高出力対応LCOS型空間光変調器で切り拓く次世代レーザ加工技術

santec AOC

近年、LCOS（Liquid Crystal On Silicon）の耐光性向上に関する研究が進み、高出力レーザにも対応可能なLCOS型空間光変調器（SLM：Spatial Light Modulator）が登場し始めている。これにより、レーザ加工分野、特に金属加工への応用も視野に入っている状況である。本稿では高出力レーザ向けに開発したSLM-310と高耐光性技術の進展、レーザ加工への応用の可能性について紹介する。

LCOS型SLMとは？その構造と基本原理

ディスプレイ用の画像投影素子として開発されたLCOS技術を用いたデバイスとして空間光変調器がある。本デバイスは光通信[1]、レーザ加工[2]、補償光学、光マニピュレーション[3]、パルス／スペクトル整形等、可視～近赤外光のさまざまな分野で広く応用されている。

LCOSはプロジェクターやリアプロジェクションテレビ用に開発されたマイクロディスプレイ技術である。数百万画素の2次元マトリクス構造を持ち、おのおのの画素はITO（Indium Tin Oxide）からなる共通透明電極と液晶駆動回路のCMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor）を形成するSi基板上の画素電極とで液晶材料を挟み込んだ構造である（**図1**）。各画素電極に独立した任意の電圧を印加することにより、LCOSに入射される光の位相を空間的に制御することが可能である（**図2**）。Si基板上の画素電極は反射ミラーとしての機能も兼ねており、光を反射して使用する反射型のLCOS構造が一般的である。当社LCOS型SLMは解像度1920x1200画素で画素ピッチは8.0μmであり、フレームレート60Hzと120Hzに対応している。特徴としては8ビット（256階調）の通常ディスプレイと比べた際の10ビット（1024階調）という高い位相分解能分解能（**図3**）と<0.002πradという高い位相安定度（**図4**）を有していることである。高い位相分解能は緻密な位相変調が可能であり、例えばディスプレイ用途においては高い消光比（コントラスト比）の実現が可能となる。また、高い位相安定度はレーザ加工、光通信、補償光学等の位相安定度が極めて重要なアプリケーションに適している。LCOSは交流電圧を印加することにより駆動するが、液晶分子の微細な揺れを発生させ、位相安定度の揺らぎ（フリッカー）となる。フリッカーは人間が視認する用途においては大きな影響とはならないが、フリッカーに対して敏

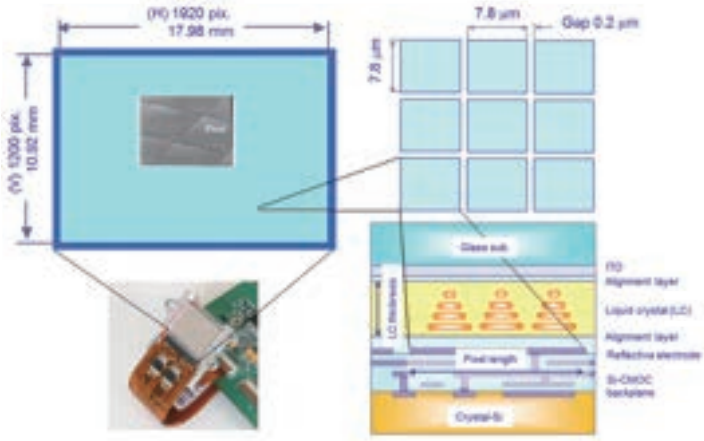


図1　LCOS構造

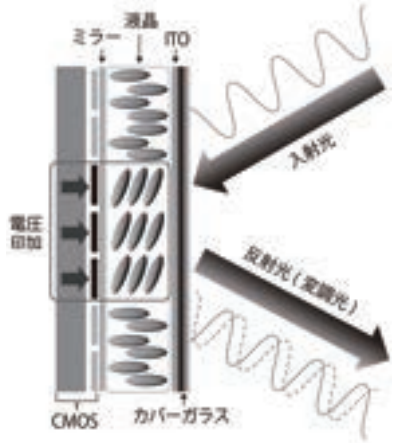


図2　LCOSによる位相変調

感に反応する用途においては大きな問題となる。当社LCOS型SLMは交流印加電圧の周波数を高く（駆動周波数>1kHz）することでフリッカーレベルを低減している。

DVIインタフェースからは内部メモリ容量に依存しないビデオ信号入力が可能で、通信インタフェースの通信速度がネックとなる場合はUSBインタフェース経由で内部メモリ（128パターン）に位相データ保存が可能である。PC以外の外部システムより位相データの切り替えを実施する場合においては入力／出力トリガ機能を用いることで位相データ切り替えが可能となっている。また、ユーザーシステムからの制御の際に利用可能なSDK（Software Development Kit）も用意されており、ユーザープログラムから容易にLCOS型SLMを制御することが可能である。

LCOS型SLMの用途

LCOS型SLMは光の位相を変調するデバイスであるが、その応用範囲は多岐に及ぶ。AR/VRディスプレイなどのホログラフィ、顕微鏡や天体観測などの補償光学、光通信におけるモード変換などへの応用が検討されており、これらにおいてSLMは重要な技術として認識されつつある。

前述の用途は比較的低出力のレーザを用いる用途であり、高出力レーザを用いるレーザ加工などでは性能が十分ではなかった。従来のLCOS型SLMでもレーザ加工で用いられるようなビーム成形は可能ではあったが、LCOSの耐光性がボトルネックとなっていた。

ただし、LCOSの耐光性向上により、高出力レーザとの組み合わせによる金属加工という可能性が現実味を帯びてきた。従来のレーザ加工ではビーム形状が固定で加工ごとにセッティング変

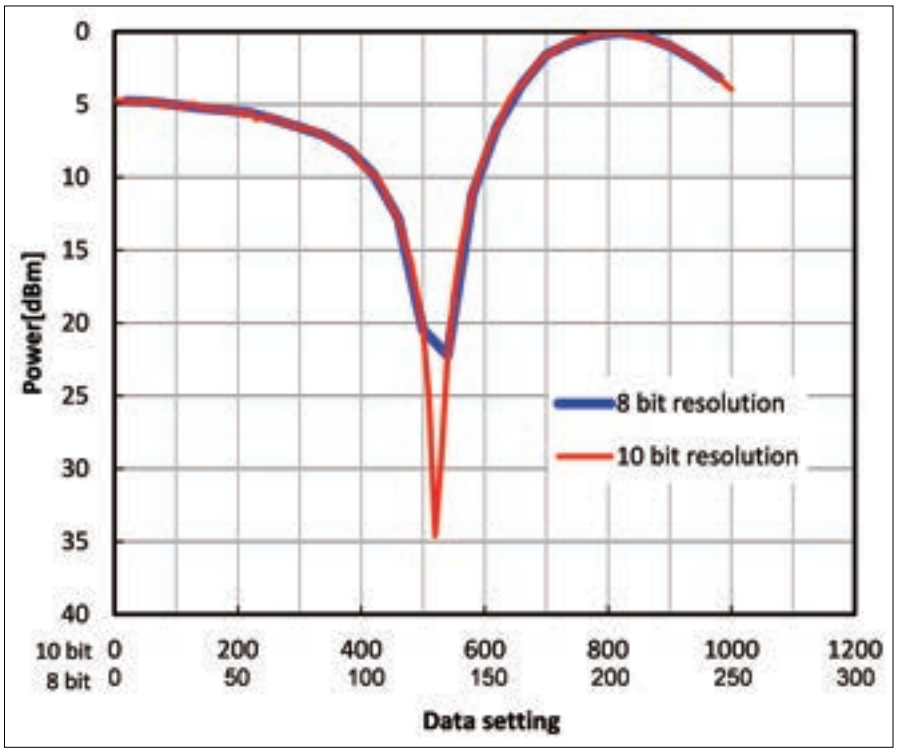


図3　LCOS強度変調性能比較

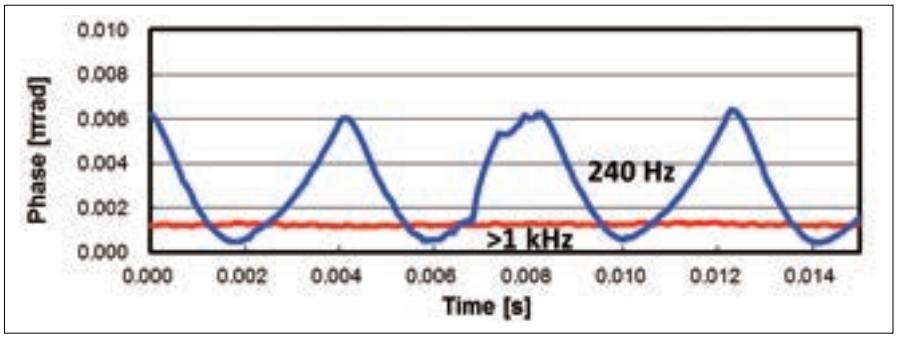


図4　LCOSフリッカー性能比較

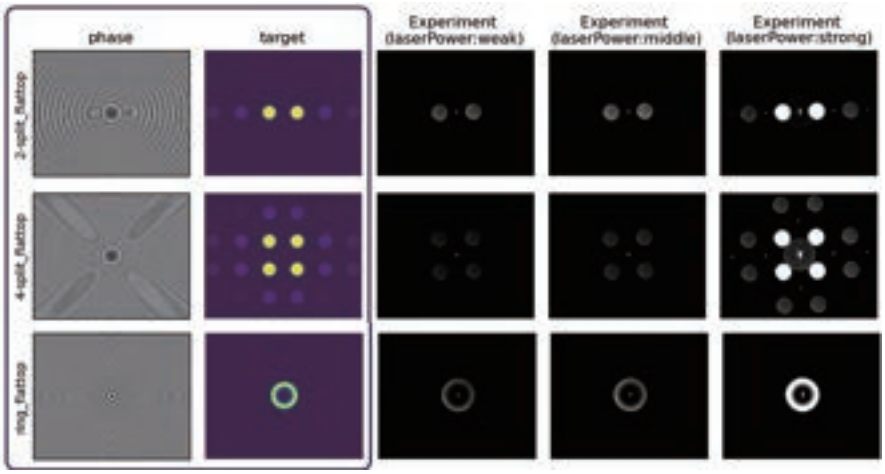


図5　SLMを用いたビーム成形の実例：多点フラットトップビーム、リングビーム

更が必要であったが、SLMを用いることにより動的なビーム成形が可能となる。これは微細加工や複雑形状の切断・溶接において、大きなメリットとなり得る。

新たな応用領域：1kW対応LCOS型SLMが切り拓く、レーザ加工の新境地

レーザによる金属材料の切断、溶接においては材質、厚みにもよるが、1kW以上のパワーが必要になる。適切なビーム形状（**図5**）にすることでスパッタを減少させるなど加工品質を向上させることが可能であるが、ビーム形状をLCOS型SLMで成形する場合、LCOSがこのパワーに耐える必要がある。SLM-310は1kWの耐光性を有しているため、レーザ加工での活用が可能となった。

レーザ加工時におけるビーム形状の最適化は熱効率向上による高速切断、高精度な溶接、複雑な形状の微細加工につながる。従来の加工では困難だった複雑形状を高精度で高速で加工可能になり、航空宇宙、自動車、医療、半導体などの分野での応用が期待される。

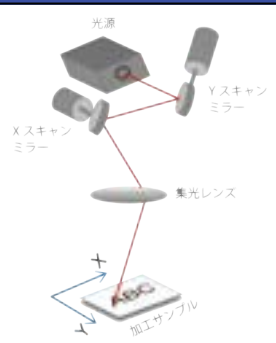
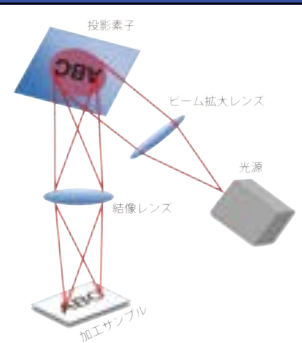
方式	スキャン方式	ワンショット方式
構成		
メリット	レーザ光有効使用	瞬時に加工が完了
デメリット	変化・移動するサンプルには不向き	ハイパワーレーザが必要

図6　レーザ加工方式

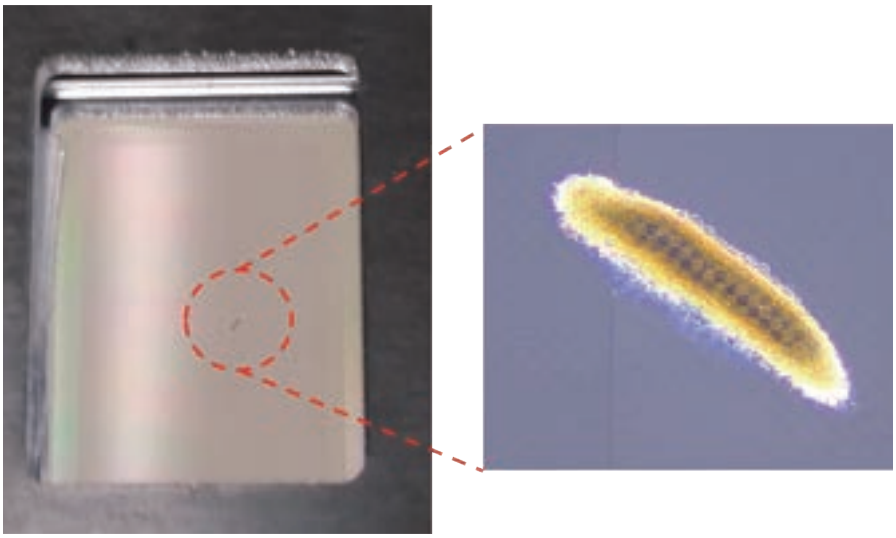


図7　入射光によるLCOS損傷

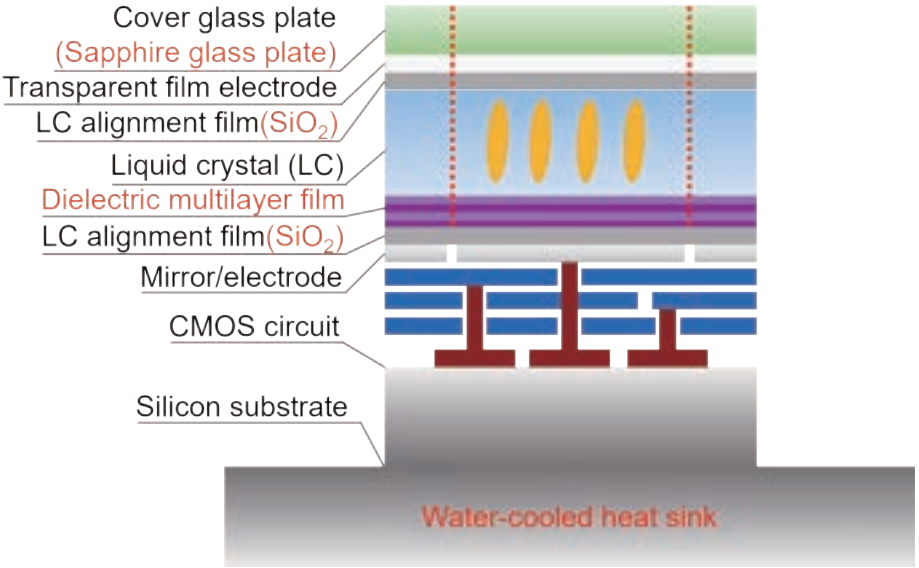
高出力レーザ対応の利点とアプリケーション例

現在、レーザ加工で使用されているデバイスとしてガルバノミラーがあるが、レーザの照射方向を変えるためには、X軸、Y軸を可変させスキャンする必要があるが、スキャンに時間を要するため、加工時間が長くなる傾向にある。しかし、LCOS型SLMは計算機ホログラム（CGH：Computer Generated Hologram）[4]等を活用し、ワンショット加工（**図6**）が可能となり、加工時間を大幅に短縮することができる。また、LCOS型SLMはDLPと比較すると位相変調の安定度が高いという特徴があり、計算機ホログラムとの親和性が高いと言える。ビーム形状を変更する手法として回折光学素子（DOE：Diffractive Optical Element）を用いる方法があるが、DOEは耐光性に優れる反面、ビーム形状を変更する必要があり、段取り替え時間が増える要因となってしまう。しかし、LCOS型SLMは装置のセッティングを変更することなくプログラマブルにビーム形状を変更することが可能である。高出力レーザに対応したLCOS型SLMはレーザ加工における可能性を大いに広げる存在となり得る。

近赤外線レーザ加工向けLCOS型SLMの進化とsantecの取り組み

従来のLCOSは、プロジェクターやリアプロジェクションテレビ等の人間が視認する用途を想定して設計されたデバイスであり、レーザ加工で用いられるような数百W～数kWの高出力レーザに対する高い耐光性は有していなかった。高出力レーザをLCOSに照射

図8　高出力レーザ対応モデルのLCOS構造



した場合、構成材料のカバーガラス、配向膜、透明電極、金属反射ミラー、液晶材料に不可逆な熱損傷を与えてしまうためである（**図7**）。LCOSを高出力レーザで使用する場合、入射光吸収による発熱、熱や光による液晶材料の変質を防ぐことが重要となる。

そのため、高い耐光性が要求される用途においてはMEMS（Micro Electro Mechanical Systems）技術を用いたDLP（Digital Light Processing）やガルバノミラーが選択される傾向があった。

高出力レーザ対応のSLM-310のLCOSは、**図8**のような構造を有している。冷却効率向上のために、カバーガラスは熱伝導性の高いサファイアガラスプレートを採用し、冷却能力の高い水冷ヒートシンクで強制冷却する構造となっている。耐光性向上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配向膜ではなくSiOx無機配向膜、金属反射ミラーは光吸収の少ないSiO_2とTa_2O_5からなる誘電体多層膜を採用した。液晶材料は共役系の小さい（反応性の低い）フッ素系化合物との混合物を用いている。

LCOS型SLMが拓くレーザ加工の未来

従来のLCOS型SLMを用いたレーザ加工については、ウエハダイシング、レーザマーキング等の低いレーザパワーを使用する加工に用いられていたが、SLM-310は金属加工等の数kWレベルの高出力レーザに対応可能である。これは加工速度や効率を大幅に向上させる可能性を秘めている。

従来のレーザ加工では、ビーム形状が固定されており、加工対象に応じた柔軟な対応が難しかった。しかし、LCOS型SLMを用いることで、加工中にリアルタイムでビーム形状を動的に変化させることが可能である。これは複雑なパターンによる微細加工、非対称ビーム形状を成形することによる切断・溶接の品質向上、さらには多点同時照射による加工効率の向上が実現される可能性がある。

ステンレスやアルミニウムなどの中厚板の高速切断、航空宇宙部品の高精度加工、金属3Dプリンティングの造形制御など、これまで困難だった加工に応用できる可能性がある。さらに、LCOS型SLMによるビーム成形は、熱影響を最小限に抑え、材料の変質や歪みを防ぐことにも貢献可能である。

今後は、AIやセンサ技術とLCOS型SLMを組み合わせた、加工対象の状態に応じて照射パターンを自動最適化する加工システムの実現も期待できる。これは、製造業の自動化・高効率化を加速させたものづくりへの一歩ともなる可能性がある。

LCOS型SLMと高出力レーザの融合は、光制御技術の枠を超えて、加工技術そのものの概念を塗り替えつつある。この革新が、次世代の製造現場にどのような変化をもたらすのか、その未来に大いに期待したい。

参考文献
(1) Y. Sakurai et al.: IEEE Phton. Technol. Lett. 23(14), 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) 音羽他, 第77回応用物理学会春季学術講演会, 14p-B3-10 (2016)
(4) Y. Hayasaki et al.: Appl. Phys. Lett. 87, 031101 (2005)

LFWJ