

気になる論文コーナー

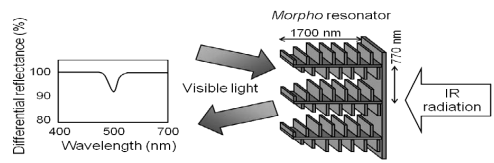
生物由来ナノ構造を用いた熱画像カメラ実現に向けた赤外検出器の開発

Towards High-Speed Imaging of Infrared Photons with Bio-Inspired Nanoarchitectures
 [A. D. Pris, Y. Utturkar, C. Surman, W. G. Morris, A. Vert, S. Zalyubovskiy, T. Deng, H. T. Ghiradella and R. A. Potyrailo: Nat. Photonics, 6, No. 3 (2012) 195-200]

中南米に生息するモルフォ蝶の翅は、鮮やかな輝きをもっている。その輝きは色素によるものでなく、翅表面の鱗粉の特徴的な棚構造で起こる干渉によるものである。本論文は、この翅表面のナノ構造共振器を用いた新しい赤外検出器の提案と、高感度熱画像カメラ実現に向けた検証を行っている。著者らは、図のようにカーボンナノチューブ(CNT: carbon nanotube)を添加したモルフォ蝶の鱗粉構造の裏面から、中赤外線を入射した。すると温度上昇により、鱗粉構造を構成するクチクラとよばれる表皮細胞に、熱膨張と屈折率変化が生じる。その結果、鱗粉構造表面からの可視光反射率が変化する。この反射光変化率と入射赤外光強度の比例関係から、赤外線強度(温度変化)を検出できる。計算モデルと実験値を比較したところ、同様のスペクトルが得られ、構造の周期の変化をもたらす熱膨張効果がスペクトル変化に最も寄与していることがわかった。CNTの光吸収と熱伝導率の高さと、表面積が大きな鱗粉の構造によって、熱容量の小さな可視光共振器が実現でき、0.02 Kの温度変化を、35 Hzの速度までヒートシン

クなしで検知できた。これらの性能は既存の赤外検出器と同等または上回っており、特に撮像素子を構成した場合のピクセルサイズは、従来の25 μmに対し、鱗粉構造の周期0.77 μmまで微細化が可能である。(図5、文献50)

モルフォ蝶の鱗粉構造から熱容量の小ささに着目し、赤外検出器としての利用を考えたのは興味深い。近年盛んな生物由来ナノ構造であるが、デバイス実現に向けては、そのナノ構造の量産技術が鍵となるであろう。(水谷 彰夫)



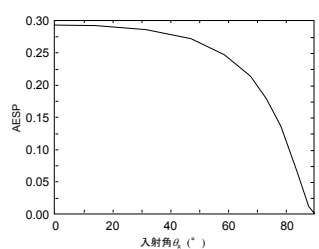
提案する赤外検出器の測定概要

フェムト秒レーザー照射で誘起される金属面上のブレード型周期構造

Femtosecond Laser-Induced Blazed Periodic Grooves on Metals
 [T. Y. Hwang and C. Guo: Opt. Lett., 36, No. 13 (2011) 2575-2577]

材料のアブレーション閾値付近のエネルギーで直線偏光レーザー光を基板上的材料に照射した場合、入射光と基板表面の散乱光の干渉によって、微細なグレーティング構造が自己組織的に形成される。本論文では、グレーティング構造の表面形状がレーザー光の入射角度に大きく依存し、入射角度が大きくなるほどグレーティング構造の表面形状が非対称な形状になることを実験的に見いだした。実験では、波長800 nm、パルス幅60 fs、繰り返し周波数1 kHzのレーザーを用い、照射エネルギー密度0.22 J/cm²、スポットサイズ150 μmの直線偏光光をPt表面に照射した。入射角度が大きくなるほど、形成されるグレーティング構造の周期は大きくなり、また、その表面形状は非対称な形状になった。著者らは、光の干渉効果によって表面に対称な周期構造がいったん形成されるが、単位面積あたりの光吸収量が入射角度の違いによって異なるため、表面が非対称な形状になったと考えてい

る。(図3、文献20)
 本論文による周期構造の形成手法は、回折効率の異なるブレード型回折格子を容易に形成する手法として興味深い。今後の展開に期待したい。(高田 健治)



単位面積・パルスエネルギーあたりの光吸収量(AESP)と入射角度の関係

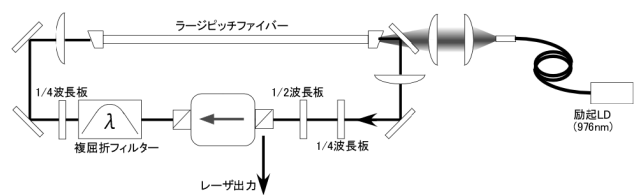
サブ100 fs マイクロジュール級ファイバー発振器による平均出力66 W発生

66 W Average Power from a Microjoule-class Sub-100 fs Fiber Oscillator
 [M. Baumgartl, C. Lecaplain, A. Hideur, J. Limpert and A. Tünnemann: Opt. Lett., 37, No. 10 (2012) 1640-1642]

工業用途や計測用途において、高ピーク出力と高平均出力を両立する超短パルスレーザーが要求されている。ファイバーを用いた超短パルスレーザーは、半導体レーザー(LD: laser diode)で直接励起が可能であり、ファイバーにおける非線形光学効果によって発振スペクトル幅が拡大するために短いパルスを発生可能であるというメリットがある。一方で、超短パルス発生時の非線形光学効果抑制とシングルモード発振の両立が困難で、高平均出力で安定的な超短パルスを発生できないという課題があった。本論文の著者らは、コア径80 μmのラージピッチフォトニック結晶ファイバーを用いて高平均出力領域における高ビーム品質発振を安定化し、ファイバーでの非線形偏光回転効果を利用したNPE (nonlinear polarization evolution) によってモードロックをかけることで、繰り返し周波数76.5 MHz、平均出力66 W(パルスエネルギーは867 nJ)、パルス幅3 psのパルスレーザー発振を実証した。透過型回折格子を用いたパルス圧縮後は、自己相関波形および発振スペクトルから推測したパルス幅は91 fs、平均出力は60 W(パルスエネルギーは780 nJ)で、パルスのピーク出力は7 MWに達すると見積もられた。このピーク出力は、ファイバーレーザーを用いたモードロックレーザーでは世界最高の値である。今回の試験では、

パルスエネルギーおよび平均出力は励起LDの出力(147 W)によって制限されており、本論文と同じ構成で、LD出力を増加することでパルスエネルギー1 μJ以上の発生が可能であると見積もっている。(図4、文献14)

従来のような複雑な増幅器を必要とすることなく、比較的単純な構成で高平均出力、高ピーク出力の超短パルスレーザーの発生が可能であることを実証した。高平均出力を生かしたレーザー加工用途への応用が期待される。(桂 智毅)



超短パルスファイバーレーザー発振器の構成

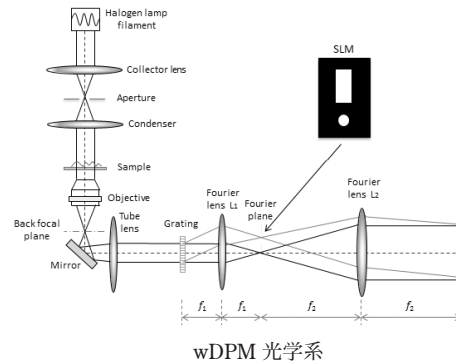
白色光を用いた回折位相顕微鏡

Diffraction Phase Microscopy with White Light

[B. Bhaduri, H. Pham, M. Mir and G. Popescu: Opt. Lett., 37, No. 6 (2012) 1094-1096]

高空間・高時間的感度をもつシングルショット画像を撮影可能な白色光回折位相顕微鏡法 (white light diffraction phase microscopy; wDPM) と、wDPMシステムにおけるノイズ安定手法が提案された。図に示す通り、wDPMシステムはハロゲンランプを用い、振幅回折格子 (格子間隔 $9\mu\text{m}$) を通過した光をフーリエ面で0次光と1次光に分離する。空間光変調器 (SLM: spatial light modulator) により1次光は通過し、ローパスフィルターをかけることにより0次光はDC成分のみが通過する。レンズ系 L1-L2 はマッハ・ツェンダー型干渉計を形成しており、1次光はイメージングフィールド、0次光は参照フィールドとなる。2つの光は干渉像を生成し、像面において CCD で撮像される。CCD により取得した干渉信号はヒルベルト変換をすることにより、定量位相像として取得できる。さらに、wDPM の高フレームレートにより複数の画像を取得し、時空間パワースペクトルを求めてバンドパスフィルタリングを行うことで、サブオングストロームの光路長変化量を測定可能にした。このシステムにより人間の子宮頸部上皮細胞系、ヒーラ細胞を18時間微速度撮影した結果、細胞増殖を

確認し、 $T = 2\text{ h}$ 、 $T = 16\text{ h}$ のときの同じ細胞の位相画像から、定量的な細胞構造を確認した。(図3, 文献21) (渡邊恵理子)



湾曲した網膜に基づいた赤外線カメラ

Infrared Camera Based on a Curved Retina

[D. Dumas, M. Fendler, F. Berger, B. Cloix, C. Pornin, N. Baier, G. Druart, J. Primot and E. Coarer: Opt. Lett., 37, No. 4 (2012) 653-655]

近年、軍事用途、民生用途を問わず、小型軽量で低コストの光学システムが望まれており、それを達成するためにはブレイクスルーが必要な状況となっている。著者らは動物の眼球の網膜にヒントを得て、撮像面がヘミスフェリカル形状に湾曲した撮像素子の開発を行った。著者らの行った方法は特別なプロセスを必要とせず、 $50\mu\text{m}$ 以下まで薄くしたシリコンを、あらかじめ凸面や凹面、またはシリンドリカル形状にしたホルダーに押し当てて引き伸ばすことで作成しており、一般的な製造プロセスをそのまま流用可能な点が特徴となっている。この方法を使用すれば、CMOS や CCD、IR マイクロボロメーターなど、さまざまなデバイスに適用が可能である。実際に、画素ピッチ $25\mu\text{m}$ で 320×256 ピクセルの赤外センサーを使用して、撮像面の曲率半径が 73 mm に湾曲したマイクロボロメーターの作成に成功した。センサー表面の形状測定の結果、非常に高精度に湾曲した形状が再現できていることが確認されている。また、電気的特性を測定した結果、電圧もノイズも通常のものと大きな差はなく、センサー表面に圧

力を加えて変形を起こさせていることによる電氣的なダメージはないことがわかった。さらに、非球面単レンズをこの湾曲したセンサーに組み合わせて光学システムを作成し、MTF測定や実写撮影を行った。その結果、像面湾曲が良好に補正され、通常の平面センサーでは2枚構成のレンズと同等の解像力を単レンズで達成できていることが確認され、実写撮影においてもコントラストの良好な画像が得られた。(図3, 表1, 文献17)

像面湾曲を補正するために撮像面をシリンドリカル形状に湾曲させるという発想は、フィルム時代のカメラでは一般的に行われていたが、それを固体撮像素子に適用し、しかもヘミスフェリカルに湾曲させている点が非常に興味深い。ただ、センサーサイズの小型化が進んでいる中では、撮像面の曲率半径が 70 mm 程度では小型化への効果は十分ではないと思われる。撮像面湾曲量を向上させるなどの、今後の技術進歩に期待したい。(佐野 永悟)

波面収差の像面分布モデル、および歪曲収差と像面湾曲のモデル

Image Field Distribution Model of Wavefront Aberration and Models of Distortion and Field Curvature

[T. Matsuzawa: J. Opt. Soc. Am. A, 28, No. 2 (2011) 96-110]

結像光学系を製造するとき、視野内全体において、要求される収差の基準を満たす必要がある。多くの結像光学系は回転対称に設計されており、その像面における各収差の分布も回転対称である。しかし実際の製造工程では、各光学面の偏心・傾き・面間隔の調整誤差がつきまとい、収差の像面分布は回転非対称の複雑な変化を示す。要求される収差の基準を満たすためには、組み上げた光学系の収差の像面分布を測定し、それを元に次の調整に反映する必要がある。適切な収差の像面分布モデルがあれば、設計と製造が効果的に連携して、光学系を製造することができる。

著者は、物体面と瞳面の座標のべき展開で表される回転対称な光学系の波面収差の像面分布を、各面の微小な変位でテイラー展開する手法を採用することで、微小な変位のある光学系における収差の物体座標依存を表す像面分布モデルを、初めて任意の高次の項まで導出した。著者のモデルの主要な概念は、回転対称な各面の微小な変位で生じる収差の像面分布の回転非対称が、いくつかの回数の回転対称成分

(シフト型・アス型・三つ葉型等) の和で表されること、および、その回数には、対象となる波面収差の回転対称の回数 (球面収差系列・コマ収差系列・非点収差系列等) と、回転対称な状態におけるその波面収差の像面分布の次数に依存して定まる上限があること、である。このモデルの特長は、回転対称な状態における像面分布の最大次数が決まれば、回転非対称の像面分布モデルに必要なすべての項が定まることと、省略可能な項の優先順位が明示されていることである。また、波面収差の像面分布モデルに近軸結像式を合わせて、歪曲収差と像面歪曲のモデルを作成し、既存モデルと比較して本モデルの妥当性も示した。(図4, 表9, 文献15)

筆者が示したモデルは、調整誤差のある光学系の収差がどのように像面上に分布するかを示す、明快なモデルである。調整誤差とそれによって生じる収差の関係をイメージしやすいため、製品開発への利用だけでなく、光学教育にも役立つように思う。(佐藤 陽輔)