

解 説

光コンピュータを構成する機能デバイス

秋 山 浩 二

松下電器産業(株)中央研究所 〒570 守口市八雲中町 3-15

(1991年8月2日受理)

Functional Devices for Construction of Optical Computer

Koji AKIYAMA

Central Research Laboratories, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.,
3-15, Yagumo-nakamachi, Moriguchi 570

1. はじめに

光コンピュータの研究開発気運が、年々高まってきている。通産省では、91年度に終了する第5世代コンピュータ開発プロジェクトに統いて、92年度より、光情報処理を含めた新しいプロジェクトをスタートさせる予定である。このプロジェクトは、従来のファン・ノイマン型のコンピュータでは達成できなかった、「より人間に近い、柔らかな情報処理」を実現するコンピュータを目指したものである。この柔らかな情報処理を実現するためには、生物が行っているのと同じような超並列分散処理が必要不可欠であると考えられている。したがって、並列処理を最大の特長とする光による演算方式は、この新しい情報処理を実現する重要な技術の一つとして大きな期待を集めている¹⁾。

このように周囲からの熱い眼差しが向けられる中で、光コンピューティングの研究も大きく様変わりしてきた。従来では、光コンピュータの多くは、アーキテクチャおよびシステム構成の提案だけにとどまっていたのが、最近では、実際にデバイスを用いてシステムを構成し、その可能性を実証していく傾向が顕著になってきたのである。このように光コンピュータが具体的なものに近づいてきた背景には、周囲からの要望が強くなってきただけではなく、それらを構成するデバイスに著しい進歩があったからといってよいだろう。今まで、光機能デバイスは、主に通信やディスプレイ向けに発展してきた過程で、新しい材料技術およびプロセス技術の開発・向上を生み出してきた。その結果、光機能デバイスの特性が

光演算に供することが可能になるまでレベルアップしてきたとともに、光演算専用の新規なデバイスも作製されるようになってきたのである。

こうしたことから、本誌でも既に光コンピュータを構成する光機能デバイスとして、VSTEP をはじめとする半導体光機能素子²⁾、液晶または光学結晶を用いた空間光変調素子³⁻⁵⁾などについて優れた解説がなされている。

本稿では、光コンピュータの中でも、近年、特に進展の著しい光連想メモリーに焦点を絞り、光連想メモリーを構成するキーデバイスについて紹介する。

2. 光連想メモリー

連想メモリーとは、ある情報が入力されたとき、それに関連して蓄えられている情報の記憶を呼び出す（これを想起という）機能をもった装置であり、想起する内容によって、自己想起型と相互想起型とに分けられている。自己想起型とは、一部が欠落したりノイズが加わった不完全な入力情報に対して、記憶している完全な情報を出力する場合をいい、相互想起型とは、例えば、オランダという入力に対し、チューリップや風車を出力するように、内容は異なるが関連のある情報を呼び出す場合をいう。

連想メモリーは基本的には相関演算を用いており、光だと簡単に相関演算を行うことができるという理由から、数多くの光連想メモリーが提案されている。これらは、大きく二つに分類することができる。ベクトル・マトリックス乗算器を用いたもの⁶⁾と、プログラムを用いたもの⁷⁾である。これらの代表的なシステム構成を、そ

れぞれ図1および図2に示す。

ベクトル・マトリックス乗算器では、発光素子アレイを発した入力情報は円筒レンズで縦方向に展開され、マトリックス状に記憶内容を表示した空間光変調器を通過して積演算が施される。その透過光は、さらに円筒レンズで受光素子アレイに横方向に集光（和演算）され出力結果となる。通常、入力情報は、0, 1のよう2値で表現されており、受光素子アレイからの出力も閾値処理され、2値で表現される場合が多い。また、光の並列性を活用するために、入力および出力ベクトルを2次元に配列し直す場合もある⁸⁾。

もう一方のホログラフィック光連想メモリーは、現在まで提案してきた光コンピュータの中で、唯一画像を扱え、二次元並列性という光演算の特長を最も生かしたものである。このシステムでは、一部が欠落した画像をホログラム（前もって、連想すべき複数の画像をそれぞ

れ参照光の入射角度を変えて多重記憶してある）に入力すると、記憶している各画像との相関がとられ、その相関の強さに応じた光強度で参照波が再生する。それらの参照波を、位相共役鏡（PCM）内にレンズで光のスポットとして集光する。PCMは、一定の強度以上の光を選択的に增幅し、PCMへの入射方向とまったく同一方向に光を逆行させる閾値処理機能をもっているため、入力像に近い画像の参照光だけが選ばれて、逆方向から再度ホログラムを読みだす。こうして得られた再生像は、ホログラムに記憶している画像がそのまま現れることになり、画像の一部分から全体像を復元することができる。

これらの光連想メモリーは、ニューラルネットワークのもつ並列性との整合性、ならびに学習による演算への柔軟性の付与の点から、ニューラルネットワークのアルゴリズムで動作する場合が多い。

3. 光連想メモリーを構成するデバイス

これらの光連想メモリーの中で用いられているキーデバイスは、ベクトル・マトリックス乗算器の空間光変調素子、ホログラフィック光連想メモリーの位相共役鏡およびホログラムである。以下では、これらのデバイスの現状について述べる。

3.1 空間光変調素子

空間光変調素子は、2次元並列光情報の強度や位相を実時間で変調する機能をもつもので、電気的または光学的にアドレスされる。電気アドレスタイプは、制御性に優れるが、情報を線順次で書き込むため、書き込み時間が長くなる。これに対し、光アドレスタイプは光を使って情報を並列に書き込めるため書き込み時間を短くできるが、2次元並列の書き込み光を作るのに工夫を要する。以下に、実際に光連想メモリーの構成に使用されている、あるいは使用が期待される空間光変調素子について説明する。

3.1.1 液晶空間光変調素子

液晶を用いた空間光変調素子（liquid crystal display : LCD）は、電圧を印加することにより液晶（一般的にはツイストネマチック効果で動作するネマチック液晶）分子の配列を変化させ、素子を通過する光の透過量を制御するものである。LCDは、ポケットTV、プロジェクションTVなど、ディスプレイへの応用を主たる目的として発展してきたが、最近、ハイビジョンTVへの応用を目指して、画素のより高密度化および高精細度化が進められている。現在、パネルサイズ：5.5インチ、画素数：1,024×1,440のものが登場してきており⁹⁾、大規模

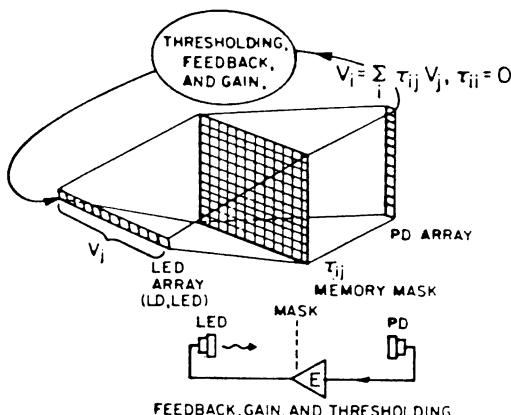


図1 ベクトル・マトリックス乗算器を用いた光連想メモリー

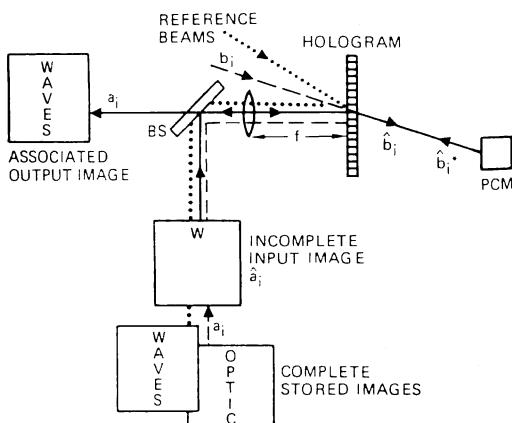


図2 ホログラムを用いた光連想メモリー

な光演算システムを構築する上で、最も手軽に使用できる素子である。駆動方法としては、単純マルチプレックス方式に比べて、高コントラストなアクティブマトリックス方式が一般的である。アクティブマトリックス方式は、薄膜トランジスタ(TFT)あるいはダイオードなどの2次元アレイを用いて、ドットマトリックス表示の各画素をオン・オフさせるものである。図3にTFTに非晶質シリコン(a-Si)を用いた液晶パネルの断面図¹⁰⁾を示す。

TFT(この図では逆スタガ構造)は、各画素に配置されている。ゲート絶縁層には、 SiN_x 膜が用いられており、TFTオフ期間の信号電圧保持特性向上のため、第1ITO電極/ SiO_x 膜/ITO表示電極で構成される蓄積容量を液晶セルと並列に設けてある。TFTには、a-Siの他に多結晶シリコンもよく使用されている。多結晶シリコンの場合、a-Siに比べてキャリヤ移動度が大きい、駆動回路との一体化が可能などの特長をもつが、高温プロセスを必要とするためコストが高くなるのが欠点である。LCDには数十msと応答速度が遅い問題があるが、100:1以上のコントラストを有することや、中間調表示可能などの特長を活かし、頻繁に表示内容を書き換えなければならない汎用の演算装置ではなく、余り書き換えを必要としない特殊用途の演算装置に応用すれば、空間光変調素子として十分実用に耐え得るであろう。

TN液晶に比べて応答速度が3桁速く、双安定性を有する強誘電性液晶(ferroelectric liquid crystal: FLC)が注目されている。LCDでは、パネルサイズ1.7インチで $1,280 \times 1,280$ 画素のものが作製されており¹¹⁾、a-SiとFLCを組み合わせた光アドレス型の空間光変調素子の開発も活発に行われている。最近、筆者らは、光和算と閾値処理機能をもった光ニューロン素子と呼ばれる空間光変調素子を開発した¹²⁾。図4に、この素子の断面図

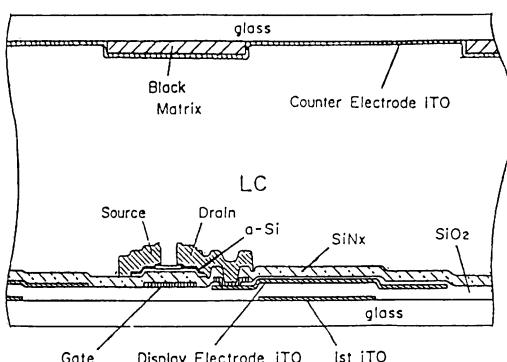


図3 TFT-LCDの素子構造

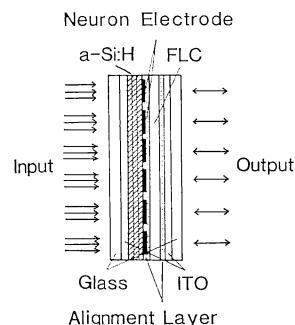


図4 光ニューロン素子の構造

を示す。この素子は、2次元アレイ状に配列したアルミニウム薄膜からなるニューロン電極を介して、pin構造のa-SiフォトダイオードとFLCを電気的に直列接続したものである。以下に、1個のニューロン電極を有する単位セルを想定して、素子の動作原理について説明する。

素子に、pin a-Si フォトダイオードに対して逆バイアスとなるパルス電圧を印加すると、フォトダイオードの抵抗はFLCのそれに比べて大きいため、印加電圧のほとんどはa-Si部分にかかる。そのため、パルス電圧が印加されてもFLCはオフ状態からオン状態に移ることができない。しかし、この時、ITO透明電極を通してa-Siフォトダイオードに入力光が照射されている場合、ニューロン電極内のa-Si部分の電圧は、a-Si部分を流れる光電流、すなわち入射光量に依存して変化する。言い替えれば、入射光量の増加に伴い、a-Si部分の電圧が減少し、FLCにかかる電圧が増大する。ただし、FLCは、電圧に対して急峻な光透過特性(閾値特性)をもっているため、ある光量以上の入力光を照射した時に、はじめてFLCをオン状態にすることができる(入力光に対する閾値処理)。

この閾値処理の結果は、クロス・ニコルの読み出し光学系において、反射鏡としても働くニューロン電極からの反射光のオン・オフとして出力される。入力光に対する閾値処理結果が読み出された後は、素子に順バイアスの電圧パルスを印加して、FLCをオフ状態に戻す。また、a-Siフォトダイオードは、高品質膜の作成により、量子効率がほぼ1で、かつ入射光量に比例した光電流が流れる優れた直線性($\gamma=0.99$)を実現している。すなわち、ニューロン電極内の入力光の強度分布にかかわらず、入力光の光量の総和に比例した光電流が流れるため、入力光に対し正確な和算が行えるわけである。このように、この素子は、光入力に対して光和算を行い、さ

らに閾値処理を行った結果を光出力し、神経細胞が行っているといわれる情報処理と同じような機能を光演算により実現していることから、光ニューロン素子と呼ばれている。また、これらの動作は、ニューロン電極からなる各セルにおいて、独立に、かつ並列に行われる。ベクトル・マトリックス乗算器では、受光素子の出力を電気回路で閾値処理をしていたが、この素子の開発により、電気回路を用いない全光演算システムの構築が可能になった¹³⁾。この他にも数多くの a-Si/FLC 空間光変調素子が提案されているが、これらについては、詳しい解説がなされている文献 3), 4) を参照されたい。

3.1.2 変形ミラー型空間光変調素子

変形ミラー型空間光変調素子 (deformable mirror device : DMD) は、金属の薄膜からなるミラーを電荷のクーロン力で変形させることにより、反射光をスイッチングするユニークな素子である¹⁴⁾。図 5 にカンチレバータイプの素子の構造を示す。Si 基板内に MOS ランジスタを形成しており、これを使って、ミラーを変形させるための電荷をアドレスする。アドレスは線順次を行い、 128×128 画素のアレイがフレームレート : 1.2 kHz で動作している。カンチレバータイプは一点で金属ミラーを支えているため、ミラーの面が平になりにくい。そこで、図 6 に示すようなミラーを二点で支えたねじりタイプの DMD も開発されている¹⁵⁾。ミラーをねじる向きは、アドレス電極の電位の極性によって制御でき、双安定なスイッチングを行っている。4 × 600 画素のものが試作されており、コントラストは、~150 : 1 である。チップサイズ 2.54 × 5 cm で $1,024 \times 2,048$ 画素の集積が可能であるという。製作コストが高いという問題があるようだが、駆動電圧は 5~10 V と小さく使いやす

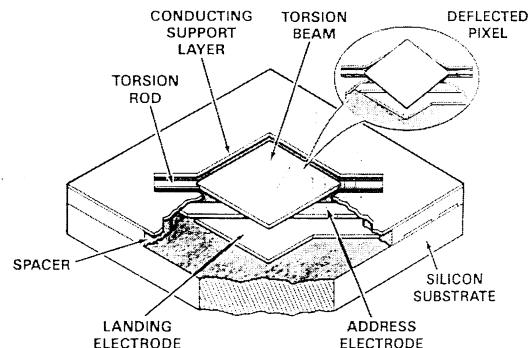


図 6 ねじり型 DMD の構造

い。また、駆動回路の改良により $1,000 \times 1,000$ 画素をフレームレート 1 kHz の高速動作も可能とあって、今後の発展が期待される。

3.1.3 磁気光学空間光変調素子

磁気光学効果を用いた空間光変調素子 (magnetooptic spatial light modulator : MOSLM) は、強磁性体結晶薄膜に磁界を印加した時に、薄膜を透過する光の偏光面が回転する現象 (ファラデー効果) を利用したもので^{16,17)}、すでに LIGHT-MOD および SIGHT-MOD の商標で市販されている。素子の構造を図 7 に示す。強磁性体結晶は、ビスマス置換した鉄ガーネットで非磁性のガドリニウム・ガリウム・ガーネット単結晶基板上にエピタキシャル成長させている。縦および横方向に設けられた配線に電流を流すことによって、各画素内の磁性薄膜の磁化方向の向きを定め、情報を表示する。磁化方向の向きは、正または負の何れか一方向をとるため、情報は、2 値で表示される。市販のものは、 128×128 画素、数十 Hz のフレームレートで動作している。1 画素

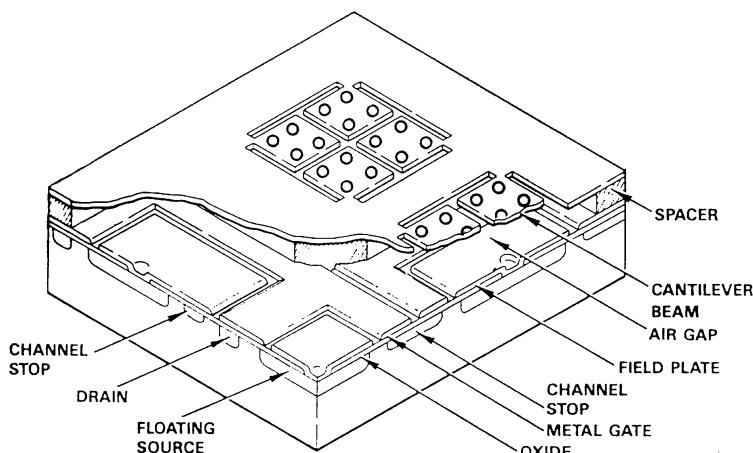


図 5 カンチレバー型 DMD の構造

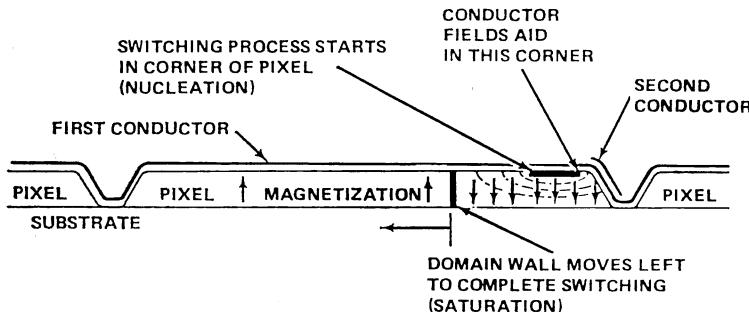


図 7 磁気光学空間光変調素子の構造

では、数十 ns の高速スイッチングが可能であるが、アレイにすると、スイッチングさせるための電流により発生する熱の影響で、この高速応答を実現できていないのが現状である。現在、永久磁石を使った駆動方法の改良により、素子の冷却を行うことなく、 48×48 画素アレイで、 ~ 1.6 kHz での駆動に成功している¹⁸⁾。

3.1.4 赤外輝尽蛍光体

赤外輝尽蛍光体 (optically stimulable phosphor) は、バンドギャップの広い材料である CaS に、Eu, Sm などのキャリヤの捕獲中心となる不純物を添加した蛍光体粒子 (粒径 1~10 μm) を有機バインダーに分散させて、ガラス基板上に 20 μm の厚みで塗布した素子である¹⁹⁾。この素子に、緑色光を照射すると Eu²⁺ 準位の電子が伝導帯に励起された後、直ちに Sm³⁺ に捕獲される。実質的には Eu²⁺ から Sm³⁺ へ電子の移動が行われて書き込みを完了する ($\text{Eu}^{2+} \rightarrow \text{Eu}^{3+}$, $\text{Sm}^{3+} \rightarrow \text{Sm}^{2+}$)。この状態で、波長 1,100 nm 程度の近赤外光を読み出し光として照射すると、Sm²⁺ から電子が伝導帯へ励起され、680 nm の赤色光を放出して再び Eu³⁺ に捕らえられる ($\text{Sm}^{2+} \rightarrow \text{Sm}^{3+}$, $\text{Eu}^{3+} \rightarrow \text{Eu}^{2+}$)。つまり、この素子は、緑色光で書き込んだ内容を、近赤外光を照射することにより赤色光で読み出せるというわけで、光書き込み型の変調素子としての機能を持っている。また、この素子の特長として、光に対する応答がナノ秒のオーダーであること、解像度が 100 lp/mm と高いこと、赤色出力光強度が緑色書き込み光強度にほぼ比例していること、基板に塗布するだけで簡単に作成できること、メモリー機能を有していること、電気的な制御をまったく必要としないことが挙げられる。大規模並列の光演算を高速で行える素子として、今後の発展が期待される。また、この素子の欠点に、読み出しを続けると記憶している内容がどんどん消去されてしまうことがある。したがって、記憶内容を保持したい場合は、内容をリフレッシュする必要があるわけだが、この素子を、ニューラルネットワーク

におけるシナプスに相当する光可塑性素子として用い、この欠点をシナプスにおける忘却として逆に活用することも提案されており、興味深い。

以上、光連想メモリーを構築するのに有用と思われる空間光変調素子の現状について紹介した。空間光変調素子は、光連想メモリーだけでなく、光ディジタル演算を行なう場合においても重要な素子であり²⁰⁾、ここにあげたもの他にも、PROM 素子⁵⁾、SEED²¹⁾ などさまざまな素子が開発されている。これらの素子については、文献を参照されたい。

3.2 位相共役鏡素子

位相共役波は、電気光学結晶を用いた 4 波混合により発生させることができる。図 8 に 4 波混合による位相共役波発生の様子を示す。信号波と参照波を入射すると、フォトリフラクティブ効果で結晶内部に位相ホログラムが形成され、これを参照波とは逆向きに裏側から読み出すと位相共役波が発生する。現在用いられている主な結晶は、LiNbO₃, BaTiO₃, Sr_xBa_{1-x}NbO₃, Bi₁₂SiO₂₀, GaAs, InP, GaP などである。電気光学係数の大きい BaTiO₃ の結晶を用いると信号光を入力するだけで、書き込み光と読み出し光が勝手に立ち上がり、位相共役波を発生させることができる。このような効果をもつ位相共役鏡は、自己ポンプ型と呼ばれているが、アライメン

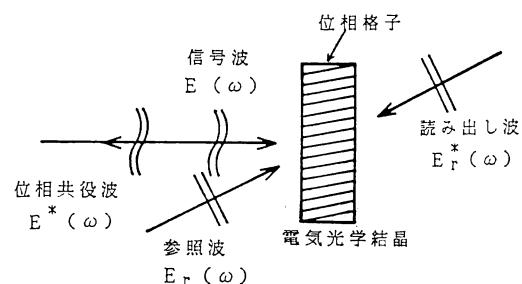


図 8 電気光学結晶を用いた 4 波混合による位相共役波の発生

トをとる必要もなく、ポンプ光を用いなくても位相共役波が得られるのでたいへん使い勝手がよい。したがって、光連想メモリーで使用されている位相共役鏡は、ほとんどが BaTiO₃ である。しかし、mW オーダーの光に対して数秒と、応答速度が遅いのが問題である。今後は、良質な結晶の作成技術の確立およびフォトリフラクティブ効果を引き起こすトラップの制御を行う、あるいは新規な材料を開発することによって応答速度の向上が望まれる。

応答速度が遅い、ならびに強度の大きな入射光を要するという電気光学結晶のもつ欠点を改善するべく、新しい位相共役鏡が報告されている²¹⁾。これは、図9に示すように、pin a-Si : H 受光層と FLC を組み合わせたもので、光書き込み型の空間光変調素子と同じ構造をしている。a-Si : H 受光層に逆バイアスが印加されている状態で、参照光 E₁ および信号光 E₃ をこの素子入射すると a-Si : H 受光層の内部で干渉縞を形成し、この干渉縞の強度分布に応じて FLC の内部に周期的な屈折率の分布を生じる。参照光 E₁ と、その反射光 E₂ は FLC 内部に生じたグレーティングによって回折され、位相共役波 E₄ を発生する。参照光 E₁ および信号光 E₃ の光強度が、0.5 mW/cm² の時に、応答速度は 100 μs と、電気光学結晶に比べてかなり改善されたが、回折効率が 8.5 %、反射率も 1.7% と小さいのが問題である。電気光学結晶だけでなく、このように新しい位相共役鏡の開発も活発に行われ、電気光学結晶の特性を越える素子の出現を期待したい。

3.3 ホログラム記録素子

ホログラムを記録する材料としては、従来、ハロゲン化銀や重クロム酸ゼラチン等が用いられてきたが、これらはいったん書き込むと、書き換えることができない。ホログラムは、画像の記録だけでなく、大容量、高密度

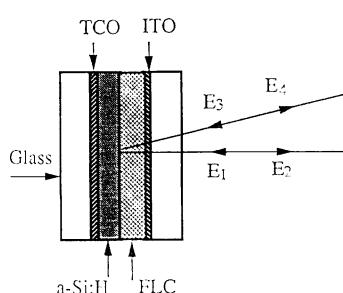


図 9 a-Si : H/FLC からなる位相共役鏡の構造 (図中の TCO は、transparent conducting electrode の略であり、ネサ電極が使用されている)

の光インターフェクション実現する素子としても期待されており、書換え可能なホログラム記録素子の開発が強く望まれている。現在、書換え可能なホログラム記録素子として、前節で述べた電気光学結晶を用いた体積ホログラムがある。解像度は 1,000 lp/mm 程度であるが、上述のように書き込み時間が長いという問題があり、位相共役鏡と併せて、応答速度の速い結晶の作成、あるいは新しい素子の開発が望まれている。

4. おわりに

光コンピュータの中でも最もポピュラーな光連想メモリーを取り上げ、それを構成する光機能デバイスについて述べた。現状の光コンピュータは、まだ簡単な光演算の可能性が実証できた「原理的な機能確認」レベルである。だが、実際にデバイスを用いて構築する動きが高まってきたことは、今まで夢として語られてきた光コンピュータが、ようやく現実のものとしての第一歩を踏み出したといってよいだろう。これには、発光素子、受光素子および空間光変調素子などの光機能デバイスの進展に依るところが大きいといえる。しかしながら、VLSI に代表される成熟した電子機能素子に比べて、現在の光機能素子の技術レベルはまだまだ未熟である。今後、光コンピュータを「原理的な機能確認」のレベルから、より現実的な「実用性の実証」レベルに発展させるためには、大規模並列処理に加えて、応用的見地から光のもつ特長（例えは、高速性、無誘導性、多重波長性など）を十分活用した「光だからこそできたんだ、光でないとできないんだ」というような光独自の情報処理を実現できる光機能デバイスの開発が重要である。そのためには、材料技術およびプロセス・デバイス化技術などの要素技術の探求はもちろん、アルゴリズムおよびアーキテクチャの開発と一体となった研究が必要不可欠であろう。

文 献

- 1) 新情報処理技術国際シンポジウム '91, 東京 (1991).
- 2) 笠原健一: 光学, 18 (1989) 330.
- 3) 岩城忠雄: 光学, 19 (1990) 295.
- 4) 黒川隆史: 光学, 19 (1990) 417.
- 5) 峯本工, 陳 靖: 光学, 18 (1989) 337.
- 6) N. H. Farfat, D. Psaltis, A. Prata and E. Paek: Appl. Opt., 24 (1985) 1469.
- 7) Y. Owechko, G. J. Dunning, E. Marom and B. H. Soffer: Opt. Lett., 12 (1987) 346.
- 8) M. Ishikawa, N. Mukohzaka, H. Toyota and Y. Suzuki: Appl. Opt., 28 (1989) 291.
- 9) Y. Okita, T. Yamada, N. Nakatani, S. Ohima, Y. Marushita, T. Arioka and T. Nakakado: Society for Information Display International Symposium Digest of Technical Papers, Volume XXII, California (1991) p. 411.

- 10) I. Kobayashi, T. Tamura, M. Uno, K. Adachi, Y. Bessho, S. Nakamura, M. Takeda and S. Hotta: *Proc. The 10th International Display Research Conference*, Amsterdam (1989) p. 48.
- 11) Y. Gohara, Y. Kobayashi, S. Fujiwara, N. Wakita, T. Uemura, K. Nakao, H. Ohnishi and K. Johten: *Society for Information Display International Symposium Digest of Technical Papers, Volume XXII*, California (1991) p. 257.
- 12) 秋山浩二, 濑本昭雄, 宮内美智博, 朝山純子, 小川久仁: 第38回応用物理学関係連合講演会予稿集 (1991) 31a-A-8.
- 13) 宮内美智博, 濑本昭雄, 秋山浩二, 蔵富靖規, 朝山純子, 小川久仁: 第38回応用物理学関係連合講演会予稿集 (1991) 31a-A-9.
- 14) D. A. Gregory, R. D. Juday, J. Sampsell, R. Gale, R. W. Cohn and S. E. Monroe, Jr.: *Opt. Lett.*, **13** (1988) 10.
- 15) D. R. Collins, J. B. Sampsell, L. J. Hormbeck, J. M. Florence, P. Andrew Penz and M. T. Gately: *Appl. Opt.*, **28** (1989) 4900.
- 16) W. E. Ross, D. Psaltis and R. H. Anderson: *Opt. Eng.*, **22** (1983) 485.
- 17) D. Psaltis, E. G. Paek and S. S. Venkatesh: *Opt. Eng.*, **23** (1984) 698.
- 18) N. H. Farhat and Z. Y. Shae: *Appl. Opt.*, **28** (1989) 4792.
- 19) F. Ito, K. Kitayama and Y. Tamura: *Opt. Lett.*, **15** (1990) 860.
- 20) 一岡芳樹: 微小光学研究グループ機関誌, **9** (1991) 65.
- 21) K. M. Johnson, C. C. Mao, G. Moddel, M. A. Handschy and K. Arnett: *Opt. Lett.*, **15** (1990) 1114.