

コヒーレント光用 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 空間光変調素子

大杉 幸久*・本多 昭彦*・峯本 工**

*日本ガイシ(株)研究開発本部 〒467 名古屋市瑞穂区須田町 2-56

**神戸大学工学部情報知能工学科 〒657 神戸市灘区六甲台町 1-1

A $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ Spatial Light Modulator for Coherent Light

Yukihisa OSUGI,* Akihiko HONDA* and Takumi MINEMOTO**

*Corporate Research and Development Group, NGK Insulators, Ltd., 2-56, Suda-cho, Mizuho-ku, Nagoya 467

**Graduate School of Science and Technology, Kobe University, 1-1, Rokkodai, Nada-ku, Kobe 657

An improved $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) spatial light modulator for coherent light was developed. Some improvements were achieved and confirmed experimentally. The wave front aberration was removed by new manufacturing process. The interference fringe pattern was removed by anti-reflection film and wedge-shaping of the BSO layer and glass substrata. The memory time was increased by choice of a material of the insulating layers. An erasing light source was installed in the device to realize compact optical system and quick erasing. The capacity for coherent light of this device was confirmed by half-tone pattern recognition using a joint transform correlator. The good recognition results suggest that the advantages of this device, such as good grey level reconstruction property and high contrast, are effective for coherent optical image processing.

1. はじめに

現在研究がすすめられている光情報処理技術^{1,2)}のなかで、光相関演算 (joint transform correlator, 以下 JTC)³⁻⁶⁾を始めとする光の干渉性を利用したコヒーレント光—光情報処理は、画像認識などの画像処理のための有効な手法として実用化が期待されている。こうした処理を行う光学系を構成する光学部品は、当然ながらコヒーレント光の使用が可能な設計でなければいけない。この光学系のキーデバイスである空間光変調素子 (spatial light modulator, 以下 SLM) についても数多くの素子が提案されているが⁷⁾、多くは開発途上にあり、コヒーレント光に問題なく適用できる完成度の高い素子の開発は不可欠である。

$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 単結晶 (以下 BSO) を使用した BSO 空間光変調素子 (以下 BSO-SLM)⁸⁾はコントラスト比が高く、滑らかな感度特性をもつ階調画像の処理に適した SLM

として知られている。本研究では、こうした特徴をいかし、さらに素子の適用範囲を広げるため、コヒーレント光の使用可能な耐久性にすぐれた BSO-SLM を開発した。以下に素子設計と特性評価結果を述べる。さらに本素子のコヒーレント光—光情報処理への適用の可能性を示すため、JTC による画像認識への適用結果について述べる。

2. 素子設計

Fig. 1 に今回試作した BSO-SLM の構造を示す。パッケージ内に素子本体、偏光子と消去灯が配置され、素子本体の保護および使用者に対する高電圧への保護が配慮されている。素子は (1 0 0) 軸に垂直に切り出された BSO 単結晶層の両面に透明な絶縁層と電極層が積層され、基板ではさまれている。以下に設計の詳細を述べる。

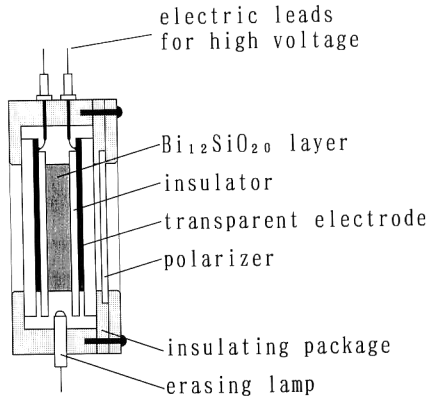


Fig. 1. Structure of the proposed BSO-SLM device.

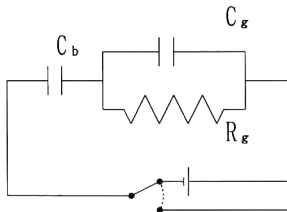
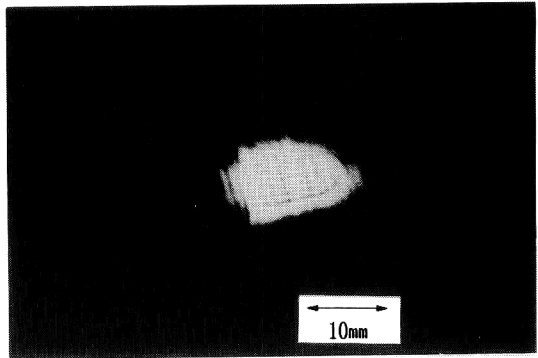


Fig. 2. Equivalent circuit of BSO-SLM. C_b , capacitance of the BSO layer; C_g , capacitance of the glass insulators; R_g , resistance of the glass insulators.

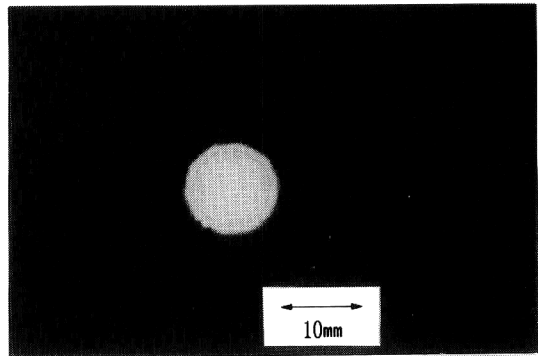
2.1 絶縁層材料

BSO-SLMの画像記録は、書込み光の照射によってBSO層内で発生した光電子が電極層間に印加された数kVの直流電圧によって結晶内をドリフトし、絶縁層に遮られ結晶表面に蓄えられることで行われる。したがって実用を目指す素子の絶縁層には、光学部品材料としての透明性、均一性、等方性のほかに、高い抵抗率、耐電圧特性と耐久性が要求される。従来、有機物の蒸着膜であるパリレンや雲母板が用いられてきたが^{8,9)}、それぞれ耐電圧が低い、複屈折をもつなどの欠点があった。筆者らはこれらに代わる絶縁層材料としてガラスを提案した¹⁰⁾。ガラスは先にあげた特性をほぼ満たし有望と考えられる。本研究ではさらに詳細な材料選定を行い、特性改良を行った。

絶縁材料の電気抵抗が十分でないと記録された画像のコントラストが低下し、減衰も速くなる。画像の減衰はFig. 2に示した等価回路で解析することができる。 C_b 、 C_g はそれぞれBSO層と絶縁層の静電容量、 R_g は絶縁層の抵抗値を示す。画像の減衰は C_b に蓄積された電荷が R_g を通してリークし、BSO層に印加される電圧値が



(a)



(b)

Fig. 3. Far field diffraction pattern of laser beam transmitting from (a) previous process sample and (b) proposed process sample.

変動することで発生すると考えられる。BSO層に印加される電圧変動の時定数 τ は、

$$\begin{aligned} \tau &= (C_b + C_g)2R_g \\ &= (C_b + C_g)2\rho d/S \end{aligned} \quad (1)$$

と書ける。 ρ は絶縁材料の抵抗率、 S は素子面積、 d は絶縁層の厚さを示す。 $S=30 \times 30 \text{ mm}^2$ 、 $d=10 \text{ }\mu\text{m}$ 、BSO層厚さを $300 \text{ }\mu\text{m}$ とすると、 C_b 、 C_g は共に 10^{-9} F 程度となる。 $\tau > 10^3 \text{ s}$ を実現するためには $\rho > 10^{16} \text{ }\Omega \cdot \text{cm}$ がのぞまれる。この条件をみたく絶縁層のガラス材料として $\rho=1.1 \times 10^{17} \text{ }\Omega \cdot \text{cm}$ の合成石英ガラスを用いることとした。

2.2 波面収差除去

SLMが波面収差をもつと、JTCにおいて相関信号ピークが歪み適度な演算結果が得られない等、コヒーレント光—光情報処理に用いる場合に問題が生じる。一例として、厚さ3mmの基板ガラス上に両面を平行に光学研磨した30mm角、厚さ $300 \text{ }\mu\text{m}$ のBSOウェハを接着

した試料を透過する円形のレーザー光のフレネル回折像を Fig. 3(a) に示す。レーザー光が波面収差を受け歪んでいることがわかる。透明絶縁層と BSO 層を貼り合わせて素子を作製する方法では、このような収差が発生することになる。以下にこの収差の原因を考察する。

この試料では基板ガラスと BSO ウェハの平面度は試料全面で $\lambda/4$ 以下であったことから、光路長のばらつきはわずかである。さらに、粒径 $0.2 \mu\text{m}$ 以下の研磨砥粒で無擾乱研磨したものであることから、研磨中に試料に与えられる物理作用によって生じる加工変質層もほとんどないと考えられる。したがって BSO 結晶単体が波面収差の原因になる可能性は少ないと考えられる。ところが BSO は圧電体であり、外部から加えられた応力によって光学特性が変化する。本試料で発生した収差の原因も、接着剤の硬化収縮が BSO 結晶板に応力を加え、光学的な不均一を発生させたと推察される。対策として、BSO 結晶厚を硬化収縮による応力に耐える厚さとすることが考えられる。

筆者らはこれまでに大型で均質な BSO-SLM を作製する方法として、電極層を形成した基板ガラス上に絶縁層材料を接着し、取り外すことなく、そのまま研磨して所定厚の絶縁層を形成し、さらに、この上に数 mm 厚の片面を光学研磨した BSO 結晶板を接着、研磨し BSO 層を形成するという工程を提案し、高解像度型の BSO-SLM を試作した¹¹⁾。この加工工程は、素子完成時の BSO 層厚にかかわらず、接着時の BSO 厚を任意に選ぶことができるので、波面収差の除去に対しても有効であることが予想される。片面を光学研磨した厚さの異なる BSO 結晶を基板ガラスに接着後厚さ $300 \mu\text{m}$ に研磨し波面収差を調べた。その結果、接着時の結晶厚を 2 mm 以上にすると透過光の波面収差を除去できることがわかった。このようにして作製した BSO 層からの、波面収差による歪みを受けない透過回折像の例を Fig. 3(b) に示す。本加工工程によって、波面収差の少ない素子の作製が可能になると考えられる。

素子作製にあたって主要な工程は研磨工程である。SiO₂ のアルカリ懸濁液を研磨液とし、平面研磨機によって研磨を行った。BSO は代表的な酸化物単結晶の一つである LiNbO₃ に比べ硬い (モース硬度: BSO = 6.0, LiNbO₃ = 5.0) が、研磨速度は $10 \mu\text{m}/\text{h}$ と LiNbO₃ に比べ 1 桁大きかった。このことから BSO の研磨過程は、物理的な砥粒のひっかけ作用による機械的除去が主であると考えられるより、化学的反応作用が複合したメカニカルケミカルポリッシングが大きな役割をしていると推

察される。また BSO は熱伝導率が小さい ($3 \times 10^{-4} \text{cal}/\text{cm}^2\text{Cs}$) ために、温度勾配による歪みが発生しやすい。したがって、研磨工程において研磨液、洗浄液の温度管理を行うことや、研磨定盤への試料固定の樹脂に低融点ワックスを用いる等のサーマルショックを避ける配慮を行った。

2.3 干渉縞の除去

Fig. 1 に示すとおり BSO-SLM は複数の層状部品から構成されており、各部品の境界面で素子内の多重反射を起こし、再生像に干渉縞ノイズを重畳させてしまう。本素子では BSO 層と基板ガラスは両面をテーパ状に斜め研磨し、両面間で発生する干渉縞間隔を素子解像度より細かくして再生像への影響を除去した。干渉縞間隔を 30 lp/mm 以上とするため、BSO 層と基板ガラスのテーパ角をそれぞれ 15', 25' とした。

電極層も干渉縞発生の原因となる。電極層は酸化インジウムリン膜を用いているが、この屈折率は 1.9 であり、ここでの反射も無視できない。本素子では、透明電極上に誘電体多層膜の反射防止膜を積層し、波長 488 nm から 633 nm の範囲で反射率 0.5% 以下におさえるようにした。

こうした設計により、ほぼ完全に干渉縞の除去が可能になると考えられる。

2.4 消去用光源の設置

記録された画像の消去には、素子内の電荷分布を打ち消すために、素子全面へ $1 \text{mJ}/\text{cm}^2$ 程度の光照射が必要である。これまでは、光学系中に消去光源を設置し、素子正面から光照射を行っていた。この方法では、光学系が複雑になるうえ、素子に吸収される消去光は照射された光の 10% 程度しかなく、効率的な消去が行えない。

本素子では Fig. 1 に示すとおり素子側面に $\phi 6.2 \text{mm} \times 27 \text{mm}$ の小型ハロゲンランプを設置し光学系の簡素化を図ることにした。素子側面から入射した光は素子内を全反射を繰り返して進む。したがって BSO 層内の光路長が長くなるので吸収率が増加し、消去効率の向上が期待できる。また素子からの消去光の漏洩光がわずかなので、写真乾板等の感光材料を扱う装置でも、特段の遮光処置が不要となる利点も期待できる。

2.5 パッケージ設計

パッケージ材料は、放電事故による素子の破壊および使用者の感電事故をさけるため樹脂製として、素子、消去灯と偏光子を格納している。素子の固定には弾性シリコンゴムを用い、素子への応力印加を避け、波面収差の発生、コントラストの低下を避けている。

Table 1. Properties of the proposed BSO-SLM.

BSO layer	300 μm thick, tapered angle 15'
Insulator	quartz glass, 10 μm thick
Substrate	quartz glass, tapered angle 25'
Effective area size	28 \times 28 mm^2
Package size	75 \times 16 \times 60 mm^3
Half wave voltage	13 kV
Applied voltage	\leq 5 kV
Resolution	20 lp/mm (MTF 1/e exposure, 15 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$)
Contrast ratio	$\geq 10^3$
Sensitivity	20 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ($\lambda=488 \text{ nm}$)
Wave aberration	$\leq \lambda$
Capacitance	300 pF

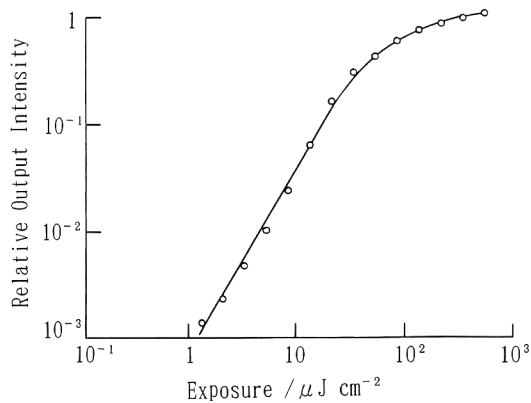


Fig. 4. Characteristic curve of transmission versus exposed light intensity (wavelength 488 nm).

3. 実験結果

3.1 素子特性測定

以上に述べた設計に基づいて作製した BSO-SLM の仕様を Table 1 に示す。

Fig. 4 に素子の露光量に対する再生光強度変化を表した感度特性を示す。再生光強度の最小値は素子の消光比で定まる。BSO 結晶の品質と接着応力を排除する作製工程によって、素子消光比は $10^4:1$ 以上が得られた。また再生光強度の最大値は絶縁層の耐電圧で制限される外部印加電圧値によって決まる。本素子では実用印加電圧 5 kV であった。これによってコントラスト 1000:1 以上が得られている。また感度曲線の傾きは $\gamma=1.7$ 程度で、滑らかな傾きから中間階調の再現性のよさがわかる。

Fig. 5 に MTF 特性を示す。書込み光波長 488 nm で露光量 15 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 、MTF 1/e で解像度 20 lp/mm であった。露光量の増加によって MTF が劣化してしまうことがわかる。したがって素子使用にあたっては、必要と

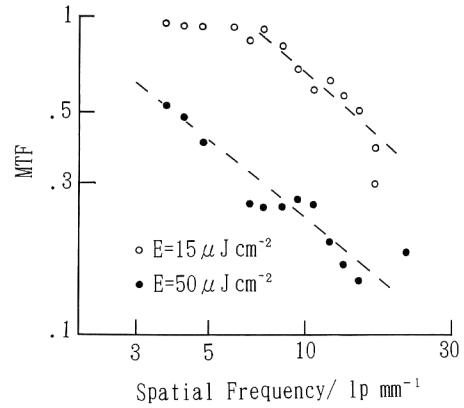
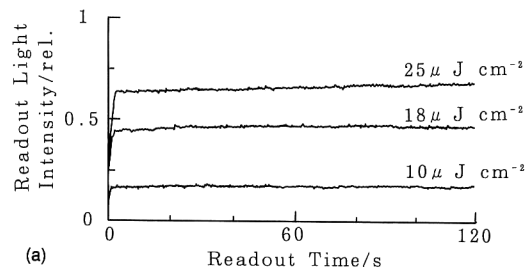
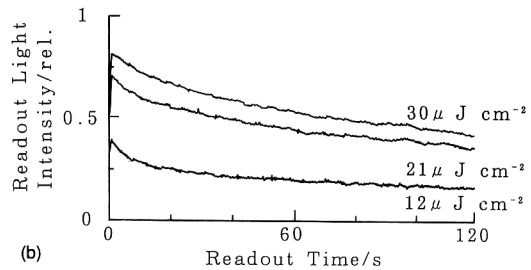


Fig. 5. Experimental MTF curves under some exposure intensities (wavelength 488 nm).



(a)



(b)

Fig. 6. Time variation of transmission of the BSO-SLMs during the readout stage using (a) the proposed material for insulation layer (quartz glass: $1.1 \times 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$) and (b) low electric resistance material (BK-7: $1.5 \times 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$).

する再生像の明るさと解像度から最適な素子駆動条件を選ぶ必要がある。

素子の画像記録特性を明らかにするために再生光強度の時間変化を Fig. 6(a) に示す。各階調で再生光強度は安定しており、良好な画像記録が行われていることがわかる。比較のために $\rho=1.5 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ の BK-7 ガラスを絶縁層に使用した素子の記録特性を Fig. 6(b) に示す。時間とともに再生光強度が減少していることから記録画像の減衰がおきていることがわかる。このことより先に

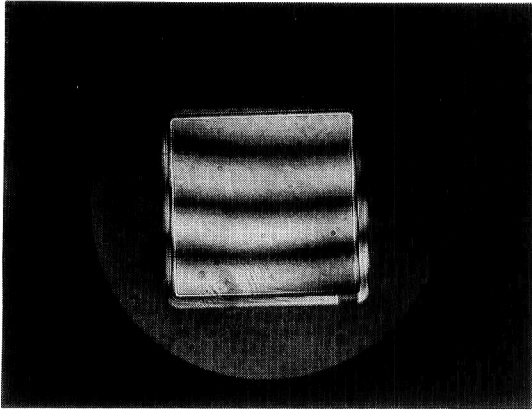
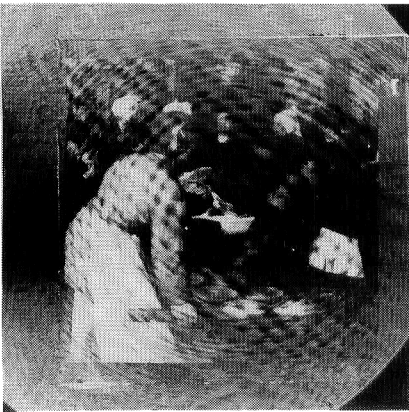


Fig. 7. Pattern showing wave front aberration in proposed BSO-SLM.



(a)



(b)

Fig. 8. Coherent readout image from (a) the proposed BSO-SLM and (b) previous BSO-SLM without measures for interference fringe patterns.

述べた絶縁層材質の選定が適切であったことがわかる。

素子内の波面収差をマッハ・ツェンダー干渉計によって測定した。測定結果の例を Fig. 7 に示す。素子全面

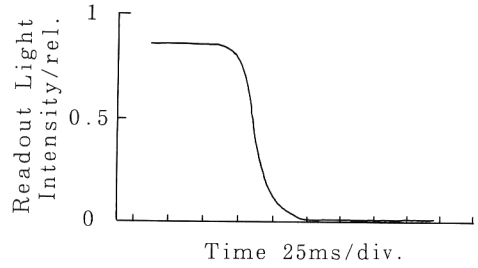


Fig. 9. Decay curve of recorded image in the erasing stage.

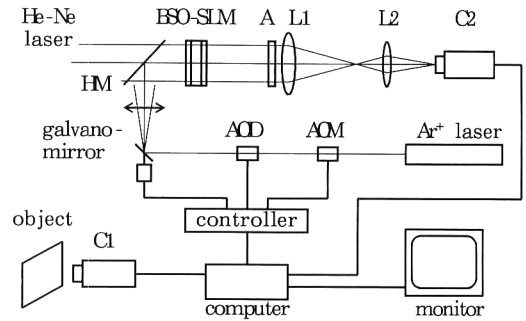


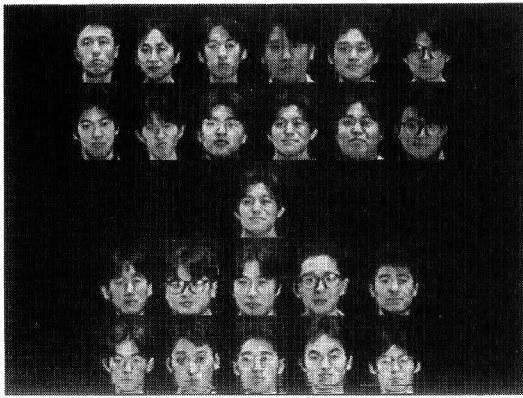
Fig. 10. Schematic diagram for joint transform correlation. A, analyzer; HM, half mirror; AOD, A-O deflector; AOM, A-O modulator.

での収差量はおおむね λ 以下であった。先に述べた接着応力に対する対策の効果がわかる。波長 633 nm の He-Ne レーザー光による素子再生像の例を Fig. 8(a) に示す。比較のために、先に述べた干渉縞対策を行わなかった素子の再生像の例を Fig. 8(b) に示す。干渉縞の除去がなされていることが明瞭にわかる。以上の波面収差と干渉縞に関する結果から、本素子がコヒーレント光でも良好に使用できることがわかった。

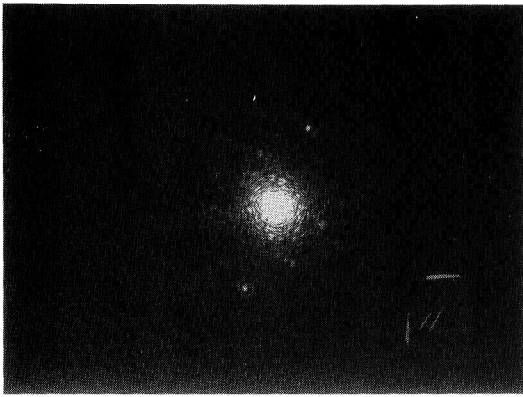
最後に本素子の画像消去過程を示す。素子に一樣な明るさの像を記録し、読出し光強度を観測しながら消去用光源を点灯して測定したときの読出し光強度の変化を Fig. 9 に示す。27 ms で画像消去が完了している。消去時間のほかに、外部印加電圧のスイッチング時間も素子駆動時間を制限する。BSO-SLM は容量性の負荷であるが、インピーダンス整合をとった高電圧回路設計により、立ち上がり、立ち下がりそれぞれ 30 ms, 20 ms の動作が可能になった。このことにより 10 フレーム/秒程度の繰返し駆動が可能になった。

3.2 JTC による画像認識への応用

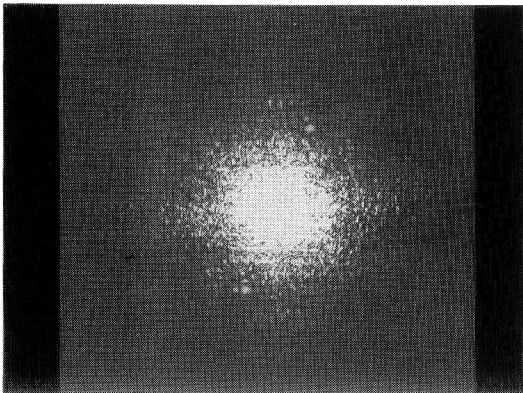
本素子のコヒーレント光—光情報処理における有効性



(a)



(b)



(c)

Fig. 11. Results of pattern recognition. (a) halftone image used for input image. Experimental output signals showing correlation signals between the center image and other images (b) using the proposed BSO-SLM and (c) using previous BSO-SLM.

を示すために、JTCによるパターン認識の実験を行った。Fig. 10に実験システムを示す。入力画像はレーザースキャナーでBSO-SLMに書き込まれ、コヒーレント光画像に変換された後、光フーリエ変換される。演算アルゴリズムは、ノイズが少なく鋭い相関信号が得られる特徴をもつBSJTCを用いた^{5,6)}。実験に用いた入力画像をFig. 11(a)に、演算結果を(b)に示す。比較のために、波面収差の除去等を行っていない従来素子を用いた演算結果を(c)に示す。両素子の結果を比較すると、従来素子では中央部の0次光の散乱光が広く広がり、相関信号も1点に集光していないのに対して、本素子ではノイズが少なく、鋭い相関ピークが得られている。このことから本素子のコヒーレント光—光情報処理に対する有効性が理解できる。また、本入力画像のような階調画像でBSJTCを実現するには、参照画像データに対するフーリエ変換を前もって光学系で行っておいたデータを使用して結合スペクトルから引き算を実行する過程を経るので、SLMの動作の再現性がよいことが強く要求される。上記のような良好な認識が行えていることから、本素子の良好な階調特性が有効に機能し、再現性よく動作していると考えられる。

4. おわりに

コヒーレント光の使用が可能な、波面収差除去、干渉縞除去、画像保持時間延長等の改良を施したBSO-SLMを開発し、その特性を確認した。また、本素子のコヒーレント光—光情報処理用途での有効性を示すため光相関演算に適用し、階調をもつ複数の画像を用いた例についても良好な演算結果を得た。

今後、素子単体に留まらず、小型、高解像度の画像書き込み用レーザースキャナー等、本素子の性能を十分に発揮し得る周辺機器の開発が望まれる。こうした開発によって、さらに高度な光情報処理用途への本素子の適用が期待される。

最後に本研究を行うにあたり、東京工業大学名誉教授辻内順平先生、千葉大学助教授岡田勝行先生、名古屋造形芸術大学教授であられた故鈴木正根先生に有効な議論をいただきました。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: "Industrial applications of optical signal processing I & II," *Opt. Eng.*, **27** (1988) 257; **27** (1988) 353.
- 3) C. S. Weaver and J. W. Goodman: "Technique for opti-

- cally convolving two functions," *Appl. Opt.*, **51** (1966) 1248-1249.
- 4) C. Ward, H. J. Caulfield, F. T. S. Yu and J. E. Ludman : "Real-time joint spectral-spatial matched filtering," *Opt. Commun.*, **15** (1984) 241-244.
 - 5) Q. Zhan and T. Minemoto : "Successful pattern matching with a large number of reference patterns using a joint Fourier-transform correlator," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32** (1993) 3471-3476.
 - 6) Y. Osugi, Q. Zhan and T. Minemoto : "Hybird binary subtracted joint transform correlator for a large number of reference patterns using a $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) spatial light modulator and a laser scanner," *Opt. Rev.*, **1** (1994) 159-162.
 - 7) 窪田恵一, 西田信夫 : "空間光変調素子", *光学*, **14** (1984) 19-28.
 - 8) 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.
 - 9) 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.
 - 10) 景 虹, 陳 靖, 峯本 工 : "ガラス板を絶縁体に使った PROM 素子", *光学*, **18** (1989) 627-631.
 - 11) Y. Osugi, A. Honda, A. Hamajima, S. Toyoda, Y. Kozuka and T. Minemoto : "A method for making high-resokution pockels readout optical modulator (PROM)," *光学*, **21** (1992) 237-240.