

気になる論文コーナー

光エレクトロニクス応用に向けた 4H-SiC 基板上への反射防止用微細構造の付与

Anti-Reflective Nano- and Micro-Structures on 4H-SiC for Photodiodes

[M.-S. Kang, S.-J. Joo, W. Bahng, J.-H. Lee, N.-K. Kim and S.-M. Koo: *Nanoscale Res. Lett.*, **6** (2011) 236]

炭化ケイ素 (SiC) は世界で 3 番目に硬い材料 (修正モース硬度 13) と称され、ワイドバンドギャップ間接遷移型半導体のひとつとして知られている。その硬度のみならず、耐熱性や化学的安定性も相まって低損失、高速動作、高熱伝導度を実現し得る次世代パワーデバイス用の基盤材料として期待されており、特に六方晶系を構成する 4H-SiC は材料物性、結晶品質、製造プロセスの成熟度といった点から実用化に最も近く、関心が高まっている。本論文では、SiC の光エレクトロニクス応用を念頭におき、その際に支障となる SiC の高い反射率に伴う光損失を改善するため、材料表面に反射防止用の微細構造を付与するための方策について報告している。硬質な SiC 基板に対する直接的な加工処理は容易ではないことから、著者らはまず SiC 基板上に蒸着した Si 層に構造パターンを加工した上で、そのパターンを SiC 基板上に転写することで SiC に対する微細構造の付与に成功している。さら

に、加工した SiC 基板を用いたフォトダイオードを試作し、微細構造の有無によるその光電変換効率の差異についても定量的に評価している。(図 5, 表 1, 文献 14)

本論文で報告されている成果そのものについては特筆すべき事項は少ないが、近年になってパワーデバイス用材料として注目を浴び始めた SiC について早々に光エレクトロニクスへの応用を志向し、試作デバイスをを用いての検証実験にまで至ったというスタンスは意義深いものであるといえる。光損失を低減するための微細構造の形状や寸法に関する設計原理や光エレクトロニクス材料としてのより汎用的な評価等、さらなる検討と検証が必要な案件はあるものの、本論文の内容が呼び水となって SiC の光エレクトロニクス応用が加速度的に進展することも十分に期待される。(堅直也)

S/N 比を向上したライトシート型顕微鏡を用いた三次元蛍光寿命イメージング

Three-Dimensional Fluorescence Lifetime Imaging with a Single Plane Illumination Microscope Provides an Improved Signal to Noise Ratio

[K. Greger, M. J. Neetz, E. G. Reynaud and E. H. K. Stelzer: *Opt. Express*, **19**, No. 21 (2011) 20743-20750]

蛍光寿命分光法は、pH やイオン距離、近接した電荷分布など蛍光体の局所的な化学環境についての情報を明らかにし、またスペクトルが類似した蛍光体を識別できる点で注目されている。特に、三次元的な蛍光体の密度分布・蛍光寿命を測定することは、組織工学や三次元細胞培養において非常に関心もたれている。これまでに光学的切断機能を持った大視野蛍光寿命イメージング顕微鏡はいくつか報告されているが、三次元蛍光寿命マッピングへの応用は S/N (signal to noise) 比やサンプルの光劣化が問題となり、困難であった。そこで著者らは、ライトシート型顕微鏡を用いた広視野観察に適した周波数ドメイン型の蛍光寿命イメージング顕微鏡を開発し、本システムの測定精度の検証と MDCK (イヌ腎臓尿管上皮細胞) の三次元蛍光寿命イメージングを行っている。

励起光として、波長 470 nm のダイオードレーザーをシリンドリカルレンズにより平面的にサンプルに照射している。一方、この励起光の平面と垂直方向に対物レンズ、蛍光検出用フィルター、ゲート型イメージンテンシファイアー、CCD カメラを設置し、画像を検出し

ている。また、蛍光寿命は、変調した励起光と検出光との位相差、変調度から算出している。

消光剤であるヨウ化カリウムとの混合比で蛍光寿命をコントロールしたローダミン 6G 溶液を用いて蛍光寿命のキャリブレーションを行った結果、蛍光寿命と消光剤の濃度との関係式である Stern-Volmer 式をよく再現していた。また、サイズや蛍光寿命の異なる蛍光ビーズを混ぜたサンプルを作製し、三次元で蛍光寿命の識別を確認している。さらに、EGFP (enhanced green fluorescent protein) で染色した MDCK 細胞を観測し、高 S/N 比で光劣化の少ない三次元蛍光寿命マッピングに成功している。(図 4, 表 2, 文献 15)

近年、蛍光寿命分光法は光化学・光物理過程のダイナミクス解明のみならず、物質の識別やセキュリティ分野への応用などが期待されており、本論文はサンプルの蛍光寿命を三次元的に可視化する手法の提案と細胞観測のデモンストレーションを行っている点で興味深い。今後、このような蛍光寿命マッピングを用いることにより、蛍光寿命測定の実用分野がさらに広がるものと期待される。(鈴木 基嗣)

繰り返し波面補償技術を用いた深部をよく観察できる多光子顕微鏡

Superpenetration Optical Microscopy by Iterative Multiphoton Adaptive Compensation Technique

[J. Tang, R. N. Germain and M. Cui: *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **109**, No. 22 (2012) 8434-8439]

多光子顕微鏡は、生体組織内の深部を非侵襲のまま観察することを可能にする。その仕組みは、フェムト秒超短パルスレーザーを対物レンズで集光し、多光子励起の現象を強制的に引き起こすことで集光点のみの蛍光強度を検出し、集光点位置を走査することで三次元撮像を行うというものである。しかし、観察対象が深部になるほど、レーザーの波面は生体組織内で乱され、集光されにくくなる。そのため、深部ほど蛍光強度が弱まるとともに PSF (point spread function) は広がり、三次元の撮像が行えなくなる。

著者らは、MEMS (micro-electro-mechanical system) ミラーを用いてレーザーの波面を変調することで、生体組織内で生じる波面収差と散乱の影響を高速で補償する手法の効果を検証した。変調する波面の位相は次のように決定する。MEMS ミラーを構成する 1024 個のミラーのうちの半分の 512 個は位相を固定し、もう半分の 512 個はすべて異なる周波数 (0.625~1.25 kHz) で位相を変調させ、得られる蛍光強度の時間変化をフーリエ変換し、対応する周波数の位相からミラー

1 つずつの位相を仮決めする。次に、今動かしたミラーは仮決めした位相で固定し、残りのミラーは 1 つずつ異なる周波数で位相を変調させ、同様に位相を仮決めする。これを 3 回繰り返し、全ミラーの位相を決定する。実験により本技術は従来の波面補償技術と比べて、① 散乱由来の高い空間周波数の取差補正が可能、② 蛍光強度が向上 (従来式は信号強度が 2~3 倍の向上だが本技術は 1~2 桁の向上)、③ 蛍光強度の変化さえあれば補償可能なので強い散乱体内部でも適用可能、④ 補償速度が速い (2~3 秒) ことが確認できた。(図 5, 文献 35)

本技術は波面を変調する位相の決定方法がユニークである。像を形成しないくらいに波面収差と散乱の影響を受けている場合でも短時間で補償可能なのが興味深い。このような工夫・アイデアの発展によって、より生体深部の観察が可能になることを期待したい。

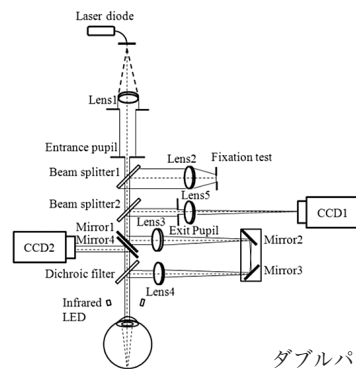
(佐藤 陽輔)

眼球内散乱光の客観的および心理物理学的評価法の比較

Comparison between an Objective and a Psychophysical Method for the Evaluation of Intraocular Light Scattering
[P. A. Barrionuevo, E. M. Colombo, M. Vilaseca, J. Pujol and L. A. Issolio: J. Opt. Soc. Am. A, 29, No. 7 (2012) 1293-1299]

眼球内における光の散乱は、正常な眼ではほとんど生じないが、加齢に伴う水晶体の濁り（白内障）などによって生じるようになる。眼球内において光が散乱すると、視覚情報の見えは低下する。眼球内での散乱の程度を評価する方法として、これまで観察者の主観に基づく心理物理学的手法が提案されてきたが、近年、ダブルパス法を用いて眼球の光学特性を解析する手法が提案されている。この手法では、点光源の光を網膜に投影し、その反射光の像（ダブルパス画像）から得られる点像分布関数（PSF）の中心部と周辺部の強度比を OSI (objective scatter index) として算出する。本論文では、この客観的手法に基づく OSI と、心理物理学的手法のひとつである BCM (brightness comparison method) によって得られる GI (glare index) を用いて、観察者の眼球内の散乱光を評価し、比較している。実験では、観察者の散乱条件を操作するために、拡散フィルターを用いた（白内障の状況をシミュレート）。結果は、フィルターによる拡散の程度が増加するに伴い、GI および OSI が増加することを示した。この結果は、心理物理学的手法に基づく指標と同様に、OSI によって眼球内での散乱光が評価可能であることを示唆する。（図 7、文献 39）

本論文では、近年提案されている客観的な指標と従来の心理物理学的な指標を厳密な統制の下で検討している点で興味深い。OSI は白内障の客観的な分類に応用可能であることから、今後の研究の発展が期待される。（瀬谷 安弘）



ダブルパス法の概略

画像取得と照明の同期による分光イメージング

Spectral Imaging by Synchronizing Capture and Illumination
[S. Tominaga and T. Horiuchi: J. Opt. Soc. Am. A, 29, No. 9 (2012) 1764-1775]

視覚情報に関連する分野において、分光イメージング技術は有用な技術であり、シーンの分光情報を取得するための手法がいくつか提案されている。代表的な分光画像取得手法として、カラーフィルターや干渉フィルター、または液晶波長可変フィルター等を用いたカメラセンサー側での分光イメージングと、光源側での分光イメージングの2つに大別できる。しかしいずれの場合も、分光情報の復元精度と実時間で撮影処理に問題があった。そこで、本論文では、任意の波長分布にて放射可能な波長可変光源と高速モノクロカメラの同期による分光イメージング技術を提案した。提案手法ではフィルターを使用することなく、高フレームレートで分光画像の取得が可能となる。また、提案手法を用いた応用技術として、高速かつ高精度な分光反射率復元を行い、さらに三刺激値イメージャーを構築した。分光反射率の復元においては、まず、カメラの分光感度の逆数が照明光の分光分布になるように波長可変光源で照明光を設計する。次に、対象物体に対し照

明光をスペクトルごとに連続的に照射することで、分光反射率そのものがカメラ出力として取得できる。それゆえ、分光反射率は従来に比べ、非常に高精度で復元可能となる。また三刺激値イメージャーにおいては、照明条件に応じて変調した等色関数を物体表面に投影することで、三刺激値を取得できる。いずれの応用例においても、分光放射輝度計や測色計とは異なり、カメラ出力から色の値をカメラの空間分解能で直接的に取得することが可能となる。実験では色票を対象として応用例の精度を検証し、良好な結果を示した。（図 16、表 3、文献 33）

波長可変光源を利用した分光イメージングの原理とその応用について示した興味深い論文であり、色彩工学やコンピュータビジョンなど多方面での応用が期待できる。広範囲を照射可能な波長可変光源の実用化にも期待したい。（西 省吾）

織り合わされた共役高分子におけるパターンニングされた光学異方性

Patterned Optical Anisotropy in Woven Conjugated Polymer Systems
[C. Müller, M. Garriga and M. Campoy-Quiles: Appl. Phys. Lett., 101, No. 17 (2012) 171907]

高度に配向した共役高分子は光学異方性を示すことから幅広い分野で応用されている。この高度配向の実現にはおもに引張延伸が使われているが、より高度な機能性を実現するためにはパターンニング技術が必須である。しかし、材料の一部にのみ延伸を施しパターンニングすることは困難である。本論文では、製織技術を利用し、高分子テープを編むことにより光学的異方性のパターンニングを実現した。400~650 nm の波長で強い吸収を示すポリ(3-ヘキシルチオフェン)をゲスト、一軸延伸フィルムとして広く研究されている超高分子量ポリエチレンをホストとして、一軸延伸フィルムを作製した。作製したフィルムは、延伸方向を軸とする線形複屈折性のみならず、線形二色性も有する。作製した2枚のテープを織り合わせた場合、テープの重ね順は2種類存在する。非偏光中でこれらを観察した場合は、2種類とも同じ透過色として観察される。しかし、それぞれのテープの延伸方向が90°以外の角度となるように織り合わされたテープ対を直交偏光子間に設置し観察すると、重ね順に依存して着色状態が変わる。これは、

一軸延伸テープを用いた製織工程で、縦糸と横糸の交差順序の選択により光学異方性のパターンニングができることを意味する。（図 4、文献 34）

テープを用いた製織品であるため、パターンニングの最小サイズ、精度、耐久性など、光学素子としての応用に向けてはさらなる研究が必要と思われる。しかし、エンターテインメント性を含んだ簡易的なセキュリティ素子などへの応用は、現時点でも可能ではないだろうか。（中山 敬三）

