

## 気になる論文コーナー

## 並列レーザーマイクロ加工のためのアドレス可能なマイクロレンズアレイ

Addressable Microlens Array for Parallel Laser Microfabrication  
[P. S. Salter and M. J. Booth: Opt. Lett, 36, No. 12 (2011) 2302-2304]

フェムト秒レーザー加工は、サブミクロンスケールの分解能で高精度に加工できるツールとして近年さかんに研究が行われており、光導波路やフォトニック結晶を含む三次元光デバイスの作製、および金属や誘電体表面の修飾応用に用いられている。実用的な大きさを有する光デバイス作製への微細加工の適用には膨大な加工時間を要するため、スループットの改良が課題となる。その課題に対するひとつの解は、光学素子により空間的に分割されたレーザービームを用いた並列同時加工である。これまでに、計算機ホログラムやマイクロレンズアレイを用いた方法が提案されている。従来法ではレンズアレイが固定の素子であるため、任意な加工パターンに対しては不向きであった。著者は、固定のレンズアレイを用いた方法に空間光変調素子 (SLM: spatial light modulator) を組み合わせ、任意パターンにも対応できる柔軟な並列加工システムを提案した。

SLM は 4f 光学系を用いてレンズアレイに結像され、SLM 上の 30×30 画素の領域  $s$  が 1 個のレンズ (500  $\mu\text{m}$ ) に対応する。レンズアレイによって生成された集光ビームアレイは、縮小光学系を介してサンプルに照射される。本加工システムは、以下の 3 つの新規性を備えている。1 つ目は加工パターンの制御である。SLM 上の任意の領域  $s$  に

チェッカー模様のバイナリー位相を表示し、集光ビーム強度を空間的に分散させることで、任意位置での加工のオン・オフを制御している。これは、フェムト秒レーザー加工における加工閾値の非線形性をうまく利用した方法である。2 つ目は集光ビームアレイ強度の均一化である。通常、レンズアレイに入射するビーム強度はガウシアン分布を有するため、レンズアレイの端部分での加工径に比べて中心部分での加工径は大きくなる。そのため、各加工径にばらつきを生じる問題があった。この問題に対して著者は、SLM 上の任意の領域  $s$  内の数画素にランダムに  $\pi$  変調を与えることで、集光ビーム強度を減衰させ、ビームアレイ強度全体の均一化を行っている。3 つ目は、各集光ビームアレイの面内方向移動の任意制御である。SLM 上の任意の領域  $s$  に位相グレーティングを表示することで、集光ビームの面内方向移動を制御している。(図 4, 文献 11)

固定素子であるマイクロレンズアレイに、SLM の特徴である柔軟性をうまく組み合わせた加工システムである。機械的なスイッチング素子を一切使用せずに、集光ビームアレイ強度や面内方向移動の制御を SLM 1 台で担っている点がシステムとして美しく、興味深いと感じた。(長谷川 智士)

## 結合系レーザーカオスを用いた乱数生成器の同期と暗号への応用

Synchronization of Random Bit Generators Based on Coupled Chaotic Lasers and Application to Cryptography  
[I. Kanter, M. Butkovski, Y. Peleg, M. Zigzag, Y. Aviad, I. Reidler, M. Rosenbluh and W. Kinzel: Opt. Exp., 18, No. 17 (2010) 18292-18302]

乱数生成器は情報セキュリティや大規模数値シミュレーション分野において必要不可欠な技術である。特に情報セキュリティ応用においては、乱数の予測不可能性や暗号鍵配送問題など、多くの要求を満足する必要がある。決定論的な乱数生成方式として擬似乱数生成器が多く用いられるが、擬似乱数生成器は予測可能であるため、情報セキュリティ上の大きな問題点を有している。そこで近年、半導体レーザーカオスを用いた物理乱数生成器が多くの注目を集めており、Gb/s を超える生成速度での乱数生成を実現している。ここで物理乱数による暗号鍵配送が可能であるかということは、情報セキュリティ応用上重要な研究課題である。そこで本研究では、相互結合された 2 つの半導体レーザーに基づく物理乱数生成器の同期方法の提案と実証を行った。強力な計算パワーを有しておりすべてのレーザーパラメーター値が既知である盗聴者に対して、情報理論的解析手法を用

いた安全性の評価を行った。一方結合よりも相互結合のほうが同期しやすいという物理現象を利用することにより、相互結合された正当ユーザー間での情報量が、一方結合された盗聴者よりも多くの情報量を有していることを理論的に証明した。また、半導体レーザーの数値モデルを用いて、半導体レーザーにランダムに光変調を加えて相互結合することで、暗号鍵配送方式の実証を行った。レーザー出力信号からカオス同期信号を除去することで、乱数の共有に成功した。さらに、三者以上の正当ユーザー間における安全性の評価を行い、ネットワークへの適用が可能であることを示した。(図 7, 文献 24)

本方式は計算量的セキュリティとは異なる新たな情報理論的セキュリティ方式をレーザーのカオス同期現象を用いて実装している点で非常にすぐれており、今後の進展が期待される。(内田 淳史)

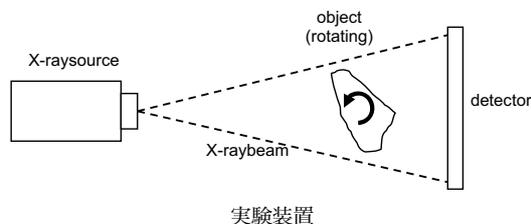
## X線シルエット形状復元法による三次元モデリング

Three-Dimensional Modeling Using X-Ray Shape-from-Silhouette  
[E. Simioni, F. Ratti, I. Calliari and L. Poletto: Appl. Opt., 50, No. 19 (2011) 3282-3288]

歴史的な文化遺跡や古代工芸品の分析において、粘土や腐食物などで完全に覆われてしまった物体を復元するために、あらかじめその三次元形状がわかっていることが望まれており、X線トモグラフィーを用いた非侵襲的な検査技術が利用されている。しかし、全周囲からの多数のX線投影像が必要であるため、計測と復元処理に長い時間を必要とする。本論文では、物体内部に隠された構造物の三次元情報をX線領域におけるシルエット形状復元法を用いて抽出する手法を提案している。シルエット形状復元法は可視光領域における3Dモデリング法として知られており、全周囲から撮影した物体のシルエット画像から物体の輪郭を取り出し、これを統合することにより物体の三次元体積情報を得る手法である。提案手法の利点として、回転角のステップサイズが $10^{\circ}$ ~ $20^{\circ}$ であり、従来のX線トモグラフィーが $1^{\circ}$ 程度であることから大幅な計測時間と処理時間の短縮ができること、また、X線のエネルギーが大幅に削減できることがあげられている。計測システムは、X線光源、ディテクター、自動回転移動ステージで構成されており、回転ステージを $360^{\circ}$ 回転することにより全周囲計測することができる。撮影は鉈が多数配置された紙の箱の中に物体を入れて行われる。キャリブレーションは箱の鉈の位置に基づいて行われる。テ

スト物体を用いてキャリブレーションアルゴリズムの確認を行い良好な結果を得ている。紀元前6~7世紀のペンダントに対して、90 kV-10 W、1画像あたり積分時間140 ms、角度ステップ $9^{\circ}$ で40枚の撮影を行い、内部に隠された人型物体の三次元構造を得ている。(図8, 文献13)

物体内部に隠れた構造物の三次元計測を簡単な計測システムで行っている点が興味深い。(吉川 宣一)



## 導波モード共鳴格子を用いた空間変調型波長フィルター

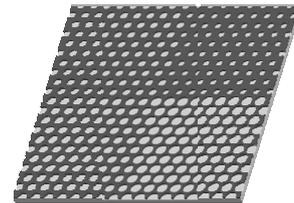
## Azimuthally Varying Guided Mode Resonance Filters

[Z. A. Roth, P. Srinivasan, M. K. Poutous, A. J. Pung, R. C. Rumpf and E. G. Johnson: *Micromachines*, 3, No. 1 (2012) 180-193]

本論文は、導波モード共鳴格子を用いた新しい空間変調型波長フィルターの提案と実証について述べている。導波モード共鳴格子は、帯域幅数オングストロームの反射型波長フィルターを実現できることから、波長多重光通信用フィルターや物質の濃度（屈折率）センサーとしての応用が期待されている。その構造は導波層とサブ波長格子からなり、反射スペクトルは構造パラメータに依存する。著者らは、偏光無依存なフィルターにするために図のような六方配列構造にし、その穴径を中心からの方位ごとに変調した構造を提案している。石英ガラス基板上に導波層として窒化シリコン膜を形成し、その上に格子周期 1150 nm の石英格子の穴径を 300 nm から 500 nm まで変調することで、反射光のピーク波長が 1538 nm から 1555 nm へシフトする。この構造にガウシアンビームを垂直入射し反射光の強度分布を観測する。穴径と共鳴波長ピークの対応から、ある方位に強い反射光強度分布が得られると、入射ビームの波長がわかる。さらに、著者らは穴径を変調するためにアナログマスクとバイナリマスクを用いた 2 回露光法を用いている。その結果、作製した素子の穴径は設計値と若干ずれが

あったが、方位角に対する穴径の連続的な変化は保たれており、1 nm あたり 28 度の方位の変化が得られた。（図 16、文献 22）

方位ごとに空間変調した共鳴格子を作製することで、入射ビーム程度のコンパクトな分光器として利用できるのが興味深い。今後は、その特性を利用した高速な屈折率センシング等への利用が期待される。（水谷 彰夫）



方位ごとに穴径を空間変調した共鳴格子の模式図

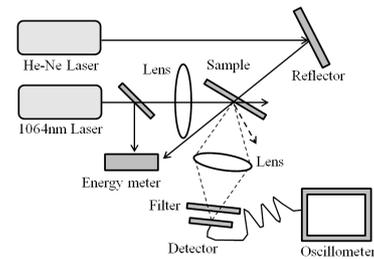
## 波長 1064 nm のレーザー照射で誘起された ITO 膜ダメージの膜厚依存性

## Thickness Effect on Laser-Induced-Damage Threshold of Indium-Tin Oxide Films at 1064 nm

[H. Wang, Z. Huang, D. Zhang, F. Luo, L. Huang, Y. Li, Y. Luo, W. Wang and X. Zhao: *J. Appl. Phys.*, 110, No. 11 (2011) 113111]

ITO（酸化インジウム・スズ）に代表される透明導電膜は、液晶や有機 EL などの薄型テレビをはじめ、太陽電池、タッチパネル等の透明電極として利用され、われわれにとって身近で有益な製品に必要不可欠である。本論文では、レーザー照射に対する透明導電膜の耐力性について、その膜厚依存性を実験的に明らかにした。波長 1064 nm のパルスレーザービームを異なる厚みの透明導電膜にそれぞれ照射し、材料にダメージを与える。参照光である He-Ne レーザーの散乱光の増加を検知することで、それぞれの膜厚におけるレーザー耐力性を測定した。レーザー耐力性は膜厚が小さいほど大きく、膜厚 50 nm のときのそれは、300 nm のときのそれよりも 7.6 倍大きい結果が得られた。また、導電膜の X 線回折パターンより、キャリア密度が膜厚に依存していることが示唆された。著者らは、膜厚が小さくなるとキャリア密度が減少し透過率が增大するため、膜厚が小さいときほどレーザー耐力性が大きくなったと考えている。（図 5、表 2、文献 19）

本論文による検証は、透明導電膜をレーザーパターニングして透明電極を作製する手法に有益な指標である。透明導電膜の材料開発における今後の展開に期待したい。（高田 健治）



透明導電膜のレーザー耐力性評価の実験光学系

## 波長可変レーザービーム成形

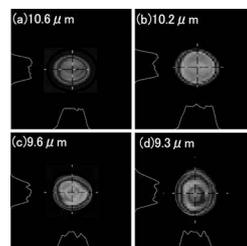
## Wavelength Tunable Laser Beam Shaping

[A. Forbes, F. Dickey, M. DeGama and A. du Plessis: *Opt. Lett.*, 37, No. 1 (2012) 49-51]

回折光学素子（DOE：diffractive optical elements）によるレーザービームの成形は、レーザー加工等に用いられ、産業界でも使用例が増えつつある。レーザービームに対して空間的に位相分布を形成して回折効果によりレーザービームを成形する手法は、レーザービームの部分的な遮蔽などにより強度分布を与えるレーザービーム成形手法と比較して、レーザービームのエネルギー利用率を高くすることができるというメリットがある。一方、通常、DOE は光学素子の空間的な厚み分布で位相差分布を形成しており、レーザー波長が変化すると位相差分布も変化するため、従来はレーザー波長変更には対応できなかった。本論文の著者らは、DOE およびフーリエ変換レンズによりレーザービーム形状を成形する手法において、フーリエ変換レンズの焦点距離  $F$  と DOE との距離  $z$ 、設計波長  $\lambda'$  および実際のレーザー波長  $\lambda$  がある条件を満たすことで、レーザー波長  $\lambda$  によらず所望のビーム形状を得られることを計算により見いだした。また、実際にビーム品質  $M^2 = 1.13$  の連続波発振の炭酸ガスレーザーを用いて、ビーム形状変換素子との距離を調整するのみで、波長 9.3  $\mu\text{m}$  から波長 10.6  $\mu\text{m}$  において、波長によらずフラットトップのビーム形状が得られること

を実証した。本手法では成形後のビーム径もスケールアップされており、1 つの素子で成形後のビーム径を変更することも可能である。（図 3、文献 6）

従来は不可能と考えられていた位相分布によるビーム成形でのレーザー波長変更を可能とする技術であり、広い波長領域を有する超短パルスレーザーのビーム成形や、複数波長を用いたレーザー加工用途への応用が期待できる。（桂 智毅）



実験で得られたビーム形状の波長依存性