

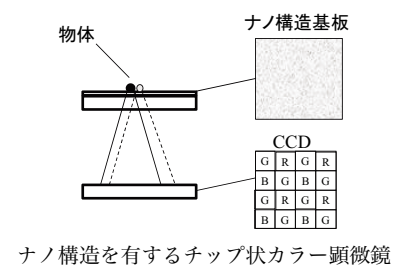
気になる論文コーナー

符号解読によるナノ構造チップ上のレンズフリーカラーイメージング

Lensfree Color Imaging on a Nanostructured Chip Using Compressive Decoding
 [B. Khademhosseini, G. Biener, I. Sencan and A. Ozcan: Appl. Phys. Lett., 97, No. 21 (2010) 211112]

近年、生物学や医学の分野で、研究現場での微量物質の即時評価や医療現場でのその場診断などに向けて、小型・軽量の顕微鏡の開発が進められている。本論文では、レンズを用いず、機械的走査がない、チップ形態の新たな顕微鏡を提案している。この顕微鏡は、ナノ構造を有する基板と、基板からの透過像を取得する撮像素子で構成されている。基板は、ナノメートルオーダーの微細な構造を有する金属薄膜とガラス基板で構成され、場所と波長によって点像分布関数が大きく変化するように設計されている。あらかじめ基板上の各場所と波長ごとの点像分布関数を測定しておき、次に観察する物体を基板上に配置し、物体からの遠視野像を撮像素子で受光する。遠視野像と既知の点像分布関数を用いて物体の観察像を復元する。実験では、画素サイズ $5.4 \mu\text{m}$ 、RGB のペイヤー配置の撮像素子を用い、波長ごとの LED 光を $2 \mu\text{m}$ の集光サイズで基板上に照射し、各場所と波長の点像分布関数を測定している。異なる色の物体を基板上に配置し、画素サイズよりも小さい分解能 ($\sim 2 \mu\text{m}$) で各色の物体を観察できることを確認

している。(図 3, 文献 20)
 チップ形態の簡易な構成でカラーの画像を取得する手法として新しい、画素サイズよりも高解像度の画像が取得できることを実験的に確認している点も興味深い。現時点では画像の生成に 10 秒 (デュアルコア 2.8 GHz) を要しており、処理の高速化が期待される。
 (池本 聖雄)



シリコンフォトニクス of Luneburg レンズ

Luneburg Lens in Silicon Photonics
 [A. D. Falco, S. C. Kehr and U. Leonhardt: Opt. Express, 19, No. 6 (2011) 5156-5162]

本論文では、図左のように、あらゆる方向からの平行光を入射と反対側の表面に無収差で集光させる Luneburg レンズをシリコン上の導波路構造内に二次元的に作り、性質を確認している。図右のような層構造を作ると、ポリマー層内のシリコンの厚みにしたがって導波路内の TM 波の有効屈折率が $1.4 \sim 2.8$ で変化する。これを利用して、動径方向に連続的に分布する二次元的な屈折率の Luneburg レンズを作製した。レンズの性能確認実験では、中心波長 1575 nm のガウスビームを導波路内に入射させ、これを上から観察したところ、スポットサイズが理論値より広がっているものの、Luneburg レンズの性質を実現できていることを確認している。(図 4, 文献 28)

るな新しい素子が理論的に考えられている。この論文の方法は二次元だが、大きな屈折率差を自由に制御できるため transformation optics の他のものにも応用できる可能性があり、面白い。(鳥羽 英光)



(左) Luneburg レンズ, (右) 作製したシリコン上の導波路構造の Luneburg レンズの断面

近年、transformation optics という分野でクロッキングなどいろいろ

単一の感受率を用いる巨視的マクスウェル方程式の枠組み: 'E, D, B, H' によるアプローチを超えて

A Single Susceptibility Scheme of Macroscopic Maxwell Equations: Beyond 'E, D, B, H' Approach
 [K. Cho: J. Phys: Condens. Matter, 20 (2008) 175202-175209]

本論文の著者は、自身が構築した光学応答理論¹⁾ から、根源的な単一の線形感受率を導出している。光学で長い間親しまれてきた 2 つの線形感受率: 電気感受率と磁気感受率 (または誘電率と透磁率) は、この単一の感受率の長波長近似下での展開項として導出される。また、磁気感受率の自然な定義の採用を提案している。2 つの感受率を用いる従来の枠組みへの問題提起は著者の広い知識に基づきなされている。ただ、従来の枠組みの論理的矛盾を感知するならば以下に注意すればよいだろう。電磁場の源泉は根本的に 3 成分で、それは電荷密度と電流密度の合計 4 成分から電荷保存則で拘束される電流密度の縦成分 (か電荷密度) の 1 成分を引いたものである。これの生み出す電磁場の独立成分も 3 成分 (スカラー・ベクトルポテンシャルの 4 成分からゲージ固定の 1 成分を引いたもの) となる。源泉と電磁場を関係づける構成方程式はお互いの 3 成分同士の関係となり、単一の感受率で記述できるはずである。ところが従来の方法は、源泉 (を導くもの) として分極 \mathbf{P} と磁化 \mathbf{M} (または \mathbf{D} と \mathbf{H}) の 6 成分を導入する。このうちの 3 成分の冗長自由度が横電流の分極電流と磁化電流への切り分けの非物理的な任意性となる。また、電気感受率と磁気感受率の 2 つが必要な理由は (静電場、静磁場への応答からの素朴すぎる類推を別にすれば) 冗長な 3 成分をも構成方程式を介して拘束せねばならない事情によるのである。本論はクーロンゲージに固定した電磁ポテ

ンシャルの 3 成分を電磁場の自由度、電流密度の 3 成分を源泉の自由度として、線形応答理論により単一の感受率を導出する。さらに長波長近似のもと、波数 k によるテイラー展開により、 $O(k^0)$ の項が電気感受率、 $O(k^2)$ の項が (新しい定義の) 磁気感受率と同定する。ただし、カイラリティーがある対称性の低い場合、電気分極励起と磁気分極励起が共存することから $O(k^1)$ の交差項が残る、本論文の方法でのみ記述が可能となる。なお、新しい定義の磁気感受率とは (\mathbf{M} と \mathbf{H} ではなく) \mathbf{M} と \mathbf{B} の関係である。これは論理的に自然な定義であり、検証実験も提案されている。(文献 23)。

本論は感受率の統一論というべきものである。単一の感受率は、対称性の低い量子系での実験で重要性が認識されれば光学の新しいインフラになっていくだろう。書籍も出版されている²⁾。(坂野 齋)

注
 1) 張紀久夫: ナノ構造物質の光学応答 (シュプリンガー・フェアラーク東京, 2004)。著者の光学応答理論は“非局所”理論と言及され特別な印象をあたえるかもしれないが、非局所性は量子系の応答としては自然で根本的なありようである。
 2) K. Cho: *Reconstruction of Macroscopic Maxwell Equations* (Springer, 2010)。

シリコン光起電モジュールにおける反射防止モスアイフィルムの特性

Characterization of Antireflection Moth-Eye Film on Crystalline Silicon Photovoltaic Module

[N. Yamada, T. Ijro, E. Okamoto, K. Hayashi and H. Masuda: Opt. Express, 19, No. S2 (2011) A118-A125]

太陽光発電における光から電気エネルギーへの変換効率、光起電セル表面の反射率に直接依存している。著者らは、室内と屋外での実験を通し、モスアイ構造をもつ反射防止フィルムを使用したシリコン光起電モジュールの変換効率を測定している。モスアイ反射防止フィルムは、陽極酸化ポーラスアルミナを用いた roll to roll プロセスによってアクリル樹脂で作製し、シリコンセルに接着層を介して貼りつけた。構造の高さは 200 nm、周期幅は 90 nm (先端幅 50 nm) である。このモスアイ反射防止フィルムの分光反射率を波長 400~1100 nm の範囲で測定したところ、入射角にかかわらず多層反射防止フィルムよりも 2~5% ほど反射率が低いことが確認された。このことは、日の出から日没まで長時間にわたる変換効率の向上を示唆している。実際に使用する場合は、入射太陽光の拡散度合が効率に影響するため、屋外の実験では、全天日射計を用いて全天日射強度 (GNI)、太

陽追尾装置を用いて直達日射強度 (DNI) を測定し、拡散指数 ((GNI-DNI)/GNI)、入射角と変換効率の関係を調査している。その結果、モスアイ構造をもつモジュールは、入射角が大きく拡散指数が小さいときに最も効率が向上し、拡散指数が大きくなるほど入射角依存性が低くなることを実験的に示した。この結果をもとに東京とアリゾナの年間の拡散指数の推移を比較し、拡散指数の異なる条件では、モジュールに傾斜を与えることで変換効率が大きく変わることを示している。(図 8, 文献 23)

反射防止効果のあるモスアイ構造が太陽光発電の効率向上に有効であることは、これまでも報告されている。しかし、著者らが屋外の実験で示した太陽光の拡散度合、入射角と変換効率の関係は、太陽光発電の設置場所および設置条件を決定する上で、有益な知見であると思われる。(海老澤端枝)

レンズレスフーリエ変換デジタルホログラムにおける量子化ノイズとその低減

Quantization Noise and Its Reduction in Lensless Fourier Digital Holography

[N. Pandey and B. Hennelly: Appl. Opt., 50, No. 7 (2011) B58-B70]

デジタルホログラフィーは物体の三次元構造を復元可能な撮像技術である。デジタルホログラフィーでは乾板の代わりに CCD カメラなどの撮像デバイスを用いて干渉パターンを記録する。干渉パターンは撮像デバイスによってサンプリングされて離散化し、各サンプル点における値は量子化される。量子化の際に生じる丸め誤差は量子化ビット数が大きいほど小さくなる。撮像素子の量子化ビット数は年々増大しており、量子化ノイズは減少している。しかしながら、一方で、記録容量や計算量、通信時の伝送容量が増大しており、多少の量子化ノイズを許容してでも量子化ビット数を減少させてコスト削減を図る取り組みがなされている。この論文では、オフアクシスレンズレスフーリエ変換デジタルホログラムにおける量子化ノイズの特徴を調査し、これを減少させる一手法を提案している。発生する量子化ノイズは、例外はあるものの基本的には白色ノイズとみなせる統計的性質をもっており、その大きさは量子化の階調数に反比例する。位相ノ

イズについては、その点における物体光と参照光の強度の積に反比例する。以上のような定性的性質を再確認しており、さらに具体的な事例について定量評価を行っている。また、スペックルノイズを低減する手法を流用した量子化ノイズの抑圧法を提案し、試行している。報告によると、1ビットで量子化したホログラム 12 枚を用いて再生した再生像のコントラストは、12ビットで量子化した1枚のホログラムを用いた場合のものよりもすぐれている。(図 16, 文献 53)

特定の手法や条件に特化しているとはいえ、量子化ノイズというすでに十分明らかにされていると考えられていた題材でも、いまだに研究の余地があるという事実が驚く。また、1ビットで量子化したバイナリーホログラムを 12 枚使って得られた再生像が 12ビットで量子化したホログラム 1 枚よりもすぐれているという結果は面白い。

(和田 篤)

皮膚創傷の特性評価におけるマルチスペクトラルカメラの使用

Use of a Multi-Spectral Camera in the Characterization of Skin Wounds

[A. Basiri, M. Nabili, S. Mathews, A. Libin, S. Groach, H. J. Noordmans and J. C. Ramella-Roman: Opt. Express., 18, No. 4 (2010) 3244-3257]

近年、皮膚表面から得られる分光反射率画像から血液量、組織酸素飽和度、皮膚色素量等を計測し、皮膚障害・疾患の同定、治療仮定の評価などに応用する試みがなされている。従来のマルチスペクトルイメージングは、分光画像を得るために狭帯域干渉フィルターを装填した回転フィルターホイールや液晶波長可変フィルターを利用するものが多いが、画像取得時間や体動による誤差が問題とされている。本論文では、単一の CCD カメラにより可視-近赤外波長領域における 18 枚の分光画像を一度に取得できるマルチスペクトラルカメラシステムを提案している。本システムでは、中心波長 480, 500, 520, 530, 540, 560, 580, 590, 600, 620, 630, 640, 660, 680, 700, 886 nm の 16 枚の狭帯域干渉フィルターおよび 2 枚の偏光フィルターを、同数の小型レンズと合わせたレンズレットを介し、計 18 の分光反射率画像の配列として被写体からの反射像をカメラの CCD 面上に投影している。光学ファントムと色標準を用いた分光応答のキャリブレーションと光学素子の配列化により生じる各分光画像の歪み補正を行うことで、システムの最適化を行っている。分光画像から皮膚組織の血中酸素飽和度マップを得るために、まず、波長 630~700 nm の吸光度からメラニン

による吸収成分と散乱成分を求め、全体の吸光度から差し引く前処理を行っている。酸化・還元ヘモグロビンの吸光係数スペクトルデータに基づき、波長 560 nm と 580 nm の吸光度から組織酸素飽和度の相対値を算出している。実験では圧力カフによる上腕の圧迫-開放を行い、皮膚の組織酸素飽和度マップの時系列を取得している。組織酸素飽和度の時間変化の傾向は、他者による先行研究の報告例と一致している。さらに、本システムは皮膚の細胞外マトリクス成分であるポリカルボキシメチルグルコース硫酸 (PCMGS, CACIPLIQ20) の創傷に対する効果を評価するための臨床試験において使用されており、褥瘡、糖尿病性潰瘍、血管性潰瘍、手術傷を含む創傷部位の組織酸素飽和度は、治療過程における創傷サイズの減少に伴い低下することが示されている。創傷治療と酸素飽和度の因果関係については、今後さらなる検討が必要であるとしている。(図 10, 文献 17)

本論文では組織酸素飽和度の結果のみを示しているが、水分量、メラニン量、および血液のヘマトクリット値等の算出も可能であり、例えば色素性皮膚癌の診断、火傷、紅斑のモニタリングなど、皮膚医学分野において多くの応用が期待できる。(西館 泉)