

解 説

光 空 間 変 調 素 子

窪田 恵一・西田 信夫

日本電気(株)光エレクトロニクス研究所 T213 川崎市宮前区宮崎 4-1-1

(1984年12月13日受理)

Spatial Light Modulator

Keiichi KUBOTA and Nobuo NISHIDA

Opto-Electronics Research Laboratories, NEC Corporation,
4-1-1, Miyazaki, Miyamae-ku, Kawasaki 213

1. ま え が き

光空間変調素子とは入射した光の振幅あるいは位相を空間的にかつ実時間に変調する光学素子であり、図形やデータパターンのような2次元情報を空間的に表示し、処理する素子である。

光空間変調素子の研究が本格的に開始されたのは、ホログラムメモリや光情報処理の研究が盛んになった1970年代からである。ホログラムメモリ¹⁾は2次元状の1あるいは0を配列した入力情報パターンを一つの微小ホログラムに記録していく高密度な光メモリで、2次元情報パターンを形成するためにマトリックス状の開口を有する光空間変調素子が用いられた。また、光情報処理の研究では、空間フィルタリング、光学的マッチドフィルタリングなどのコヒーレント光学処理²⁾の研究が進み、紙に印刷された文字や風景などの対象物をコヒーレント光で扱える形に変換するための光空間変調素子が必要とされた。この目的の光空間変調素子は、空間的に連続に広がる画像を形成するために、マトリックス状の開口は有しておらず、ある波長の光が入射した部分のみが散乱状態になったり、複屈折性が変化したりする特性を必要としている。このタイプの素子は、普通の光（インコヒーレント光）で照明されたパターンをコヒーレント光変調用のパターンに変換するという意味で、インコヒーレント-コヒーレント変換素子（I-C変換素子）^{3,4)}と呼ばれている。また、“光の弁”という意味でライトバルブ（light valve）とも呼ばれている。

最近、光による演算処理の高速性、並列性に注目して

光コンピューティングの研究が盛んになってきている^{5,6)}。光コンピューティングにおいては、並列的に情報を入力する素子あるいは並列的に演算する素子として光空間変調素子が必要であり、光コンピューティングの性能は光空間変調素子の性能に大きく依存する。このため、従来に増して高解像度で高速の光空間変調素子の要求が高まっている。

本稿では、光空間変調素子を分類し、その動作原理と性能を紹介し、次に光空間変調素子の応用、とくに光コンピューティングへの関わりについて述べる。

2. 種類と動作原理

光空間変調素子の基本機能を図1に示す。光学的あるいは電気的情報を光空間変調素子に与えると、光空間変調素子を透過、もしくは反射するレーザー光やインコヒーレント光はその入力情報によって変調を受け、2次元画像、処理画像、データパターンとなって出力される。これらの入出力の組合せによって、光空間変調素子は光情報処理、ディスプレイ、プリンタの用途に実用化されている。

光空間変調素子は情報書き込み手段によって表1のように分類することができる。光学像を書き込む光空間変調素子は、光伝導体と表示媒体との組合せによる素子が多く、光情報処理用として従来から研究され、報告例が多い⁷⁻²³⁾。光ビーム（レーザービーム）書き込みや電子ビーム書き込みによる光空間変調素子は、ビーム走査によって画像を表示媒体に書き込む素子である。光ビーム書き込みでは、上に述べた光学像書き込み型素子を用いるほか

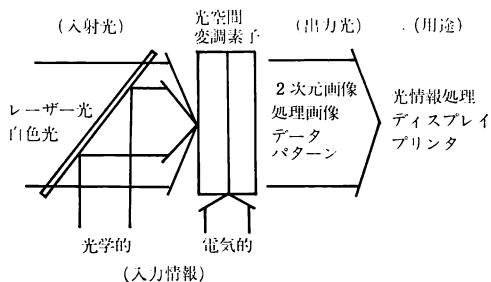


図1 光空間変調素子の基本的機能

表1 光空間変調素子の情報書き込み手段による分類

情報書き込み手段	情報記録表示媒体	発生画像
光学像	光伝導性強誘電体結晶	偏光面回転画像
	光伝導体-強誘電体結晶	
	光伝導体-液晶	
	MCP-電気光学結晶	
光ビーム	光吸収体-液晶	散乱画像
電子ビーム	油膜	位相画像
	強誘電体結晶	偏光面回転画像
電気信号	CCD-液晶	偏光面回転画像
	マトリクス電極-電気光学結晶	
	マトリクス電極-磁性材料	
	マトリクス電極-アルミ薄膜	位相画像

に、光ビームの熱を利用する素子がある。電子ビーム書き込みには、油膜、強誘電体結晶、サーモプラスチックなどを用いた素子があり²⁰⁻²⁶⁾、油膜を用いたものは大画面TVとして実用化されている^{24,25)}。電気信号を直接入力して書き込む光空間変調素子は、CCD (charge coupled device) やマトリックス電極と表示媒体を組み合わせ、表示画素に信号を転送して書き込み、表示する素子である²⁸⁻³²⁾。この電気信号書き込み型素子は最近になって発表されたものが多く、現在では一次元シャッター配列として電子写真プリンターに応用されているものが多い^{29,30)}。

以上に述べた光空間変調素子の基本性能を種類別にまとめたものが表2である。これらの光空間変調素子のうち、光情報処理、とくに光コンピューティングへの応用を考えられる光学像書き込み型と電気信号書き込み型の素子について、代表的なものを取り上げ、その動作原理を以下に述べる。

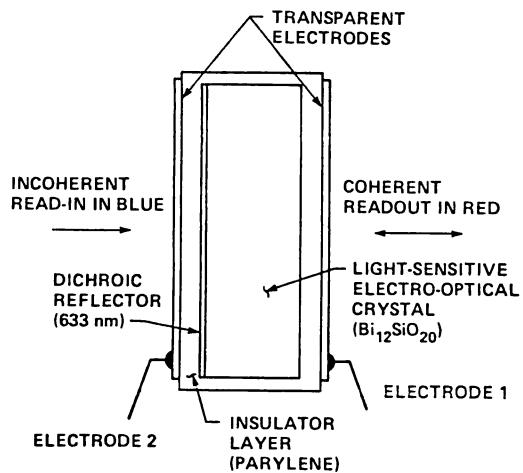


図2 光伝導性ポッケルス効果素子(PROM)の構成

2.1 光学像書き込み型素子

現在、光学像書き込み型で商品化されている光空間変調素子は、光伝導性材料と電気光学効果をもつ材料とを組み合せたものである。これは、この組合せが、光伝導性材料の光に対する高感度特性と外部から加えられた電界の変調による大きな電気光学効果とを利用できるためである。このような素子には、光伝導性強誘電体結晶、光伝導体-強誘電体結晶、光伝導体-液晶がある。

光照射のみで、透過率、吸収率などその材料自身の光学的特性が可逆的に変化する材料、たとえばフォトクロミック材料、アモルファス半導体(As-S系)、色中心材料(NaF, KCl: NaCl)、電気光学結晶(LiNbO₃, BaTiO₃)、もあるが、これらの材料は光空間変調素子と機能するには感度が低く、応答速度も遅い。そこで、光照射によって光電面で発生する2次電子をマイクロチャンネルプレート(MCP)で増倍して電気光学結晶に電荷パターンを形成する光空間変調素子が提案されている。

2.1.1 光伝導性ポッケルス効果素子⁷⁻¹²⁾

光伝導性ポッケルス効果素子は BSO(Bi₁₂SiO₂₀)などの光伝導性強誘電体結晶の薄片を図2のように絶縁層で包み、両端に透明電極をつけた素子である。BSO結晶は青色光により光伝導性を示すと同時に、印加された電圧に応じて読み出し光(赤色光)の偏光面を回転させるポッケルス効果をもつ結晶で、他に BGO(Bi₁₂GeO₂₀)結晶も同じ効果をもつ。透明電極間に電圧(～1 kV)を印加して、光を入射すると、結晶の光伝導性によって入射する光の強度分布に応じて電子が移動し、結晶に加わる電圧が空間的に変化する。この電圧の結晶面上での空間分布に応じて、結晶に空間的な複屈折分布が生じ、ポッ

表 2 光空間変調素子の種類と性能

種類	性能 物質 (名稱)	書き込みエネルギー (mJ/cm ²)	コントラスト	解像度 (lp/mm)	書き込み時間	消去時間 (立下り時間)	サイズ	用途
光伝導性ポッケルス効果素子	(Bi ₁₂ SiO ₂₀) (Bi ₁₂ GeO ₂₀)	2.5×10 ⁻³	5×10 ³	150～500	~μs	<6 μs	4 cm ⁴	光情報処理
光伝導体一強誘電体結晶	KD ₂ PO ₄ Bi ₄ Ti ₂ O ₁₂ PLZT	10 ⁻² 1 10	40～100 20 30	20～75 ~800 ~50	10 μs ~ms ~s	10 μs ~ms ~s	4 cm ⁴ 1 cm ⁴ 3.25 cm ⁴	光情報処理
光伝導体一液晶	CdS-液晶 シリコン-液晶	2.4×10 ⁻³ 4×10 ⁻²	20～100 20～100	35～100 25～35	10～30 ms 2～5 ms	15 ms 5～20 ms	2.5 cm ⁴ 5.0 cm ⁴	(光情報処理 ディスプレイ)
MCP-電気光学結晶	MCP-LINbO ₃	2.2×10 ⁻⁶		~10	30 ms	30 ms	2.5 cm ⁴	光情報処理
電子ビーム一強誘電体結晶	KD ₂ PO ₄	100 μA ビームカレンジト	60	40	30 ms	1 ms	5.1 cm ⁴	光情報処理
電子ビーム一油膜	Eidophor GE ライトバルブ	20 μA ビームカレンジト	<400 100	1000 TV 本	32 1 ms	<13 ms 5～300 ms		ディスプレイ
電子ビーム一サーモプローラスチック	Lumatron		100	35	0.03 ms	<1 s		
CCD-液晶		—	50	32	30 ms		0.5 cm ⁴	光情報処理
GaAs CCD		—	10 ³	100	~ns			光情報処理
マトリクス電極一電気光学結晶	TIR PLZT	— —	500<	5	0.5 μs 10 μs	10 μs		プリント、光情報処理
マトリクス電極一磁性材料	ガーネット薄膜	—		5～50	0.5～10 μs	~10 μs	2.5 cm ⁴	プリンター、ディスプレイ
薄膜トランジスターAl 薄膜	DMD	—		10	0.1～1 μs	0.1～1 μs	0.5 cm ⁴	ディスプレイ、光情報処理

ケルス効果として読み出される。書き込み度は ~ 25 erg/cm²と高く、解像度は結晶の厚さと書き込み時の電荷分布に依存して 150 lp/mm 以上であり、コントラストは 10³ 程度が得られている。BSO 結晶を用いた光空間変調素子は Itek 社から PROM (Pockels Read-Out Optical Modulator) という商品名で市販されている。最近、国内でも大面積の BSO 結晶が製作可能になり^{11,12)}、この光空間変調素子を用いた研究が盛んになっている。

2.1.2 光伝導体-強誘電体結晶を用いた素子¹³⁾

光伝導体と強誘電体結晶とを組み合わせた光空間変調素子は光伝導性ポッケルス効果素子と同様に、書き込み光によって電荷分布が形成され、その結果生じる複屈折効果を利用する。素子は DKDP (KD₂PO₄) や Bi₄Ti₂O₁₂ の結晶に誘電体ミラーと CdS, ZnSe などの光伝導体をつけて一体化したもので、DKDP を用いて実現したものは photo-titus と呼ばれている。電気光学効果を利用するため駆動電圧が数 kV と高く、photo-titus では駆動電圧を下げるためにキューリー点 (-50°C) 近くに冷す必要がある。

2.1.3 光伝導体-液晶を用いた素子^{8,9,14-17)}

光伝導体と液晶とを組み合わせた光空間変調素子は図 3 に示す構造をもち、液晶ライトバルブと呼ばれている。光伝導体には CdS と CdTe のヘテロ接合による構成が用いられ、CdTe は読出し光が CdS に入射するのを防止する遮光層としても働いている。誘電体ミラーは読出し光を反射するために設けられている。液晶はネマチック液晶で、ツイストネマチック効果と複屈折効果を利用したハイブリッド電界モードで動作する¹⁶⁾。画像

(書き込み光) が光伝導体に投影されると、光が照射された部分は光伝導体のインピーダンスが低下し、光が照射されていない部分に比べて高い電圧が液晶に印加される。このため、画像に相当する電圧パターンが液晶に加わり、ハイブリッド電界効果によって、入射光の偏光状態は電圧パターンに応じて回転される。このようにして、液晶ライトバルブで反射された光は書き込み画像によって変調される。

液晶ライトバルブの解像度は素子を構成する材料の層厚に依存して 50 lp/mm 程度、表示速度は液晶の応答速度で制限され 30 ms 程度である。液晶ライトバルブは FROM と同様に市販されていて、この素子に関する応用研究の報告例が多い。液晶ライトバルブの時間応答特性を改善するために、光伝導体を CdS から Si に変えたシリコン液晶ライトバルブ¹⁷⁾が現在研究開発されている。

また、図 3 と同様の構造で、電圧印加時に周期的な帯状ドメインが生じる薄層の液晶を用いた、VGM (variable grating mode)^{8,9)} 液晶ライトバルブがある。周期的な帯状ドメインは回折格子として作用し、そのピッチは印加電圧、すなわち照射光強度とともに変化する。この VGM 液晶ライトバルブを用いると周波数領域での光学的処理が容易に行なえる。

2.1.4 MCP-電気光学結晶を用いた素子

(MSLM)²¹⁻²³⁾

今までに述べてきた素子と異なり、この光空間変調素子は 2 次電子増倍効果をもつ MCP と電気光学結晶とを組み合わせた素子である。素子は図 4 に示す構造をもち、画像 (書き込み光) がフォトカソードに入射すると 2 次電子が放出され、2 次電子は MCP で 10⁴ 倍程度に増倍加速されて誘電体ミラーに衝突する。この結果、誘電体ミラー上に電荷パターンが形成され、この電荷パターンによる電圧によって電気光学効果が結晶に生じ、結晶を透過する読出し光の偏光面が回転する。電気光学

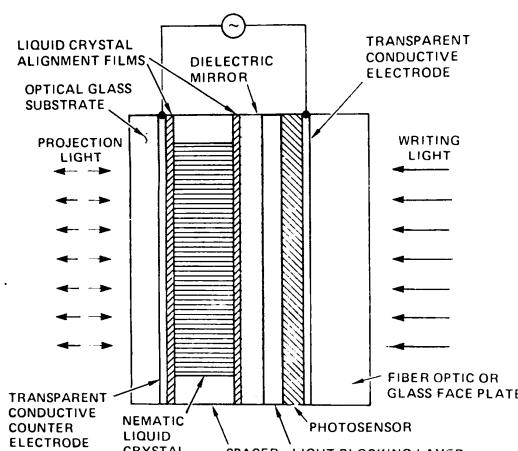


図 3 液晶ライトバルブ (CdS 型) の構成

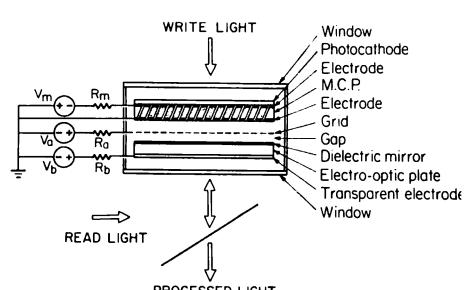


図 4 MCP を用いた素子 (MSLM) の構成

結晶には LiNbO₃, LiTaO₃ が用いられ, 解像度はこの結晶上の電界分布と結晶の厚みによって決まり, 10 本/mm 程度である. MSLM の特徴は, 非常な微弱光に対して感度をもつこと, バイアス電界のかけ方によって画像の反転, 演算が容易にできる点にある.

2.2 電気信号書き込み型素子

電気信号書き込みによる光空間変調素子には表1に示したように、マトリックス電極書き込みとCCD書き込みの二つの型がある。現在は、画素数が少なく、一般的な光情報処理の応用には不十分な性能であるが、今後改良が十分に期待される。

2.2.1 マトリックス電極書き込み型素子²⁸⁻³²⁾

マトリックス電極や薄膜トランジスタ配列を用いて、電気光学結晶や熱光学効果を生じる材料に電気的に書き込む型の素子が提案されている。その一つに DMD (deformable mirror device) と呼ばれる MOS トランジスタのアドレス層でアルミ膜を変形させる、図 5 に示す構造をもつ素子があり光スペクトルアナライザに応用した報告例がある²⁸⁾。また一次元状の素子であるが、電気光学結晶 (LiNbO_3) の屈折率変化を利用した全反射型

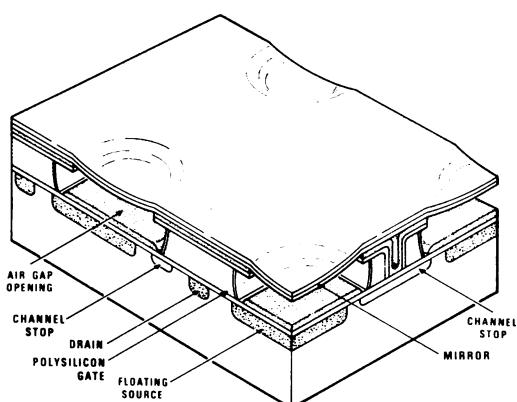
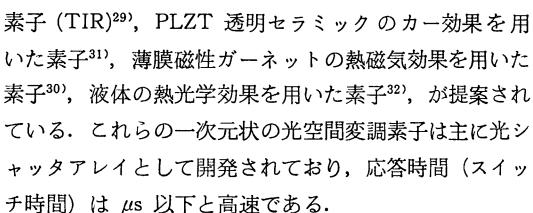


図 5 変形ミラー (Al 膜) を用いた素子 (DMD) の構成



2.2.2 CCD 書込み型素子^{27,33)}

CCD (charge coupled device) 書込み型素子は時系列信号の電気的書込みを高速に行なうために CCD チャンネル層を設けた光空間変調素子である。液晶と CCD を組み合わせた CCD 液晶ライトバルブ²⁷⁾は、図 6 に示すように CCD チャンネル層、電荷転送層、液晶セルのハイブリッド構造からなる。時系列信号が CCD に入力されると次々に転送され、二次元の画像フレームが形成される。次に、この二次元的な電荷分布が面と垂直方向に転送され、液晶にかかる電界分布が形成され、2.1.3 で述べた光書込み方式の液晶ライトバルブと同様にして画像が形成される。現在、128×128 画像の素子が実現

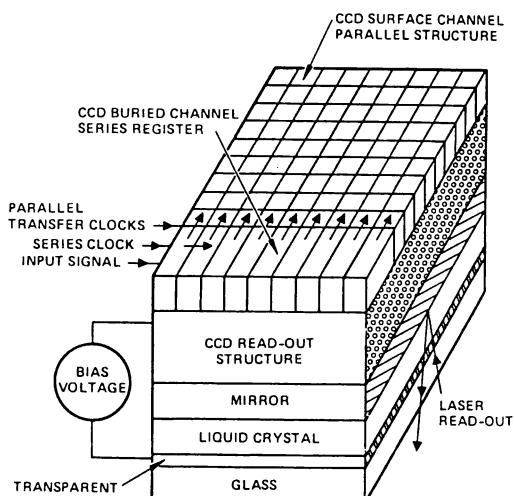


図 6 CCD 液晶ライトバルブの構成

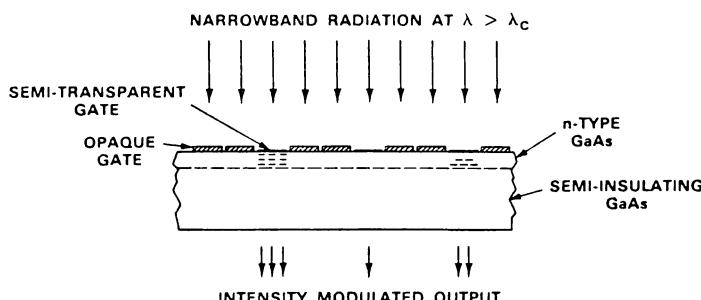


図 7 GaAs CCD 素子の構成

されているが、 $1,000 \times 1,000$ 素子の開発が計画されている。

また、フランツ-ケルディッシュ効果（電子吸収効果）を利用した高速の GaAs CCD 素子が提案されている³³⁾。その構造を図 7 に示す。Cr をドープした GaAs 基盤上に n 型の GaAs 層があり、ゲート間の電荷量によって光の吸収率が変化し、電荷パターンに応じて画像が取り出される。応答時間は 1 ns 程度と高速で、光学的な書き込みも可能である。読み出し光は 900 nm と長波長であるが、今後に期待できる素子といえる。

3. 光空間変調素子の応用例

光空間変調素子はコヒーレント光学処理を始めとする種々の光情報処理、ディスプレイなどに応用されている。また、最近では、光コンピューティングに関する提案の中に光空間変調素子が必要構成要素として取り上げ

られる場合が多い。ここでは、光空間変調素子の応用について、代表的な光情報処理への応用と光コンピューティングへの応用を紹介する。

3.1 I-C 変換

光空間変調素子を用いて、インコヒーレント光の画像をコヒーレント光の画像に変換し、実時間相関^{34,35)}、実時間フィルタリング³⁶⁾、波長変換³⁷⁾、などが行なわれている。

3.1.1 実時間相関

光空間変調素子を用いた実時間相関をロボットアイに応用した例を図 8 に示す。ベルトコンベアで移動する自動車部品の像を液晶ライトバルブに書き込み、コヒーレント光学系で扱える画像に変換し、その画像をマッチドフィルターに入射させる。マッチドフィルターにはすでに標準部品のフーリエ変換ホログラムが記録されていて、必要とする欠陥のない部品の像のフーリエ変換像が

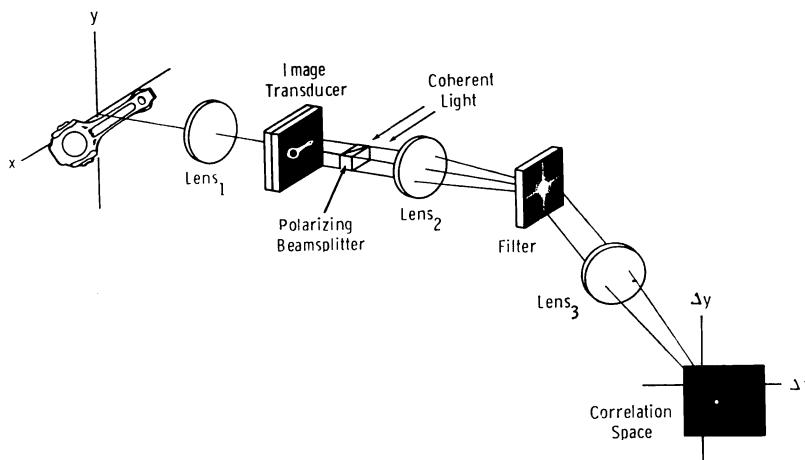


図 8 実時間相関処理システム

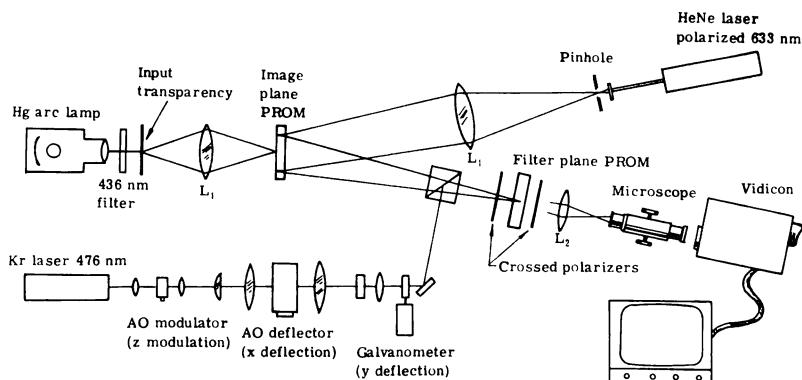


図 9 実時間フィルタリング処理システム

入射したときに相関信号が得られる。置かれた方向の異なる部品に対して同じ相関信号を得るために、回転ミラーで画像を回転したり、相関信号の S/N を良くするために画像の輪郭強調を行なうなどの工夫がなされている。一部品の相間に要する処理時間は 1 秒で、相関信号に基づいてロボットハンドが移動して必要とする部品をつかむという実験がなされている³⁴⁾。

最近、半導体レーザーを光源に用いて、実時間相関システムを ITV カメラと同程度のポータブルな寸法にまとめた報告もある³⁵⁾。

実時間相間はマッチドフィルターが現在では可変にできないため、あらかじめ決められた対象物を検知する目的に応用が限られている。

3.1.2 実時間フィルタリング

光空間変調素子に任意のフィルターパターンを書き込み、任意のフィルタリングを実時間で行なうシステム³⁶⁾を図 9 に示す。2 個の BSO 素子 (PROM) が用いられ、一つの PROM を I-C 変換素子として用い、他の PROM を実時間的に可変の空間フィルターとして用いている。空間フィルター用の PROM にはレーザービーム走査で任意のフィルターパターンが書き込まれる。このようなシステムを用いると、入力画像の雑音除去 (高域カット), 輪郭強調 (低域カット), 微分, などの処理を実時間で行なうことができる。

3.1.3 波長変換

光空間変調素子の光感度-波長依存性を積極的に利用して、ある光波長の画像を異なる波長の画像に変換する応用が提案されている³⁷⁾。図 10 に示すように CRT (陰極線管) 動画像 (可視光) をシリコン液晶ライトバルブ

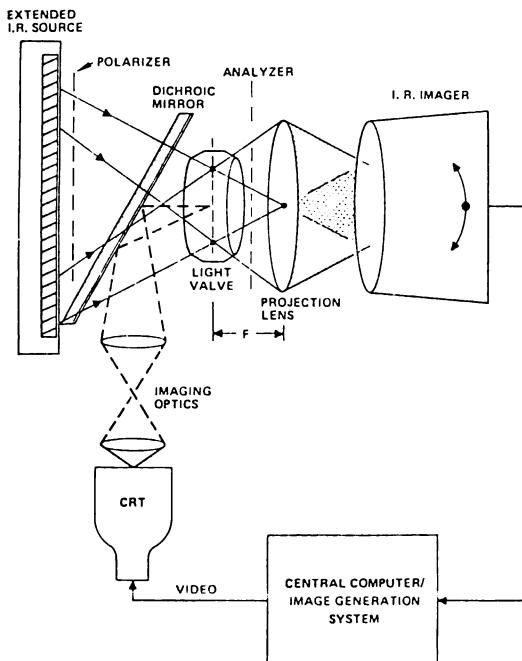


図 10 可視-赤外波長変換処理システム

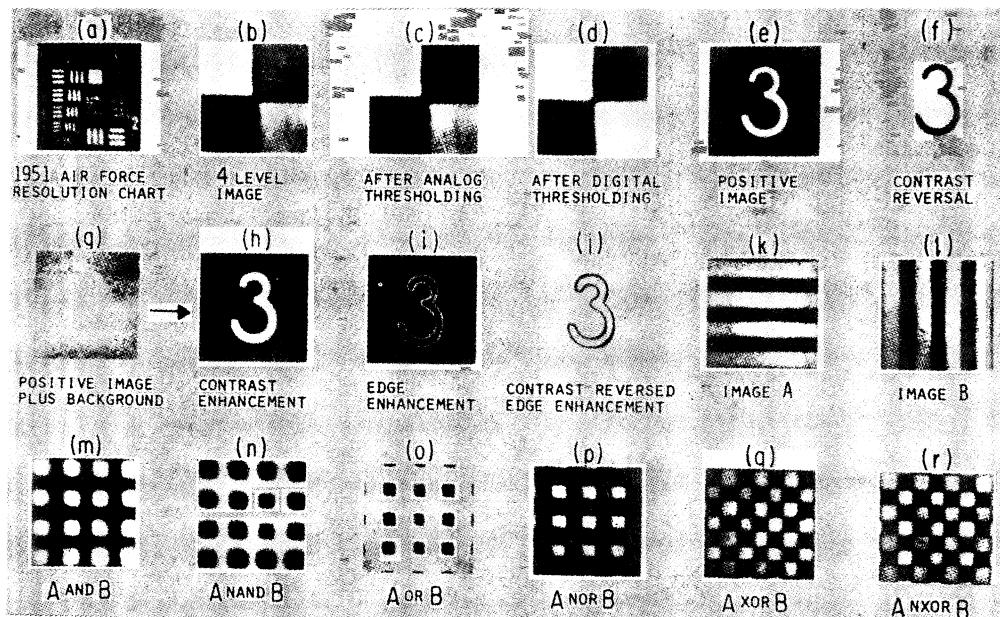


図 11 MSLM による画像処理例

に書き込み、赤外レーザーあるいは黒体光源からの赤外光を液晶ライトバルブに照射し、読み出される赤外動画像を赤外イメージセンサーシステムに投射する。この方法によって赤外イメージセンサーシステムの優れた試験と評価が可能であり、波長 $13\text{ }\mu\text{m}$ までの赤外光に対して高コントラストな画像が得られることが確認されている。

3.2 画像処理

光空間変調素子を用いて、入力画像のコントラスト反転、輪郭強調などの処理や、2画像間の AND, OR, EXOR, などの演算が可能である^{22,38)}。2.1.4で述べたMSLMを用いた画像処理例を図11に示す。MSLMでは画像書き込み時にグリッド電圧を変化させると、正電荷像あるいは負電荷像として蓄積でき、このことを利用し

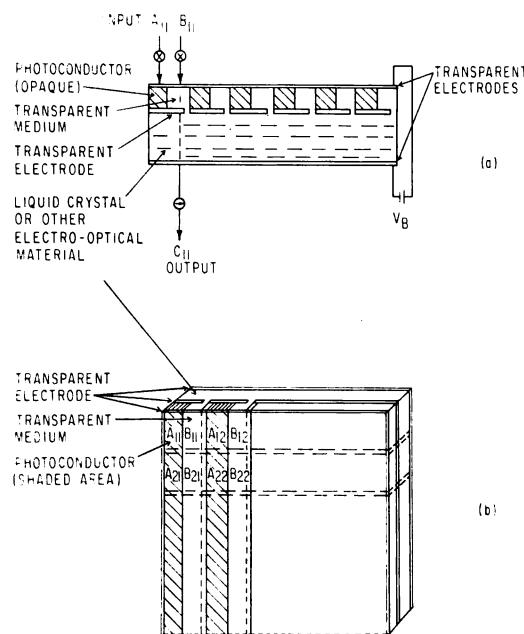


図 12 液晶を用いた並列光論理 (OPAL) 素子
(a) 断面図, (b) 正面図

て種々の画像処理が可能である²²⁾。

3.3 並列光論理演算

高速化に限界の見えて来た電子的演算に代わり、光の並列処理を用いて高速にデジタル演算を行なう提案がなされている。

3.3.1 光半加算器

光空間変調素子を用いて2入力情報のデジタル演算を並列に行なう提案がある³⁹⁾。図12はこの演算に用いる並列光論理素子を示す。各画像が帯状に2分されていて、2入力情報A, Bはそれぞれ異なる部分に入射するように構成されている。書き込み原理は液晶ライトバルブの原理と同じである。入力情報Aの一要素 A_{ij} が0の場合は、入力情報Bの一要素 B_{ij} が液晶を透過するとその偏光方向は 90° 回転する。 A_{ij} が1の場合は、 B_{ij} の偏光方向は変化せず液晶を透過する。並列光論理素子をはさんで偏光子、検光子を置くと、それらが平行に置かれているときに得られる演算結果 (C_{ij} : 透過光) は $A \cup B$ となる。偏光子、検光子が直交して置かれているときは、演算結果は $\bar{A} \cap B$ となる。この並列光論理 (OPAL: optical parallel logic) 素子を2個用いた半加算器は図13のように構成される。入力情報A, Bの2入力を二つのOPAL素子に入射すると、演算結果であるCARRY (桁上り信号) とSUM (和) が得られる。この方式による半加算器で現在実現できる演算速度は $2 \times 10^7 \text{ bits/s}$ 程度である。

また、光源アレイと符号化マスク (光空間変調素子) からなる投影光学系を用いた方式でも、同様の並列光論理演算が可能であることが示されている⁴⁰⁾。

3.3.2 マトリックス演算

フーリエ変換やベクトル演算に必要なマトリックス演算を光空間変調素子を用いて高速で行なう方式が提案されている⁴¹⁾。図14に示すように、LED光源とマトリックスマスク (光空間変調素子) とCCD光検出器を組み合わせた構成を用いる。LEDは時系列的に強度変調し

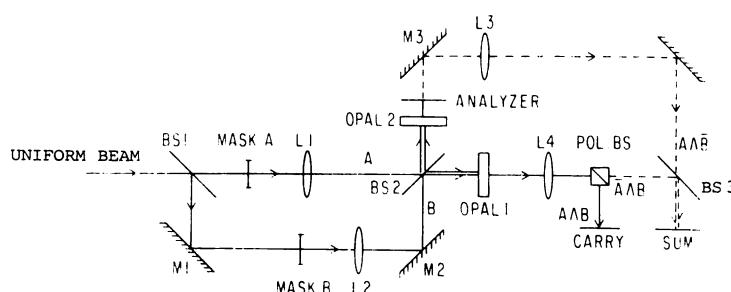


図 13 OPAL 素子で構成した半加算器

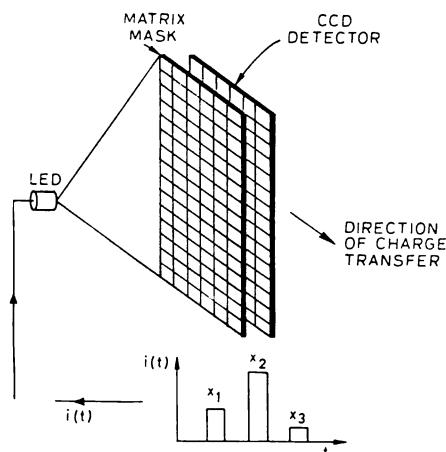


図 14 LED を用いたマトリックス演算器

た信号で点灯し、マトリックスマスクを透過した光が CCD 光検出器に受光される。受光量に比例して発生する電荷は CCD のクロック信号ごとに列方向に移動し、LED 光量とマトリックスマスクの透過率との積の値が加算されていく。その結果、最終クロック時に行列演算結果が得られる。このようなマトリックス演算には、LED アレイと 1 次元受光素子アレイを用いた方式⁴²⁾、3 次元的に光空間変調素子を配列した方式⁴³⁾、なども提案されている。演算速度は 32 ビットの FFT (高速フーリエ変換) で 3×10^9 サンプル/秒が可能とされている。

3.4 光スペクトルアナライザ

画素数の多い光空間変調素子を用いた光スペクトルアナライザの報告がある。光空間変調素子に電気的に入力信号を書き込み、読み出し光のフーリエ変換パターンを光学的に得れば、光スペクトルアナライザが実現できる。2.2.1 で述べた DMD を用いた二次元スペアナ²⁸⁾、TIR を用いた一次元スペクトルアナライザ²⁹⁾の報告がある。

4. おわりに

光空間変調素子を用いた種々の光演算の提案があるが、これらの演算処理が電子的回路よりも速度的に優るためにには、光空間変調素子の並列度、スイッチング速度の向上がかなり必要である。光がゆえのうまい処理方法、アーキテクチャの発明が望まれる。最近、プリンタ用シャッターアレイとして種々の高速の一次元光空間変調素子の提案があり、二次元素子への拡張も可能であるので、今後、光演算に適した光空間変調素子の出現が期待できそうである。

文 献

- 1) T. Tsunoda, K. Tatuno, K. Kataoka and Y. Takeda: *Appl. Opt.*, **15** (1976) 1398.
- 2) D. Casasent: *Proc. IEEE.*, **67** (1979) 813.
- 3) 鳥居康弘: *画像技術*, 7月号 (1973) 33.
- 4) 西原 浩: *応用物理*, **49** (1980) 479.
- 5) 日経コンピュータ, 9月5日号 (1983) 41.
- 6) 一岡芳樹: *計測と制御*, **22** (1982) 851.
- 7) P. Vohl, P. Nisenson and D. S. Oliver: *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-20** (1973) 1032.
- 8) S. G. Lipson and P. Nisenson: *Appl. Opt.*, **13** (1974) 2052.
- 9) B. A. Horwitz and F. J. Corbett: *Opt. Eng.*, **17** (1978) 353.
- 10) 末元好郎, 藤田 茂, 峯本 工: *光学*, **7** (1978) 194.
- 11) 日経エレクトロニクス, 6月9日号 (1980) 64.
- 12) 多田祐二, 工原美樹, 龍見慎一: *電子通信学会総合全国大会*, 855 (1980).
- 13) D. Casasent: *Opt. Eng.*, **17** (1978) 365.
- 14) J. Grinberg, A. D. Jacobson, W. P. Bleha, L. Miller, L. Fraas, D. Boswell and G. Myer: *Opt. Eng.*, **14** (1975) 217.
- 15) A. D. Jacobson, J. Grinberg, W. P. Bleha and L. Miller: *Inf. Disp.*, **12** (1975) 17.
- 16) W. P. Bleha, L. T. Lipton, J. Grinberg, P. G. Reif, D. Casasent, H. B. Boom and B. V. Markevitch: *Opt. Eng.*, **17** (1978) 371.
- 17) U. Efron, P. O. Braatz, M. J. Little, R. N. Schwartz and J. Grinberg: *Opt. Eng.*, **22** (1983) 682.
- 18) B. H. Soffer, D. Boswell and A. M. Lackner: *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **218** (1980) 81.
- 19) A. R. Tanguay, C. S. Wu, P. Chavel, T. C. Strand, A. A. Sauchuk and B. H. Soffer: *Opt. Eng.*, **22** (1983) 687.
- 20) D. Casasent: *IEEE Trans. Commun.*, **C-22** (1973) 852.
- 21) C. Warde, A. M. Weiss, A. D. Fisher and J. I. Thackara: *Appl. Opt.*, **20** (1981) 2066.
- 22) C. Warde and J. I. Thackara: *Opt. Lett.*, **7** (1982) 344.
- 23) C. Warde and J. I. Thackara: *Opt. Eng.*, **22** (1983) 695.
- 24) E. Labin: *J. SMPTE*, **54** (1950) 393.
- 25) W. E. Good: *Proc. Natl. Electr. Conf.*, **24** (1968) 771.
- 26) R. J. Doyle and W. E. Glenn: *Appl. Opt.*, **11** (1972) 1261.
- 27) M. J. Little, et al.: *Soc. Information Display Tech. Digest* (1982) p. 250.
- 28) D. R. Pape and L. J. Hornbeck: *Opt. Eng.*, **22** (1983) 675.
- 29) R. V. Johnson, D. L. Hecht, R. A. Sprague, L. N. Flores, D. L. Steinmetz and W. D. Turner: *Opt. Eng.*, **22** (1983) 665.
- 30) B. Hill and K. P. Schmidt: *Philips J. Res.*, **33** (1978) 211.
- 31) 岩岡秀人, 杉山 直: *電子通信学会光・量子エレクトロニクス研究会資料*, OQE 81, No. 115 (1981) 15.
- 32) 箕浦一雄, 曰井正幸, 松岡和彦, 馬場 健, 鈴木雅之, 浅井 朗: 第 12 回微小光学研究会 (1984) p. 1.
- 33) R. H. Kingston: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-19** (1983) 1443.
- 34) A. D. Gara: *Appl. Opt.*, **16** (1977) 149.

- 35) J. G. Duthie and J. Upatnieks: Appl. Opt., **22** (1983) 2798.
- 36) S. Iwasa: Appl. Opt., **15** (1976) 1418.
- 37) J. Grinberg, U. Efron, M. J. Little and W. P. Bleha: Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., **226** (1980) 129.
- 38) U. K. Sengupta, *et al.*: Opt. Lett., **3** (1978) 199.
- 39) R. A. Athale and S. H. Lee: Opt. Eng., **13** (1979) 513.
- 40) J. Tanida and Y. Ichioka: J. Opt. Soc. Am., **73** (1983) 800.
- 41) R. P. Becker: Appl. Opt., **13** (1974) 1670.
- 42) J. W. Goodman, *et al.*: Opt. Lett., **2** (1978) 1.
- 43) R. P. Becker, *et al.*: Appl. Opt., **2** (1983) 804.