研究所 (Hughes Research Laboratories) でこの10年間に開発されてきた液晶光バルブ (LCLV) について概説する。CdS や Si を用いた光入力型の光バルブや、CCD 駆動の光バルブにつき、その構造、動作と性能を説明する。又、情報処理システム、ディスプレイシステムへの応用例についても述べる。

1. まえがき

ここで述べる光バルブとは光ビームに空間的な変調を加えて読み出すことを可能にするデバイスである。この種のデバイスは画像増幅器または画像変換器 (又はその両方) として用いることができる。画像増幅器としての使用の一例は図1に示すような大スクリーンへの投影システムである。小さく (25~50mm) で輝度の低いブラウン管 (CRT) を光バルブに画像を入力するために用い、高輝度の光源を用いれば、その

図1 大スクリーンへの投影システム

図2 汎用コヒーレント光学系テストベンチ

画像を大きなスクリーンに投影することができる。画像変換器としての代表的な応用例は図2のような光情報処理のためのノンコヒーレント-コヒーレント画像変換器である。このデバイスは読み出し光源としてレーザーを用いることにより、CRT 上のノンコヒーレント (非干渉) な画像をコヒーレント (可干渉) な画像に変換する。画像変換の他の一例としては波長変換、例えば赤外線ミサイル追跡装置の動的試験に用いられる可視-赤外画像変換器などが挙げられる。このようなシステムでは画像は可視 CRT から光バルブに入力され、赤外光により読み出される。画像変換器のいま一つの例は電氣的に駆動する光バルブであり、この場合には時系列の電気信号が任意の光波長域での並列的な光画像に変換される。

本稿では、3つの世代に分けられるヒューズの液晶光バルブ (LCLV) について述べる。これらは全て反射モードで作動し、2. で説明するハイブリッド電界効果モードで駆動する液晶

本資料は今年2月4日~6日、東京で開催されたエレクトロ-optics/レーザー'82セミナー (レーザー学会主催) のテキストの一部である。

* Hughes Research Laboratories, 3011 Malibu, Canyon Rd. Malibu, California 90265

** 大阪大学工学部電子工学科 (〒565 吹田市山田丘2-1)

を用いている。動作原理を簡単に述べると、先ず、液晶層が十分な大きさの信号電流により駆動されると、入力光の偏光ベクトルが電気信号の大きさに比例した角度だけ回転する。従って反射した出力光ビームには偏光角の空間的な変調が加わることになる。この偏光変調のパターンは、アナライザ（検光子）として通常の偏光フィルム又は偏光ビームスプリッタを用いることにより、強度変調された出力画像に変換される。3. および4. ではそれぞれCdS, Siを用いた光入力型のデバイスについて述べ、5. では電氣的駆動の光パルプすなわちCCD/LCLVについて述べる。6. ではこれらの光パルプの代表的な応用例について説明する。

2. ハイブリッド電界効果モード

本稿で述べるデバイスは液晶を光変調媒質として用いている。液晶は優れた電気光学効果（EO）材料であり、1）複屈折が顕著（ $\Delta n = 0.1 \sim 0.25$ ）、2）誘電異方性が大きい（ $\Delta \epsilon = 3 \sim 15$ ）、3）EO効果に閾値電圧がある、4）液体であるの4項目の重要な特徴を持っている。

複屈折が大きいいため非常に薄い液晶層（ KD_2PO_4 や $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 等の結晶の場合は $0.1 \sim 1 \text{ mm}$ 必要であるのに対し液晶では $1.5 \sim 12 \mu\text{m}$ ）でデバイスを構成でき、従って光受容角を大きくとった場合でも高い分解能を実現することができる。さらに液晶層が薄いことは駆動回路が中程度のインピーダンスを有するものでよいこととなり、駆動回路構成が容易となる。薄い液晶層と大きな誘電異方性の組合せは低電圧（先述の材料では $200 \sim 2000 \text{ V}$ 必要であるのに対し $1 \sim 20 \text{ V}$ ）での作動を可能にし、又、中程度のインピーダンスであることから非常に小さな電力しか必要としないことになる。図3に示すようなEO効果の閾値電圧が存在することで駆動回路の構成は更に容易になる。又、このため駆動回路に比較的大きな漏れ電流があっても出力画像のダイナミックレンジ（コントラスト）には殆んど影響を与えない。例えば著者らは1:1の信号対漏れ電流比しかない場合でも100:1の出力スクリーン上コントラスト比を得ている。更

図3 液晶の電気光学効果にみられる電圧閾値

に液晶の使用により、 KD_2PO_4 や $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ の場合のような大きな結晶を成長させることや大面積（ 50 mm ）の薄い板に研磨する工程が不要となる。

液晶には幾つかの電気光学（EO）効果がある。最もよく知られているものはダイナミックスクャタリングと2つの電界効果であり、電界効果には単純な複屈折効果とツイストネマティック効果がある。電界効果はダイナミックスクャタリングに比べ薄い液晶層を用いることができるので応答速度が速く、又高いコントラストを得る可能性がある。複屈折効果を利用するには基板に平行なホモジェニアス配向と垂直なホメオトロピック配向のいずれをも用いることができるが、ホモジェニアス配向ではディスプレイシステムに要求される黒のバックグラウンドを得ることができない。ホメオトロピック配向ではOFF状態で黒のバックグラウンドを得ることができるが、均質なON状態を実現するにはわずかにプレティルト角を持たせた配向が必要である¹⁾。著者らはこのプレティルト角は強い読

み出し光に対しては不安定であることを明らかにした。通常のツイストネマティック配向は反射モードでは作動しないのでここで述べる光バルブには適用できない。強い読み出しビームからフォトコンダクタやCCDドライブといった画像入力部を分離するためには出来るだけ反射モードを用いることが望ましい。そこでこれらの全ての要求を満たすため、著者らはハイブリッド電界効果モード (HYFEM) を用いたデバイスを構成することにした。

このハイブリッド電気光学効果を実際に応用するために、著者らはツイスト配向の液晶層を作製した。すなわち、液晶は電極位置でその分子長軸が電極面に平行 (ホモジェニアス配向) となるよう配列している。さらに液晶分子はデバイスの配向処理方向に沿って互いに平行に配向されている。ツイスト配向状態を実現するには、2枚の電極板の方向を、それぞれの電極面上での液晶配向方向が互いに或る鋭角をなすようにすればよい。図4に 45° ツイストの場合を

図4 45° ツイストネマティック液晶配列 (ハイブリッド電界効果) の概略図

示したように、電極間の液晶層内部では液晶分子軸は滑らかに回転している。このツイスト配向と液晶個有の複屈折性により、直線偏光の光が入射したときその偏光方向はツイスト角だけ回転する。これがいわゆるツイストネマティッ

ク効果であるが、通常のツイストネマティック効果デバイスではツイスト角は 90° であるのに対し、上述したように著者らのデバイスのツイスト角は 45° である。

図5 ハイブリッド電界効果モード光バルブの動作：(a) OFF状態、(b) ON状態

ハイブリッド電界効果モードの動作を説明するためにまずOFF状態を考える。図5 (a) のように光バルブと読み出し光源の間に直交したポラライザ/アナライザ対を置く。ポラライザは入射ビーム光路中に軸が入射側電極板の配向方向と平行になるように置き、アナライザは反射ビームの光路中に置く。直線偏光にされた入射光は液晶層を通過することによりその偏光方向が 45° 回転するが、誘電体ミラーにより反射して再び液晶層を通過する際には逆方向に 45° 回転して入射光と同方向の偏光に戻るので、入射側のポラライザと直交するアナライザにより遮光される。このためOFF状態は暗状態とすることができる。これから分るようにデバイスのOFF状態は全くツイストネマティック効果で支配されている。

これに対しON状態はやや複雑である。電界を印加して正の誘電異方性をもつ液晶分子を基板に垂直 (ホメオトロピック) な方向に回転させれば、入射光の偏光は液晶により影響されなくなり、OFF状態と同様にON状態も暗状態と

なるであろう。しかしこれでは何にもならない。しかし、このプロセスを更に注意深く観察すれば、完全な“OFF”状態と完全な“ON”状態の中間にデバイスが直交アナライザを通して光を誘過させる電圧領域があることが分る。液晶に電圧が印加される際に、液晶分子はホメオトロピック配向に近付くように傾斜する(図5(b)参照)。このような分子軸方向(基板に平行と垂直の中間)では、分子の複屈折性により光の偏光に影響が生じる。その結果、この中間的な電圧ではミラーで反射後デバイスから出射する光はもはや直線偏光ではなくなり、幾らかはデバイスを透過できることになる。そこで問題はON状態でどれ程の透過光が得られるかということである。

この問題を明らかにするために、液晶分子の方向を層に垂直な方向に沿っての位置とデバイスへの印加電圧の関数と考えよう。図6はツイスト配向のデバイスにおける液晶分子のツイスト角とティルト(傾斜)角を液晶層内の位置の関数として計算した結果を示している。同図から分るように、電圧印加は螺旋状のツイストをなくする効果を持っている。理想の場合には、電圧を印加したとき、液晶層の半分では分子は一方の電極板の配向処理方向に配向し、他の半分ではもう一方の電極板の配向処理方向に配向する。

図6 液晶層内での分子軸方向の計算結果:(a)ツイスト角, (b)ティルト角(文献2)

実際のツイストネマティックデバイスにもこのような理想的な分子配向分布に近いツイスト角分布を実現する電圧範囲が存在するが、それ

は物理的には次のように説明できる。液晶分子のツイストは液晶のもつ“長”距離分子間配列力によりある薄い層から次の層へと伝達される。一般に、液晶分子のティルト(傾斜)角が大きくなれば(基板に垂直に近くなれば)、このツイストの層間の伝達力は弱くなる。もし液晶に電極板に垂直に配列した層があれば、ここではツイストは全く伝達されない。このような層は全体の螺旋状ツイストを2つに切ってしまう効果を示す。実際にこうした効果を生じれば、液晶は近い方の電極板の配向処理に従った方向に配向して安定する。これはすなわち理想的に近いツイスト角の分布(図6(d))を実現することに他ならない。

ティルト(傾斜)角(θ)を液晶セル厚さ方向の位置の関数として計算した結果を図6(b)に示す。電極に近い位置ではティルト角は小さいが、液晶層中心ではティルト角(θ)は分子間傾斜角の液晶セル厚さの半分にわたっての総和に等しいので大きな値となっている。閾値の2倍の電圧でも、液晶セル中心でのティルト角は 80° にもなる。このようにして液晶に加えられた比較的低い電圧でも螺旋は切れてツイスト角の分布は図6(a)の理想的なものに近くなるのである。更にこの理想に近い状態では平均のティルト角は 90° よりもずっと小さい。

デバイスはこの状態での複屈折を以下のように利用したものである。ツイストネマティック効果のOFF状態を実現するため、デバイスに入射する光の偏光は入射側電極板の配向処理方向に平行でなければならない。従って 90° ツイストのセルでは、ツイストが切られたとき偏光方向は大部分の液晶分子に対して 0° と 90° の角をなし、複屈折は非常に小さい。このことから明らかのように、複屈折を(少なくとも1次のオーダーで)最大にするには2枚の電極板の配向処理方向を互いに 45° の角をなすようにすればよい。このときデバイスのON状態での光透過率は最大になる。反射モードで用いた 45° ツイストと 90° ツイストのネマティック液晶セルの特性には図7に示すように顕著な違いがみられる。

図7 反射モードの45°ツイストと90°ツイストのツイストネマチックセルの電気光学効果の比較

3. CdS 光入力型液晶光バルブ

A. 構造

一般的なデバイス構造を図8に示す。この交流光バルブは2板のガラス板にはさまれた数層の薄膜で構成されている。低圧（5～10V_{rms}）

図8 CdS液晶光バルブの断面図

の低周波電源が多層構造の両外側の(InO₂/SnO₂ (ITO) 薄膜透明電極に接続されている。フォトコンダクタ（光伝導体）の硫化カドミウム(CdS)と遮光層のテルル化カドミウム(CdTe)は整流性のヘテロ接合を構成している。フォトコンダクタは誘電体ミラーと遮光層により読み出し光の影響を受けない構造となっている。この構造により、デバイスは書き込み光・読み出し光の波長に関係なく書き込みと読み出しを同時に行なうことができ、これがこの交流光バルブの大きな特徴である。又、誘電体ミラーが液晶内を直流電流が流れるのを阻止しているため、デバイスは長寿命である。更に、誘電体ミラー

の反射波長域を適当に選ぶことにより、ミラーの分離効率を最適化するとともにデバイスの反射率を最大にすることができる。液晶層は化学的に安定なSiO₂絶縁層の間に封入されているため、デバイスは非常に長寿命である。なおこのデバイスに用いた液晶はビフェニール系のネマティック液晶である*。

B. 動作

デバイスの動作を図9に示す理想的な光バルブ基板**の等価回路を用いて説明する。同図で、

図9 入力光が入射しないときの理想化した光バルブ“基板”の等価回路と電圧波形

ダイオードはCdS/CdTeヘテロ接合ダイオードを表し、キャパシタは誘電体ミラーのキャパシタンスを表す。この図はOFF状態、すなわち、CdS光センサに入力光が入射しない場合を表したものである。この回路に交流電圧を加えれば、キャパシタは最初の周期で電源の負のピーク電圧（ $-V_p$ ）まで充電される。この電圧は正弦的な電源電圧の全ての値に対してダイオードの逆バイアスとなる。もしダイオードの逆方向抵抗が無限大ならば、電源電圧が周期的でさえあれば、その周波数、波形、振幅にかかわらず、回路に流れる定常状態の電流は常に0である。従って理想的な液晶光バルブの入力光が入射しない部分では電流は全く流れない。

さて、次に入力光が入射する部分について考えよう。理想化した回路では、光入射により図10(a)のようにダイオードに並列に漏れ抵抗が生じることになり、キャパシタはダイオードが逆バイアスされるサイクルでこの漏れ抵抗を適して放電する。この時の電圧・電流波形はそれぞれ図10(b), (c)のようになる。電源周波数が十分

* British Drug House mixture E-7

** 光バルブ“基板”とは光伝導体、遮光層および誘電体ミラーからなる薄膜構造の部分を表す。

図10 入力光が入射したときの理想化光パルス“基板”の等価回路と電流波形

低く、電流が十分大きければ、光入射した部分の液晶にはその電気光学閾値を越す電界が印加され、スイッチングが起る。この結果、書き込まれた画像を投射ビームによって読み出すことができる。

実際の光パルスにより近い等価回路を図11に示す。ここで R_1 、 C_1 はそれぞれ液晶の抵抗とキャパシタンスを表わし、 C_2 はミラーのキャパシタンスを表わす。更に R_4 と R_3+R_4 および C_3 はそれぞれダイオードの順抵抗と逆抵抗およびキャパシタンスを表わしている。ミラーの漏れ抵抗 R_2 が極めて大きいとすれば、 ω を電源の基本角周波数として $R_2 C_2 \omega \gg 1$ が成立し、回路中 R_2 の効果は無視できる。理想的な回路とは異なり、図11で表わされる回路ではフォトコンダク

図11 実際の光パルスの等価回路

タに光が当たらない場合でも多少の電流が流れる。この回路で光が入射すると R_3 と R_4 の値は減少し C_3 は増加（接合のフォトキャパシタンス効果による）する。その結果、光の当たった部分での電流は当たらない部分より大きくなる。フォトコンダクタにより液晶の電気光学効果を制御することができるのはこの電流の違いのためである。従って、光の当たらない部分で電流は液晶

の閾値レベルより小さく、光の当たっている部分では液晶分子をスイッチングするのに適当な値だけ閾値より大きな電流が流れるようにデバイスの“基板”を設計しなければならない。この電流比は光パルスの光電効率を決めるものであるので、著者らはこれをデバイスのスイッチング比と呼ぶが、一般的にデバイス設計の目標はこの比を最大にすることにある。

フォトコンダクタのCdSはスパッタによって作製される多結晶の薄膜であるが、ストイキオメトリ（化学量論的組成）からのずれや多くの格子欠陥をもっており、このためキャリアトラップの密度は比較的大きい。又、CdSは2.4eVという大きなバンドギャップエネルギーを持つ半導体であり、このバンドギャップ中には長寿命のキャリアトラップも存在する。このためフォトコンダクタの応答は遅くなるが、キャリアトラップは光電流のゲインを生み出すという重要で有益な役割をも果たしており、このゲインがなければデバイスは満足に作動しない。図10から分るように殆んどサイクルでダイオードは逆バイアスになっている。この逆バイアス電圧の殆んどはCdS層にかかっており、CdTeにかかる電圧は無視できる位小さい。その理由はCdS（20~40 μ m）はCdTe（2 μ m）に比べずと厚く、約100倍の比抵抗を持っているからである。

OFF状態ではCdS層は接合から裏面までの全域にわたってデプレッション（空乏）状態になっている。これに光が入射すると電子—正孔対が生成される。正孔は殆んど直後にトラップされるが、電子は比較的自由に移動できるのでサイクルが空乏状態の間に全て移動してしまう。トラップされた正孔が電子と再結合するまでの寿命は非常に長い。もし電源の周期がトラップされた正孔の寿命より短かければ、光生成された電子はトラップされた正孔と再結合するまでの間の各サイクルごとに何回も生成され移動する。これがゲインを生み出し、ゲインは駆動周波数と正孔の寿命に比例する。ダイオードをデプレッションモードで動作させた時はそうでない場合に比べてトラップされた正孔の寿命は長

いもデプレッション領域で再結合確率は事実上0に等しく、再結合は回復時間内のみで起る。従ってデプレッションの場合のトラップされた正孔の寿命は、デプレッションとなる時間の非デプレッションとなる時間に対する比を乗じたものとなる。実験により、このゲインは10KHzで100のオーダとなり、スイッチング比は100Hzから100KHzにわたってほぼ一定であることが分った。これは暗電流は主としてキャパシタを通して流れる電流であるので周波数に比例するのに対し、光電流はゲインにより流れる電流であるためである。

表1. CdS液晶光バルブの性能

TABLE I. CdS LCLV PERFORMANCE

LC MODE	HYBRID FIELD EFFECT
CLEAR APERTURE	46 mm DIAMETER
LIMITING RESOLUTION	70 LINES/mm
CONTRAST RATIO	50:1
SENSITIVITY	50 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ AT 520 nm
TIME RESPONSE	100 m sec

このデバイスの性能を表1に示す。デバイスは現在ヒューズ社で半ば生産段階に入っており、光情報処理のための最も有用なデバイスのひとつと考えられる。

4. Si光入力型液晶光バルブ

A. 構造

ヒューズ研究所では第2世代の液晶光バルブ(LCLV)の開発が最終段階にまで来ている。この新しいデバイスはフォトコンダクタ(光伝導体)として高抵抗のシリコン単結晶の薄い(5ミル)ウエハを用いたものである。このデバイスは応答速度、感度、分解能および生産性の点でCdSを用いたデバイスより優れたものとなる可能性をもっている。

デバイスは図12のようにシリコンフォトコンダクタと酸化膜層からなるMOS構造を有している。誘電体ミラーと遮光層が一体化された構造は最近開発されたものである、この構造により、強い読み出し光のフォトコンダクタへの影

図12 Si液晶光バルブの断面図

響をなくすると共に、広い波長域で要求される高い反射率(90%以上)を実現することができ。読み出し光は液晶を通過してこの誘電体ミラーによりリトロー反射される。液晶は先に述べたハイブリッド電界効果モードで動作する。

B. 動作

MOSの動作モードは周期的なデプレッション(空乏)状態とアキュムレーション(蓄積)状態からなっている。デプレッション状態(活性状態)では、高抵抗のP型(π)シリコンは完全に空乏状態になっており、入力光により生成された電子生孔対は電界により移動し、液晶を駆動する信号電流を生じる。この信号電流によってSi/SiO₂界面に蓄積された電子は、電源周波数周期の終りでパルス的にMOSがアキュムレーション状態になった時に再結合により消滅する。信号電流電子をウエハ内で(拡散によってではなく)電界と π -SiO₂界面にリンの打ち込みによって作成したn- π グリッドにより移動させることにより、シリコンを通した画像も入力画像と同じ空間分解能を持つようにすることができる。このグリッドは流入する電子をグリッドにより定義される分解単位に集中させる作用をもつとともに、既にSi/SiO₂界面に蓄積された電子の電荷“容器”を形成する。このため横方向の“流れ出し”は起こらず、従って電荷パターンが鮮明さが失われることはない。シリコンウエハの周辺部には周囲から活性領域へ少

数キャリアが注入されるのを防ぐためダイオードガードリングが設けられている。光変調器には応答速度が速く正の誘電異方性をもった液晶によるツイスト角 45° の薄い液晶層が用いられている。入力電極は $\text{InO}_2/\text{SnO}_2$ を被着したファイバオプティックフェイスプレートである。前面ガラス上の電極上には $\text{InO}_2/\text{SnO}_2$ 導電層と液晶スペーサが埋積されている。全体は陽極酸化したアルミニウムの気密ホルダ内に組立てられている。

フォトコンダクタや薄膜構造およびシリコンプロセスなど最近の技術発展により、デバイスの分解能、コントラスト比および応答速度は相当改善されてきている。現在の性能の詳細を表2に示す。又、代表的な時間応答と幾つかのSi-LCLVのMTFカーブをそれぞれ図13と14に示す。

表2. Si液晶光バルブの性能

TABLE II. PERFORMANCE OF Si/LCLV

- RESOLUTION: 70 LINES/mm (LIMITING)
(FOCUSING GRID-10 μm PERIODICITY)
- SENSITIVITY UP TO 20 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
- CONTRAST RATIO: UP TO 100:1
- RISE/DECAY TIMES 5/20 ms (LC - LIMITED)
- NONLINEAR RESPONSE: BETTER THAN 10% IN 80% OF OPERATIONAL REGION
- VERY GOOD REAL-TIME TV PROJECTION (LAG FREE OPERATION)
- MULTIMODE (PSEUDO COLOR) CAPABILITY: 2 COLORS + GREY SCALE

図13 Si液晶光バルブの時間応答 上側：入力LED光パルス（負レベル＝0V） 下側：出力光応答 立上り時間＝4 msec, 立下り時間＝22msec

現在継続されている研究の課題は

(1)出力像の均一性の改善, (2)遮光層の遮光能力の改善, (3)高い空間周波数域の変調度（図14参

図14 幾つかのSi液晶光バルブの変調伝達関数 (MTF)

照)を高めるためのSiプロセスの改善などである。

5. CCDアドレス液晶光バルブ

このデバイスは液晶光バルブ (LCLV) の第3の世代であり、現在ヒューズ研究所で開発が進められているものである。このデバイスは、電氣的に駆動されるもので、従って入力ディスプレイ（すなわちCRT）が不必要であるという点で先に述べた2つのLCLVと異なっている。このCCD/LCLVは光情報処理システムをより小型・堅牢にすることを主眼に開発されている。

デバイスの機能の概略を図15に示す。CCD（電荷結合デバイス）回路は時系列の電気信号を2次元の情報フレームに変換しCCDアレイ内に電荷パケットとして蓄積する。最初に情報

図15 CCD入力液晶光バルブの構造

の1ラインがCCDのシリアル入力レジスタ(x方向)にロードされ、このレジスタが満たされるとこのラインの情報全体がCCDの平行アレイに平行に転送(y方向)される。次にシリアルレジスタに新しい1ラインの情報が入力される。更に第1ラインの情報が平行アレイ内で1段シフトされると同時に第2ラインの情報がシリアルレジスタから平行アレイの第1段に転送される。この過程が平行アレイに情報フレーム全体が満たされるまで繰り返される。最後にフレーム全体が同時に液晶層へ転送(z方向)され、空間的に分解された電圧変調パターンとなる。この転送は平行CCDアレイのゲートを全て同時にアキュムレーションにバイアスし、蓄積していた電荷パケットを放出することによってなされる。この空間的なパターンをなす電子電荷は、薄いエピタキシャル層内をデバイスの高抵抗シリコン基板側まで拡散した後、完全に空乏状態となっている基板の空間電荷領域の電界により捕集される。この変調は、CCD平行アレイに新しい情報フレームが入力される間、一時的に液晶層に保持される。このデバイスからの光学的読み出しは先に述べた2つのLCLVと同様にして行われる。基本的なCCD光バルブの読み出し機構の断面図を図16に示す。信号電荷がCCD平行アレイから液晶界面に移される際には、薄

い($125\mu\text{m}$)高抵抗($5\text{K}\Omega\cdot\text{cm} < \rho < 10\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$)の π -シリコン基板は低抵抗($1\Omega\cdot\text{cm} < \rho < 50\Omega\cdot\text{cm}$)のエピタキシャル層まで完全に空乏状態となっている。この転送は空乏層の電界によってなされるが、電界分布はCCD面に垂直であるので(先に述べたSi/LCLVと同様に)CCD平行アレイの空間分解能を損うことなく行われる。シリコンエピタキシャル層は中程度の比抵抗をもち、表面チャンネルCCDのレジスタとストレージアレイを作製するのに適している。低抵抗のチャンネルストップは主として隣接するCCDラインを分離する役割を果たす。これはまたエピタキシャル層へのオーミックコンタクトでもあるので、エピタキシャル層は読み出しのための液晶へのバイアスに対してSiチップのCCD側の種々の電気信号をシールドするための電氣的な接地面としても用いられている。

以上で説明したように、このデバイスには2種類の全フレームの蓄積機構がある。第1はCCDアレイであり第2は液晶であるが、後者はほぼ指数関数的に消失する性格をもっている。このため、CCDストレージを時系列の入力信号を平行型式に変換し、その後フレーム全体を平行に液晶(第2のストレージ)と光処理システムに転送するために用いることができる。このことは全ての画素が同時に表示される必要のあるコヒーレント光情報処理では非常に重要なことである。64×64エレメントのCCD光バルブが既に作製され、その動作が確認されている。これらのデバイスではフレーム全体で32本の読み出し空間分解能と50:1以上の読み出しコントラスト(図17参照)が得られている。この基本設計を拡張してフレーム当たり256×256エレメントの空間分解能を達成する試みが現在なされており、最初のデバイスが2ヶ月以内に完成する予定である。長期にわたっては100MHzの入力を処理できる1000×1000アレイのデバイスを目指と考えている。

6. 応用

一般的に言ってこの種のデバイスは汎用性が

図16 CCD液晶光バルブの断面図

図17 CCD液晶光バルブの電気—光学伝達関数，横軸：ゲート電圧 V_{gate} で表した入力信号電荷 (Q_{in} , $Q_{in} = C_{ox} V_{gate}$)。

あり，作製過程を少し変えれば，多くの異なった用途に用いることができる。最も重要な応用はもち論，大スクリーンのディスプレイシステムである。これらのディスプレイシステムは，コマンド・コントロールのためのカラーシンボル表示やフライトシミュレーション用のテレビジョンその他多くの応用が考えられる。

A. コマンド・コントロール

この種のシステムは文献1に述べられているもので，また図1にも示したように1個の単電子鏡CRTと1個の光バルブから構成されている。CRT上の輝度の違いがスクリーン上で異なった色として表示される。CRT上の空間的な輝度分布は液晶に加わる電圧の分布に変換され，液晶層の実効的複屈折の空間的な分布が生じる。実効的な複屈折 Δn と液晶の厚さ d の積で与えられる光路差が比較的大きいので，位相差 ($\Delta n d / \lambda$) は光の波長 (λ) によって著しく異なり，このためある波長の透過率は大きく他の波長に対しては小さくなる。液晶の透過スペクトルは図18のようになるが，この範囲で色が良好に識別されシンボル表示に適するような動作点を何点か選ぶことができる。さらに，基板に垂直な配向をも利用すれば，同時にハーフトーンを含んだ明暗の画像をも作り出すことができる。ツイストネマティック配向の場合にはスペクトルは更に複雑なものになる（計算は文献6と7に述べられている）。必要となる大きな光路差を得るための液晶厚さは $6 \sim 15 \mu m$ である。この方法

図18 基板に垂直に配向（ホメオトロピック配向）し液晶層の透過スペクトル

により非常に簡単な多色システムが実現できるが，応答速度が $50 \sim 200 msec$ と比較的遅い。しかし，この応答速度でもシンボルディスプレイには十分に用いることができる。CdS光バルブを用いたこのシステムは市販されている。

B. テレビジョン

この場合は高速で多色かつハーフトーンを含む応答が必要である。このため図19のような3チャンネルの色混合システムが用いられる。3原色がダイクロイックフィルターにより選択され，McNeilビームスプリッターにより重ね合される。このシステムの重要な利点は全てのコ

図19 3チャンネル色混合システム

ンポーネントが光軸上にあることで、従ってシステムを画素の精度で軸合わせすることが比較的容易なことである。このタイプのシステム (CdS光バルブを用いたもの) は既に作製されており、近く市販されることとなろう。

C. 光情報処理

光学的な情報処理の重要な応用領域は広帯域時系列信号の処理と2次元情報又は画像情報の処理である。光入力型のデバイスは画像処理に有効に利用でき、^{5,8,9)} CCD入力型空間光変調器は両方の領域に応用できる。CCD-LCLVの特に重要な応用はレーダーの信号処理であり、これには“ぼけ”関数発生や合成開口レーダー (SAR) 処理も含まれる。

2個の液晶光バルブを用いた“ぼけ”関数発生システムについては既に報告があるが、⁵⁾ 光入力型のLCLVをCCD入力のLCLVに置き換えることによりCRTや音響光学ユニットを用いる必要がなくなりシステムは格段に改善されるであろう。

最近NOSCの研究者により、合成開口レーダー (SAR) のための電気-光学プロセッサ (EOP)にCCD-LCLVを援用することが提案された。EOPの原理は高速のLEDを入力に用い、時間的に変化するLED発光強度と適当な2次元透過マスクの相関をとることによるRange-Azimuthの処理である。¹⁰⁾ この相関はCCDイメージセンサを用いてマスクを透過した空間的に変調された光強度を積分することにより得られる。このシステムでCCD-LCLVをプログラマブルマスクとして用いれば (図20), フライタ条件や、ターゲットの性格等を種々に変化させることができ、リアルタイムで相関をとることができる。もう一つのCCD-LCLVの有効な応用にスペクトル分析があげられる。この場合CCD-LCLVは (リアルタイムの) 100Hzのフレームレートのとき100MHz以上の帯域で 10^6 点の分解能を得ることができるであろう。必要なパワーとサイズを考えに入れれば、このような性能は開発中の最新のデジタル技術 (VHSIC) でさえも達成することはできないであろう。

図20 CCD液晶光バルブを用いた電気-光学プロセッサ (LEDはダイオード列のうちの1個を示している)

コヒーレント光相関システムはフライタガイド、標的検出・認識を行えるような設計が可能である。¹¹⁾ ホログラフィックマッチドフィルタ技術を用いた最初の実験では明るい見通しが得られている。¹²⁾ 大部分の画像センサシステムでは時系列のビデオ電気信号が出力されるが、この信号はCCD-LCLVに入力することができる。

図21 CCD入力と光入力型の液晶光バルブを用いた結合変換法による画像相関システム

上述の応用のための画像と参照パターンの相関を行う一例を図21に示した。ここで解析する画像 $A(t)$ (ビデオ型式) と参照画像 $B(t)$ の相関演算が結合変換法¹³⁾により行なわれる。2個のCCD-LCLVはフーリエ面で乗算されるコヒーレントなリアルタイム光画像を発生するための電気-光学変換器として用いられており、光

入力型のSi-LCLVは乗算された画像を再変換することにより求める相関を得るために用いられている。

解析される画像をSi-LCLV上に直接結像させることのできる場合もあるが、Si-LCLVは450～550nmの波長域で $50\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 程度の感度をもち、実際には400nmから1100nmまでの広い波長域で用いることができる。この場合、Si-LCLVの直接画像出力およびインコヒーレントコヒーレント変換の機能を有効に利用することにより、入力画像をビデオ信号で記録・読出する必要はなくなる。

D. 可視-赤外画像変換器

この応用では光バルブは波長変換器の機能を果たす。一般にこのデバイスは可視動画を赤外動画に変換する。赤外イメージセンサシステムの試験と評価がその目的の一つである。

これを具体化したシステム¹⁴⁾では光バルブは透過モードで作動させる。この場合、反射モードより透過モードの方が(1)非常に長い(10 μm)波長域では誘電体ミラーの作製が非常に困難である、(2)光伝導体(CdS, Si)は長波長に感度を持たないので透過モードで使用できる、の2つの理由で適している。CdSやSiは赤外光を良く透過させるが、ガラス基板は通常のものに代って赤外域で透明な材料(例えばZnSe)に置き換えなければならない。又、液晶は(45°ツイストの代りに)90°ツイストとし液晶層厚さを適当に選ぶ必要がある。優れた性能のシステムが開発されている。¹⁴⁾

以下のコントラクトによる開発援助に感謝する。F33615-80-C-1019 (AF/AWL), F33615-81-C-0018 (AF/HRL), N00024-76-C-5366 (NAVSEA)。

参考文献

- 1) Jan Grinberg, William P. Bleha, Alexander D. Jacobson, Anna M. Ladner, Gary D. Myer, Leroy J. Miller, J. David Margerum, Lewis M. Fraas, and Donald D. Boswell, IEEE Trans. ED- , 775-793 (1975).
- 2) D. W. Berreman, J. Opt. Sci. Am. **63**, 1374 (1973).
- 3) L. M. Fraas, J. Grinberg, W. P. Bleha, A. D. Jacobson, J. Appl. Phys. **47**, 576 (1976).
- 4) L. M. Fraas, W. P. Bleha, A. D. Jacobson, J. Appl. Phys. **47**, 584 (1976).
- 5) W. P. Bleha, L. T. Lipton, E. Wiener-Avneer, J. Grinberg, P. G. Reif, D. Casasent, H. B. Brown, B. V. Markevitch, Opt. Eng **17**, No. 4, 371 (1978).
- 6) J. Grinberg, A. D. Jacobson, J. Opt Soc. Am **66**, 1003 (1976).
- 7) E. Wiener-Avneer. To be published.
- 8) J. Grinberg, A. D. Jacobson, W. P. Bleha, L. J. Miller, L. M. Fraas, Opt. Eng. **14**, 217 (1975).
- 9) J. Grinberg and E. Marcus, Proc. SPIE **118**, 66 (1977).
- 10) K. Bromley, M. A. Monahan, R. R. Bocker, A. C. Louie, and R. D. Martin, "Incoherent Optical Signal Processing Using Charge-Coupled Devices (CCDs)," SPIE **118**, 118 (1977).
- 11) K. G. Leib, R. A. Bondurant, S. Hsiao, R. Wohlers, and R. Herold, "Aerial Reconnaissance Film Screening Using Optical Matched-Filter Image Correlator Technology," Appl. Opt. **17**, 2892 (1978).
- 12) B. D. Guenther, C. R. Christensen, and J. J. Upatnieks, "Coherent Optical Processing: Another Approach," IEEE J. Quantum Electron, **QE-15**, 1348 (1979).
- 13) J. E. Rau, "Detection of Differences in Real Distributions," J. Opt. Soc. Am. **56**1490 (1966).
- 14) J. Grinberg, U. Efron, M. J. Little, W. P. Bleha, Proc. SPIE **226**, 129 (1980).