

解説

空間光変調器と並列光演算

黒川 隆 志

NTT 光エレクトロニクス研究所 〒243-01 厚木市森の里若宮 3-1

(1990年3月2日受理)

Spatial Light Modulators and Its Applications
for Parallel Optical Processing

Takashi KUROKAWA

NTT Opto-electronics Laboratories, 3-1, Morinosato Wakamiya, Atsugi 243-01

1. はじめに

空間光変調器 (spatial light modulator; SLM) は、空間的な光ビームを入力信号に応じて2次元的なパターンに変調する機能をもつデバイスである。とくに光アドレス形の空間光変調器は画像を撮像し、その画像を光ビームで読みだすことができるため、いわば現象が不要な実時間フィルムとしての機能を目指している。その目標の困難さゆえにまだ実用的なレベルに至っていないにもかかわらず、応用範囲の広さから光情報処理における基本デバイスとして位置づけられている。その非線形な画像入出力特性を利用して並列的な光演算処理への適用が試みられている。並列的な光処理を実行するためには2次元デバイスが必要となるが、空間光変調器はその中でもとりわけ画像を取り扱うのに適したデバイスといえる。

空間光変調器および並列光処理のいずれについても、現在のところまだ実用的な段階に到っていないが、空間光変調器を用いて具体的な並列光処理系を構築することにより、将来の光情報処理への展開を捉えることが可能となり、ひいては画像処理など身近な応用も開けてくることが期待できる。

本稿ではまず空間光変調器の機能、動作について述べるとともに、最近注目を集めつつある高速な強誘電性液晶を用いた空間光変調器について筆者らの仕事を紹介する。さらに空間光変調器の並列光演算処理への適用例について述べ、光情報処理への応用について紹介する。

2. 空間光変調器の動作と機能

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入力信号に応じて2次元的なパターンに変調するもので、図1にその概念を示す。入力信号が電気か光かによって、電気アドレス形と光アドレス形に大別される。

入力信号が電氣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次元的なパターンにシリアル-パラレル変換する機能をもつ。液晶 TV のような非発光型の表示素子は、電氣的な入力信号に応じて各画素ごとに光を2次元的に変調しており、このような表示素子はすべて電気アドレス空間光変調器と言い替えてもよい。

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。すなわち画像を撮像し、その像を光ビームによって読みだせるため、いわば書換え可能な実時間フィルムとしての機能をもつことになり、全光的な処理系の構成が可能となる。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で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。書込み光と読出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、書込み光強度を読出し光強度よりも大きくすることができ、実質的な画像

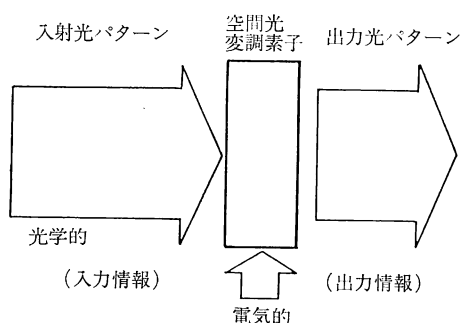


図1 空間光変調器の動作概念

の増幅も可能となる。現在良く使われている光アドレス形の空間光変調素子として、液晶ライトバルブ (LCLV)¹⁾、BSO フォトリフレクティブ結晶を用いた PROM²⁾、マイクロチャンネルプレートと電気光学結晶を組み合わせた MSLM (Microchannel plate SLM)³⁾ 等がある。

空間光変調器の一例として、図2に MSLM の構造と動作を示す。これは光電面、マイクロチャンネルプレート (MCP) および電気光学結晶から構成される。入力光は光電面で光電子に変換された後、MCP で増倍され結晶表面に電荷パターンを形成する。その電荷パターンによって結晶内に印加される電界パターンが変化し、電気光学効果により屈折率が変化する。つまり、書き込んだパターンに応じて結晶内に屈折率パターンが形成される。このため入射した読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と

して読み出される。このデバイスは MCP により光電子が増倍されるため入力感度が高く、また電荷の蓄積のため画像を記憶できる特徴をもつ。LCLV, PROM とも同様に液晶あるいは BSO 結晶の電気光学効果による偏光状態の変化を利用したメカニズムである。読み出される像は偏光子の対向状態 (平行と直交) によって、書き込み像と同じパターンあるいは明暗が反転した像となる。

これまで開発されている空間光変調器の性能は、解像度 10~30 本/mm, コントラスト 20:1 以上であるが、応答時間が 10~100 ms と遅いため動画像に対応できない欠点があり、より高速化が望まれている。また速度、解像度、入力感度、コントラスト、メモリ機能、駆動電圧、サイズなどの諸特性についてすべてを満足するものがないため、実用的な応用には困難がある。

並列光デバイスとしては空間光変調器のほかに、半導体を用いた光電融合素子^{4,5)} や純光形の非線形エタロン⁶⁾ なども盛んに研究されている。これらの並列光デバイスの性能を表1に示す。空間光変調器については次に述べる強誘電性液晶を用いたものの特性値を掲げた。一般に応答速度はそのときの入力感度に依存する (入力光が大きいかほど速くなる) から、感度はその最高速度に対応する値を示した。この表からわかるように、空間光変調器は画像入力が可能で並列度、感度に特長があるのに対し、光電融合素子はその高速性に特長がある。また非線形エタロンはさらに高速であるが、きわめて大きな入力光パワーを要するため、並列度はそれによって制限される。なお、入出力の波長についても空間光変調器が可

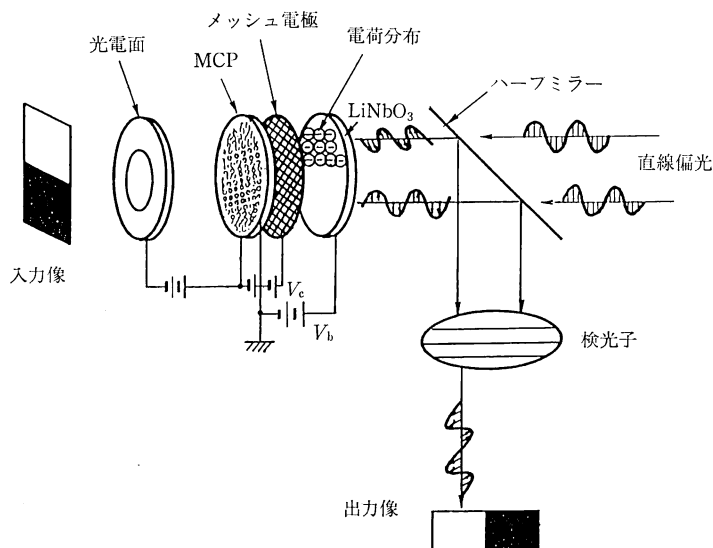


図2 MSLM の構造と動作

表 1 並列光デバイスの研究状況

項目	非発光形			発光形
	空間変調器	QCS 効果素子	非線形エタロン	光サイリスタ + LED 光トランジスタ + LED
並列度 (bit)	10^5	2×10^3	>10	10^3
応答速度 (s)	7×10^{-5}	4×10^{-8}	5×10^{-9}	2.5×10^{-8}
入力感度 (mW/bit)	10^{-6}	8	10	10^{-2}
コントラスト	60	2.2	~5	>100
メモリ性	バイアス不要	バイアス要	バイアス要	バイアス要

視の広い領域に適用できるのに対し、半導体素子では近赤外の一定波長に固定される。これらの素子の特徴の比較から、空間光変調器は主として画像処理に向き、また半導体素子は高速の光インタコネクションが主な適用領域と予想される。

3. 強誘電性液晶を用いた空間光変調器

ディスプレイへの応用の観点から多くの研究がなされてきたネマチック液晶に比べて、強誘電性液晶 (FLC) は比較的新しい魅力ある材料であるが、その物性や配向技術はまだ解明されていない部分が多い。強誘電性液晶の特長は、①ネマチック液晶など従来の液晶材料にくらべて応答速度が2桁から3桁高速なこと(高速性)、②正負の電圧に応じて二つの配向状態をとること(双極動作)、③電圧を切ってもその配向状態を維持すること(メモリ機能)等が挙げられる。これまで米国を中心に強誘電性液晶を用いた空間光変調器の開発が報告されているが^{13,14)}、いずれも初めての高速性の追求を主眼とし、 $100 \mu\text{s}$ 程度の応答速度が達成されている。しかしながら強誘電性液晶の双極動作、メモリ性を十分に活かすためには、液晶分子の適切な配向技術と変調器の機能に応じた駆動方法が必要となる。これらの強誘電性液晶の特長を生かした双極動作可能な空間光変調器 (Bipolar-operational Spatial Light Modulator; BSLM) について以下に紹介する⁷⁾。BSLM 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、書き込み像を読み出せるメモリ機能をもつ。

この変調器の構造はネマチック液晶の空間変調器と同様に、感光層の a-Si 膜、誘電体ミラー、強誘電性液晶を積層した構造である。FLC に印加される電界の制御を光伝導層に担わせ SLM への印加電圧とパルス幅を適当に選ぶと、光による読み出し光の変調が可能となる。図 3 に示すように、負パルスと消去光により FLC 分子があらかじめ OFF 状態に整列されていると、偏光面の

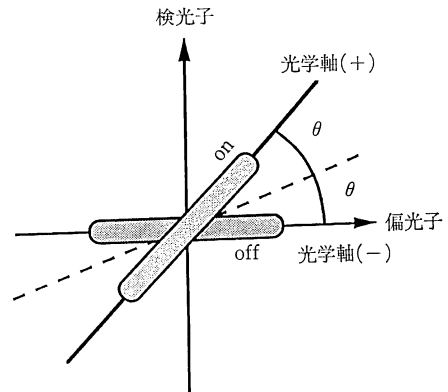


図 3 強誘電性液晶分子の配向状態

回転は生じないから読み出し光は全面が暗い状態となる。この状態で SLM に正パルスを加えつつパターンを書き込むと、光が照射されている領域では FLC 分子は ON 状態にスイッチングし、その状態に固定される。一方書き込み光の非照射部では正パルスが印加されている時間内、FLC 分子は ON 状態に向かうがパルスが除去されると閾値特性により再び OFF 状態に戻る。すなわち FLC は印加するパルスの電圧・時間積が一定以上で、一方の配列状態にスイッチングが固定される閾値特性を有する。この動作では直交ニコルで読み出すと陽画像がえられる(ポジティブモードと呼ぶ)。上記において、ON と OFF また正パルスと負パルスとをそれぞれ逆にするると陰画像を読み出すことができ(ネガティブモード)、双極パルスによる双安定動作が実現される。

633 nm の He-Ne レーザーを用いて測定した動特性の結果を図 4 に示す⁸⁾。消去のために、消去光を照射すると同時に書き込み時と逆極性の電圧を印加し、変調器を初期化した。すなわち、ポジティブモードでは消去光と同時に負パルスを印加し、この後書き込みのための正パルスを印加した。図 4 (a) にポジティブモードにおける駆動波形と読み出し光強度の時間的変化を示す。変調器は $200 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ の消去光で十分に初期化された。書き込み光が照射されないとき、読み出し光はいったん ON へ向か

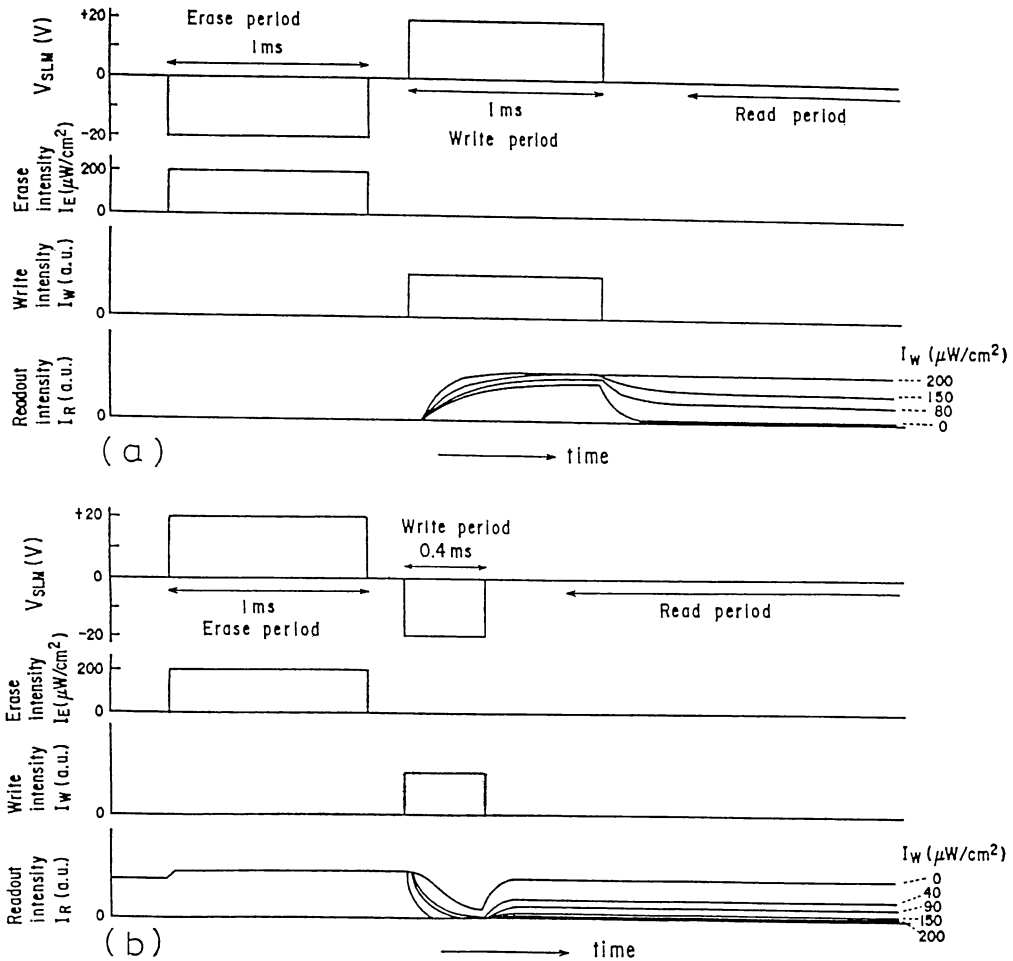


図4 BSLMの駆動パルスと出力光強度
(a) ポジティブモード, (b) ネガティブモード

うが電気パルス終了後数 100 μs で減衰し OFF へ戻る。書き込み光が 200 μW/cm² 以上のときは電気パルスを除いた後も ON 状態が保持される。この状態は 2h 以上保持され、この記憶時間内にいつでも読み出すことができる。図 4 (b) はネガティブモードでの動作特性であり、反転動作が観測された。なお図 4 に示されるように、閾値以下の書き込み光に対しては、強度に応じて読出し光の立下り時間が異なる。このことを利用して、読出し光をパルス化することにより中間階調の出力制御も可能となる。

二つのモードにおける画像の出力結果を図 5 に示す。これらは書き込み数秒後のメモリ状態で撮影したものである。変調器の画像入出力性能を表 2 にまとめた。書き込み 1 時間後においてもコントラスト、解像度はほとんど劣化

しなかった。なお、解像度の測定は、高周波領域での結像がきわめて難しくなるため、書き込み面側に形成した干渉縞による読出し光の回折を観測することにより行った。

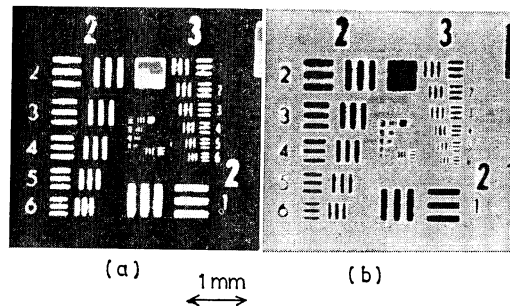


図5 BSLMの読出し画像
(a) ポジ画像, (b) ネガ画像

表 2 強誘電性液晶空間光変調器の特性

応答速度 (μs)	70
分解能 (lp/mm)	60
入力光感度 ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	100
コントラスト	>60 : 1
印加電圧 (V)	20
メモリ性	> 1 週間
開口面 (mm)	10×10

4. 空間光変調器による光演算

並列光演算処理はその高並列性の結果としての処理速度の向上が一般にいわれているが、並列処理をより意味のあるものとするためには、データが2次元的に意味のある配列構造をしていること(たとえば画像データ)、あるいは処理過程自体が光の並列性を利用していること(たとえばパターン論理やホログラフィックな処理)が重要であろう。そのような点を併せて考えると、きわめて大きな並列度、感度をもつ空間光変調器は画像光情報処理に向けたデバイスの一つとして位置づけられる。

空間光変調器を用いて並列な光演算系を構成する場合、変調器の非線形な入出力特性を利用した画像処理に応用できる。変調器の非線形入出力特性の捉え方としておもに二つの方法が考えられる。一つは図6のような変調器の入力光と出力光の間の強度的な非線形性を利用するもので、光強度を2値でとれば AND と NOR の論理を実行できることになる⁹⁾。もう一つは偏光の変換を利用するもので、水平偏光と垂直偏光をそれぞれ2値

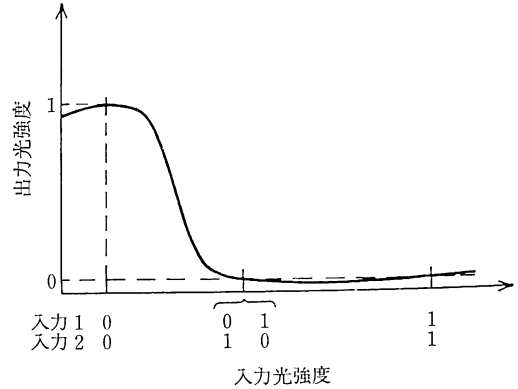


図 6 強度を2値とした空間光変調器の入出力論理

(図7において p, s で表示) でとれば変調器の入力と出力の間には図7のように排他的論理和の関係が得られる。すなわち、書き込み光 W は偏光子によって p 偏光は暗となり、 s 偏光は明となる。読み出し光 R_i について p, s それぞれの偏光を入力すると、書き込み光が暗のときは偏光の回転は起きず、明のときは偏光の回転が起きるため、図のような真理値表が得られる。一般的には偏光を2値としたほうが S/N 的に有利である。偏光論理を利用した光論理系を光アドレス形の空間変調器と組み合わせる基本的な例を図8に示す。

このように偏光子、検光子、空間光変調器の組合せによっていくつかの基本論理系を構成することができる。しかしながらこのような構成では、論理演算を選択的に制御できないため、光演算系としての柔軟性に乏しい。先に述べた双極動作の強誘電性液晶の空間光変調器では

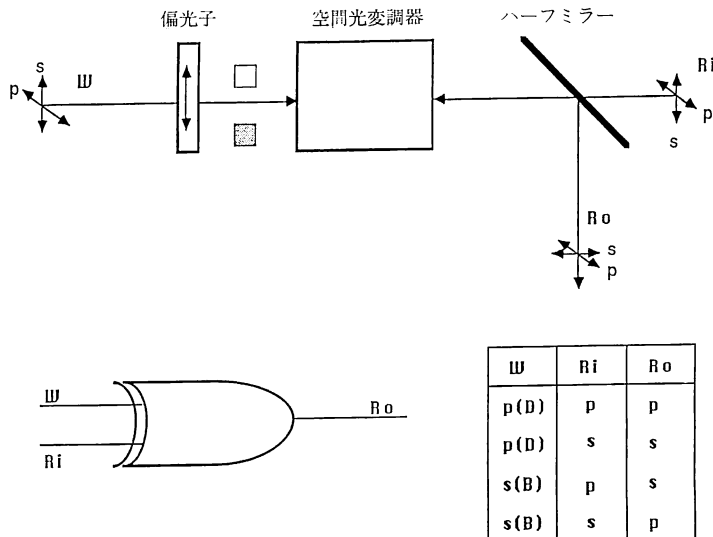


図 7 偏光を2値とした空間光変調器の入出力論理

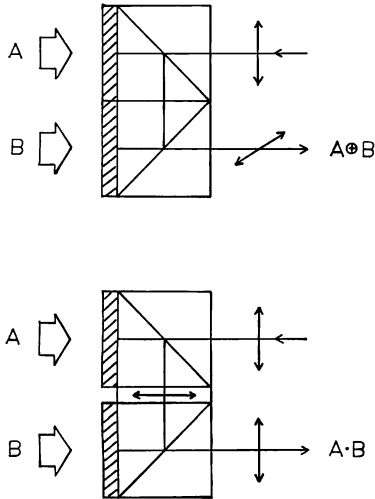


図8 空間光変調器を用いた偏光論理の構成例
上: XOR, 下: AND

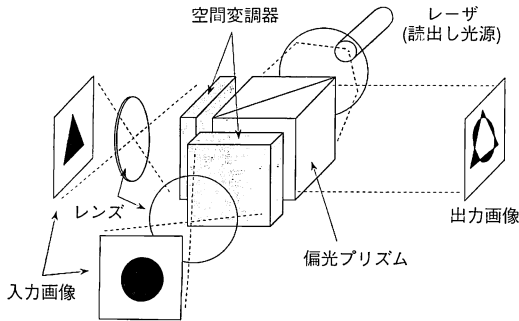


図9 BSLMを用いた画像処理モジュールの構成

印加する電気パルスの正負によってポジ、ネガ像を切り換えられる（言い換えればインバータ動作を実現できる）ため、論理制御の柔軟性を付与することが容易となる。強誘電性液晶の空間変調器による光演算系の例を図9に示す¹⁰⁾。二つの変調器を読出し側で直列接続すると、印加電圧の組合せにより、入力画像A、Bに対して $AB(++)$ 、 $A\bar{B}(+-)$ 、 $\bar{A}B(-+)$ 、 $\bar{A}\bar{B}(--)$ の各論理がパルス制御により実行できる。このように複数の変調器の光結合により並列な組合せ論理が実行でき、高速画像処理等への応用が期待できる。また、FLCのメモリ性を利用して並列なフリップフロップ動作も可能であり¹¹⁾、組合せ論理のみならず順序論理も空間変調器によって可能となる。

以上の並列論理の構成は、数値処理などの演算処理系へ拡張できる。たとえば二つの液晶空間光変調素子に2次元データを入力することにより、XORやANDの論理を並列に出力できるが、これらは加算器のサムとキャ

リに対応する。実際に空間光変調素子による数値処理への応用として、加減算を並列的に実行する光プロセッサが報告されている¹²⁾。電気アドレス形の液晶空間光変調素子により、データは電子メモリから2次元の光パターンとなり、光演算部へ導入される。演算部は空間光変調素子の偏光回転特性を利用した偏光論理で動作し、出力されたサムとキャリイはいったんラッチされた後、フィードバックされる。実時間で4ビットのデータを2組並列に加減算する実験がなされている。

5. ま と め

空間光変調器の構成と機能について紹介し、とくに最近進展の著しい強誘電性液晶を用いた空間光変調器の動作について詳述した。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。画像処理や連想処理は比較的光の特徴を生かした応用が可能な分野と考えられるが、素子への要求としては速度よりも10万程度以上の大きな画素数が要求される。空間光変調器は画素数の大きさや高感度な点に特徴があり、このような処理分野に適した素子と考えられる。強誘電性液晶の空間光変調器における論理制御性を利用した画像演算の例を示し、画像処理等への応用が実際に可能なことを紹介した。

今後空間光変調器の実用化への検討が進み、光情報処理への応用についても多くの提案がなされることを期待したい。

文 献

- 1) W. P. Bleha, *et al.*: *Opt. Eng.*, **17** (1978) 371.
- 2) B. A. Horwitz and F. J. Corbett: *Opt. Eng.*, **17** (1978) 353-364.
- 3) C. Warde and J. I. Thackara: *Opt. Lett.*, **7** (1982) 344-346.
- 4) D. A. B. Miller, *et al.*: *Appl. Opt. Lett.*, **45** (1984) 13.
- 5) 河合 滋, ほか: 電子情報通信学会春季全国大会予稿集, 1-278 (1988).
- 6) T. Kurokawa, *et al.*: IQEC, Tokyo, TuI-9 (1988).
- 7) T. Kurokawa, *et al.*: *Optical Computing '90*, Kobe, 9B3 (1990).
- 8) S. Fukushima, T. Kurokawa, S. Matsuo and H. Kozawaguchi: *Opt. Lett.*, **15** (1990) 285-287.
- 9) A. A. Sawchuk and T. C. Strand: *Proc. IEEE*, **72** (1984) 758-779.
- 10) 福島誠治, 黒川隆志, 松尾慎治: 第50回応用物理学会学術講演会予稿集 3 (1989) p. 791.
- 11) 福島誠治, 黒川隆志, 小沢口治樹, 松尾慎治: 第36回応用物理学関係連合講演会予稿集 3 (1989) p. 775.
- 12) T. Kurokawa, *et al.*: *Topical Meeting on Optical Computing*, Salt Lake City, WA 2 (1989).
- 13) G. Moddel, *et al.*: *Appl. Phys. Lett.*, **55** (1989) 537.
- 14) D. Williams, *et al.*: *J. Phys. D*, **21** (1988) 156.