

GaAs の電界吸収効果および電気光学効果を用いた 高コントラストな空間光変調素子

尾 藤 洋 一

光のもつ高速性, 空間並列性, 耐雑音性, 可干渉性などのすぐれた特性を利用した光情報処理 (光コンピュータ) は現在の電子計算機に代わる, もしくは欠点を補う情報処理技術として期待されている。空間光変調素子はこの光情報処理システム実現のためには欠くことのできないデバイスである¹⁾。

空間光変調素子はそのアドレス方式により電気アドレス型と光アドレス型に大別されるが, 光の並列性をより生かすという観点から, 光アドレス型が望まれる場面は多い^{2,3)}。光アドレス型の素子に要求される性能としては, 光感度, 応答速度 (フレームレート), 空間分解能, コントラスト比などがあげられるが, 現在のところ, これらすべての性能において実用に耐え得る素子は開発されていない。現時点で最も代表的な光アドレス型の空間光変調素子は液晶を変調材料に用いた素子である。液晶を用いた光アドレス型の素子は液晶ライトバルブと呼ばれ, 光導電体や誘電体反射膜との複合構造となっている。液晶ライトバルブの開発は盛んに行われており, 最近では, a-Si や強誘電性液晶などを用いることで 50 lp/mm を超える空間分解能やキロヘルツを超えるフレームレートが実現されている⁴⁻⁶⁾。しかし, 液晶空間光変調素子にはコントラストが低いという共通の欠点が存在する。光情報処理システムにおいて, コントラスト比は処理の精度に直接影響を与える重要な要素であり, 光学的フーリエ変換を基軸としたアナログ処理方式においては特に高いコントラスト比が望まれる⁷⁾。また, 閾値 (二値化) 処理や論理演算など, 入力光強度に対して非線形な処理の可能な空間光変調素子も求められている^{1,2)}。液晶空間光変調素子のコントラスト比は

200~100:1 程度であり, 満足な値とはいえない^{8,9)}。

一方, コントラスト比の高い素子として PROM (Pockels readout optical modulator) 素子と呼ばれる光アドレス型の空間光変調素子がある。PROM 素子では電気光学効果 (ここではポッケルス効果の意) と光導電効果を併せもつ光学的均一性のよいバルク結晶を変調材料かつ光感度材料として用いる。これまで, 通常の PROM 素子では $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) 単結晶が用いられ (BSO-PROM 素子), 製品化もなされている。液晶に比べ BSO などのバルク結晶の電気光学効果はかなり小さいが, PROM 素子では数十~数百 μm という厚さに数 kV の高電圧を印加することで, 1000:1 以上の高コントラスト比を実現している¹⁰⁾。しかしながら, BSO-PROM 素子にはフレームレートが遅いという致命的な欠点がある。これは, BSO の光感度があまり高くなく, なおかつその感度領域が青色よりも短い波長の光になること, 数 kV の高電圧の on-off 動作が必要なことが主な原因である。

筆者らはこの BSO-PROM 素子の欠点を解消し, 高コントラストかつ高速動作の可能な空間光変調素子を実現するために, まず, GaAs 単結晶板を用いた PROM 素子 (GaAs-PROM 素子) を提案した^{11,12)}。GaAs は近赤外 (バンドギャップ) 以下の波長の光に対する吸収係数が大きく, 電荷の移動度も速いことから光感度の大幅な改善が期待できる。また, 従来の電源の on-off 操作に代えて, 交流電圧を印加電圧とするシステムを構築することで, 高速での高電圧印加を可能にした。さらに, 数十~数百 μm という結晶厚に数 kV の高電圧が印加される PROM 素子の構造においては, 電界吸収効果を利用して高いコントラスト比が得られることを見いだした¹³⁾。そして, この電界吸収効果に電気光学効果を重ね合わせることでさらに高いコントラスト比と大きな γ 特性を実現した¹⁴⁾。

計量研究所量子部光学計測研究室 (〒305-8563 つくば市梅園 1-1-4)
E-mail: bitou@nrlm.go.jp

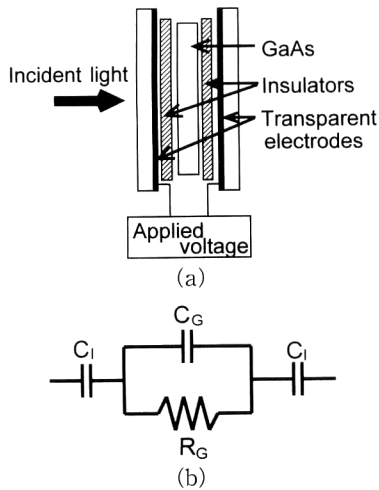


図1 素子構造とその等価回路。(a) 素子構造, (b) 等価回路。C₁: 絶縁体の静電容量, C_G: GaAs 単結晶板の静電容量, R_G: GaAs 単結晶板の抵抗値。

本報告では GaAs におけるこの 2 つの電界効果を利用した空間光変調素子に関する一連の研究結果を報告する。以下では、まず、素子の構造と 2 つの電界効果を利用するときの動作原理について説明する。次に、交流電圧を印加したシステムの構成と素子の特性を述べる。そして、最後に今後の展望にふれ、まとめとする。

1. 素子の構造

GaAs 単結晶を用いた空間光変調素子の構造を図 1(a) に示す。基本的な構造は BSO-PROM 素子と全く同じである。GaAs 単結晶板を絶縁体で挟み、さらに、それを透明電極で挟んだ構造となっている。電界効果と光導電効果を併せもつ結晶を用いているので、液晶ライトバルブのように光導電体との複合構造にする必要がなく、非常にシンプルな構造である。試作した素子の GaAs 単結晶板には、液体封止引き上げ法によって成長させたアンドープのバルク結晶から方位 $\langle 001 \rangle$ に垂直に切り出したウェハを厚さ $400 \mu\text{m}$ に光学研磨したものを用いた。また、絶縁体には厚さ $10 \mu\text{m}$ の石英ガラスを用いた。素子の電氣的な等価回路は図 1(b) のように表すことができる。石英ガラスのように絶縁性の高い膜で挟むことで、半導体である GaAs においても、数 kV の高電圧を印加することが可能となっている。

素子の基本的な動作手順としては、まず、素子に電圧を印加した状態で書き込み光を照射する。書き込み光が照射された部分では、発生したフォトキャリアが印加電界に沿って移動し、GaAs 単結晶板での電界強度 (分圧) を弱める。これにより、書き込み光強度分布は GaAs 単結晶板での電界強度分布に変換される。そして、その電界強度

分布は GaAs の電界効果を介して読み出し光の強度分布に変換される。

2. 光変調の原理

2.1 電気光学効果 (ポッケルス効果) による光変調の原理 (GaAs-PROM 素子)

GaAs の電気光学効果のみを利用した場合の基本的な光変調の原理は、BSO-PROM 素子と全く同じである^{1,15)}。通常の動作方法ではクロスニコルにセットした偏光板が素子の前後に置かれる。このとき、素子に電圧を印加したときと印加していないときの読み出し光の強度比 (相対的な値ではあるが、以下ではこれを素子の透過率と呼ぶ) T_{EOC} は、理想的には、

$$T_{\text{EOC}} = \sin^2 \left[\frac{\pi}{2} \frac{V_a}{V_\pi} \right] \quad (1)$$

と与えられる。ここで、 V_a は PROM 素子への印加電圧、 V_π は PROM 素子の半波長電圧である。

空間光変調素子のコントラスト比は形成画像の明、暗の比で定義される。PROM 素子における画像明部の強度は、素子への印加電圧と素子の半波長電圧により、式(1)で与えられる。半波長電圧 V_π は、結晶への分圧比と電気光学定数の積により決まる。BSO と GaAs では電気光学定数と誘電率の比があまり変わらないので、素子を作製したときの半波長電圧に大差はない。BSO-PROM 素子の半波長電圧が可視光で 5 kV 程度であるのに対して、今回試作した GaAs-PROM 素子では、読み出し光波長 980 nm のとき半波長電圧 7.5 kV であった¹¹⁾。一方、画像暗部の強度は素子の消光比で決まる。素子の消光比は、素子に入射した直線偏光が結晶に発生するわずかな複屈折や散乱により、どれだけ直線偏光から乱されるかによって決まる。GaAs 単結晶の場合、その製造技術により、BSO 単結晶と同程度の光学的品質を得ることはさほど難しくはないと思われる¹⁶⁾。以上より、GaAs 単結晶板を用いた PROM 素子においても、BSO-PROM 素子と同程度の高いコントラスト比が期待できる。筆者らが試作した GaAs-PROM 素子においては 700 : 1 という高いコントラスト比を得ている¹²⁾。

2.2 電界吸収効果による光変調の原理

バルク半導体における電界印加による光学定数の変化としてフランツ・ケルディッシュ効果がある¹⁷⁾。この現象はバンドギャップ付近の波長をもつ光に対して生じ、バンドギャップ (GaAs : 867 nm) よりもわずかに波長の長い光に対しては吸収係数の増加が起こる。この現象は電界吸収効果と呼ばれ、その効果は印加電界が高く、波長がバンド

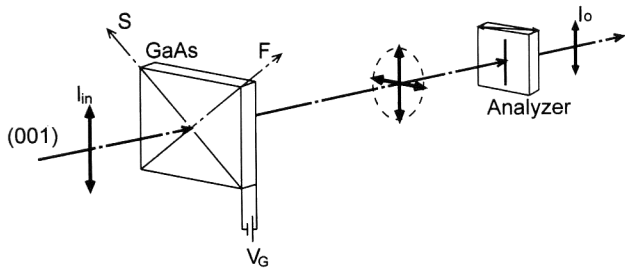


図2 電界吸収効果に電気光学効果を重ね合わせた光学配置. S: Slow 軸, F: Fast 軸.

ギャップに近いほど大きい. この電界吸収効果を読み出し光の変調 (強度変調) に利用したときの素子の透過率 T_{EA} は,

$$T_{EA} = \exp[-\Delta\alpha(E)L_G] \quad (2)$$

と与えられる. ここで, L_G は GaAs 単結晶板の厚さ, E は GaAs 単結晶板での電界強度, $\Delta\alpha(E)$ は吸収係数の変化である. この場合の素子のコントラスト比は T_{EA} の逆数により与えられる.

2.3 電界吸収効果に電気光学効果を重ね合わせるときの光変調の原理

式(1), (2)よりわかるように, 本素子の動作モードは, 電気光学効果を利用した GaAs-PROM 素子では, 書き込み光を照射し印加電界を弱めた部分が暗く読み出される陰画像モード, 逆に電界吸収効果を利用した場合には, 書き込み光を照射した部分が明るく読み出される陽画像モードとなる. よって, そのままでは2つの効果を重ね合わせることはできない. 電界吸収効果に電気光学効果を重ね合わせるためには, 図2に示すように偏光子をオープンニコルにセットし, 2つの電界効果がともに陽画像モードで動作するようにする. 2つの電界効果を重ね合わせたときの透過率 T は電界吸収効果 T_{EA} と電気光学効果 T_{EOO} (オープンニコルにセットしたときの透過率) の積によって与えられ,

$$T = T_{EA} \cdot T_{EOO} \\ = \exp[-\Delta\alpha(E)L_G] \cdot \cos^2\left[\frac{\pi}{2} \frac{V_a}{V_\pi}\right] \quad (3)$$

と表される¹⁴⁾. この場合のコントラスト比も T の逆数によって与えられ, 電界吸収効果のみを利用したときよりも電気光学効果の分だけ高いコントラスト比が得られる.

3. 動作システムの構成

交流電圧を印加する本素子の動作システムでは, 印加交流電圧の1周期を画像変換動作の1フレームに対応させる. そして, 書き込み, 読み出し, 消去の各照射光も交流

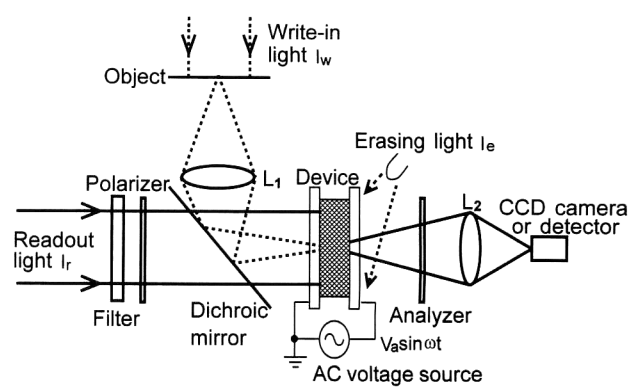


図3 素子の動作システム.

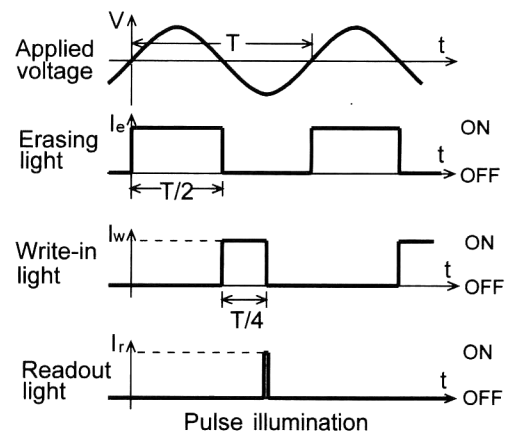


図4 印加交流電圧に対する消去, 書き込み, 読み出しの各照射光の照射タイミング.

電圧に同期して強度を変調する.

図3に動作システムの構成図を示す. 図中にある消去光は強い一様な光であり, 書き込まれた像を素早く消去するために用いられる. 消去光と書き込み光の光源には, 吸収の大きい領域である中心波長 660 nm の LED を用いた. 読み出し光の波長は吸収との兼ね合いから, LED と干渉フィルターにより中心波長を 900 nm とした (FWHM = 10 nm). 印加電圧は絶縁体の耐電圧 (5 kV 程度) によって制限され, 今回の実験では印加交流電圧の振幅を 4 kV とした.

次に各照射光の照射タイミングを図4に示す. 読み出し光は印加交流電圧の一方のピークに同期してパルス状に照射する. 書き込み光は読み出し動作時の印加電界を打ち消すように 1/4 周期の間照射する. 消去光は印加電界の方向が読み出し動作とは逆方向となる半周期の間照射する. この消去動作には電界分布を素早く打ち消す以外に, 印加電界の方向が逆になることを利用して, 次の読み出し動作時の結晶内電界を強める働きがある. この手法は on-off 操

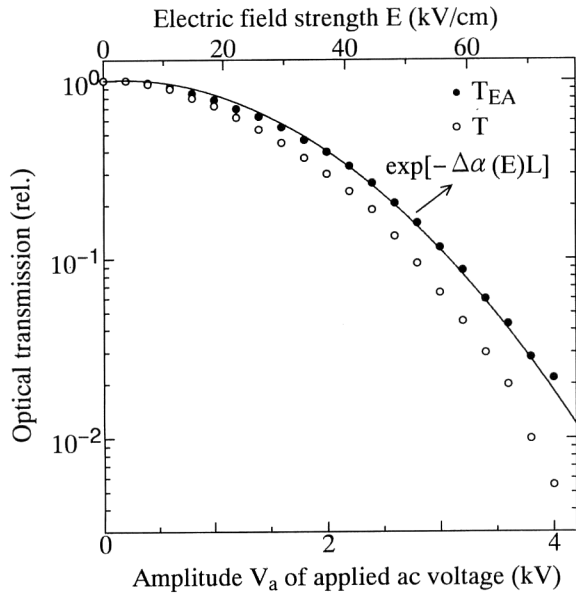


図5 素子透過率の印加電圧特性. T_{EA} : 電界吸収効果のみ利用したときの透過率, T : 電界吸収効果に電気光学効果を重ね合わせたときの透過率.

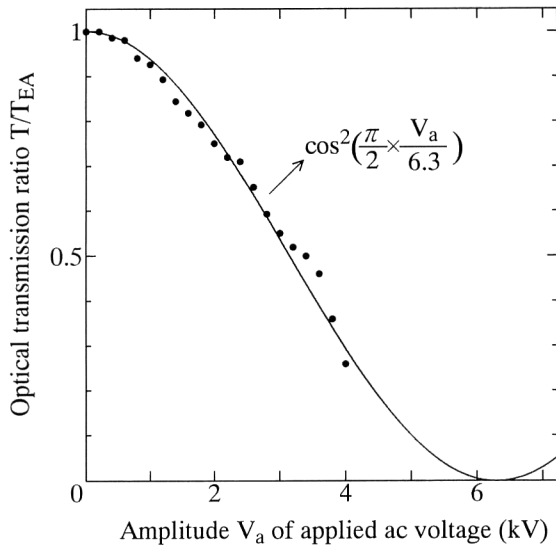


図6 図5に示した透過率の比 T/T_{EA} (電気光学効果による透過率 T_{EOO} の変化).

作の BSO-PROM 素子でも用いられており高変調モードと呼ばれている¹⁵⁾.

4. 素子の特性 (実験結果)

4.1 基礎特性

素子への印加電圧 V_a (交流電圧の振幅) を変化させたときの読み出し光の透過率 T , T_{EA} の変化を図5に示す. この測定では, 書き込み, 消去光は照射せず, 読み出し光の強度は十分に弱い値 (パルスピーク強度 $I_r = 0.24 \text{ mW/cm}^2$) とした. ここで, 電界吸収効果における吸収係数の

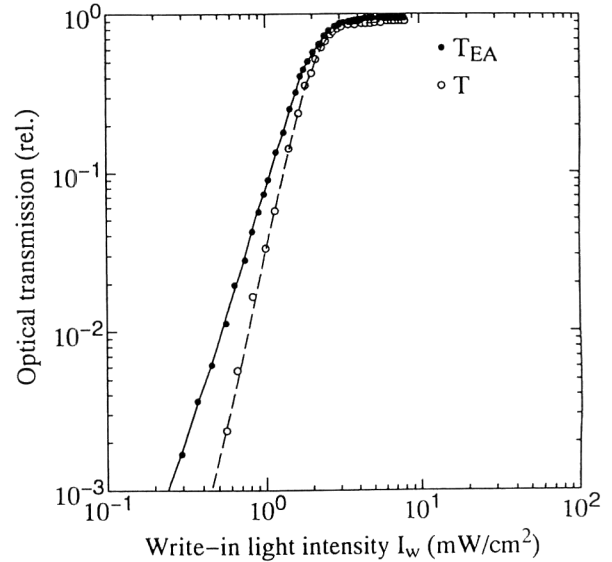


図7 素子の感度特性. T_{EA} : 電界吸収効果のみ利用したときの透過率, T : 電界吸収効果に電気光学効果を重ね合わせたときの透過率.

変化 $\Delta\alpha(E)$ は, 印加電界 E により,

$$\Delta\alpha(\lambda, E) = \alpha_1(\lambda)|E| + \alpha_2(\lambda)E^2 \quad (4)$$

と表される¹⁸⁾. 図5中の実線は式(4)によるフィッティングカーブを示しており, データとよく一致している. なお, 印加電界強度 E は図1(b)に示す等価回路より求めた. また, フィッティングカーブに用いた $\alpha_1 = -1.3 \times 10^{-4} \text{ V}^{-1}$, $\alpha_2 = 2 \times 10^{-8} \text{ cm/V}$ であり, 印加電圧が高いときは2次の効果が支配的となる.

図5より, 電界吸収効果に電気光学効果を重ね合わせた場合のほうがより読み出し光強度が弱くなっていることがわかる. そして, 式(2), (3)より T と T_{EA} の比をとると,

$$\begin{aligned} T_{EOO} &= T/T_{EA} \\ &= \cos^2\left[\frac{\pi}{2} \frac{V_a}{V_\pi}\right] \end{aligned} \quad (5)$$

となり, オープンニコル状態での電気光学効果 T_{EOO} を求めることができる. 図6に図5より求めた T_{EOO} を示す. 図6中の実線は式(5)によるフィッティングカーブを示しており, データとよく一致している. なお, 素子の半波長電圧は 6.3 kV とした.

4.2 感度特性 (コントラスト比)

感度特性は消去光パルスを照射した状態 (強度 $I_e = 5 \text{ mW/cm}^2$) で, 書き込み光パルスの強度を変化させることにより求めた. 読み出し光パルスの強度 I_r は, CCDカメラにより読み出し像が得られるように前節の実験よりも強い $I_r = 1.7 \text{ mW/cm}^2$ とした. ここで, 第3章で述べた消去光の効果により, 書き込み光を照射していない状態

(暗状態)での透過率 T_{EA} , T は, 図5に示した値よりも小さな値となる(大きな消光比). 印加電圧を4 kVとしたときの透過率 T_{EA} , T はともに, 光検出器の限界を超えた値(2800:1以上)となった.

図7に感度特性の測定結果を示す. 読み出し光パルスの強度は暗状態(光検出器の感度以下の値)から, 書き込み光強度が強くなるにしたがって強くなっていき, 最終的に透過率が1の付近で飽和する. 素子のコントラスト比はこの飽和状態と暗状態での強度比によって与えられる. また, γ 値は図7中の直線部分の傾きによって与えられる. 本実験より, 電界吸収効果のみを用いた場合でも2000:1以上という高いコントラスト比と2.86という大きな γ 値を得た. これに電気光学効果を重ね合わせると, さらに高いコントラスト比と, 3.83という大きな γ 値が得られた.

4.3 フレームレート

フレームレートは書き込み光パルスを1フレームおきに照射する($I_w=5\text{ mW/cm}^2$) ことにより確認した. その様子を図8に示す. 図中の下段が読み出し光パルスの強度を示しており, (a)は電圧を印加していない状態, (b)は交流電圧を印加した状態, (c)は(b)の状態に1フレームおきの書き込み光パルスを照射したときの様子をそれぞれ示している. 図8(a), (b)より, 交流電圧を印加すると, 読み出し光パルスがほとんど透過しなくなっている様子がよくわかる. そして, 図8(c)より, 書き込み光が照射されたフレームでの読み出し光強度は, ほぼ図8(a)に示す状態と等しくなっているのに対して, 書き込み光が照射されていないフレームでの読み出し光強度は図8(b)と同じくほとんどゼロとなっている. これにより, 500 Hzのフレームレートが達成されていることがわかる. この500 Hzという値は, 交流高圧電源の性能によって制限された値であり, 素子の限界を示すものではない. 図8よりキロヘルツオーダーでの動作は十分に可能であると思われる.

4.4 空間分解能

解像力テストチャートを書き込み像として用いて測定した限界解像度は約17 lp/mmであった. この値は液晶ライトバルブやBSO-PROM素子に比べると低い値である.

5. 今後の展望

前章で述べた素子の性能より, 本素子には空間分解能が低いという欠点がある. この空間分解能は, GaAs単結晶の暗抵抗を上げること, GaAs単結晶板の厚さを薄くすることにより大幅に改善できると思われる. GaAs単結晶板の厚さを薄くすると, 印加電界に対して1次の効果である

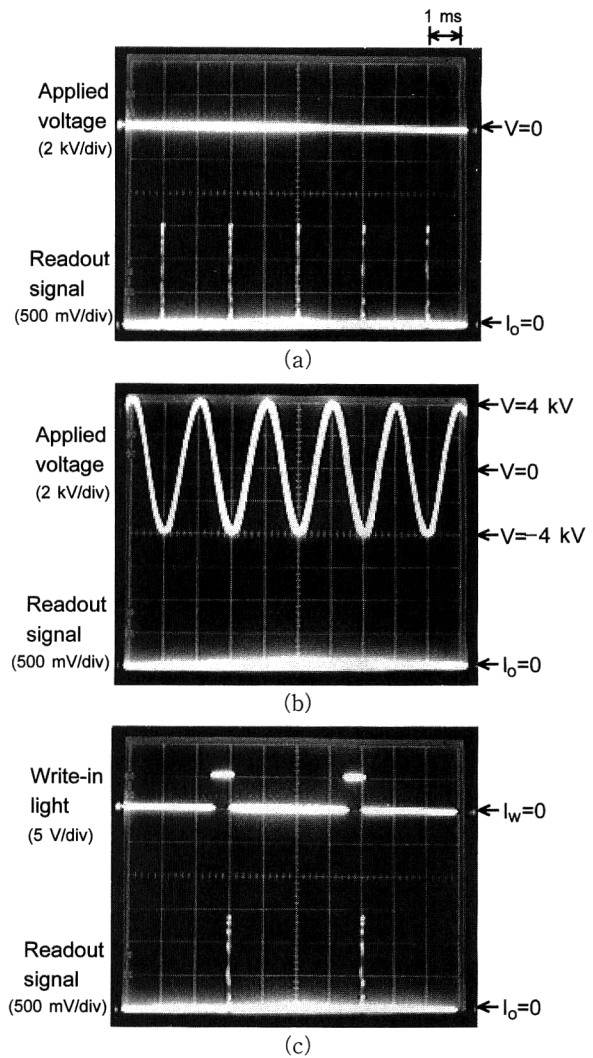
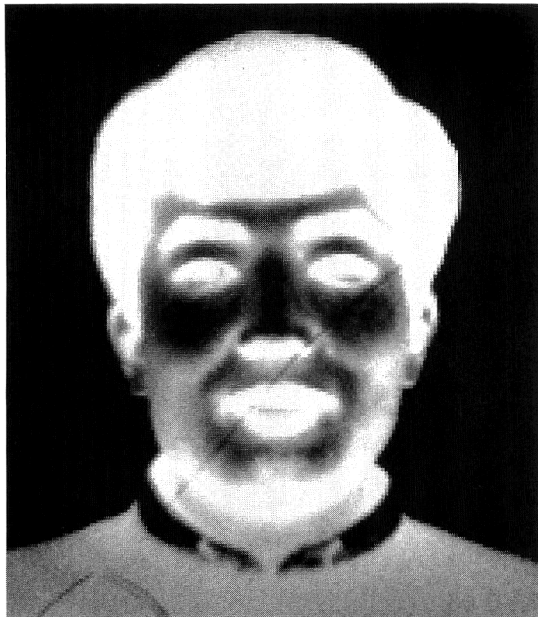


図8 読み出し光パルスの様子. 図中の下段が読み出し光パルスの変化を示し, (a), (b)の上段は印加電圧, (c)の上段は書き込み光パルスを示している. (a)電圧を印加していないとき. (b)交流電圧を印加したとき. (c) (b)の状態に1周期おきの書き込み光パルスを照射したとき.

電気光学効果(ポッケルス効果)は弱くなるが, 2次の効果が支配的である電界吸収効果は違った応答を示す. 吸収係数の変化が印加電界に対して2次式で近似できるとすると, コントラスト比を最大にする結晶厚が存在する¹⁹⁾. 今回試作した素子の条件でその値を計算すると, 結晶厚100 μm 付近でコントラスト比が最大となる. 実際に厚さ150 μm の素子を試作してみたところ, 空間分解能と同時にコントラスト比も向上し, 5.6という非常に大きな γ 値を得た¹⁹⁾. 図9にその素子を用いて得た読み出し像を示す. 図より, 非常にハイコントラストな画像に変換されている様子がわかる. 前述の理論¹⁹⁾では, 結晶厚を100 μm 程度よりもさらに薄くしていくとコントラスト比は低下していくが, 結晶厚が薄くなることで, よりバンドギャップに近い



(a)



(b)

図9 (a) 書き込み画像, (b) 読み出し画像.

波長の光を読み出し光として用いることができる。これにより、コントラスト比の低下を緩和できると思われる。さらにコントラスト比を上げる方法としては、素子を反射型にすることも有効である。特に、電界吸収効果においては、式(2)より、2乗の形で効果が現れるので、大幅にコントラスト比、 γ 値を向上できる。

以上より、今回得た素子の性能よりもさらに高いコントラスト比、大きな γ 値、高い空間分解能、高いフレームレートを併せもつ空間光変調素子の実現は十分に可能であると考えられる。難点としては、50 lp/mmを超えるような空間分解能は期待できないこと、また、素子の発熱も安

定使用のためには問題点としてあげられる。しかしながら、本素子の大きな γ 値特性により、単にコントラスト比の高い画像変換素子としてだけでなく、閾値処理や並列論理演算などの非線形処理への応用も期待できる¹⁴⁾。また、光源として、半導体レーザーやLEDを用いることができるので、システムをコンパクトにすることも可能である。さらに、素子の構造が単純であること、GaAsというすでに量産技術が確立された材料を用いていることから大口径の素子も容易に作製することができる。製作コストの点でも非常にすぐれた空間光変調素子である。

最後に、本研究を行うにあたり直接ご指導をいただきました神戸大学工学部峯本工教授、および素子製作にご協力いただいた日本ガイシ株式会社の大杉幸久氏に深く感謝いたします。

文 献

- 1) 辻内順平, 一岡芳樹, 峯本 工: 光情報処理 (オーム社, 1989).
- 2) B. Javidi, Q. Tang, D. A. Gregory and T. D. Hudson: "Experiments on nonlinear joint transform correlator using an optically addressed spatial light modulator in the Fourier plane," *Appl. Opt.*, **30** (1991) 1772-1776.
- 3) H. Yamazaki, T. Matsunaga, S. Fukushima and T. Kurokawa: "4×1024 holographic switching with an optically addressed spatial light modulator," *Appl. Opt.*, **36** (1997) 3063-3069.
- 4) 窪田恵一, 西田信夫: "光空間変調素子", *光学*, **14** (1985) 19-28.
- 5) 山本修平: "強誘電性液晶空間光変調素子の構造と特徴", *光技術コンタクト*, **33** (1995) 492-498.
- 6) K. Sayyah, A. Au, U. Efron and T. Yamazaki: "High-resolution liquid-crystal-based spatial light modulator with a thin crystalline silicon photosubstrate structure," *Appl. Opt.*, **35** (1996) 5761-5764.
- 7) T. Minemoto, Y. Osugi, H. Mizukawa and J. Ishikawa: "Effect of dynamic range input image on performance of binary subtracted joint transform correlator," *Opt. Rev.*, **3** (1996) 505-511.
- 8) J. Tanida, J. Nakagawa, E. Yagyu, M. Fukui and Y. Ichio: "Experimental verification of parallel processing on a hybrid optical parallel array logic system," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 2510-2521.
- 9) T. Minemoto, O. Kim and H. Hiratsuka: "Parallel image processing algorithms based on mathematical morphology using a multiple-imaging system," *Opt. Rev.*, **2** (1995) 352-361.
- 10) 大杉幸久, 本多昭彦, 峯本 工: "コヒーレント光用 Bi₁₂SiO₂₀ 空間光変調素子", *光学*, **25** (1995) 48-54.
- 11) Y. Bitou and T. Minemoto: "Fast response PROM using GaAs single crystal," *Spatial light modulators, Trends in Optics and Photonics Series, Vol. 14* (Optical Society of America, Washington, D. C., 1997) pp. 147-154.

- 12) Y. Bitou and T. Minemoto: "High-speed and high-contrast incoherent-to-coherent converter that uses a GaAs single crystal," *Opt. Eng.*, **38** (1999) 710-716.
- 13) Y. Bitou, H. Ohta and T. Minemoto: "High-speed and high-contrast spatial light modulator that uses electroabsorption in a GaAs single crystal," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 1377-1385.
- 14) Y. Bitou and T. Minemoto: "High contrast spatial light modulator by use of the electroabsorption and the electro-optic effects in a GaAs single crystal," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 4347-4356.
- 15) R. A. Sprague and P. Nisenson: "The PROM—A status report," *Opt. Eng.*, **17** (1978) 256-266.
- 16) M. Fukuzawa and M. Yamada: "Birefringence induced by residual strain in optically isotropic III-V compound crystals," *Proc. SPIE*, **2873** (1996) 250-253.
- 17) B. O. Seraphin and N. Bottka: "Franz-Keldysh effect of the refractive index in semiconductors," *Phys. Rev.*, **139** (1965) 560-565.
- 18) A. Partovi and E. M. Garmire: "Band-edge photorefractivity in semiconductors: theory and experiments," *J. Appl. Phys.*, **69** (1991) 6885-6898.
- 19) Y. Bitou and T. Minemoto: "Dependence of the contrast ratio on crystal thickness in an electroabsorptive spatial light modulator," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 8227-8232.

(1999年3月26日受理)