

### マルチモードファイバーによる結像の解像限界

Resolution Limits for Imaging through Multi-Mode Fiber

[R. N. Mahalati, R. Y. Gu and J. M. Kahn: Opt. Express, 21, No. 1 (2013) 1656-1668]

単ファイバーかつ走査ユニット不要となる将来の超小型内視鏡技術として、MMF (multi-mode fiber) と SLM (spatial light modulator) を利用したシステムが考案されている。本論文では、この新しい内視鏡における解像限界と、その実現方法を示している。

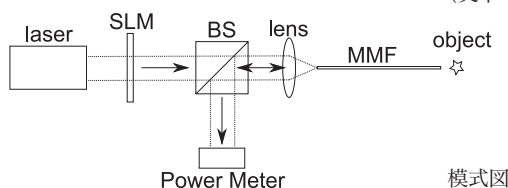
システムは、次のような構成になっている。MMF の入口側に配置された SLM で、入射光の (振幅と) 位相を変調することで、MMF の出口側にある物体に、さまざまな強度パターンを照明する。その強度パターンと SLM による変調パターンの関係は、あらかじめ測定 (または計算) しておく。物体からの反射光は、再びファイバーを通して入口側に配置された (単ピクセル) 測定器に至り、その強度が計測される。多数の既知パターンに対する反射強度を測定し、それらのデータから、物体の反射率分布を計算によって復元するのである。

SLM 変調によりスポット状の照明を物面に形成・走査させることによって、物体各点の反射率を計測する手法等は提案されていたが、本論文ではその照明強度パターンを既知のランダム分布にし、各照明パターンに対する反射強度をもとに最適化計算で物体の反射率分布を復元する。この手法は、スポット走査の場合と比較して実効的な PSF

(point spread function) のサイズを 2 分の 1 にできると述べられている。物面に照明スポットを形成するときは、MMF を通る電場モードの組み合わせで作るのに対して、ランダム強度パターンの組み合わせによって物体上の一点を表現する場合は、強度モードの組み合わせとなる。MMF を通すことができる電場のモード数が  $N$  のとき、(強度が振幅の二乗であることから) 強度のモード数は最大  $4N$  となるため、このような解像度の向上が実現できるのである。(図 6, 文献 32)

将来的には髪の毛ほどのファイバーで、従来は不可能だった脳内等の直接的な観察ができるようになるといわれており、興味深い。

(奥平 陽介)



模式図

### フェムト秒レーザー誘起融解ダイナミクスの時間分解観察

Time-Resolved Studied of Femtosecond-Laser Induced Melt Dynamics

[C. Unger, J. Koch, L. Overmeyer and B. N. Chichkov: Opt. Express, 20, No. 22 (2012) 24864-24872]

フェムト秒レーザー加工は、レーザーのパルス幅が励起された自由電子のエネルギー緩和時間 (数 ps) よりもきわめて短いため、熱影響を最小限に抑えた高精度な微細加工を可能とする。Au や Ag を含む貴金属を材料とした際のフェムト秒レーザー加工において、材料の電子・フォノン結合は、Cr や Mo を含む他の金属と比べて比較的弱く、自由電子のエネルギー緩和時間はより長くなるため、熔融層が基盤上に長時間存在する。そのため、通常のアブレーションダイナミクスとは異なるプロセスをたどることで、回折限界以下の大きさを有するマイクロバンプやナノジェットとよばれる高アスペクトな構造物が生成される。その特異な構造は、金属表面のテクスチャリングやトライボロジー制御、およびプラズモニクデバイス作製への応用に期待されている。この技術の特徴は、低フルエンスのシングルショット加工であるため、不要なデブリを伴わずフォトンコストが安い点にある。近年、これら構造物の生成過程に関するいくつかのシミュレーションが報告されているが、実験的に観測した報告は、本論文が最初である。(図 7, 文献 42)

実験光学系は、ポンプ・プローブ法を用いた時間分解計測に基づく、加工用の光源には、パルス幅 30 fs、中心波長 800 nm の Ti:Sapphire 再生増幅フェムト秒レーザーを、観測用の光源には、パルス幅 9 ns、中心波長 532 nm の Nd:YAG レーザーの二倍波を用いた。実験系の時間分解能は 10 ns、最大遅延時間は 500 ns であった。実験では、ガラス基板上の厚さ 60 nm の金薄膜に対し、集光スポット 6  $\mu\text{m}$ 、フルエンス 0.39 J/cm<sup>2</sup> の条件下でフェムト秒パルス照射した際の、マイクロバンプやナノジェットの生成過程を観察した。結果より、熔融層と固体層との密度差による歪みの発生と基盤による抑制効果によって、基盤に垂直な方向に応力が働きバンプやナノジェットを形成し、さらに表面張力によってジェットの先端に球状の構造を形成することが示された。また、構造物の形成には、パルス照射時からおよそ 250 ns の時間を要し、その時間はフルエンスに依存することが明らかになった。

本論文で得られた知見は、構造物の高効率作製や高精度な形状制御に役立つと期待され、産業応用において重要な結果であると感じた。

(長谷川智士)

### サブ波長金属キャビティー半導体レーザーの電流注入による室温連続発振

Record Performance of Electrical Injection Subwavelength Metallic-Cavity Semiconductor Lasers at Room Temperature

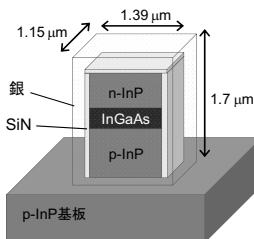
[K. Ding, M. T. Hill, Z. C. Liu, L. J. Yin, P. J. van Veldhoven and C. Z. Ning: Opt. Express, 21, No. 4 (2013) 4728-4733]

著者らは、波長 ( $\lambda = 1591 \text{ nm}$ ) に比べて小さな、 $1.15(\text{W}) \times 1.39(\text{L}) \times 1.7(\text{H}) \mu\text{m}^3 (= 0.67\lambda^3)$  の InP/InGaAs ダブルヘテロ構造を金属 (銀) で埋め込んだ微小キャビティーレーザーを作製し、電流注入による室温連続レーザー発振に成功した。金属を用いたレーザーは、光を回折限界以下の微小領域に閉じ込めることで、小型化、低閾値化、高速化など、さまざまな利点が期待されるため、近年活発に研究が進められている。しかし従来は、金属内部における光吸収が支配的となり、電流注入による室温連続発振は難しいとされていた。これに対して著者らは、自身の先行研究 (文献 21) において、2012 年に初めて室温での連続発振に成功している。

本論文では、文献 21 の技術をさらに改善することにより、キャビティーの  $Q$  値を大幅に向上させ、従来の半導体レーザーと同様の特性を実証している。具体的には、電子線描画プロセス、エッチングプロセス、銀の蒸着プロセス、表面処理プロセスの改善をそれぞれ行い、SiN 層の厚みを最適値に制御することにより、レーザー発振  $Q$  値を 3182 まで向上させ、レーザー線幅を 0.5 nm まで狭くすることに成功している。これらの値は、金属キャビティー型サブ波長レーザーとし

ては、これまでに報告されていたものの中で最高の特性である。(図 3, 文献 36)

素子の構造や原理は、先行研究において提案されているものの延長であり目新しくないが、このようなサブ波長金属キャビティーを用いて、従来の半導体レーザーと同様の特性を初めて実証したという点が重要である。LSI チップ内部の光配線や光センシングへの応用可能性を示唆するものであり、大変意義深い成果である。(種村 拓夫)



金属 (銀) を用いた微小キャビティー InP/InGaAs レーザー

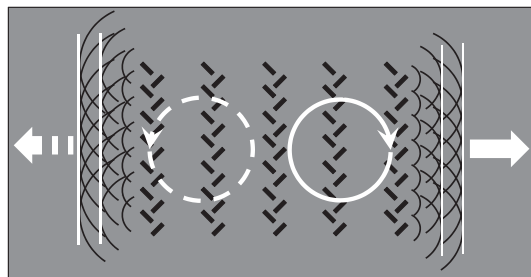
## 表面プラズモンの結合方向を偏光によって制御可能な結合器

Polarization-Controlled Tunable Directional Coupling of Surface Plasmon Polaritons

[J. Lin, J. P. B. Mueller, Q. Wang, G. Yuan, N. Antoniou, X.-C. Yuan and F. Capasso: Science, 340 (2013) 331-334]

表面プラズモンポラリトン (SPP) は、回折限界以下の領域に集光できることから、光エレクトロニクス分野などへの発展が期待されている。しかし、外部光から SPP を励起する場合は、溝やリッジ状の散乱体に垂直な直線偏光成分をその方向へ結合させることしかできない。本論文では、図のように傾けた 2 列のナノスリットアレイを提案した。個々のスリットは、右または左方向へ結合させる一種のフェーズドアレイアンテナとして機能する。スリットの傾きを  $45^\circ$  と  $135^\circ$  としてお互いに直交させ、両スリット間の距離を適切に選ぶことで、垂直入射光の右円偏光成分を右側へ、左円偏光成分を左側へ結合できることを実証した。また、入射偏光を変えると左右の結合比を変えることができる。結合器は、厚さ 150 nm の金薄膜に、幅 50 nm、長さ 200 nm のスリットを縦方向に 300 nm、横方向に 600 nm の間隔で集束イオンビーム加工することで作製した。波長 633 nm の光を垂直入射し、異なる偏光に対する SPP 励起の様子を近接場光学顕微鏡で観測し、理論モデルと一致することを確認した。また、他の実演例として、2 列スリットを円環状に配置することで、右円偏光成分は内側へ、左円偏光成分は外側へ結合できることを示した。(図 4, 文献 21)

単純な構造を用いて、偏光により結合方向を制御できるのが興味深い。今後は、積極的に偏光情報を利用したプラズモニックデバイスへの応用が期待される。(水谷 彰夫)



2 列ナノスリットアレイ結合器

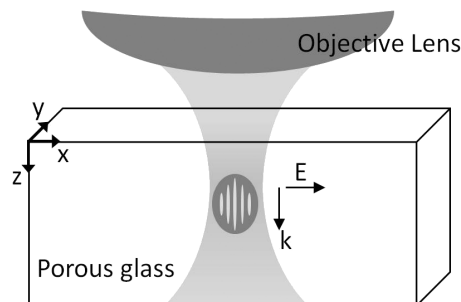
## フェムト秒レーザー照射による多孔質ガラスへのナノ構造作製

Femtosecond Laser Nanostructuring in Porous Glass with Sub-50 nm Feature Sizes

[Y. Liao, Y. Shen, L. Qiao, D. Chen, Y. Cheng, K. Sugioka and K. Midorikawa: Opt. Lett., 38, No. 2 (2013) 187-189]

フェムト秒レーザーの集光照射によりガラス内部に三次元構造を構築し、光導波路やミラー、レンズ等のマイクロ光学素子を集積化する研究は盛んに行われている。フェムト秒レーザーの集光照射プロセスの特徴としては、ガラス内部の任意の位置に三次元構造を形成できる点、回折限界以下の大きさの構造物を形成できる点が挙げられる。本論文では、入射パルスエネルギーを制御し、ガラス内部にボイドが形成される閾値付近のエネルギーを照射することで、幅 37 nm という超微細なボイドを形成することに成功した。実験では、波長 800 nm、パルス幅 100 fs、繰り返し周波数 250 kHz の直線偏光のレーザー光を、 $NA = 1.10$  の対物レンズを用いて多孔質ガラス内部に集光照射した。レーザーの走査方向と偏光方向、および入射パルスエネルギーを変化させて実験した結果、ガラス内部に形成されるボイドの長軸は常にレーザーの偏光方向と垂直な方向になることが明らかになった。また、材料の非線形な光学応答を利用したナノ構造の形成では、入射パルスエネルギーが非常に敏感に影響することが示唆された。(図 4, 文献 14)

医療やバイオ化学、環境等のさまざまな分野の分析用のマイクロチップの作製手法として、フェムト秒レーザーの集光照射プロセスが応用されることを期待する。(高田 健治)



ガラス内部へのフェムト秒レーザーの集光照射

## 液体光導波路レンズと Nd:YAG ロッドを用いた 120 W 連続波太陽光励起レーザー

120 Watt Continuous Wave Solar-Pumped Laser with a Liquid Light-Guide Lens and an Nd:YAG Rod

[T. H. Dinh, T. Ohkubo, T. Yabe and H. Kuboyama: Opt. Lett., 37, No. 13 (2012) 2670-2672]

太陽光を用いた効率的なシステムとして、マグネシウム (Mg) サイクルが提案されている。これは、Mg の化学反応によって生じるエネルギーをエンジンや燃料電池に使用し、反応生成物である MgO を太陽光励起レーザーにより Mg に還元する、化石燃料を使用しないエネルギーサイクルである。そこで、著者らは、太陽光励起レーザーの変換効率を高めるために冷却水による新しい集光構造とレーザー媒質について検討した。励起光を円錐型のキャビティー内に閉じ込め、端面と側面から励起するハイブリッド励起構造に加えて、レーザー媒質の周りに冷却水を満たすことで冷却水がレンズの役割を果たす構造 (LLGL; liquid light-guide lens) を用いて、レーザー媒質への励起パワーを高めている。その結果、伝搬ロスが減らすことができ、LLGL を用いなかった場合の 2 倍の出力 (120 W)、スロープ効率 2 倍、閾値励起パワー 0.7 倍が得られた。LLGL を用いた励起キャビティー内でのレーザー媒質への吸収パワーは 1.2 倍に増加し、太陽光の単位入射

面積あたりのレーザー出力は 1.5 倍 ( $30 \text{ W/m}^2$ ) であった。レーザー媒質については、Cr:Nd:YAG と Nd:YAG の散乱係数を実測にて見積もった結果、Cr:Nd:YAG のほうが 2 倍大きいことがわかった。そのため、Cr:Nd:YAG でのレーザー出力は、Nd:YAG を用いた場合よりも 0.7 倍となる。しかし、Cr:Nd:YAG は吸収波長域が広く、高生産性という優位性があるため、今後は散乱ロスを抑えた組成について研究が必要である。(図 4, 表 1, 文献 10)

本論文では、太陽光を励起光源としたレーザー出力の太陽光入射面積に対する効率向上に取り組んでいるが、今回の検討では、フレネルレンズに気泡や傷が入っていたことや、キャビティーの反射面を手研磨していることなどを考慮すると、さらなる高効率化が見込まれ、Mg を用いたエネルギー分野だけでなく、宇宙分野などさまざまな分野での応用が期待される。(多久島 秀)