

LCOS型空間位相変調器の レーザー加工応用と最新動向

santec(株) 西立野将史・桜井 康樹
山陽小野田市立山口東京理科大学 高頭 孝毅・伊藤 雅浩

1. はじめに

主にプロジェクタ等の画像投影用素子に使用されるディスプレイとして開発されたLCOS (Liquid Crystal On silicon) 技術は、空間位相変調器 (SLM: Spatial Light Modulator) の用途で光通信⁽¹⁾、レーザー加工⁽²⁾、オプトジェネティクス⁽³⁾、補償光学、光マニピュレーション技術、パルス/スペクトル整形⁽⁴⁾等、可視～近赤外光を扱うさまざまな分野で幅広く応用されている。画像投影素子の先行技術として、TFT (Thin Film Transistor) 液晶やMEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 技術を用いたDLP (Digital Light Processing) が既に産業的に広く利用されている。各々の技術においてそれぞれ一長一短があり (図1)、MEMS技術と比較して液晶技術は応答速度と耐光性で見劣りする一方で、MEMS技術では計算機ホロ

グラム (CGH: Computer Generated Hologram)⁽⁵⁾にも利用されるLCOSの高度な空間制御性は実現が難しい。

本稿では、当社製品を例に、LCOS型SLMの性能とレーザー加工への応用例、及び最新の開発動向として高い耐光性と高速応答を実現するためのLCOS技術について紹介する。

2. LCOS型SLM

マイクロディスプレイ技術として確立されているLCOSは、数百万画素を有する2次元マトリクス構造となっており、ガラス基板に各画素共通の透明電極であるITO (Indium Tin Oxide) を積層し、CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) を形成するSi基板で液晶を挟み込む構造となっている。

CMOS上の各画素電極毎に電圧を可変して印可することが可能なため、LCOSに投影された光の位相を空間的に自由に操ることができる (図2)。当社製SLMに搭載されているLCOSの特徴として、通常ディスプレイでのLCOSの電圧印可分解能は階調度8ビット (256階調) であるのに対し10ビット (1,024階調) 分解能であること、及び1 kHz以上の高速なLCOS駆動周波数を採用しているため、LCOSに印可する交流電圧の周波数に同期した微細な液晶の揺れに起因するフリッカー現象が抑えられる点が挙げられる。通常のディスプレイに比べて1/20以上の低フリッカー性能を実現できる。

図3に本LCOSを搭載したSLMの製品群を示す。標準性能を有するSLM-200に加え、UV光での動作が可能なSLM-250、耐光性に優れ高出力レーザーを扱うこ

| | TFT | LCOS | DLP |
|-------------------------|----------|----------|----------|
| Light use efficiency | 50% | 90% | 80% |
| Optical power stability | ○ | ◎ | × |
| Optical response time | ~10 msec | ~10 msec | ~10 μsec |
| Optical resistance | △ | △ | ◎ |
| Optical phase control | Yes | Yes | No |

図1 画像投影素子の技術別比較

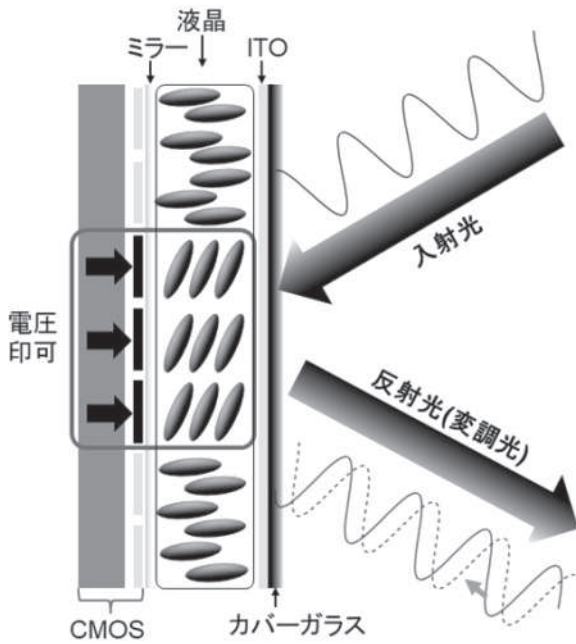


図2 LCOSの構造と機能

ロチップパルスレーザー⁽⁶⁾による有機半導体薄膜の加工が報告されている⁽⁷⁾。図5に加工例を示すように、LCOS型SLMの高度な空間制御性を利用してサブミクロンオーダーでのワンショット加工が実現されている。

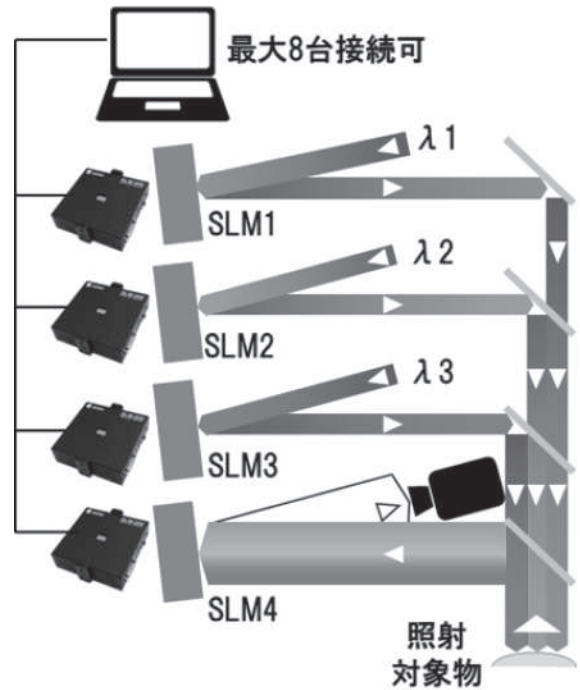


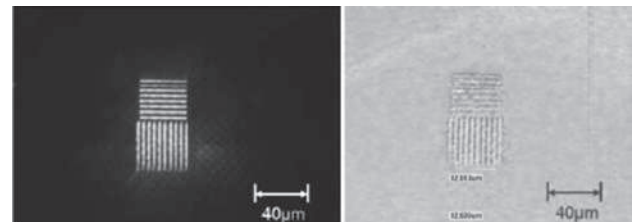
図4 複数台制御システム例



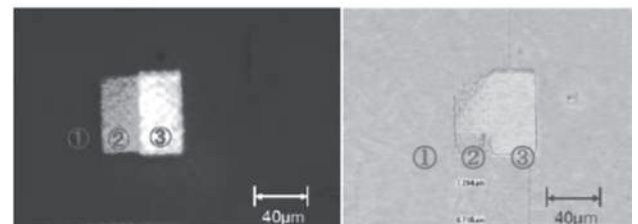
図3 santec製SLMラインナップ

とができるSLM-300、高速応答に特化したSLM-210がある。DVI-HDMI信号によるLCOSへの直接描画表示と、USB通信による最大128描画パターンデータのメモリ機能による読み込み時間のタイムロスのない表示が可能である。また、各プログラミング言語に対応したDLLと60 cm長のFPC (Flexible Printed Circuits)、1台のPCから最大8台のSLMを制御する集中制御機能により、任意のユーザーシステムにも組み込み易い設計となっている(図4)。

LCOS型SLMを組み込んだシステムの一例として、Nd:YAG/Cr4+:YAG結晶を用いたQスイッチマイク



(a) レーザー照射パターン (a) 加工像
ライン&スペース加工例



(a) レーザー照射パターン (a) 加工像
3D加工例

図5 延長FPCラインナップ

3. 高耐光性LCOS型SLM

従来のLCOSはプロジェクタやリアプロジェクションテレビ等、人間が視認できる程度の光量を前提に設計されており、レーザー加工等で想定されるkWクラスのレーザーを照射すると液晶材料が破壊されてしまう(図6)。しかしながら、耐光性の技術が確立できればLCOSによるワンショット加工により、作業効率を大幅に改善できる可能性がある。図7に典型的な可視域用LCOSの断面構造の詳細を示す。通常LCOSの構成材料であるカバーガラス、ポリイミド配向膜、金属反射ミラー、液晶材料は高い光強度により不可逆な熱損傷を引き起こす可能性があるため、数10 W程度までの光強度での使用に制限されてきた。弊社が開発したSLM-300に搭載されているLCOSの断面構造を図8に示す。熱損傷を回避するために素子内部に発生する熱を放熱する目的でカバーガラスに熱伝導性のよいサファイア基板を用い、水冷ヒートシンクをLCOSの裏面に取り付けて直接LCOSを強制的に冷却することで耐光性の改善を図った。配向膜にはハイパワー耐性と長期信頼性の改善を目的として、反応性の高いポ

リイミド有機膜の代わりにSiO_x無機膜を採用している。また、反射ミラーには光吸収の少ないSiO₂とSiNからなる誘電体多層膜を、液晶材料には共役系の小さい(反応性の低い)フッ素系化合物の混合物を用いた。通常LCOSと耐光性を改善したLCOSに近赤外線光(1,064 nm)を照射した場合の温度比較実験結果を図9に示す。なお、LCOSパネル面でのビームは直径約9 mmのガウシアンビームである。一般的に液晶材料の相転移温度TNIは約100 degCであり、それ以上の温度ではLCOSは動作しなくなる。温度がTNIに近づくにつれ顕著な光の位相変調量の劣化が現れるため、位相変調量の変化がない温度範囲70 degCでのパワー密度を比較すると、約3倍の改善効果が見込まれる。なお、通常LCOSでは250 W/cm²の光を10秒間照射した場合に急激な温度上昇と不可逆な破壊が観測されたが、改善させたLCOSでは温度は上昇するものの破壊は確認されず、耐光性が大幅に改善されていることが確認された。

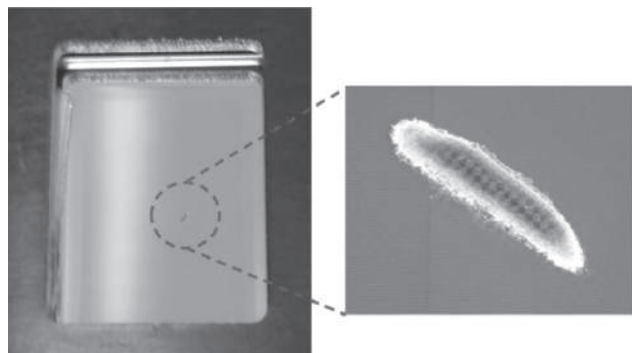


図6 LCOSを応用した有機半導体薄膜加工例

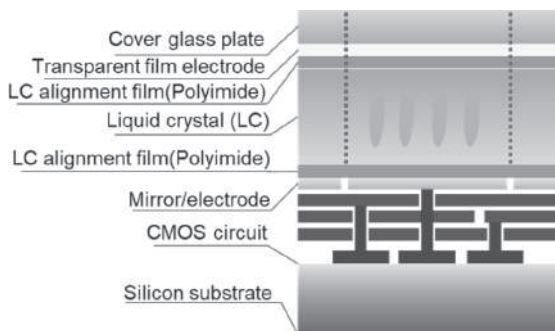


図7 LCOSの光による破壊例

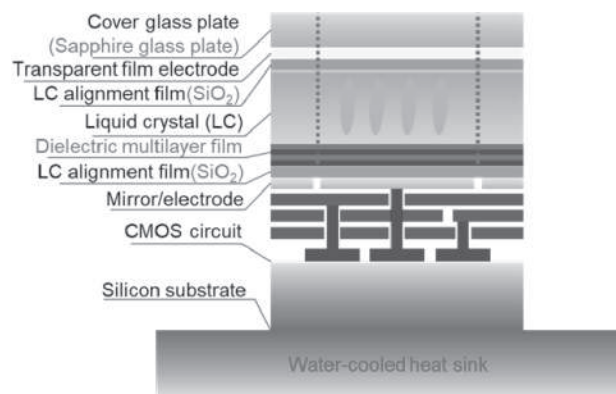


図8 従来LCOSの構造

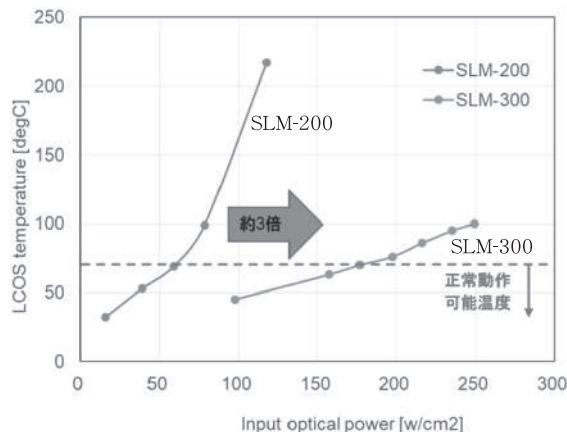


図9 SLM-300の構造

更に耐光性を改善するために、重合禁止剤を液晶材料に添加することが有効である。図10に破壊前後の液晶材料のガスクロマトグラフィによる成分分析結果を示す。破壊後は各分子の信号に隣接するようにピークが現れており、液晶材料の変質を示している。この結果は破壊前に二つのフッ素基を有する高分子が、破壊後にはフッ素基一つが離脱した高分子に変質したものと考えられる。フッ素基が離脱することでラジカルが発生し、それを起点に重合反応の連鎖を引き起こしたものと推測される。液晶材料に重合禁止剤を添加することで、耐光性が大幅に改善されていることが実験的に確認された（図11）。この技術をSLM-300に適用することで金属レーザー加工用途等のkW級高出力レーザーを使用するアプリケーションへの応用も期待できる。

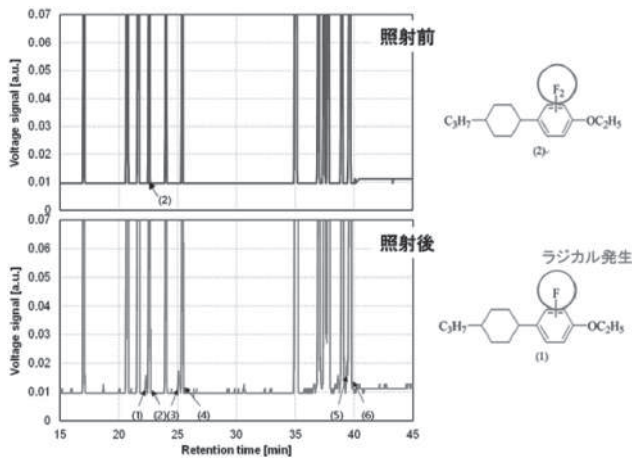


図10 64 nm光源によるSLM-200とSLM-300の温度上昇比較

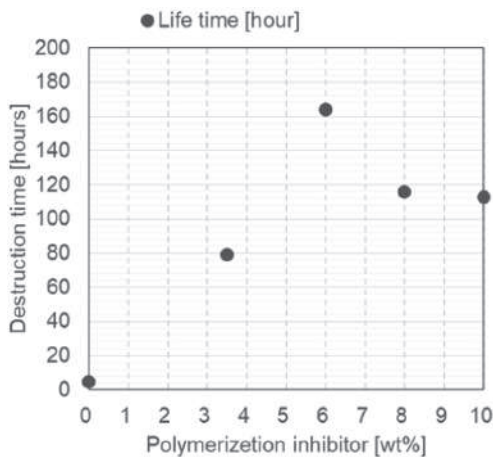


図11 クロマトグラフィによる液晶破壊前後の成分分析 (1)(2)各ピークで推測される液晶材料の分子構造

4. LCOS型SLMの高速応答化

当社製SLM-210に搭載しているLCOSの応答速度改善手法について紹介する。一般的な液晶素子の応答速度は下記で表現される。

$$\tau_{on} = \frac{\eta d^2}{\epsilon_0 \epsilon_a (V^2 - V_c^2)} \quad \dots(1)$$

$$\tau_{off} = \frac{\eta d^2}{\pi^2 \cdot K} \quad \dots(2)$$

τ_{on} と τ_{off} はそれぞれ電圧上昇、下降時応答速度、 η は液晶粘度、 d は液晶層厚、 ϵ は誘電率異方性、 V は電圧、 K は液晶の弾性定数を表す。高速化には液晶層厚 d を薄くすることが効果的である。特にホログラムに应用されるLCOSは最大位相変調量として 2π ラジアン必要であるが、液晶層厚を薄くすると位相変調量が低下してしまう。液晶素子の位相変調量 $\Delta\phi$ は下記で表される。

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta n \cdot d}{\lambda} \quad \dots(3)$$

Δn は液晶の複屈折率異方性、 λ は波長である。これらの関係から、 Δn の大きな液晶を適用し最大位相変調量 2π ラジアンと高速化を両立する必要がある。また、液晶粘度 η は、一般的に温度上昇により低下することが知られており、温度上昇も高速化の手段となりうるが温度上昇は同時に位相変調量の低下を招くため、温度選定には慎重な検討が必要である。これらの改善手法を取り入れたLCOSは従来に比べ約50倍程度の高速化の可能性がある（図12）、リアルタイムなスキャンングが必要な高速顕微鏡やCGHを利用する高度なプロジェクトへの応用が期待される。

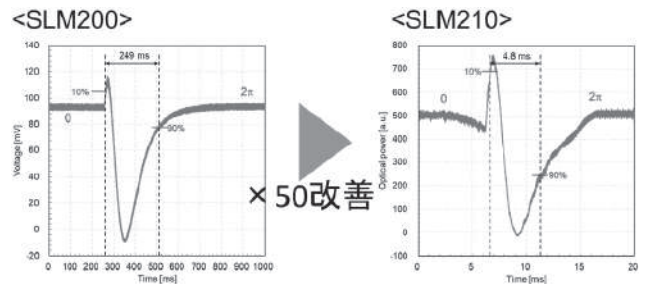


図12 重合禁止剤による耐光性の改善効果

5. おわりに：まとめ

LCOSを用いた空間位相変調器について、当社製品を例にその性能とレーザー加工への応用、及び最新動向として耐光性と応答速度を改善するLCOS技術について紹介した。これらのLCOS技術が新しい応用分野を切り拓いていくことを期待する。

＜参考文献＞

- (1) Y. Sakurai, et al. : IEEE Photon. Technol. Lett. 23(14), pp.989-991 (2011)
- (2) 堀田・他：第77回応用物理学会春季学術講演会、14a-C31-2 (2016)
- (3) T. Okada, et al. : Science Advances Vol.7, No.12, eabd8261 (2021)
- (4) 音羽他：第77回応用物理学会春季学術講演会、14p-B3-10 (2016)
- (5) Y. Hayasaki, et al. : Appl. Phys. Lett. 87, 031101 (2005)
- (6) A. Kausas, et al. : Opt. express 25, pp.6431-6439 (2017)
- (7) Y. Sakurai, et al. : Proc. The 6th LIC, LICj-2 (2018)

【筆者紹介】

西立野将史

santec株式会社 AOCカンパニー 研究開発グループ
リードスペシャリスト

高頭孝毅

山陽小野田市立山口東京理科大学 工学部 教授

伊藤雅浩

山陽小野田市立山口東京理科大学 工学部 助教

桜井康樹

santec株式会社 AOCカンパニー 研究開発グループ 次長