

空間光変調器研究の昨日・今日・明日

原 勉

Research Activity on Spatial Light Modulator: Past, Present and Future

Tsutomu HARA

Optical information processing was considered as a promising method because of its capability for high speed signal transmission, parallelism of transmission and processing, a wide frequency bandwidth, and so forth. Such research started in the mid 70's and was reaching the peak in the 80's and 90's. The spatial parallelism is the most useful feature, so various kinds of architectures based on parallel processing have been proposed. In these architectures, the parallelism plays a key role for signal input, processing, memory, output, and transmission. To implement such architectures, the spatial light modulator (SLM) is a key device to perform as a transducer, a processor, and a memory device, or any combination of these functions. Therefore various types of spatial light modulators have been proposed and developed. In this article, I will mainly describe an overview and a history of our research activities on SLMs, and the prospects for SLMs will also be given.

Key words: spatial light modulator (SLM), optical information processing, optical computing, parallel processing

光学情報処理は、信号伝送の高速性、伝送および処理の空間的並列性、周波数帯域の広さ、信号間の干渉の少なさなどの光の特長が利用できる有望な情報処理技術として、1970年代半ばに始まった研究であり、1980年代から1990年代にかけて最盛期を迎えた。それらの特長の中でも空間的な並列性は最も注目され、その特長を生かすキーコンポーネントとして、空間的な広がりをもつ情報をそのまま空間情報として入力・演算・記憶・出力および伝送可能なデバイスである空間光変調器 (spatial light modulator; SLM) が研究開発されてきた。本稿では、われわれが開発してきたデバイスを中心に概観しつつ、空間光変調器の開発の歴史を振り返るとともに、今後の展望について述べる。

1. 空間光変調器

空間光変調器¹⁻⁴⁾は、図1に示すように、二次元または一次元の読み出し光の位相・偏波面・振幅・強度・伝搬方向の分布を書き込み情報によって変調させるデバイスで、

アドレス部と光変調部から構成される。つまり、書き込み情報により光変調部の光学的特性を変化させ、その変化に応じて読み出し光が変調され、書き込み情報を反映した出力光を得ることができる並列3端子デバイスである。

これらは大きく3つに分類される。二次元あるいは一次元の光信号によって並列情報を光学系で直接アドレス部に書き込むものを光アドレス型といい、アドレス部と光変調部が独立しているI型(図2(1))と光変調部がアドレス部の機能を併せもつII型(図2(2))に分類される。いま1つは、電気信号で書き込みを行う電気アドレス型(図2(3))である。それぞれは読み出し光の入射方向の違いで、反射読み出し型(A)と透過読み出し型(B)に分けられる。

上述の分類は、さらに材料によって細分される。図3および図4は、これまでどのような材料が用いられてきたのかを示している。これらの材料がデバイスに適した形に加工され組み合わせられることで、それぞれ独特な空間光変調器が構成される。

光アドレスI型では、アドレス部として光導電材料・光

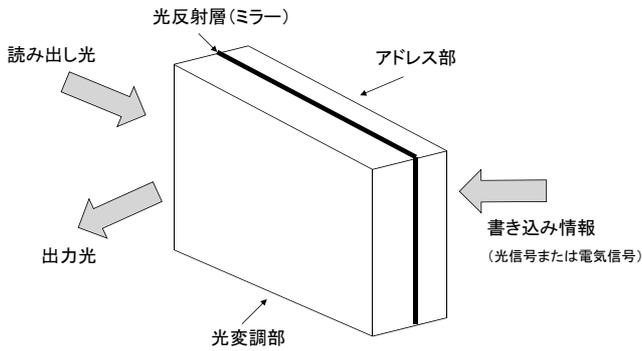


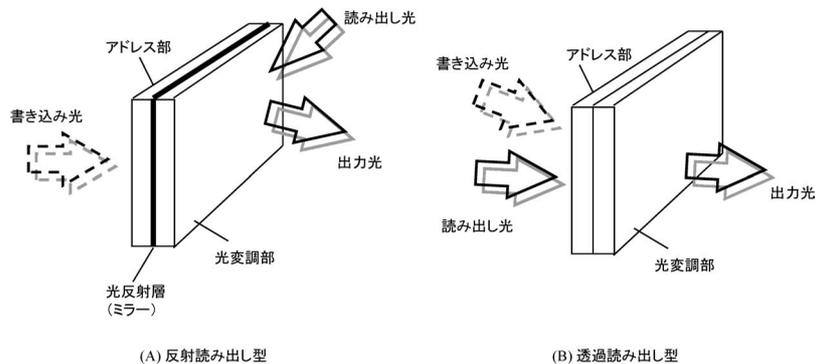
図1 空間光変調器.

起電材料・半導体回路・焦電材料・光電面および熱吸収材料などが用いられ、光変調部には、液晶・電気光学結晶・電界吸収効果材料・形状可変材料が用いられている。

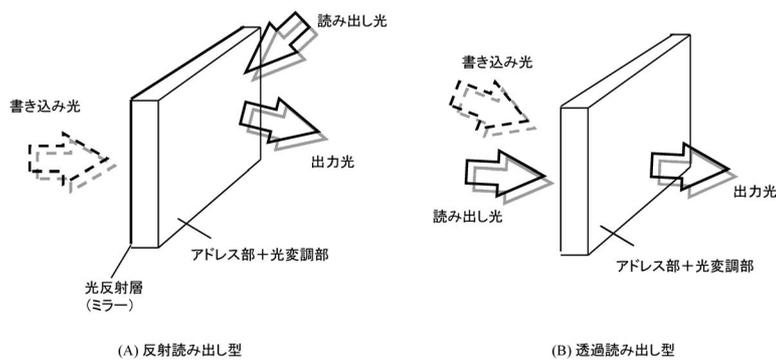
光アドレスⅡ型では、光誘起屈折率結晶・バクテリオロドプシン・フォトクロミックポリマー・金属膜+有機膜・相変化材料・化合物半導体の多重量子井戸 (MQW) 構造が利用されている。

電気アドレス型では、アドレス部には電子銃・電極マトリクス・半導体回路および音響トランスデューサーが用いられ、光変調部には、液晶・電気光学結晶・電界吸収効果

(1) 光アドレスⅠ型空間光変調器



(2) 光アドレスⅡ型空間光変調器



(3) 電気アドレス型空間光変調器

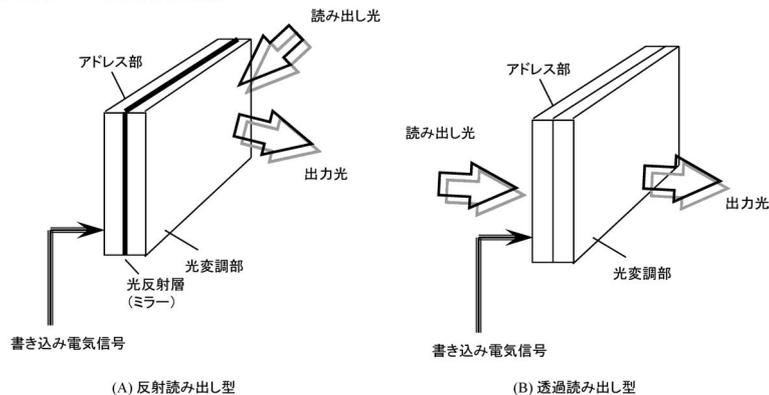


図2 空間光変調器の構造による分類. (1) 光アドレスⅠ型, (2) 光アドレスⅡ型, (3) 電気アドレス型.

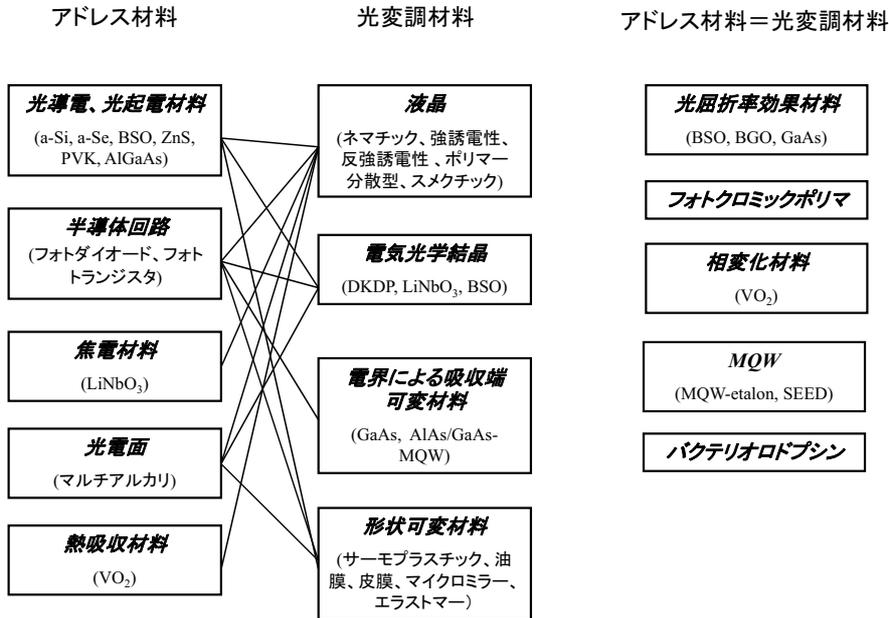


図3 空間光変調器を構成している材料 (光アドレス型).

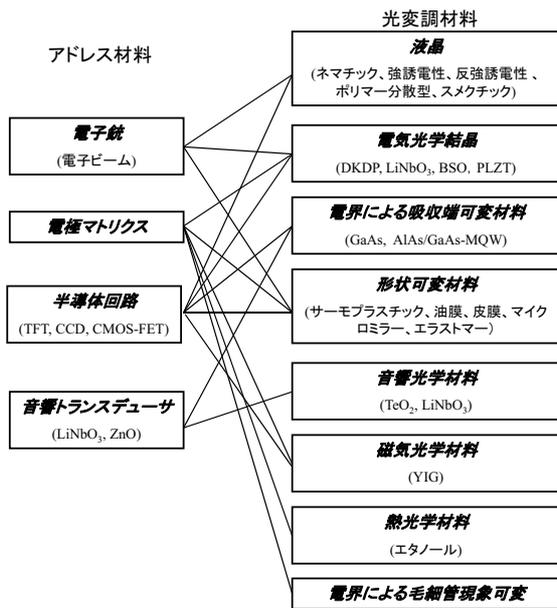


図4 空間光変調器を構成している材料 (電気アドレス型).

材料・形状可変材料・可動マイクロミラー・音響光学材料・磁気光学材料・熱光学材料および毛細管効果材料が用いられている。最近では、CMOS回路と液晶を組み合わせたLCOS-SLM (liquid crystal on silicon spatial light modulator) と、MEMS (micro electro mechanical system) 技術を利用したマイクロミラーアレイ (micro mirror array) デバイスが位相変調素子として注目されている。

また、光アドレス型空間光変調器をCRT (cathode-ray tube) や液晶ディスプレイ (LCD: liquid crystal display) と光学的に結合し、電気アドレス型空間光変調器として利用

できるものも開発された。

さまざまな応用からの要求を満たすため、材料からデバイスの構成に至るまで精力的な研究開発が行われ、数多くの空間光変調器が提案されてきたが、実際に使えるレベルに至ったものは少ない。表1および表2に、これまでに開発された代表的な光アドレス型および電気アドレス型空間光変調器の特性をまとめた。

われわれは長年にわたり空間光変調器の研究開発を進めてきた。1985年には光電面をアドレス部とし、光変調部として電気光学結晶板 (LiNbO₃) から構成される、真空管方式の空間光変調管 (microchannel spatial light modulator; MSLM) を完成させた。世界でも数少ない“使える空間光変調器”だったため、国内外の多くの研究者がMSLMを入手して研究を進め、1980年代後半から1990年代にかけて光学情報処理研究の発展に貢献した。

次に、実用性も考慮して液晶デバイスの研究開発を始めた。まず、アモルファスシリコン (a-Si) をアドレス部として用い、液晶分子を基板に平行に配向したネマチック液晶層を光変調部とした平行配向液晶空間光変調器 (parallel aligned nematic liquid crystal spatial light modulator; PAL-SLM) を開発した。

さらに、PAL-SLMの特長を踏襲し、産業用途を見据えて、アドレス部をCMOS回路、光変調部を液晶とするLCOS型空間光変調器 (LCOS-SLM: liquid crystal on silicon spatial light modulator) も完成させた。

表1 光アドレス型空間光変調器の特性.

デバイス名	アドレス部	光変調部	空間解像度 (lp/mm)	入力感度 ($\mu\text{J}/\text{cm}^2$)	応答時間 (ms)	コントラスト比	備考
LCLV	光導電体 (CdS)	ツイストネマチック液晶	50	2	30	50 : 1	
LCLV	光導電体 (a-Si)	垂直配向ネマチック液晶	50	3	16	600 : 1	
FLC-SLM	光導電体 (a-Si)	強誘電性液晶	100	0.1	0.1	100 : 1	二値メモリー, 二値データ位相変調 ($>2\pi$ ラジアン)
PAL-SLM	光導電体 (a-Si)	平行配向ネマチック液晶	50	0.6	30		
MSLM	光電面 (マルチアルカリ)	電気光学結晶 (LiNbO_3)	20	0.01	100	1000 : 1	アナログメモリー, 演算機能
Photo-Titus	光導電体 (a-Se)	電気光学結晶 (DKDP)	75	10	0.01	70 : 1	アナログメモリー, 演算機能, 要冷却
TP-SLM	光導電体 (PVK)	サーモプラスチック	1,000	10	5,000	100 : 1	アナログメモリー
PROM	BSO	BSO	50	200	10	1000 : 1	アナログメモリー, 演算機能

表2 電気アドレス型空間光変調器の特性.

デバイス名	アドレス部	光変調部	空間解像度 (画素数)	応答時間 (ms)	コントラスト比	備考
LCD	半導体回路 (TFT)	ツイストネマチック液晶	1,024×768	33	350 : 1	
D-ILA	CMOS トランジスタ	垂直配向ネマチック液晶	1,365×1,024	16	1000 : 1	
FLC-SLM	CMOS VLSI	強誘電性液晶	1,280×1,024	0.1	100 : 1	二値データ
EBSLM	電子銃	電気光学結晶 (LiNbO_3)	20 (lp/mm)	100	1000 : 1	アナログメモリー, 演算機能
Titus	電子銃	電気光学結晶 (DKDP)	40 (lp/mm)	33	60 : 1	アナログメモリー, 演算機能, 要冷却
Eidophor	電子銃	油膜	50 (lp/mm)	33	1000 : 1	
TIR	半導体回路	電気光学結晶 (LiNbO_3)	4735	128 MHz	100 : 1	一次元デバイス
DMD	CMOS トランジスタ	マイクロミラー	1,280×1,024	0.015	800 : 1	二値データ
AOD	音響トランジューサー (LiNbO_3)	音響光学材料 (TeO_2)	32×120	0.002		
LIGHT-MOD/MOSLM	電極マトリクス	磁気光学材料 (YIG)	512×512	0.5	100 : 1	二値データ
LCOS-SLM	CMOS 回路	平行配向ネマチック液晶	792×600	30		位相変調 ($>2\pi$ ラジアン)
Micro Mirror Array	CMOS 回路	マイクロミラー	240×200	10		位相変調 (500 nm stroke)

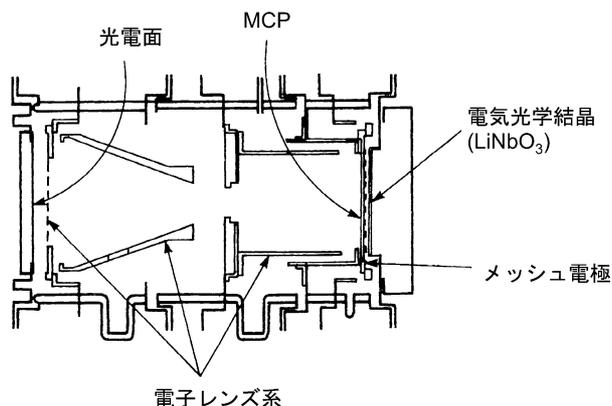


図5 空間光変調管 (MSLM) の構造 (断面図).

2. 空間光変調管 (MSLM)

MSLM はマサチューセッツ工科大学 (MIT) の C. Warde らによって提案されたもので⁵⁾, 光電面, マイクロチャネルプレート (MCP) および電気光学結晶から構成される, 真空管タイプの光アドレス型の空間光変調器である^{6,7)}. 図5にデバイスの構造を示す. 直径50 mm, 長さ80 mm程度の大きさである. 光電面, 光電子を加速・収束するための電子レンズ系, および MCP までの構造は通常のイメージインテンシファイアと同じである. その蛍光面の代わりに電気光学結晶板が固定されている. MCP と結晶の間には, 結晶表面電荷を制御するためのメッシュ状の二次電子捕集電極が設けられている. また, 結晶の電荷蓄積面には, 読み出し光の反射効率を上げるために, 誘電体ミラーがコーティングしてある. 光電面としてはマルチアルカリ

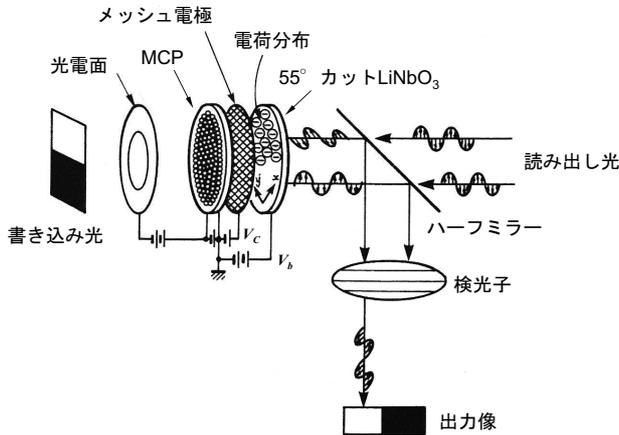


図6 空間光変調管 (MSLM) の動作原理.

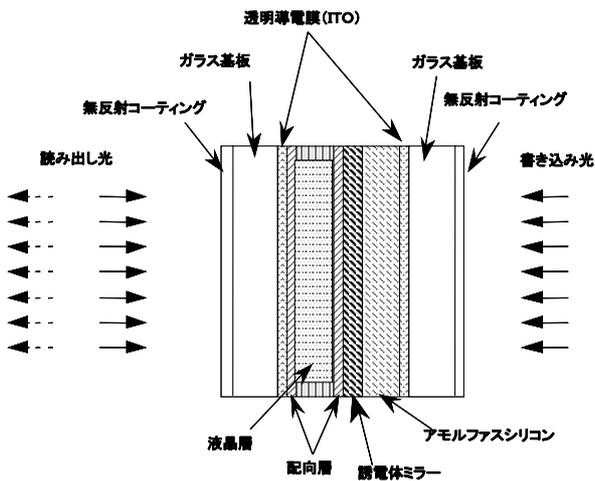


図7 平行配向液晶空間光変調器 (PAL-SLM) の構造 (断面図).

光電面を用い、結晶板は $50 \mu\text{m}$ 厚の LiNbO_3 単結晶を用いた。図6で動作原理を説明する。光電面に入射した書き込み光は光電子像に変換される。その光電子はMCPで数千倍に増倍された後、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応じて結晶を横切る電界が変化し、電気光学効果によって結晶の屈折率(複屈折性)が変化する。ここで直線偏光の読み出し光を結晶に照射すると、結晶を往復した光は書き込み光強度に対応した位相変調を受けることになる。MSLMは高感度であり、かつメモリー機能を有し、結晶表面での電荷の蓄積効果および二次電子放出特性を利用することで、デバイス内部で加減算をはじめさまざまな演算処理ができる多機能デバイスである。

3. 平行配向液晶空間光変調器 (PAL-SLM)

実用性も考慮して平行配向液晶空間光変調器 (PAL-SLM) の開発を行った。図7にPAL-SLMの構造を、図8にその動作原理を示す⁸⁾。アドレス部には光導電体である水素化アモルファスシリコン (a-Si:H)、光変調部としての液

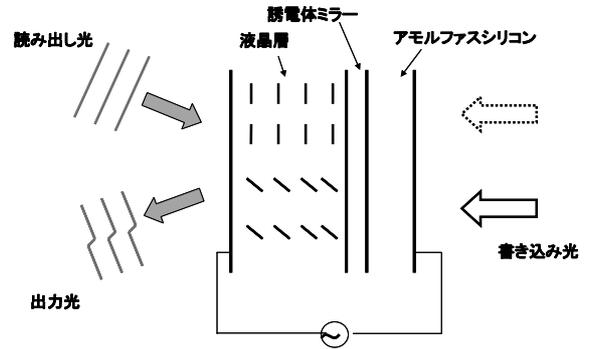


図8 平行配向液晶空間光変調器 (PAL-SLM) の動作原理.

晶層にはネマチック液晶を用いた、光アドレス型のデバイスである。誘電体多層膜ミラーにより、書き込み側と読み出し側が光学的に分離されている。液晶層は液晶分子がガラス基板面に平行になるように配向され、読み出し光の偏光方向は、位相だけを変調する場合には液晶分子軸に平行に設定される。

透明電極 (ITO) 間に数ボルトの交流電圧を印加して、a-Si層に書き込み光によって画像(二次元情報)を書き込む。書き込み光が当たっていない領域では、a-Si層のインピーダンスが液晶層に比べて大きいので、液晶層には電圧がほとんど与えられない。そのため液晶分子は傾かない。一方、書き込み光が照射された部分では、a-Siのインピーダンスが下がり液晶層に与えられる電圧が上昇するので、液晶分子が傾く。その結果、読み出し光に対する液晶の等価的な屈折率が小さくなり、液晶中では読み出し光の位相が進む。PAL-SLMは読み出し光の位相だけを二次元的に 2π ラジアン以上変調することができ、理論限界に近い回折効率を有するデバイスである。

また、パソコンとの整合性を考えて開発された電気アドレス型空間光位相変調器モジュール (programmable phase modulator; PPM) は、PAL-SLM、結合光学系、液晶ディスプレイ (LCD)、書き込み用レーザーダイオード (LD) から構成される⁹⁾。パソコンで生成されたパターンはLCDに表示され、LDで読み出されて、結合光学系を介してPAL-SLMのアモルファスシリコン上に結像される。結合光学系はLCDの画素構造が除去されるように設計されているので、PAL-SLMから読み出された出力光パターンは、LCDの画素に起因する回折光成分が低減されている。

4. LCOS型空間光変調器 (LCOS-SLM)

次にわれわれは、産業用途を見据えた小型・軽量のLCOS型空間光変調器 (LCOS-SLM) の研究に着手した。

図9にLCOS-SLMの構造を示す¹⁰⁾。アドレス部は、シ

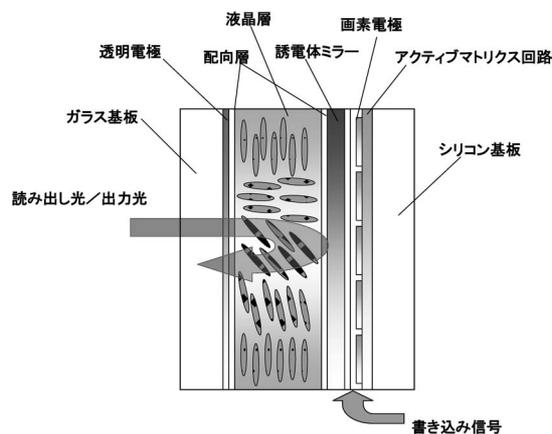


図9 LCOS型空間光変調器 (LCOS-SLM) の構造。

シリコン基板に形成された CMOS アクティブマトリクス回路上に画素電極が配置されている。開発したデバイスの画素数は 800×600 画素、画素ピッチは $20 \mu\text{m}$ 、開口率は 95% である。光変調部は、シリコン基板と、それに対向するガラス基板の間に保持されたネマチック液晶層から成り、PAL-SLM/PPM と同様に液晶分子は基板に平行に配向されている。パソコンのグラフィックボードからの出力画像が、専用のコントローラーを介して CMOS アクティブマトリクス回路に書き込まれ、その書き込み信号の強度 (256 階調) に応じて、画素電極と対向するガラス基板上に形成された透明電極との間の電圧が制御される。この電圧変化に伴って液晶分子が傾き、屈折率が変化することにより、読み出し光に位相変化を与えることができる。

LCOS-SLM の完成により、その波形成形および波面補償の機能を使うことで、光学情報処理が実用化への第一歩を踏み出したと考えている。

長年の光学情報処理の研究で培われたホログラム技術やアダプティブオプティクス技術が、空間光変調器の位相変調機能を利用することで、レーザー加工やマーキング¹¹⁻¹⁵⁾、顕微鏡¹⁶⁾、検眼鏡^{17,18)} などの実用的な応用分野へと展開し始めた。また、空間光変調器のユーザーも研究機関から企業へと変化してきており、今後のビジネスとしての発展が大いに期待される場所である。

光演算やメモリーアクセス用の空間光変調器としては応答速度の高速化が、また、ホログラム表示用途には小さな画素と大面積化 (多画素化) が必要とされ、研究されている。一方で、上述のレーザー加工、マーキング、顕微鏡、検眼鏡などの実用化をさらに進展させるためにも、空間光変調器に関して高速化、多画素化への要求がある。そこでは、空間光変調器の応答速度は 1 ミリ秒オーダー、画素数

は数 $1000 \times$ 数 1000 程度が求められる。さらに、空間光変調器の読み出しレーザー光の高利用効率、面内均一性、入出力の直線性、使える波長域の拡大も、それらの応用には重要なパラメーターである。

空間光変調器も、現状はディスプレイと同様に液晶デバイスと MEMS デバイスが主流になっている。しかし、われわれの光学情報処理および空間光変調器の研究は続いており、まだ具体的な姿は見えていないが、新規な応用システムを見いだすとともに、その応用に使われる次世代の空間光変調器の実現を目指したいと思っている。

文 献

- 1) 原 勉, 鈴木義二: “空間光変調器の最近の動向”, オプトロニクス, 4月号 (1985) 73-79.
- 2) A. D. Fisher and J. N. Lee: “The current status of two-dimensional SLM technology,” Proc. SPIE, **634** (1986) 352-370.
- 3) 谷田貝豊彦監修: 光コンピュータ技術 (トリケップス, 1989).
- 4) 辻内順平, 黒田和男他編: 光学技術ハンドブック (朝倉書店, 2002) pp. 314-320.
- 5) C. Warde, A. D. Fisher, D. M. Cocco and M. Y. Burmawi: “Microchannel spatial light modulator,” Opt. Lett., **3** (1978) 196-198.
- 6) T. Hara, M. Sugiyama and Y. Suzuki: “A spatial light modulator,” Adv. Electron. Electron Phys., **64B** (1985) 637-647.
- 7) T. Hara, Y. Ooi, Y. Suzuki and M. H. Wu: “Transfer characteristics of the microchannel spatial light modulator,” Appl. Opt., **28** (1989) 4781-4786.
- 8) N. Mukohzaka, N. Yoshida, H. Toyoda, Y. Kobayashi and T. Hara: “Diffraction efficiency analysis of a parallel-aligned nematic-liquid-crystal spatial light modulator,” Appl. Opt., **33** (1994) 2804-2811.
- 9) Y. Igasaki, F. Li, N. Yoshida, H. Toyoda, T. Inoue, N. Mukohzaka, Y. Kobayashi and T. Hara: “High efficiency electrically-addressable phase-only spatial light modulator,” Opt. Rev., **6** (1999) 339-344.
- 10) T. Inoue, H. Tanaka, N. Fukuchi, M. Takumi, N. Matsumoto, T. Hara, N. Yoshida, Y. Igasaki and Y. Kobayashi: “A reflective LCOS spatial light modulator controlled by 12-bit signals for optical phase only modulation,” Proc. SPIE, **6487** (2007) 64870Y.
- 11) 伊藤晴康: “空間光変調器を用いた高精度波面制御技術のレーザー加工への適用”, 光アライアンス, **23** (2012) 52-56.
- 12) A. Stone, H. Jain, V. Dierolf, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, K. Miura and K. Hirao: “Multilayer aberration correction for depth-independent three-dimensional crystal growth in glass by femto-second laser heating,” J. Opt. Soc. Am. B, **30** (2013) 1234-1240.
- 13) H. Itoh, N. Matsumoto and T. Inoue: “Spherical aberration correction suitable for a wavefront controller,” Opt. Express, **17** (2009) 14367-14373.
- 14) N. Matsumoto, Y. Takiguchi, H. Itoh, M. Hoshikawa, H. Iwaki, T. Hasegawa, M. Nakano, M. Oyaizu, T. Sakamoto, T. Ogiwara and T. Inoue: “Improvement of laser dicing system performance I: High-speed, high-quality processing of thick silicon wafers using spatial light modulator,” Proc. SPIE, **8608** (2013) 860805.
- 15) Y. Takiguchi, N. Matsumoto, M. Oyaizu, J. Okuma, M. Nakano, T. Sakamoto, H. Itoh and T. Inoue: “Improvement of laser dicing performance II: Dicing rate enhancement by multiple beams and simultaneous aberration correction with phase-only spatial light modulator,” Proc. SPIE, **8608** (2013) 860809.

- 16) Y. Takiguchi, M. Kanada, N. Matsumoto, H. Takamoto, T. Inoue, S. Okazaki and S. Terakawa: "Evaluation of basic characteristic for sensorless aberration correction using spatial light modulator for deep imaging," *Program and Abstract Book: Focus on Microscopy FOM 2011*, P1-F07 (2012) p. 243.
- 17) H. Huang, T. Inoue, H. Toyoda and T. Hara: "High-performance adaptive optics system with long-term stability using liquid-crystal-on-silicon spatial light modulator for high-resolution retinal imaging," *Proc. SPIE*, **8200** (2011) 820002.
- 18) K. Takayama, S. Ooto, M. Hangai, N. Ueda-Arakawa, S. Yoshida, T. Akagi, H. Ikeda, A. Nonaka, M. Hanebuchi, T. Inoue and N. Yoshimura: "High-resolution imaging of retinal nerve fiber bundles in glaucoma using adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy," *Am. J. Ophthalmol.*, **155** (2013) 870-881.

(2013年8月8日受理)