

解説

光学結晶を用いた空間光変調素子

峯本 工・陳 靖

神戸大学工学部 〒657 神戸市灘区六甲台町

(1989年3月20日受理)

Spatial Light Modulator Using an Electro- or
a Magneto-Optic Crystal

Takumi MINEMOTO and Jing CHEN

Department of Instrumentation Engineering, Kobe University,
Rokkodai, Nada-ku, Kobe 657,

1. ま え が き

情報社会と言われる今日、大量情報の高速処理を実現するシステムがアクティブに模索されている。光学系を利用した並列演算システムもこの問題を解決できる可能性を秘めたものとして注目され、並列デジタル演算法、演算システム構成法、および演算素子などの要素に関する研究開発が積極的に行なわれている。これらを実現するために欠かせない要素素子の一つに空間光変調素子がある。

空間光変調素子は並列光演算システムや光情報処理デバイスへ信号情報を入力するための素子、演算子の一部、または一時的な記憶素子などに利用される。この素子は、外部からの入力信号によって、素子に入射してくる光（入力光）に変化を与えることが目的であるから、出力された光が入力情報に対応して、その空間的な分布が変調されていることが重要である。そして、空間光変調素子としては、入力信号に対する感度が高く、動作速度が早く、変調のダイナミックレンジが広く、空間分解能も高く、さらに操作性の良いことが要求される。しかし、これらの要求すべてを満足する素子はまだ存在しない。したがって現状は、感度、動作速度、変化範囲、空間分解能のいくつかについて、ある程度の性能を実現できそうな素材を探し出し、構成を工夫していろいろな素子が試作開発されている段階である。いうまでもなく、今後の空間光変調素子の開発の成否が光演算システムお

よび光情報処理の将来の鍵を握っている。

空間光変調素子の解説もこれまでに数多く出され¹⁻⁵⁾、本誌でも第14巻1号⁴⁾に掲載されている。そして、空間光変調素子の発展速度はどちらかという速くないと言える。さらに、近年、液晶テレビの急速な発展に歩調を合わせるように液晶を利用した素子の研究は活発化し、かなりの進歩が認められる。残念なことに結晶の光学効果を利用した空間光変調素子に関してはあまり大きな進歩は見られなかったように思う。後者を前者と比較した場合の特長は、変換された出力像のコントラストを比較的容易に高くできること、空間分解能を高くできる可能性が大きいことである。他の動作特性は総合的に判断すると現状においては優劣つけにくいものと思われる。

液晶空間光変調素子については本号“最近の技術から”⁶⁾において述べられるので、ここでは電気光学効果や磁気光学効果を示す結晶を利用した空間光変調素子に関する最近の成果および近況（表1参照）について簡単に述べる。

2. 光伝導性電気光学結晶を用いた素子

この素子は光伝導性と電気光学効果を併せもつ $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) などの単結晶板を図1のように薄い絶縁層で包み、その外側に透明電極をつけて、構成される。この素子では結晶板の光伝導性を利用して、光の空間的な強度分布を結晶板の内部および表面に分布する正と負の

表1 光学結晶を利用した空間光変調素子の種類と性能

	光変調材料	アドレス材料	感度 (mJ/cm ²)	解像度 (lp/mm)	コントラスト	書き込み時間	消去時間	サイズ
PROM	Bi ₁₂ SiO ₂₀	Bi ₁₂ SiO ₂₀	5×10 ⁻³	15	1000	~μs	~5 μs	4 cm ^φ
PRIZ	Bi ₁₂ SiO ₂₀	Bi ₁₂ SiO ₂₀	5×10 ⁻³	20		~μs	~5 μs	4 cm ^φ
Photo-refractive	Bi ₁₂ SiO ₂₀	Bi ₁₂ SiO ₂₀	0.1~0.2	10~15		30 ms	10 ms	1 cm [□]
MSLM	LiNbO ₃	光電面+MCP	2×10 ⁻⁶	15	1000	50 ms	20 ms	1.5 cm ^φ
Matrix 電極 PLZT	PLZT	Matrix 電極		128×128 bits	25	10 ⁷ bit/s		
Si-PLZT	PLZT	Si	10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁴		25	~50 μs	~50 μs	
Matrix 電極 磁性材料	鉄ガーネット 磁性膜	Matrix 電極		5~50		0.5~10 μs	~10 μs	2.5 cm [□]

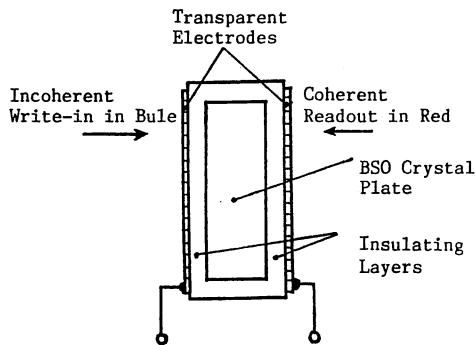


図1 PROM 素子の構造

電荷の分布に変換し、結晶板内の電界の分布として画像を記録する。そして、結晶板内の電界によって発生する電気光学効果 (Pockels 効果) を利用して読出し光の変調 (偏光方向の分布を作る) を行なう。通常、画像の書き込みは単結晶に対して光伝導度の高い波長の光を用いて行ない、読出しは記録されている情報をできるだけ破壊しないように結晶に対して光伝導度の低い波長の光を用いる。

素子作製には BSO 単結晶が通常よく用いられるが、ZnS や Bi₁₂GeO₂₀ などの結晶も使用される^{7,8)}。

絶縁層は書き込み光および読出し光に対して透明であり、屈折率が単結晶とほぼ同じであり、比誘電率が大きく、電気抵抗が高く、絶縁破壊電圧が高く、かつ均一に薄く加工できるものが望ましい。

BSO 単結晶を用いた素子には PROM⁹⁾ と PRIZ¹⁰⁾ の2種類がある。PROM は結晶軸 [0 0 1] に垂直に切り出した単結晶を用いて構成し、縦方向の電気光学効果を利用して読出し光の変調を行なう。他方、PRIZ は結晶軸 [1 1 1] または [1 1 0] に垂直に切り出した単結晶板を用いて構成し、横方向の電気光学効果を利用して光

の変調を行なう。BSO 結晶板の二つの主軸の2等分線の方向に直線偏光した読出し光に対するこれらの素子の電気光学効果は、直交検光子を通して観測するとき、

$$I = |iA \exp(i\phi) \sin G|^2 \quad (1)$$

で表される¹¹⁾。ここに、 A は入射光の振幅であり、位相 ϕ と信号 G は表2に与えられている。表中の $E_{L,T1,T2}$ は BSO 結晶内の電界の方向成分を表わし、 $V_{L,T1,T2}$ は光が伝播する方向に沿って電界を次のように積分したものであり、 V_h は BSO 結晶の半波長電圧である。

$$V_{L,T1,T2} = \int_0^d E_{L,T1,T2} dz \quad (2)$$

ただし、 d は結晶板の厚さである。

PROM 素子の感度は書き込み光の波長と BSO 結晶板の厚さに依存する¹²⁾。また、画像を素子の陰極側から書き込むか陽極側から書き込むかによって素子の感度が異なる¹³⁾。素子の解像度は画像書き込みの過程でキャリアが BSO 結晶板内に結晶板の厚さ方向 (縦方向: 外部印加電界の方向) とそれに垂直な方向 (横方向: 板面に沿った方向) の両方向へ動くことを考慮した解析が行なわれ、MTF 特性が解明された¹⁴⁾。素子の解像度を向上させる有効な方法は薄い BSO 結晶板を用いることである。PROM 素子の構成に用いる絶縁膜としては、パリレン⁷⁾ と雲母板¹⁵⁾ を使用することが多いが、均一に薄く加工でき、誘電率が大きな他の適当な絶縁体を用いることも解像度改善のための一方法である。

BSO 結晶とパリレンあるいは雲母のような絶縁体膜により構成した PROM 素子では、絶縁耐圧の範囲内で印加できる電圧は素子の半波長電圧より低い値となっており、BSO 結晶のもっているダイナミックレンジを満足に利用できていない。この問題に対して、BSO 単結晶と電気光学効果を示す絶縁膜を組み合わせる素子を

表 2 電気光学効果を表わす位相 ϕ と信号 G の各値¹¹⁾

BSO 結晶板 の方向	$\langle 001 \rangle$ PROM			$\langle 111 \rangle$ PRIZ			$\langle 110 \rangle$ PRIZ		
	E_L	E_{T1}	E_{T2}	E_L	E_{T1}	E_{T2}	E_L	E_{T1}	E_{T2}
結晶内電界 の方向	$\langle 001 \rangle$	$\langle 110 \rangle$	$\langle \bar{1}10 \rangle$	$\langle 111 \rangle$	$\langle 11\bar{2} \rangle$	$\langle \bar{1}10 \rangle$	$\langle 110 \rangle$	$\langle 00\bar{1} \rangle$	$\langle \bar{1}10 \rangle$
位相 ϕ	0	0	0	$\frac{\pi V_L}{2\sqrt{3} V_h}$	0	0	0	$\frac{\pi V_{T1}}{4 V_h}$	0
信号 G	$\frac{\pi V_L}{2 V_h}$	0	0	0	$\frac{\pi V_{T1}}{\sqrt{6} V_h}$	$\frac{\pi V_{T2}}{\sqrt{6} V_h}$	0	$\frac{\pi V_{T1}}{4 V_h}$	$\frac{\pi V_{T2}}{2 V_h}$

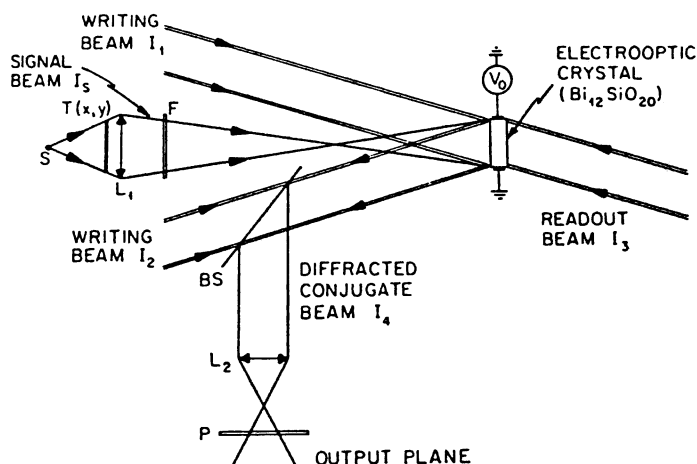


図 2 4 光波混合光学系による画像変換²⁴⁾

構成し、BSO 結晶内での電気光学効果と絶縁体内での電気光学効果を重畳して利用する素子が提案され、LiNbO₃ 単結晶板を絶縁体に用いて素子を構成した例では半波長電圧が絶縁体の絶縁耐圧以下になっている¹⁶⁾。

PRIZ 素子には、図1 のように絶縁膜をつける素子^{17,18)}と結晶板の表面に透明電極を直接に蒸着して作る conducting PRIZ 素子がある¹⁹⁾。PRIZ 素子では光励起により BSO 結晶板内に生じた空間電界の横方向の成分による電気光学効果を利用している。素子は零空間周波数に対して応答はなく、回折格子を書き込んだ場合の回折効率率は PROM 素子より高くなっている²⁰⁾。PRIZ 素子の感度は PROM 素子の感度と比べて少し良くなる程度でほとんど変わらず、素子の解像度も PROM 素子の解像度より少し高い程度である^{21,22)}。

3. Photorefractive 素子

この種類の素子では、コヒーレント光の干渉縞によって photorefractive 単結晶内に発生した正孔あるいは電

子が拡散して形成する電荷格子縞を低空間周波数帯域の画像で変調することによって、位相形 volume ホログラムの回折効率分布を画像の強度分布に対応させ、入力画像をコヒーレント光の画像に変換する。

Shi と Marrakchi^{23,24)} は BSO 単結晶を用いて素子を構成し、ホログラム格子をインコヒーレント画像を入力する前に記録する grating erasure mode (GEM)、画像入力後にホログラム格子を記録する grating inhibition mode (GIM) と、画像入力とホログラム格子を同時に記録する simultaneous erasure/writing mode (SEWM) の三つの動作モードについて調べている。素子の操作は SEWM モードがいちばん簡単であり、このモードを実現する一つの手法として図 2 に示す 4 光波混合光学系を利用することができる。

三つのモードにおける素子の感度、応答時間と分解能はそれぞれ異なる。素子の感度をできるだけ高くして使うためのコヒーレント光と画像入力用インコヒーレント光の波長 matching の条件も動作モード、結晶板の厚さ、光の入射方向によって変わってくる²⁴⁾。素子の感度は

100~200 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ であり、解像度は 10~15 line pairs/mm である。素子の解像度は結晶板の厚さなどの要因に影響される。また、図2のような光学系を利用する場合、Bragg 回折の条件からのずれが起こることにより分解能が悪くなる傾向がある²⁴⁾。

ほかに2光波混合光学系を利用し、光学系を単純化した photorefractive 空間光変調素子もある。KNbO₃ 単結晶の anisotropic self-diffraction 効果を利用する光学系²⁵⁾では、インコヒーレント画像は二つのコヒーレント書込み光により形成されたグレーティングを交差し、画像信号はグレーティングを形成するために用いるコヒーレント光の回折光、すなわち自己回折光波に変換される。また、BSO 単結晶における Doppler-enhanced self-diffraction 効果を利用した素子もある²⁶⁾。

特殊な構成の光波混合光学系を利用した入力画像変換素子に GaAs 単結晶を用いたものが報告されている²⁷⁾。この系では入力光と画像情報を含む制御光の結合により、二つの光波の偏光方向が回転することを利用して画像変換を行なう。

以上の素子の感度や解像度などの特性はまだまだ良くない状態であり、今後の新材料の開発、現在の素子の改良が期待される。

4. 電気光学結晶と MCP を用いた素子

二次電子増倍用マイクロチャンネルプレート (MCP) と電気光学効果を示す強誘電体結晶板を組み合わせて構成した空間光変調素子が MSLM (multichannel spatial light modulator) である。MSLM では、電子像は MCP 内で高倍率 (10⁴ 倍程度) に増幅され、電気光学効果 (Pockels 効果) をもつ強誘電体結晶板の表面に電荷パターンを形成する。電荷パターンが結晶板内に作る電界に対応して発生する縦方向電気光学効果によって読出し光の偏光状態を変える。素子から出てきた読出し光を適当な検光子を通して観察すると、入力情報が光の強度分布 (出力像) に変換される²⁸⁻³¹⁾。

MSLM には、入力情報の電子像を電子銃で作った MCP に入力する電子アクセス型のものと、光電面で発生した電子像を近接した MCP 上に直接入力するもの²⁸⁾ ならびに光電子像を静電レンズによって MCP 上に結像させて入力する方式³¹⁾ (図3) の光アクセス型のものがある。電気光学結晶には LiNbO₃ や LiTaO₃ が用いられる。光アクセス型素子の感度は光電面の種類、入力光の波長と MCP の増倍率に依存するが、nJ/cm² オーダーの非常に高い値が報告されている。解像度は 15 line pairs/mm、コントラスト比は 1000:1、半波長電圧は 1.2 kV、書込みに要する時間は 50 ms、記憶時間は 1 日、消去に要する時間は 20 ms、有効画面の大きさは直径 15 mm である。この素子は単独で像の反転、輪郭抽出、数種類の論理演算が行なえる。図3に示す構造の素子では像の拡大、縮小、移動、回転なども行なえる。最近、MSLM を用いた光学系で行なった光ニューロコンピューティングの実験が報告され、注目されている³²⁾。また、MSLM を用いた双安定光学系の構想³³⁾ なども出されている興味ある素子の一つである。

この種の素子は解像度がまだ少し低い。これは MCP の管径の微細化と強誘電体結晶板の厚さを薄くすることで解決されるであろう。また、LiNbO₃ や LiTaO₃ 単結晶を用いた素子では、これらの結晶の天然の複屈折性のために、読出し光の入射角がわずかに変化しただけで、出力像のコントラストに大きく影響するため、読出し光の平行性と入射方向に細心の注意を払う必要がある。素子の操作性はたいへん良いので有用な素子となるであろう。

5. PLZT を用いた素子

強誘電体セラミックス PLZT は組成を変えることによってメモリー効果、一次電気光学効果、二次電気光学効果 (Kerr 効果) を示す³⁴⁾。二次電気光学効果を示す PLZT 基盤上に Si 半導体の受光素子と光変調器の駆動回路を集積して、機能性の優れた空間光変調素子を作る

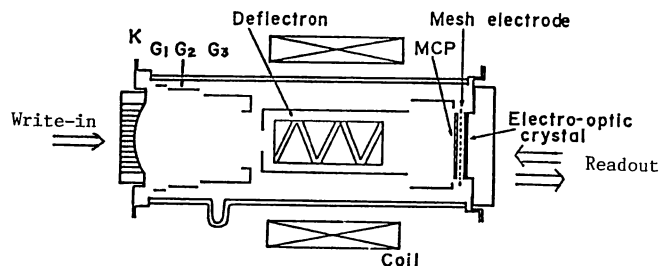


図3 MSLM の構造³¹⁾

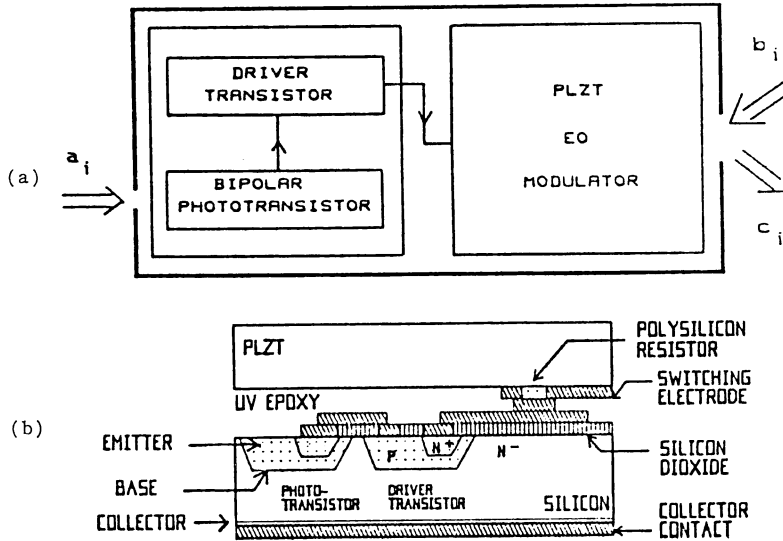


図 4 Si-PLZT 素子の構造³⁶⁾
(a) 平面構造, (b) 断面構造

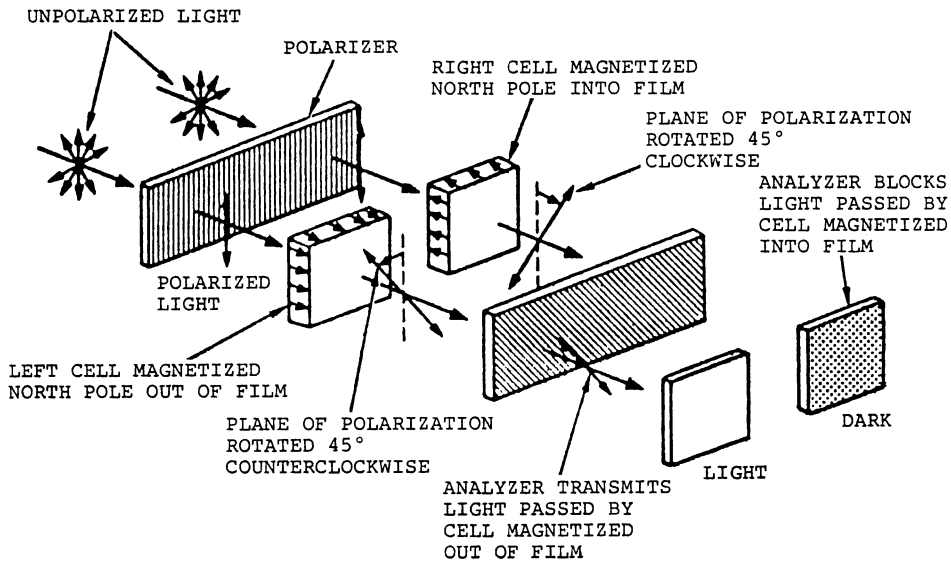


図 5 磁気光学効果を利用する空間光変調素子の原理⁴²⁾

研究が行なわれている^{35,36)}。素子の構造図を図 4 に示す。各画素ごとに受光素子と駆動回路をもち、受光素子で得た信号を増幅器で増幅して PLZT の画素に電界を印加し、PLZT の電気光学効果を利用して読出し光の変調を行なう。多結晶 PLZT (9/65/35) を用いた一次元配列の素子における基礎実験で応答速度 10 kHz が実証され³⁵⁾、画素数 1000×1000、フレームレート 10 kHz ダイナミックレンジ 30 dB の性能をもつ空間光変調器の試作構想が示されている³⁶⁾。画素数の多い素子が現実のものになると、たいへん操作性の優れた柔軟性のある

光情報処理デバイスが構成できるようになる。

PLZT 基盤に簾電極を付け、電気信号で直接アクセスする一次元および二次元空間光変調素子の開発も行なわれ、画素数 100×200、空間分解能 10 gate/mm、応答速度 10 μ s、消光比 500:1 以上などの成果を得ている³⁷⁻³⁹⁾。これらの素子では電極構造の動作特性への影響なども詳しく研究され⁴⁰⁾、画素数規模の大きい素子を実現することが課題といえる。光情報処理分野とは異なるが、応答速度の速い特長を生かして、プリンタ用の光ゲートへの応用も試みられた³⁸⁾。

6. 強磁性体結晶を用いた素子

エピタキシャル成長した強磁性体結晶薄膜の Faraday 効果を利用して、透過光の偏光面を回転させ、光を変調する素子が開発されている (図5)^{41,42)}。この素子は、非磁性ガーネット基盤の上にエピタキシャルに成長させて作った鉄ガーネット磁性薄膜の二次元配列 (磁性薄膜セル) によって構成されている。情報の入力 (書込み) 法は、縦方向と横方向に交錯して付けられた電極に流す (1) 電流による磁界で各磁性薄膜セルの磁化方向を決定する方法^{41,42)}と (2) 電流が発生するジュール熱を利用して磁化方向を決定する方法⁴³⁾がある。

素子の駆動が電流信号で行なえるため、高速動作が可能となっている。基本的には各画素の磁化はその画素内で正か負のいずれか一方に揃えて行なわれ、変調された出力像は2階調の像となる。実際に素子を白色光画像処理や画像間の相関演算に応用した報告もある^{44,45)}。今後、素子の有効面積の拡大化が実現されると有用な素子となるであろう。

7. おわりに

光情報処理法および光演算法の最大のメリットは大量のデータを空間的に並列に配列して処理を実行できる点にある。この長を生かすには、電子回路では容易に実現できそうにない大きな並列度をもつ空間光変調素子を開発する必要がある。非線形光学材料の開発研究が盛んになりつつある今日を思うと、空間光変調素子に適した新素材が現われ、光情報処理や並列光演算に適した素子の出現が期待できそうである。

文 献

- 1) 末元好郎, 藤田 茂, 峯本 工: 光学, **7** (1978) 194.
- 2) 西原 浩: 応用物理, **49** (1980) 479.
- 3) 西原 浩: テレビジョン学会誌, **36** (1982) 1068.
- 4) 窪田恵一, 西田信夫: 光学, **14** (1985) 19.
- 5) 窪田恵一: 第24回サマーセミナー論文集 (1987) p. 107.
- 6) 間多 均: 光学, **18** (1989) 350.
- 7) D. S. Oliver, P. Vohl, R. E. Aldrich, M. E. Behrndt, W. R. Buchan, R. C. Ellis, J. E. Genthe, J. R. Goff, S. L. Hou and G. McDamiel: Appl. Phys. Lett. **17** (1970) 416.
- 8) Itho: Opt. Commun., **8** (1973) 387.
- 9) S. L. Hou and D. S. Oliver: Appl. Phys. Lett., **18** (1971) 325.
- 10) M. Petrov, V. I. Marakhonov, M. G. Shlyagin, A. V. Khomenko and M. V. Krasin'kova: Sov. Phys. Tech. Phys., **25** (1980) 752.
- 11) Y. Owechko and A. R. Tanguay: J. Opt. Soc. Am., **A1** (1984) 644.
- 12) R. A. Sprague: J. Appl. Phys., **46** (1975) 1673.
- 13) 峯本 工, 陳 靖: 光学, **15** (1986) 213.
- 14) J. Chen: "A spatial light modulator using photoconductive and electrooptic crystal", 神戸大学博士論文 (1989); J. Chen and T. Minemoto: J. Opt. Soc. Am. A, **6** (1989) in printing.
- 15) T. Minemoto, H. Yoshimura, Y. Suemoto and S. Fujita: Jpn. J. Appl. Phys., **18** (1979) 1727.
- 16) J. Chen and T. Minemoto: Opt. Commun., **71** (1989) 29.
- 17) M. P. Petrov, A. V. Khomenko, M. V. Krasin'kova, V. I. Marakhonov and M. G. Shlyagin: Sov. Phys. Tech. Phys., **26** (1981) 816.
- 18) D. Casasent, F. Caimi, M. P. Petrov and A. V. Khomenko: Appl. Opt., **21** (1982) 3846.
- 19) D. M. Shields and T. E. Luke: Opt. Commun., **55** (1985) 391.
- 20) D. Casasent, F. Caimi and A. V. Khomenko: Appl. Opt., **20** (1981) 3090.
- 21) D. Casasent, F. Caimi and A. V. Khomenko: Appl. Opt., **20** (1981) 4215.
- 22) D. Casasent, F. Caimi, M. P. Petrov and A. V. Khomenko: Appl. Opt., **21** (1982) 3846.
- 23) Y. Shi, D. Psaltis, A. Marrakchi and A. R. Tanguay, Jr.: Appl. Opt., **22** (1983) 3665.
- 24) A. Marrakchi, A. R. Tanguay, Jr., J. Yu and D. Psaltis: Opt. Eng., **24** (1985) 124.
- 25) E. Voit and P. Gunter: Opt. Lett., **12** (1987) 769.
- 26) A. Marrakchi: Opt. Lett., **13** (1988) 654.
- 27) E. M. Garmire: Opt. Lett., **12** (1987) 705.
- 28) C. Warde, A. D. Fisher, D. M. Cocco and M. Y. Burmawi: Opt. Lett., **3** (1978) 196.
- 29) C. Warde, A. M. Weiss, A. D. Fisher and J. I. Thackara: Appl. Opt., **22** (1981) 2066.
- 30) C. Warde and J. I. Thackara: Opt. Lett., **7** (1982) 344.
- 31) T. Hara, K. Shinoda, T. Kato, M. Sugiyama and Y. Suzuki: Appl. Opt., **25** (1986) 2306.
- 32) 石川正俊, 向坂直久, 豊田晴義, 鈴木義二: 信学技報, CPSY 88-15 (1986) 61.
- 33) S. Lau and C. Warde: Appl. Opt., **27** (1988) 2954.
- 34) 岡崎 清: セラミックス誘電体工学 (学献社, 東京, 1978).
- 35) S. C. Esner, J. H. Wang, T. J. Drabik, M. A. Title and S. H. Lee: Opt. Eng., **26** (1987) 406.
- 36) S. H. Lee, S. C. Esner, M. A. Title and T. J. Drabik: Opt. Eng., **25** (1986) 250.
- 37) K. Ueno and T. Saku: Appl. Opt., **19** (1980) 164.
- 38) 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, 115 (1981) p. 15.
- 39) 河井高志, 山中江里子, 内藤誠一, 栗田良夫: 第46回応用物理学会学術講演会予稿集 (1985) p. 72.
- 40) K. Tanaka, M. Yamaguchi and H. Seto: Jpn. Appl. Phys., **24** (1985) 177.
- 41) W. E. Ross, D. Psaltis and R. H. Anderson: Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., **341** (1982) 341.
- 42) W. E. Ross, D. Psaltis and R. H. Anderson: Opt. Eng., **22** (1983) 485.
- 43) P. Hansen, *et al.*: Philips Tech. Rev., **41** (1983/84).
- 44) F. T. S. Yu, X. Lu and M. Cao: Appl. Opt., **23** (1984) 4100.
- 45) D. Psaltis, E. G. Paek and S. S. Venkatesh: Opt. Eng., **23** (1984) 698.