

空間光変調器と三次元光デバイス高効率製造技術

浜松ホトニクス株式会社 中央研究所

原 勉

Spatial light modulator and its application to high-efficiency laser processing for 3-D optical devices

Tsutomu Hara

Central Research Laboratory, Hamamatsu Photonics K.K.

1. まえがき～浜松ホトニクスにとって 「光」とは

電子式テレビジョンは1926年、高柳健次郎博士によって世界ではじめて浜松の地で誕生した。それゆえ高柳博士は「テレビの父」と呼ばれるわけであるが、浜松ホトニクス株式会社は、そんな高柳博士の門下生であった堀内平八郎（初代社長）が晝馬輝夫（現社長）らとともに1953年に設立した（当時は浜松テレビ株式会社）。当社は、高柳博士からその先見性とチャレンジ精神とともに、光電子増倍管の基本技術である光電変換技術を受け継ぎ、現在に至っている。

『真の価値は金ではない、新しい知識だ』—社長の晝馬の哲学である。中央研究所（図1）は1990年にスタートし、10年後、20年後を見据えた新しい知識を獲得するための研究を行っている。

さらに晝馬は言う。「人類には知らないこと分らないことが無限にある。我々は光を用いてこれらの未知未踏分野を切り拓くことが使命である。光を深く追求することで、世の中の



図1 中央研究所 研究棟

様々な問題を解決し人類社会に寄与できる」と。そのため、中央研究所では、基礎研究（光とは何か、光と物質はどのように相互作用するか、など）から、応用研究（計測、通信、情報処理、エネルギー、医療、生物、脳科学など）まで多くの分野について光からのアプローチを続けている。

ここでは、光情報処理の研究から生み出された素子である空間光変調器と、ニューガラスフォーラム・京都大学と共同で進めさせていただいているNEDO「三次元光デバイス高効率製造技術」プロジェクトとの関わりを中心に述べさせていただく（なお本誌2008年3月号の内容と一部重複することをお許しいただきたい）。

〒434-8601 静岡県浜松市浜北区平口5000

TEL 053-586-7111（代表）

FAX 053-586-6180

E-mail: hara@crl.hpk.co.jp

2. 空間光変調器とは何か

光情報処理およびその応用分野において必須なものは光情報を並列に表示し処理できるデバイスであり、これを空間光変調器 (SLM: Spatial Light Modulator) と呼んでいる¹⁾。

空間光変調器は、最初はディスプレイ用として、あるいはフーリエ変換に適用するためのインコヒーレント-コヒーレント光変換器として開発された。それが光情報処理の研究の発展とともに、ベクトル-マトリクス演算等の数値演算・光位相補償・スペクトラムアナライザへの応用展開が意図され、さらに光インターコネクション・並列論理演算・ニューロコンピューティング・光波面制御用のデバイスとしての可能性が検討されるようになった。それに伴い、高解像度・高速応答性など特性に関する要求が強まり様々なデバイス開発に拍車がかかった。

空間光変調器は、図2に示すように2次元または1次元の読み出し光の位相・偏波面・振幅・強度・伝播方向の分布を、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。情報を光学系により直接書き込む光アドレス型と、電気信号により書き込む電気アドレス型に分けられ、さらに図3および図4のようにアドレス部と光変調部の材料によって細分される。

様々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、これまでに数多くの空間光変調器が提案され、これまでに世界中で100種類を超える空間光変調器が研究開発されてきたが、実際に使えるレベルに至ったものは少ない。

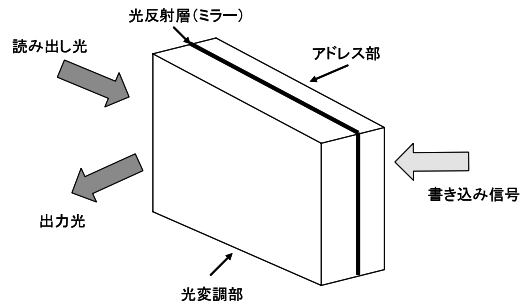


図2 空間光変調器

3. 浜松ホトニクスにおける空間光変調器の開発

我々は長年にわたり空間光変調器の研究開発をおこなってきた。

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 (LiNbO_3) を採用した真空管方式の空間光変調管 (MSLM: Microchannel Spatial Light Modulator)²⁾ を完成させた³⁾。MSLMは、マイクロチャンネルプレート (MCP) を内蔵しているので高感度であり、かつメモリー機能を有し、デバイス内部で演算処理も可能な多機能デバイスである⁴⁾。世界でも数少ない“使える空間光変調器”であったため、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年代にかけて光情報処理研究の発展に大きく貢献した。

近年になって、光波形成形、光パルス成形、光波面補償、光計測などの分野において、光波の位相を2次元的に制御するためのデバイスの必要性が高まった。そこで、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 (PAL-SLM: Parallel Aligned nematic Liquid crystal Spatial Light Modulator) を開発した⁵⁾。PAL-SLMは読み出し光の位相だけを2次元的に 2π ラジアン以上変調することができる光アドレス型の空間光変調器である。また、

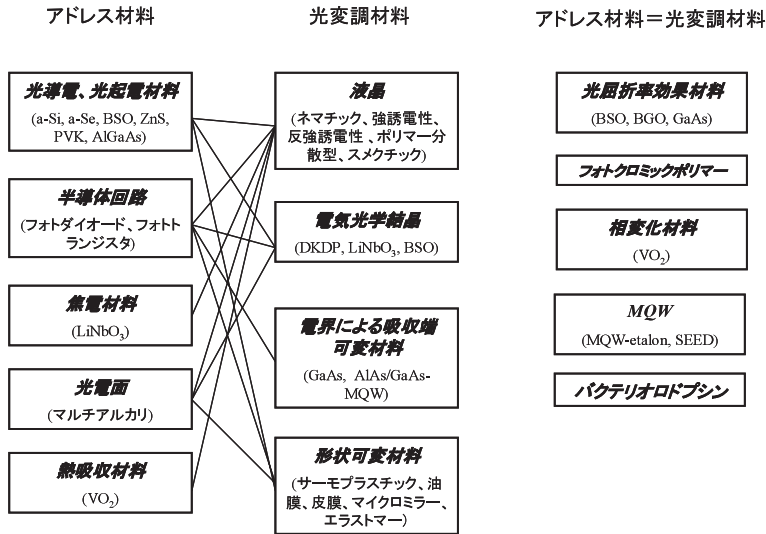


図3 空間光変調器を構成している材料 (光アドレス型)

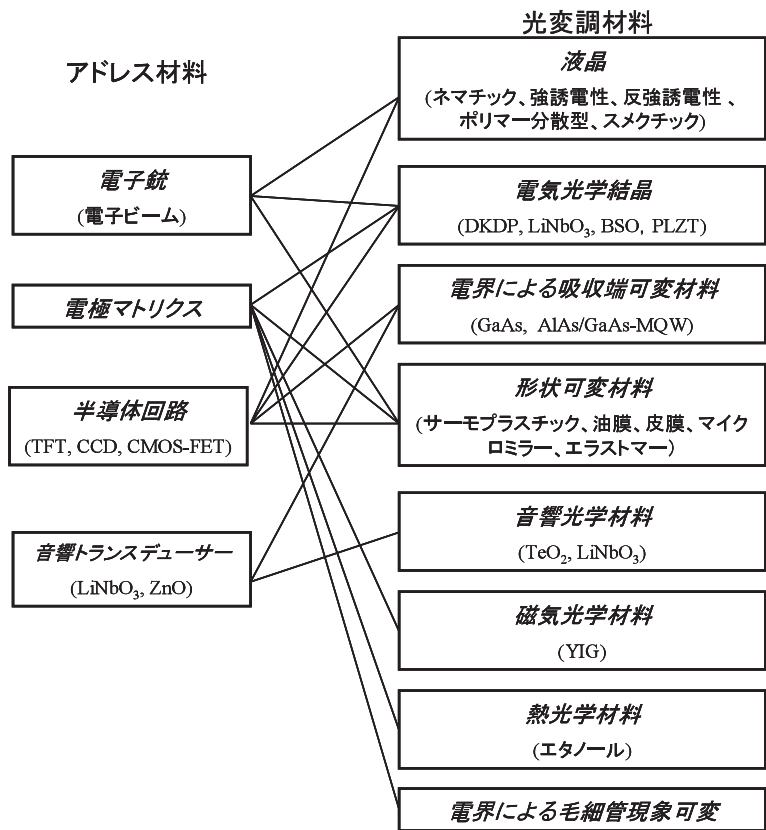


図4 空間光変調器を構成している材料 (電気アドレス型)

コンピューターとの整合性を考え、液晶ディスプレイ (LCD: Liquid Crystal Display) と PAL-SLM を最適設計された光学系で結合し、画素構造を除去した光利用効率の高い電気アドレス型空間光位相変調器 (PPM: Programmable Phase Modulator) を完成させた^{6, 7)}。

最近になって、産業用途を見据えた小型・軽量の LCOS (Liquid Crystal On Silicon) 型空間光変調器 (LCOS-SLM) の開発に成功した⁸⁾。アドレス部は CMOS アクティブマトリクス回路からなり、このデバイスの光変調部も光波の位相だけを変調できるように分子を基板に平行に配向した液晶層から成る。光情報処理だけでなくレーザー加工などの産業応用にも道を拓いたデバイスと言える。

4. NEDO 三次元光デバイス高効率製造技術プロジェクトにおける浜松ホトニクス の役割

NEDO 「三次元光デバイス高効率製造技術」プロジェクトでは、フェムト秒レーザーと、波面制御素子としてのホログラムによるガラス内部への多点同時加工を目指している (研究テーマ「三次元加工システム技術の開発」ニューガラスフォーラム, 当社担当)。うち、可変型の三次元加工システムの実現にむけた研究を当社は担当している (研究テーマ「空間光変調器三次元加工システム技術」)。

三次元多点同時加工の自由度を高める書き換え可能なホログラムとして LCOS-SLM がその光波形成・光波面補償の機能から重要な役割を果たす。そのためプロジェクトにおいて当社は、フェムト秒レーザー光に対して耐光性を有する LCOS-SLM の開発、LCOS-SLM とフェムト秒レーザー加工システム本体との光学接続に適した光波面制御モジュールの開発、および加工の速度・精度・機能の向上を図る光波形成技術や光波面補償技術などの波面制御技術の開発を進めている。プロジェクトにおける進捗を含めて最近の成果を紹介する。

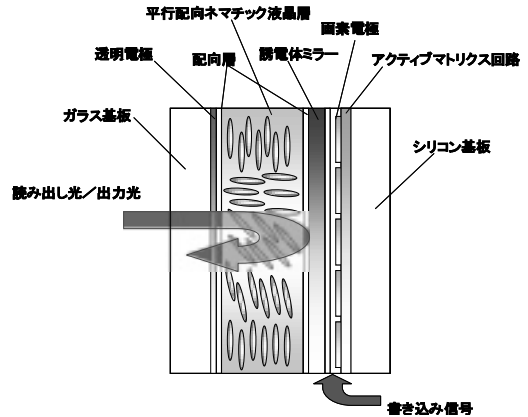


図5 LCOS-SLM の構造



図6 LCOS-SLM の外観

4-1. フェムト秒レーザー加工用 LCOS 型空間光変調器の開発

図5に、本プロジェクトで研究開発している LCOS-SLM の構造を、図6に外観を示す。アドレス部は、シリコン基板に CMOS アクティブマトリクス回路が形成され、その上に画素電極が配置されている。光変調部は、シリコン基板と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、液晶分子は基板に平行に配向されている。液晶部分の面積は 20 mm × 16 mm である。書き込み信号の大きさに応じて液晶分子が傾き、屈折率が変化するので、読み出し光に位相変化を与えることができる。

LCOS-SLM の高強度フェムト秒レーザーパルスによる破壊においては、液晶層における蓄積熱に依存した熱的破壊が支配的である考えられる。まず入射光と反射光の位相をずらす位相シフト層を LCOS-SLM 内部に導入し、液晶界

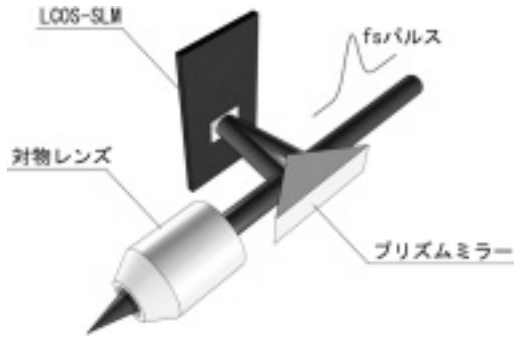


図7 光波面制御モジュールの構造

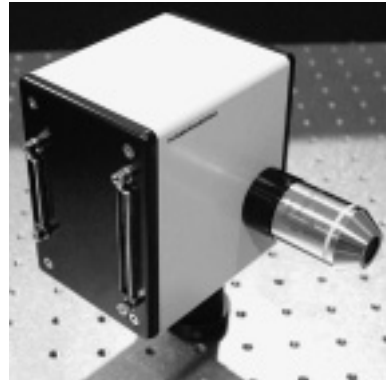


図8 光波面制御モジュールの外観

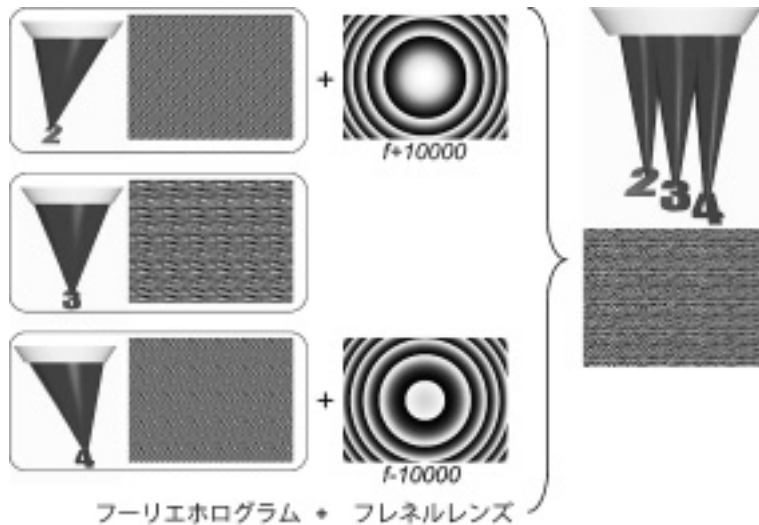


図9 三次元加工のためのホログラム製作

面における入射光と反射光との重複状態を緩和させることにより、液晶層における光強度が低減され、その結果として素子の耐光性を向上させることを可能とした。さらに、アルミ画素電極上に誘電体多層膜ミラーを製膜することでLCOS-SLMを構成する反射層の反射率向上を試みた。反射層後段に配置されるアクティブマトリクス回路等に到達する光量が減少し、回路に蓄積される熱量を緩和させることが可能となった。

4-2. フェムト秒レーザー光波面制御モジュールの開発⁹⁾

開発したLCOS-SLMの性能を最大限に活かし、かつ可変型の三次元加工システムへの導入を簡易にする光波面制御モジュールの開発を進めている。

開発している光波面制御モジュールの概念図を図7に、外観写真を図8に示す。従来、空間光変調器により波面制御を行う場合には、専用の光学系を構築する必要があった。この場合、光学系が煩雑になるばかりで無く、綿密な光学調整技術を必要とした。これに対し、光波面制

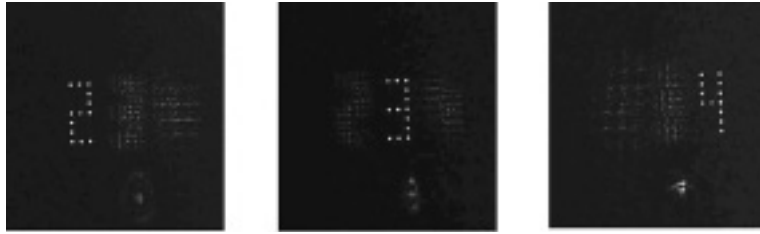


図10 三次元ホログラム再生結果

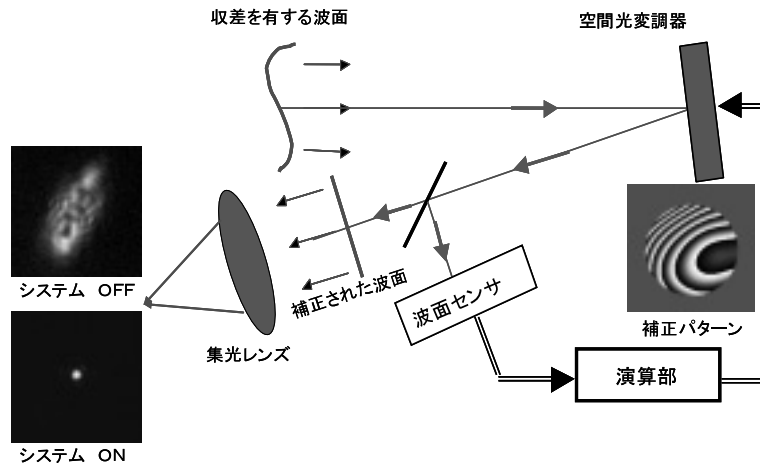


図11 波面補償システム

御モジュールは、既存の光学系に配置するだけで、容易に波面制御を行うことを可能とするものである。特に、プリズム型のミラーを用いることにより、既存の光軸を維持した状態で波面制御を行うことが出来るため、小型化、操作性の向上が実現された。

4-3. 高機能三次元加工のための LCOS-SLM による波面制御技術の開発¹⁰⁾

任意の光パターンを生成するためには LCOS-SLM に入力する 計算機合成ホログラム (CGH) の作成が重要な技術となる。図9に示すように、奥行き方向を制御することのできるフレネルレンズパターンと2次元の光パターンを生成する CGH を足し合わせることで三次元加工のためのホログラムを作製した。このホログラムを光波面制御モジュールに書き込み、レーザーで読み出すことにより三次元の光パ

ターン生成を実現した (図10)。再生像はレンズに近いほうから (10 倍の対物レンズで再生した場合、およそ $60\mu\text{m}$ 間隔)、“2” “3” “4” という数字が生成されていることが確認できた。この場合には、38 点を同時に加工できることになる。

本プロジェクトで開発しているようなレーザー加工システムに限らず、計測システムなどに適用される波面制御技術の一つに波面補償システム¹¹⁾がある。これは、ガラス材料の収差や光学系の収差を補償する場合に有効な技術であり、当社は従来からその開発を進めてきた (図11)。

波面歪 (収差) を持つ光は空間光変調器の読み出し光として入射し位相変調を受ける。空間光変調器からの反射光の一部は波面センサー (シャックハルトマンセンサー) に送られる。波面センサーはマイクロレンズアレイとインテ

リジントビジョンシステム¹²⁾の組み合わせであり、レンズアレイを構成する個々のレンズの焦点での光スポットの重心位置情報を高速に検出し、それに基づき図中に例示したような補正パターンを生成する。波面補正前は集光レンズを用いても一点に集光できないが、空間光変調器を逐次的に制御することで補正パターンによって波面は補正され、集光状態を改善することができるのである。

5. あとがき

近年になって、レーザー加工、顕微鏡、検眼鏡、多ビーム光ピンセット、光メモリーなど空間光変調器の具体的な応用分野が示され、性能に対する要求も具体化し、実応用が検討されるようになった。その結果、空間光変調器も価格や性能面で、より良いものへ発展してきた。このような中、我々はLCOS-SLMの開発を進め、2次元の光位相制御を必要とする多くの応用に対して有効なデバイスであることを確認することができた。またNEDO「三次元光デバイス高効率製造技術」プロジェクトに参加させていただいたことで、高耐光性を有するLCOS-SLMの開発が進展した。これらの成果が、日本の産業競争力の強化、そして「新しい知識」の獲得と人類の抱える問題解決にいくばくなくとも貢献できるようになればと願っている。

最後になりましたが、この場を借りて、NEDO 技術開発機構、プロジェクトリーダーの平尾教授、ニューガラスフォーラム、京都大学の関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 辻内順平, 黒田和男他編集: 光学技術ハンドブック (朝倉書店, 2002) 314-320.
- 2) C. Warde, A. D. Fisher, D. M. Cocco and M. Y. Burmawi: "Microchannel Spatial Light Modulator," *Opt. Lett.*, **3**, (1978) 196-198.
- 3) T. Hara, M. Sugiyama, and Y. Suzuki: "A Spatial Light Modulator," *Adv. Electron. Electron Phys.*, **64 B**, (1985) 637-647.
- 4) T. Hara, Y. Ooi, Y. Suzuki, and M. H. Wu: "Transfer characteristics of the microchannel spatial light modulator," *Appl. Opt.*, **28**, (1989) 4781-4786.
- 5) 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.
- 6) 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) pp. 339-344.
- 7) T. Hara, N. Fukuchi, Y. Kobayashi, N. Yoshida, Y. Igasaki, and M. H. Wu: "Electrically-addressed spatial light phase modulator," *Proc. SPIE*, **4470**, (2001) 114-122.
- 8) T. Inoue, H. Tanaka, N. Fukuchi, M. Takumi, N. Matsumoto, T. Hara, N. Yoshida, Y. Igasaki, Y. Kobayashi, "A reflective LCOS spatial light modulator controlled by 12-bit signals for optical phase only modulation," *SPIE Photonics West* [6487-31] (2007).
- 9) 伊藤, 井上, 福智, 松本, 原, "高強度フェムト秒レーザー用波面制御モジュールの開発," レーザー学会学術講演会第28回年次大会, (2008).
- 10) 福智, 向坂, 井上, 松本, 原, "LCOS-SLMによる可変焦点レンズ検証実験," 2008年春季第55回応用物理学関係連合講演会, (2008).
- 11) H. Huang, T. Inoue, T. Hara: "An adaptive wavefront control system using a high-resolution liquid crystal spatial light modulator," *Proc. SPIE*, **5639**, (2004) 129-137.
- 12) H. Toyoda, N. Mukozaka, S. Mizuno, Y. Nakabo and M. Ishikawa: "Column parallel vision system (CPV) for high-speed 2 D-image analysis," *Proc. SPIE*, **4416**, (2001) 256-259.