

気になる論文コーナー

デュアル補償光学を用いたダイヤモンド内部の三次元レーザーマイクロ加工

Three Dimensional Laser Microfabrication in Diamond Using a Dual Adaptive Optics System
[R. D. Simmonds, P. S. Salter, A. Jesacher and M. J. Booth: Opt. Express, 19, No. 24 (2011) 24122-24128]

ダイヤモンドは、硬度の高さ・熱伝導率の大きさ・光透過波長帯の広さ・化学的安定性において、きわめてすぐれた特性を有する。著者らは、フェムト秒レーザーを用いたダイヤモンド内部の高精度な三次元加工法を報告した。レーザー加工の高精度化は、液晶空間光変調素子 (SLM: spatial light modulator) と可変形状ミラー (DM: deformable mirror) から成るデュアル補償系を用いた光学系の収差補正により達成された。通常、材料内部の加工において、空気と材料間の屈折率ミスマッチに起因する集光点の歪み (球面収差) が、光軸方向分解能や加工効率を低下させる。加えて、高開口数対物レンズを用いて高屈折率 ($n=2.4$) を有するダイヤモンド内部を加工する場合、球面収差の影響がより顕著となる。本論文の新規性は複数の補償系を並列に駆動させ、より高精度な三次元加工を実証した点にある。補償系としての DM は、大きな位相変調量を有する反面、空間解像度が低く、高次の収差補正には不向きである。一方、SLM は高い解像度を有するが、位相変調量が小さいため、大きな収差に対する位相共役像は 2π 以内

に折り畳まれて SLM に表示され、この影響によって収差は十分に補正されない。また、位相差を折り畳んで補正したフェムト秒パルスは光路差が発生してしまうため、集光点でのピーク強度は低下する。著者らは、DM と SLM の補償系の利点を組み合わせて、位相跳びのない共役像を得ることで、より高い精度で収差を補正した。実験は、SLM のみを補償系として用いたときと、DM と SLM の両方を補償系として用いたときとで、油浸対物レンズ ($NA=1.4$) を用いて加工された構造物の光軸方向分解能や加工閾値を比較し、デュアル補償系の有効性を示している。(図 5, 文献 22)

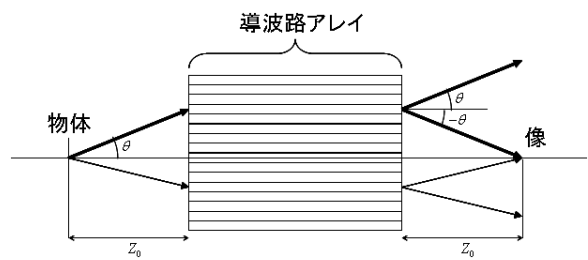
各補償系の得意な部分をうまく組み合わせて欠点を補うという、一見当たり前で単純な発想が、非常に効果的な結果を生み出している。本手法は、三次元フェムト秒レーザー微細加工だけでなく、非線形光学顕微鏡観察においてもきわめて有効であり、今後の応用展開が期待される。(長谷川智士)

可視光における負の屈折とレンズ効果：導波路アレイを用いた実験

Negative Refraction and Lensing at Visible Wavelength: Experimental Results Using a Waveguide Array
[J. A. Ferrari and E. Frins: Opt. Exp., 19, No. 14 (2011) 13358-13364]

負屈折率やスーパーレンズ効果は、メタマテリアルを用いることにより、現実の現象として認められるようになった。この論文では、メタマテリアルでなくても導波路アレイを用いることにより、「負の屈折」や「レンズ効果」のような振る舞いが得られることを実験で示した。波長に比べて開口の大きな導波路に対して斜めに入射した光は、円錐状の光として出射される。この円錐状の光の中には、負の屈折のように振舞う成分が存在すると解釈できる (図中の 1 つの導波路の要素からの出射光は、円錐状の光の断面)。さらに、導波路アレイのすべての要素からの負に屈折したとみなせる成分の光が足し合わされることで、物体から出射した光が結像する。この結像では、物体から導波路アレイの入射面までの距離と、出射面と像までの距離は等しい。論文では市販のファイバーバンドルを用いて、 $Z_0=3.5$ mm の条件でバーチャート等を結像させる実験を行っている。(図 7, 文献 19)

知られている現象に対して「負屈折率」という別の解釈を与え、ファイバーバンドルのような従来から存在する素子で結像が可能であることを示したのは面白い。(鳥羽 英光)



導波路アレイを用いた「負の屈折」の概念図

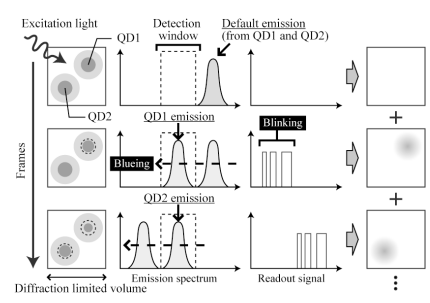
結像に寄与しないノイズ成分がかなり大きいであろうが、以前から

量子ドット発光の青色化と明滅効果を利用したナノスケール顕微観察

Quantum Dot Blueing and Blinking Enables Fluorescence Nanoscopy
[P. Hoyer, T. Staudt, J. Engelhardt and S. W. Hell: Nano Lett., 11, No. 1 (2011) 245-250]

量子ドットは、微小半導体材料中の電子の閉じ込め効果に基づくエネルギー準位の離散化を利用した発光材料として広く知られており、高量子収率、高い光退色耐性、シメトリックな蛍光スペクトルといった特長をもつ。本論文では、量子ドットに特有の性質である表面酸化に伴う蛍光スペクトルの「青色化」と発光時の電子のランダム過程に起因する「明滅効果」を積極的に利用することにより、これまで有機色素を用いた蛍光修飾が一般的とされていた走査型の超解像顕微観察技術 GSD 法 (ground state depletion microscopy) のさらなる性能向上を実現する方策を提案している。検証実験の結果、量子ドットの寸法程度 (10 nm 前後) の空間分解能が実現されたことに加え、系の簡易化に関する方策としてウェブカメラを用いたデモ実験についても言及されている。(図 5, 文献 36)

特に、量子ドットの質の向上という観点からは抑制因子とされている青色化と明滅効果を有効に活用するという着想は、他の応用分野への波及効果も期待される。(堅 直也)



量子ドットを用いた GSD 法の基本原理

修飾したシリコン基板上的金ナノディスクを用いた近赤外ガスセンシングの試み

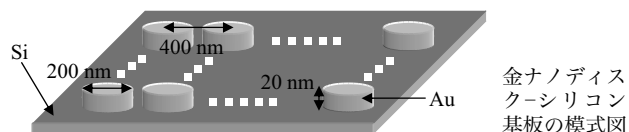
Demonstration of Near Infrared Gas Sensing Using Gold Nanodisks on Functionalized Silicon

[P. J. Rodríguez-Cantó, M. Martínez-Marco, F. J. Rodríguez-Fortuño, B. Tomás-Navarro, R. Ortuño, S. Peransí-Llopis, A. Martínez: Opt. Exp., 19, No. 8 (2011) 7664-7672]

表面プラズモンは、金属と誘電体との境界面で伝達する電磁波であり、電磁場が表面近傍にトラップされる結果、金属表面上では電場が増強される。これを利用したセンシング技術が近年注目されており、特に金属ナノ粒子の局在表面プラズモン共鳴 (LSPR) は、粒子の大きさや形状により共鳴波長や電場増強度が変化することから、金属ナノ構造を利用した高感度分析に応用する研究がさかんに行われている。一方、測定分子の金属表面への固定化は、金属表面に修飾した分子による化学結合や吸着などによるものが多く、再利用時にはアルカリや酸による測定分子の除去が必要となり、金属ナノ粒子・ナノ構造にダメージを与える。そこで、本論文では、シリコン基板上に金ナノディスクを作製し、シリコン上に修飾した分子によりトラップされた測定分子を金ナノディスクの LSPR 波長変化によりモニターしている。金ナノディスクは厚さ 20 nm、直径 200 nm、間隔 400 nm であり、一般的な電子線リソグラフィによりシリコン基板上に作製した。その後、修飾基としてイソシアン酸 3- (トリエトキシシリル) プロピルの自己組織化単分子膜を浸漬法によりシリコン上に作製した。測定分子は、エチレンジアミンを用い、作製した基板に噴霧させて、透過スペクトルから LSPR 波長を測定した。その結果、エチレンジア

ミンを噴霧することにより基板の LSPR 共鳴波長がレッドシフトし、噴霧時間が 25 分を超えるとシフト量は一定であった。ラングミュアモデルに基づいて解析した結果、時定数は、 5.16 ± 0.4 min、シフト最大量は 37.8 nm であった。また、センシング後の基板を 150 度で加熱した結果、エチレンジアミンが脱離し、元の基板の LSPR 共鳴波長にほぼ戻ることがわかった。(図 5、文献 27)

本論文は、基板の再利用による低コスト化を目指し、金属表面ではなくシリコン上に修飾した基板を用いることにより、測定分子との結合・吸着力をコントロールした点において、ユニークな手法といえる。今後、基板・修飾基の種類や金属ナノディスクの大きさ・形状などの最適化により、高感度・高選択性で再利用できるプラズモンセンサーの開発が期待される。(鈴木 基嗣)



銀ナノ粒子の表面プラズモンによる高分子発光ダイオードの発光効率の向上

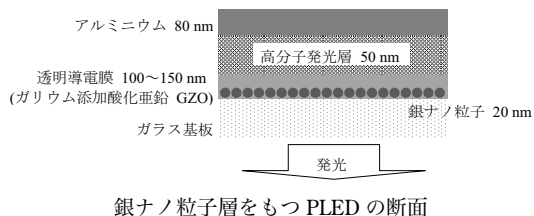
Enhanced Luminescence Efficiency by Surface Plasmon Coupling of Ag Nanoparticles in a Polymer Light-Emitting Diode

[S.-H. Chen and J.-Y. Jhong: Opt. Express, 19, No. 18 (2011) 16843-16850]

フレキシブルな面光源として期待される有機発光材料は、一部実用化されているものの、広い普及にはさらなる高い発光効率求められる。本論文では、透明導電膜とガラス基板の間に設けた銀ナノ粒子層による発光効率向上の効果について述べている。通常、透明導電膜は 100 nm 以下の金属微粒子が溶解する 400°C 以上で成膜する。これに対して著者は、レーザーアブレーションにより、粒径 20 nm の銀を蒸着したガラス基板上に、150°C でガリウム添加酸化亜鉛 (GZO) 導電膜を成膜している。この GZO 膜の最大吸収波長は 465 nm であり、高分子発光層のピーク波長 440 nm とほぼ一致する。銀ナノ粒子層のある GZO 膜と、ない GZO 膜の原子間力顕微鏡像を比較すると、銀ナノ粒子層によって接触電流値の上昇が確認できる。また、X線電子分光分析の結果、GZO 膜のみの場合に比べて、銀ナノ微粒子層をもつ GZO 層ではイオン酸素空孔が 45% 増加し、イオン導電性が高くなった。以上の結果、100 cd/m² の出力を得るための印加電圧は、銀ナノ粒子層のない polymer light emitting diode (PLED) が 7.83 V

であるのに対して、ある PLED は 5.91 V と発光効率が向上したといえる。(図 6、文献 20)

近年、プラズモンによる有機発光材料の発光効率の向上について、数多くの成果が報告されている。金属粒子の材料や形状によって増強される波長や効率が異なることから、粒子の最適化や大面積な粒子層の生成技術が実現すると考えられ、高演色性・高光効率な大面積照明への応用が期待できる。(海老澤瑞枝)



超小型顕微内視鏡用アダプティブ位相補償

Adaptive Phase Compensation for Ultracompact Laser Scanning Endomicroscopy

[A. J. Thompson, C. Paterson, M. A. A. Neil, C. Dunsby and P. M. W. French: Opt. Lett., 36, No. 9 (2011) 1707-1709]

光を走査して画像取得する走査型光学系に必須であるスキャナーは、多くの場合可動部を有する。このため小型化は容易ではなく、使用される場面も限られている。著者は、ファイバーバンドル (FB) と空間光変調器 (SLM) を利用して可動部のない三次元スキャナーを提案し、共焦点顕微鏡や顕微内視鏡への応用を検討している。平行光がビームスプリッター (BS) を透過して SLM に照射されると、SLM に書き込まれた位相情報 (二次元パターン) に従って平行光の波面が変調され、この二次元パターンは 4f 光学系を介して FB 端面上に結像される。もう一方の FB 先端から出射する光はいずれも発散する球面波となるが、個々の球面波の位相には二次元パターンの位相情報が重畳されている。したがって、SLM 上の位相変調量を適当に調整すれば、二次光が波面を形成する、というホイヘンスの原理のアナロジーに従って三次元走査が可能となる。ここでは、先端部径が約 600 μm

で可動部のない顕微内視鏡のデモを実施し、視野範囲 80 μm、深さ方向に 100 μm の走査を達成した。

走査速度は SLM のフレームレートに依存するため高速走査は難しく、FB の各ファイバーへの結合効率が低いという課題はあるが、FB 入射前の位相変調によって FB 出射後の光を三次元走査できることが大変興味深い。(雙木 満)

