

## 並列光デバイスの特長と応用

黒川隆志 福島誠治 天野主税  
NTT 光エレクトロニクス研究所

並列光信号処理技術は情報処理、通信、計測などに応用できる基本的な技術であるが、現在のところ具体的な応用にはまだ結び付いておらず、アーキテクチャとデバイスの両面からその可能性を模索している段階にある。本稿では光並列処理の特長を活かすためのデバイス特性と適用領域について概観し、デバイスに要求される諸特性について考察する。さらに並列光処理デバイスとして空間光変調器、半導体光電融合素子、純光形非線形素子の研究の現状について紹介する。

## FEATURES AND APPLICATIONS OF PHOTONIC DEVICES FOR PARALLEL PROCESSING

Takashi Kurokawa Seiji Fukushima Chikara Amano

NTT Opto-electronics Laboratories

3-1, Morinosato Wakamiya, Atsugi, Kanagawa 243-01, Japan

Parallel optical processing is very promising technologies for information processing and communication systems though it has not yet been entirely successful. We consider photonic devices for parallel processing in the context of system applications. We have to realize that different systems require different attributes. So, we investigate three kinds of devices with different attributes, spatial light modulator, semiconductor optoelectronic integrated devices and nonlinear-optic effect devices for example.

## 1. まえがき

光ファイバ伝送や光ディスクメモリの実用化により光技術は通信や情報処理の分野に大きく入りこみつつある。しかしながら通信や情報処理において処理の段階まで光技術を導入していくにはまだ多くの技術的困難があり、その方向もまだ明確とはいえないが、このような処理の光化は光の大きな特徴、即ち並列性、高速性、広帯域性を最大限に利用できるであろうという期待感から最近注目を集めつつある。

特に光は3次元空間を伝搬でき、光と光の直接的な相互作用も小さいため、極めて大きな並列性を持ち、並列処理に適していると言われる。光並列処理に向けた機能デバイスの研究は、最近の光スイッチングや光コンピューティングの研究の進展と共に盛んになりつつある。本稿では光並列処理のためのデバイスについて、その特徴と適用領域について概観し、デバイスに要する諸特性について考察する。さらに並列光処理デバイスとして空間光変調器、半導体光電融合素子、純光形非線形素子の研究の現状について紹介する。

## 2. 並列光処理デバイスの特性要素と適用領域

光技術を並列処理に適用したときどのような点で効果を発揮しうるかを次に列挙する。

- (イ) 光ビームは大きな並列性を持つため、高いスループットで空間内を情報伝送できる。
- (ロ) 光ビームは本質的に画像のような2次元のデータを処理することに向いている。
- (ハ) 単に並列的な結線だけではなく、論理演算の手法に並列的な論理アルゴリズムを持ち込むとさらに効果的となる。例えば光アレイロジックやシンボリックサブステイションなどがその例である。
- (ニ) 光の波動的な性質を利用した、例えばホログラフィックな手法を用いた処理が特にコヒーレントな系では重要となる。

以上のような光の利点を発揮した並列処理系を考えたとき、光ビームを並列に処理する2次元デバイスと空間的な集積技術が必要となる。処理系へ並列光デバイスを適用するとき、並列性、応答速度、感度などの諸特性としてどの程度のものが要求されるかは、その適用する対象によって大きく異なると考えらる。ここでは応用との関連から並列光デバイスの特性要素について列挙してみる。

- (ホ) 並列性：画像のような $10^5$ 以上の大きな並列度を処理するためには、2次元的な形状の素子が必然となる。一方、100ビット以下の信号処理では1次元的な構成でも可能であろう。またホログラムを書き込むためには単に総ビット数だけでなく数100本/mm以上の高密度が必要となる。
- (ヘ) 応答速度：一般に並列度、感度と密接に関連する。系としてのスループットは並列度と応答速度の積となるから、並列度が小さい場合には極めて速い高速性を要求されることになる。
- (ト) 入力感度：一般に感度と応答速度の積は素子ごとに一定になるから、高速で動作させようとする場合には入力光パワーを大きくしなければならない。外部の物体像を撮像しようとする場合には、極めて高い感度が必要となる。また入出力光の間に光ゲインがないと多段なシステム構成は実際上困難となる。
- (チ) ピクセル：並列的な各ピクセルが個々にピクセル化されているか、連続的であるかの構造的な違いによって利用範囲が異なる。連続的な場合には空間的にコヒーレントな性質を用いたホログラフィ等の光技術を利用しやすい。
- (リ) 信号レベル：扱える信号がアナログがバイナリかは素子の構造によって決まる。画像などに対してはアナログのほうが利用価値が大きい場合が多いが、広いダイナミックレンジが必要となる。

バイナリな場合はデジタルな信号処理系への適用が主眼となる。

(ヌ) 動作波長：画像の場合には可視光が適している。通信系などへの適用の場合には半導体レーザーと適合した赤外波長となろう。さらに素子の波長帯域が広いほど一般には使いやすい。

並列光処理デバイスはハイブリッドな空間光変調器、モノリシックな半導体光電融合素子、電気的なバイアスを要しない純光学非線形素子に大別される。これらの素子を並列度、応答速度、感度の3軸上にその特性を位置づけると図1のようになる。この図から空間光変調器、半導体光電融合素子、光非線形素子の特長と適用領域は次のように考えられる。

- ・空間光変調器： 高並列、高感度、低速度。画像の処理に向く。
- ・半導体光電融合素子： 中並列、低感度、高速。デジタル並列処理や光接続に適合。
- ・純光学非線形素子： 低並列、大パワー駆動、超高速。高速光信号処理に適合。

これらの素子はまだ研究段階にあるものが多いが概ね、上のような特長にそって開発が進んでいくものと予想される。次にこれらの素子の具体的な例について述べる。

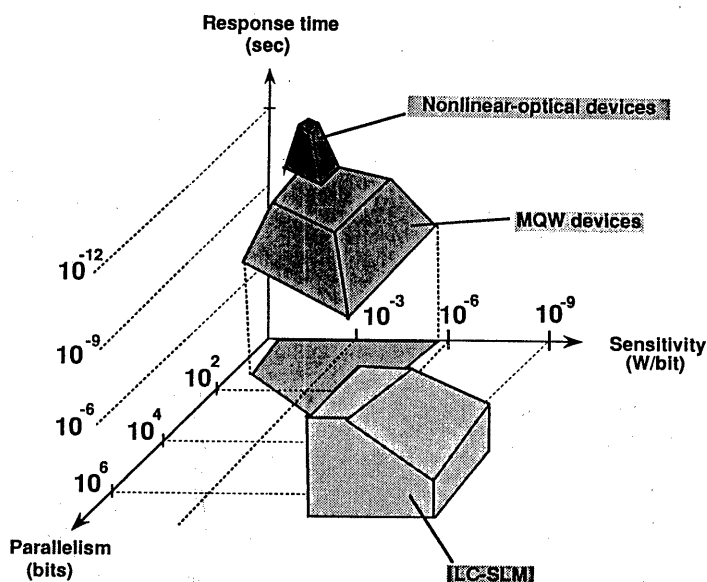


図1. 並列光デバイスの特性領域

### 3. 並列光処理デバイスの現状

#### 3.1 空間光変調器

2次元光素子の代表的なものとして空間光変調器がある。空間光変調器は、空間的な光ビームを2次元的なパターンに変調するもので、入力信号が電気か光かによって、電気アドレス型と光アドレス型に大別される。

入力信号が電気的な電気アドレス空間光変調器としては液晶TVが良く知られた例であり、時系列なデータを2次元的な光パターンにシリアル-パラレル変換する機能を持つ。

一方、光アドレス空間光変調器では入力信号は画像のまま光で書き込まれ、別の光によって読み出される。このような空間光変調器は一般的に感光部と光変調部とからなり、入力光パターンは感光部に電界パターン等に変換され、その電界パターンが光変調部の光学特性を変化させる。書き込み光と読みだし光の間の波長変換、インコヒーレント-コヒーレント変換など、画像間のトランスデューサとしての機能が光アドレス空間光変調器の基本的な機能である。また、書き込み光強度を読みだし光強度よりも大きくすることができ、実質的な画像の増幅も可能となる。図2に筆者らが開発した強誘電性液晶を用いた空間光変調器の構造を示す。<sup>1)</sup>強誘電性液晶層、誘電体ミラー、光伝導層の積層構造からなる。強誘電性液晶(FLC)は $100\mu s$ 以下と従来のネマチック液晶に比べて2桁以上高速の応答性を持ち、かつメモリ性を有する。空間光変調器にパルス電圧を印加した状態で光伝導層に光パターンを書き込むと露光部分の抵抗が小さくなり、液晶にかかる電界が高くなって配向状態が変化する。このため液晶層に入射した読み出し光の偏光面がパターンに応じて回転し、アナライザによって強度的な光パターンが読み出される。この空間光変調器は印加するパルスの極性を変えることにより、陽画・陰画両方を可逆に出力でき、また書き込み光をオフした後も、書き込み像を読みだせるメモリ機能を持つ。応答速度は約 $100\mu s$ 、分解能 $501p/mm$ 以上、感度 $100\mu W/cm^2$ が達成されている。また高分解能を追求した仕様では $2001p/mm$ 以上となり、ホログラムを実時間で記録再生できることも確認されている。<sup>2)</sup>

ポジ・ネガ両画像を可変に出力できることを利用して、図3のように空間光変調器を3個カスケードに接続し、2つの入力画像のあいだの任意の演算を実行できる。<sup>3)</sup>空間光変調器MA、MBに画像を入力し直列的に読み出すとMA、MBに印加する電圧の極性を変えることにより4種の基本演算が得られる。この結果をさらに空間光変調器MCに重ね書きすることにより16種類のブール代数の演算が得られる。

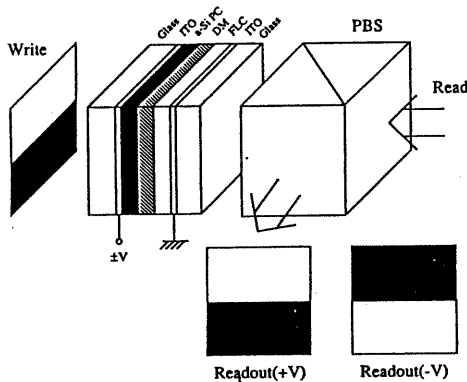


図2. 強誘電性液晶空間光変調器(BSLM)の構造

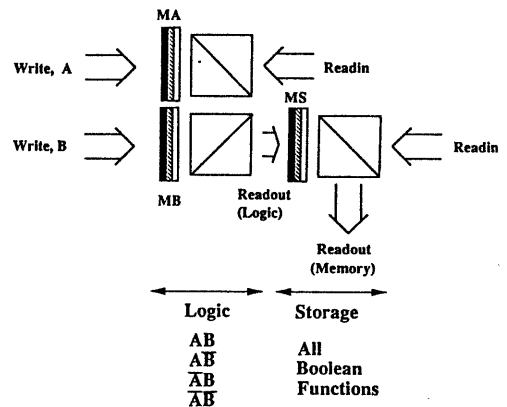


図3. 強誘電性液晶空間光変調器を用いた画像光演算系

### 3. 2 半導体光電融合素子

最近のOEIC技術の進歩や半導体量子効果の発現に伴い、光電融合形の2次元半導体素子の研究も盛んになりつつある。発光形ではLDと受光素子を組み合わせた構造が基本となっており、しきい値機能や双安定動作が可能となる。フォトダイオードとLEDをモノリシックに集積した1kビット光メモリ、<sup>4)</sup>サイリスタとLEDとを集積したVSTEP素子<sup>5)</sup>などが報告されている。発光形は消費電力が大きくなる欠点があるが、最近しきい値電流の小さな面発光レーザーの研究も進みつつあり、面発光レーザーを中心とした2次元素子の研究が活発になると予想される。

非発光形では量子井戸構造中の量子閉じ込めStark効果を利用した素子の研究が盛んである。この効果は量子井戸に電界を印加することにより励起子ピークや吸収端がシフトするもので、pinダイオード内に量子井戸構造を導入したSEED素子などが報告されている。<sup>6)</sup>32x32ビットの2次元素子で1ns以下の応答速度をもつが、コントラストが3:1程度と低い。

最近筆者らは吸収端波長を用い反射形のMQW構造とフォトランジスタをモノリシックに積層した高コントラストの3端子光ゲートアレイ(EARS: Exciton Absorptive Reflection Switch)を開発した。<sup>7)</sup>図4にその構造を示す。下側から入射する入力光により上側から入射するバイアス光がスイッチングされる。入力光によってバイアス光がオフとなる否定形ゲートのため論理構成に向いている。オンオフ比は20dB以上と高く光インターコネクションやデジタル処理への適用が可能と考えられる。

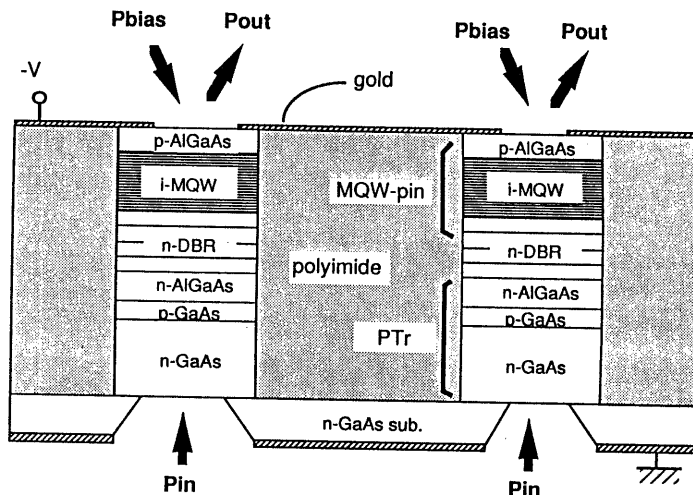


図4. 光ゲートアレイ (EARS) の構造

### 3. 3 純光学非線形素子

入力光強度が強い状態では材料の吸収や屈折率が光によって変化する非線形光学効果が起こる。この効果は電氣的なバイアスを必要とせず、きわめて速い応答で起こる。但し、生じる屈折率変化はかなりおおきな入力光のもとでも小さいためエタロン構造内に非線形材料を挟み込んだ図5のような素子が一般的である。この非線形エタロンは透過形ではANDゲート、反射形ではNORゲートとして動作させることができる。材料的には半導体量子井戸構造、<sup>8)</sup>半導体ドープガラス、有機材料などが検討されて

いる。psオーダまでの高速応答が確認されており、また3端子素子構造化による全光形フリップフロップ回路への応用も報告されている。<sup>9)</sup>

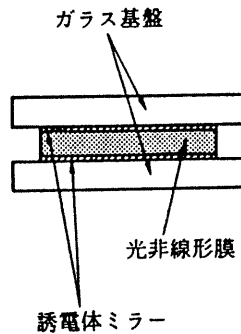


図5. 非線形エタロンの構造

#### 4. まとめ

並列光処理デバイスの特長と適用領域について述べ種々の素子についてその研究の現状を紹介した。並列光信号処理技術は、コンピュータのみならず通信、計測などに適用できる基本的な技術であるが、現在のところ具体的な処理と結び付いた応用には至っていない。今後デバイスの研究の進展とともに、光情報処理への応用についても研究が活発になることを期待したい。

#### 文献

- 1) S. Fukushima, T. Kurokawa, S. Matsuo, H. Kozawaguchi : Opt. Lett. 15, 285-287 (1990)
- 2) S. Fukushima, T. Kurokawa and M. Ohno : Appl. Phys. Lett., to be published
- 3) S. Fukushima and T. Kurokawa : CLEO'90, CTUH61, Anaheim, May 21-25 (1990)
- 4) K. Matsuda et al. : IOOC'89 (1989)
- 5) 田代義春ほか : 第48回秋期応用物理学会予行集 p. 724 (1987)
- 6) D.A.B. Miller: Optical and Quantum Electronics, 22, S61-S98 (1990)
- 7) C. Amano, S. Matsuo and T. Kurokawa : Topical Meeting on Quantum Optoelectronics, MB2, Salt Lake City, March 11-13, (1991)
- 8) K. Nonaka et al. : IEEE Photonics Tech. Lett., 1 (1989)
- 9) H. Tsuda et al. : 1990 International Topical Meeting on Photonic Switching, Kobe, 13C-38