



ガラス板を絶縁体に用いた PROM 素子

景 虹・陳 靖・峯本 工

神戸大学工学部計測工学教室 〒657 神戸市灘区六甲台町 1-1

(1989年6月16日受理)

A PROM Device Using Thin Glass Plates for Insulating Layers

Hong JING, Jing CHEN and Takumi MINEMOTO

Department of Instrumentation Engineering, Faculty of Engineering,
Kobe University, 1-1, Rokkodai, Nada-ku, Kobe 657

A Pockels readout optical modulator (PROM device) was constructed with a $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ single crystal plate and thin glass plates for insulating layers. The characteristics of the PROM device were improved, since the glass plates have high transparency, high dielectric strength and no birefringence by which the electrooptic effect of the device is complicated.

1. はじめに

光情報処理システム¹⁻³⁾および光並列演算システム⁴⁻⁶⁾に関する研究はこれまでも数多く行なわれ、現在も盛んに行なわれている。しかし、これらのシステムが実際に実用的なものとなるためにはまだまだ多くの問題を解決しなければならない。これらの避けて通れない問題のなかの一つに空間光変調素子の開発がある。空間光変調素子についても多くの研究が行なわれ、いろいろな種類の素子が提案されてきた⁷⁻¹¹⁾。光伝導性の電気光学結晶を利用する PROM 素子もそのうちの一つである。PROM 素子は光書込み・光読出し型で比較的高感度の空間光変調素子であるが、動作電圧が高く、解像度がいま一步不足しているなど、その性能に改善を要する点が残っている¹²⁾。近年の技術の進歩や新しい材料の開発によって性能改善の可能性も増してきている。

PROM 素子は従来、両面を光学研磨した $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (以下では BSO と略す) 単結晶の板と、絶縁体にパリレン薄膜または雲母のへき開膜を用いて構成されてきた^{13,14)}。しかし、パリレン薄膜は絶縁耐圧が低いため、BSO 単結晶の電気光学効果特性を十分に活用できない欠点がある。一方の雲母膜は絶縁耐圧が約 6 kV と高いが、固有の複屈折性のために素子の電気光学効果特性が複雑なものになること¹⁵⁾、および厚さのそろった(均質

な) 大きな面積の薄板を作ることが困難であるという欠点をもっている。近年の光学研磨技術の発達により、厚さ数十 μm 程度のガラスの薄板が研磨で作製できるようになってきた。この技術を利用すると、均質な光学的に等方性の透明な絶縁体を再現性よく作製できることになる。また、ガラス薄板は、絶縁耐圧と雲母膜と同程度であるので、パリレン膜と雲母膜の欠点を改善でき、PROM 素子の絶縁体に好都合と考えられる。

本研究では、厚さ 20 μm に研磨したパイレックスガラス薄板を絶縁体に用いて PROM 素子を構成し、その特性を測定した。そして、コヒーレント光によるアナログ情報処理光学系への画像入力素子に用いて、画像の輪郭抽出を行ない、良好な結果を得た。以下、素子の構造、素子の特性測定結果および画像処理に利用した実験結果について述べる。

2. PROM 素子の構造

PROM 素子は、BSO 単結晶の光伝導性を利用して書込み画像情報の光強度分布を結晶板内の電荷分布に変換し、蓄積する。そして、この電荷分布が作る電界によって引き起こされる電気光学効果を利用して読出し光の強度分布に変換する。したがって、PROM 素子は BSO 結晶板とそれを包む絶縁体層および透明電極によって構成される。素子の構造を Fig. 1 に示す。BSO 結晶板

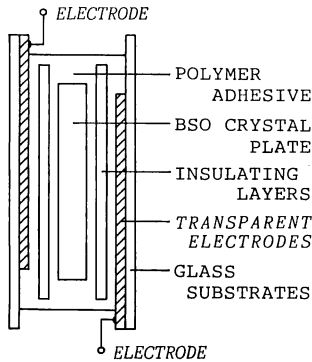


Fig. 1 Structure of the PROM device using thin glass plates for insulating layers.

は、単結晶から結晶軸 (0 0 1) に垂直に数百 μm の厚さに切り出して得られる。結晶板の表面で起こる多重反射による影響を除くために結晶板にはわずかなテーパ ($15' \sim 30'$) を付ける。PROM 素子は、この BSO 結晶板の両表面に絶縁体として厚さ数 μm の薄いガラス板を貼り付け、さらにその外側に透明電極を付けたガラス基板を貼り付けて構成する。ガラス基板の外側表面には反射防止膜を蒸着して、光の透過率を良くする。

このような構造の PROM 素子に電圧 V_e を印加した場合、素子の中心に位置する BSO 結晶板における降下電圧 V_B は

$$V_B = \frac{\epsilon_I \epsilon_P d_B}{\epsilon_I \epsilon_P d_B + 2\epsilon_P \epsilon_B d_I + 4\epsilon_B \epsilon_I d_P} V_e \quad (1)$$

と書ける。ここでは、

- ϵ_B : BSO 単結晶の比誘電率
- ϵ_I : 絶縁体に用いるガラス薄板の比誘電率
- ϵ_P : 接着剤の比誘電率
- d_B : BSO 単結晶の厚さ
- d_I : ガラス薄板の厚さ
- d_P : 接着層 (4 層) の平均厚さ

この PROM 素子の半波長電圧 V_{PH} は、接着層が非常に薄く、接着層による電圧の降下がないと仮定すると、

$$V_{PH} = \frac{\epsilon_I d_B + 2\epsilon_B d_I}{\epsilon_I d_B} V_{BH} \quad (2)$$

となる。ただし、 V_{BH} は BSO 単結晶の半波長電圧である。BSO 単結晶の特性定数 $V_{BH} = 3.9 \text{ kV}$ 、 $\epsilon_B = 56$ を用い、絶縁体のガラスに $\epsilon_I = 4.6$ のパイレックスガラスを使用し、BSO 単結晶板とガラス薄板の厚さを $d_B = 300 \mu\text{m}$ 、 $d_I = 20 \mu\text{m}$ とすると、接着層における電圧の降下を無視できる場合には、 $V_{PH} = 10.2 \text{ kV}$ となり、 $d_I = 10 \mu\text{m}$ の場合には $V_{PH} = 7.0 \text{ kV}$ となる。しかし、

実際の素子では絶縁層中での降下電圧は無視できず、素子の半波長電圧はこれらの値よりさらに高くなるであろう。

3. 実験結果と検討

3.1 素子の構成と特性測定

素子の製作には、厚さ $300 \mu\text{m}$ (テーパ $15'$ 付き) 大きさ $15 \times 15 \text{ mm}^2$ の BSO 結晶板と、厚さ $20 \mu\text{m}$ 大きさ $20 \times 20 \text{ mm}^2$ のパイレックスガラスの薄板を用い、接着剤には高分子レンズボンド M 62 を用いた。透明電極の付いたガラス基板には、片面が誘電体多層膜の反射防止膜 (波長 $430 \sim 670 \text{ nm}$ で、反射率が 0.5% 以下) でコートされた市販のパイレックスガラス板 (厚さ 1.2 mm) のもう一面に ITO 膜をコートしたものをを用いた。

作製した PROM 素子の電気光学効果特性を反射型読み出し光学系で測定した結果を Fig. 2 に示す。PROM 素子の電気光学効果を透過型読み出し光学系で観測すると、素子からの出力光の強度 I_o は、BSO 結晶板表面間の電位差が V_B であるとき、

$$I_o = I_i \sin^2(\pi V_B / 2 V_{BH}) \quad (3)$$

で与えられ、この式を PROM 素子への印加電圧 V_e と素子の半波長電圧 V_{PH} で表わすと

$$I_o = I_i \sin^2(\pi V_e / 2 V_{PH}) \quad (4)$$

となる。ここで、 I_i は PROM 素子への入射光の強度である。また、反射型読み出し光学系で観測すると

$$I_o = I_i \sin^2(\pi V_e / V_{PH}) \quad (5)$$

となる。測定結果 (Fig. 2) より、出力光強度が最大となる印加電圧の値、すなわち素子の半波長電圧は約 12.6 kV であった。

素子の半波長電圧の測定結果と、(2)式のところで接

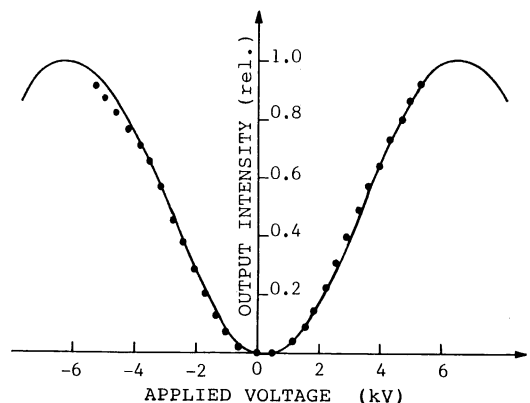


Fig. 2 Experimental curve of electrooptic effect in the PROM device.

着層内降下電圧を無視して求めた素子半波長電圧とを比較することにより、4層の接着層で降下した電圧は合計約 2.4 kV であったと推定できる。したがって、素子に半波長電圧を印加しているとき、接着層1層当たりで降下する電圧は約 0.6 kV であると言える。接着層の比誘電率を $\epsilon_P=3$ 程度と仮定し、 $V_e=12.6$ kV、 $V_B=3.9$ kV を用いて接着層1層当たりの厚さ d_P を推定すると約 $2.5 \mu\text{m}$ という結果を得る。

厚さ $20 \mu\text{m}$ のパイレックスガラスの薄板を絶縁体を用いたときの素子の半波長電圧は 12.6 kV であるから、ガラス板の絶縁耐圧を 6 kV 程度とすると、透過型読出し光学系で使用する場合には、BSO 単結晶の固有の電気光学効果特性のダイナミックレンジの約半分程度を利用できることになる。これは雲母膜を用いた素子より少し劣るが、パリレン薄膜を用いた素子より優れている。今後ガラスの絶縁体を $10 \mu\text{m}$ 程度にできれば、半波長電圧は約 3.2 kV 程度低くなると推定され、BSO 単結晶のダイナミックレンジより多く利用できるようになるであろう。また、Fig. 3 に示すように絶縁体を用いるガラスの薄板の一面に透明電極を付けるように工夫すれば、素子の半波長電圧は低下し、利用できるダイナミックレンジも広がるであろう。

入力画像の空間周波数に対する読出し像のコントラストの変化を表わす MTF (modulation transfer function の略) 特性を解像度テストチャート (USAF 1951) を用いて測定した。実験では、解像度テストチャートを $1/2$ に縮小した像を中心波長 450 nm のインコヒーレント光で書き込み、透過型読出し光学系で He-Ne レーザー光 (波長 633 nm) を用いて読み出した。PROM 素子からの読出し像の一例を Fig. 4 に示す。MTF 特性の測定結果を Fig. 5 に示す。MTF の値が $1/e$ になる空間

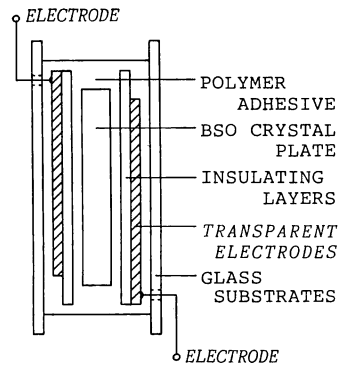


Fig. 3 Improved structure of the PROM device.

Table 1 Characteristics of the PROM device.

Function	Performance
Active area	11 mm diameter
Thickness of BSO crystal	$300 \mu\text{m}$
Thickness of glass	$20 \mu\text{m}$
Half wave voltage	12.6 kV
Resolution (with $MTF=1/e$)	24.0 lp/mm
Output contrast ratio	4500 : 1

周波数を解像度と定義すると、この素子の解像度は約 24.0 lp/mm であった。製作した PROM 素子のおもな性質をまとめて Table 1 に示す。この表に示す出力光のコントラスト比は Fig. 2 における電気光学効果の最大値と最小値の比を表わすものである。

3.2 アナログ画像処理への応用

コヒーレント光を用いたアナログ画像情報処理で代表的なものにフーリエ変換や空間周波数フィルタリングがある。この研究では、製作した PROM 素子をコヒーレント光学系への画像入力素子 (incoherent-to-coherent

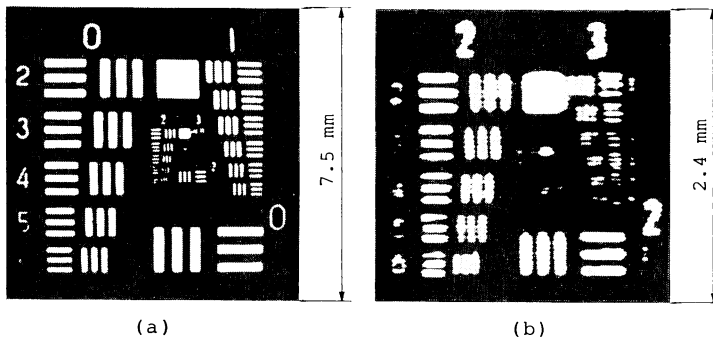


Fig. 4 Output image from the PROM device. (a) Air Force test chart (with the writing system of $1/2$ magnification), (b) the expansion of the central part of (a).

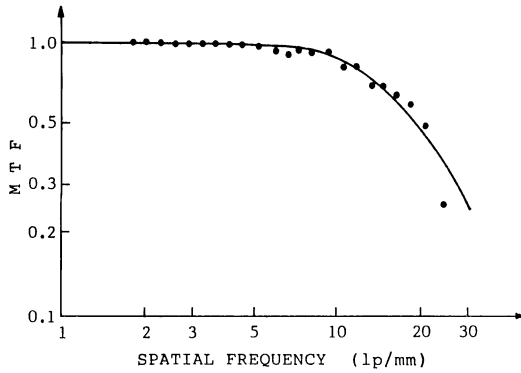


Fig. 5 Experimental MTF curve of the PROM device. The curve was obtained by using the test chart (USAF 1951) as an input pattern.

image converter) に応用して、画像のフーリエ変換や空間周波数フィルタリングが満足に行なえるかどうかを調べた。

PROM 素子を画像データ入力素子に用いた空間周波数フィルタリング処理光学系を Fig. 6 に示す。画像データの光学系への入力は、画像をテレビカメラで撮影後、小型青色 CRT (画面大きさ=32×25 mm², 発光中心波長 450 nm) に表示し、レンズ L₁ で PROM 素子上に結像することによって行なわれた。素子に記録され

た画像情報は He-Ne レーザーからの光を用いて読み出した。素子から出たコヒーレント光画像はレンズ L₂ によってフーリエ変換され、この面に置かれた適当な空間周波数フィルタによって変調され、レンズ L₃ の後側焦点面にフィルタリング処理された像となって現われる。

本研究のフィルタリング処理実験では、計算機ホログラフィ技術を利用して作製したホログラフィック光学素子 (HOE)¹⁶⁾ を Fig. 6 の光学系に組み込み、入力画像に対する微分処理を行なった。その一例を Fig. 7 に示す。同図 (a) はガラス薄板を絶縁体に用いた PROM 素子から読み出したコヒーレント光画像である。同図 (b) は (a) を微分処理したものである。微分処理によって原画の縞のエッジの所が明線になるため、処理像 (b) では、縞の本数が増加している。同図 (c) には比較のために雲母膜を絶縁体に用いた素子を使用して微分処理を行なった結果も示した。ガラス薄板を絶縁体に用いた PROM 素子のほうが優れていることが明瞭にわかる。

これらの処理結果における解像度は Table 1 に示した素子の解像度に比べると低いことに気がつく。これは HOE の処理能力がその大きさによって限られるからである。HOE の一辺の長さを α とすれば、処理できる最大空間周波数 (出力輪郭像の最大分解能) は

$$R = \alpha / 2\lambda f \quad (6)$$

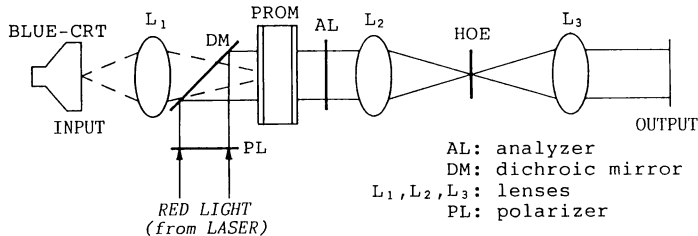


Fig. 6 Optical system for spatial filtering.

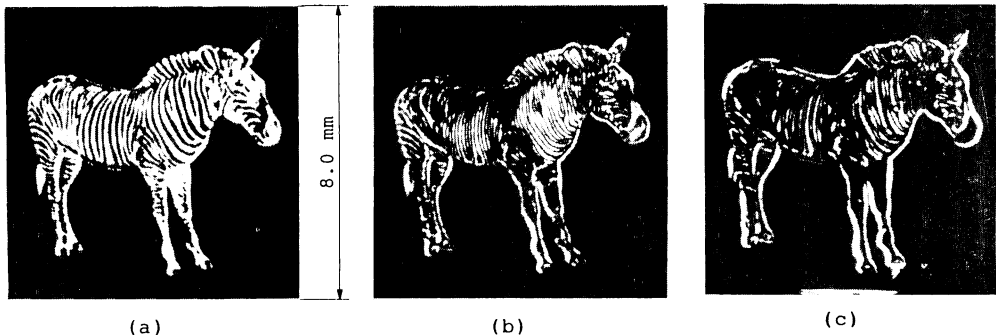


Fig. 7 Results of spatial filtering using PROM devices. (a) coherent image from the PROM device using thin glass plates, (b) differentiated image of (a), (c) differentiated image obtained by coherent image from a PROM device using mica films.

で与えられる。ただし、 λ は読出し光の波長、 f はフーリエ変換レンズ (L_2) の焦点距離である。本研究では、 $\alpha=3.2$ mm, $\lambda=633$ nm, $f=300$ mm より、 $R=8.43$ lp/mm であった。素子の解像度はこれよりさらに高いから、より大きな HOE を用いれば、処理された像の分解能はさらに高くなると期待できる。

次に、ガラスの薄板を用いた素子による処理像のほうが雲母膜を用いた素子による処理像より優れている理由について述べる。HOE を用いた微分処理はフーリエスペクトル面における空間周波数フィルタリングであるため、処理された像の画質は PROM 素子での画像変換に微妙に影響される。絶縁体に雲母膜を用いた PROM 素子の場合、BSO 単結晶に雲母膜、または雲母膜に透明電極を貼り付ける過程において、比較的柔軟性に富む雲母膜は接着剤の硬化の際の収縮に伴って曲げられ、小さな漣がたつたように複雑に湾曲する。さらに、雲母膜と接着剤の屈折率が少し異なるために PROM 素子からの読出し像の位相に乱れが生じて、素子からの出力波面にわずかではあるが余分な雑音性の複雑な変調を加えている。雲母膜に比べてガラス板は硬いため接着剤が硬化する際に雲母膜のような収縮に伴う湾曲も起こらず、屈折率も接着剤のそれとほとんど差異がないため、PROM 素子からの読出し像に余分な位相の乱れをなくすことができ、良質の処理像が得られた。

4. おわりに

ガラスの薄板を絶縁体を用いた PROM 素子の一例を示したが、今後ガラスの薄板の均質性の向上、透明電極を付けるガラス基板にオプティカルフラットを採用するなどの改善を行えば、さらに良質の素子を作製できるようになるであろう。一方、現在のネオパン SS 写真フィルムの 35 mm 判と同程度の情報量を記録するためには、厚さ数百 μm 、直径 30 mm 程度の BSO 結晶板が必要であるが、今後光学研磨技術の開発などによっ

て、このような有効画面の大きな素子も再現性よく作製できるようになると期待される。

最後に、本研究を行なうに際し BSO 単結晶板およびガラスの薄板を提供して下さった日本ガイシ(株)開発本部応用研究所松沢素一郎氏に感謝いたします。

文 献

- 1) D. Casasent: "Coherent optical pattern recognition," Proc. IEEE, **67** (1979) 813-825.
- 2) 峯本 工: "ハイブリッド画像処理システム", システムと制御, **30** (1986) 71-77.
- 3) Special issue ed. by B. Javidi: "Industrial applications of optical signal processing I & II," Opt. Eng., **27**, 4 (1988) 257; **27**, 5 (1988) 353.
- 4) 一岡芳樹: "光コンピューター", 応用物理, **54** (1985) 1019-1030.
- 5) 谷田 純: "並列光論理演算", 光学, **15** (1986) 382-389.
- 6) 谷田貝豊彦: "光コンピューター研究の現状と課題", 応用物理, **57** (1988) 1136-1150.
- 7) Special issue ed. by A. VanderLugt: "Special section on acousto-optic signal processing," Proc. IEEE, **69**, 1 (1981) 3-5.
- 8) 窪田恵一, 西田信夫: "光空間変調素子", 光学, **14** (1985) 19-28.
- 9) 窪田恵一: "空間光変調素子", 第24回サマーセミナー「新光学素子」論文集 (1987) pp. 107-126.
- 10) 間多 均: "液晶空間光変調器", 光学, **18** (1989) 350-351.
- 11) 峯本 工, 陳 靖: "光学結晶を用いた空間光変調素子", 光学, **18** (1989) 337-342.
- 12) 峯本 工: 光技術動向調査報告書 I (光産業技術振興協会, 1985) pp. 233-238.
- 13) S. L. Hou and D. S. Oliver: "Pockels readout optical memory using $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$," Appl. Phys. Lett., **18** (1971) 325-328.
- 14) T. Minemoto, H. Yoshimura, Y. Suemoto and S. Fujita: "Incoherent-to-coherent optical image converter of transmission type using $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ single crystals," Jpn. J. Appl. Phys., **18** (1979) 1727-1739.
- 15) J. Chen: "A spatial light modulator using photoconductive and electrooptic crystal", 神戸大学博士論文 (1989).
- 16) 西出和弘, 景 虹, 峯本 工: "画像処理用 HOE の製作", 第47回応用物理学会学術講演会予稿集 (1987) p. 527.