低紫外線反射率を示す蝶の翅からのバイオニックナノ構造の作製

Preparation of Bionic Nanostructures from Butterfly Wings and Their Low Reflectivity of Ultraviolet

[Z. W. Han, S. C. Niu, W. Li and L. Q. Ren: Appl. Phys. Lett., **102**, No. 23 (2013) 233702]

可視光に対する反射防止構造（antireflective structures; ARS）は，各種光学素子やフラットディスプレイパネル表面への応用がさかんに研究・実用化されているが，紫外線（UV）に対しては研究途上である．ARS研究のひとつに，自然界に存在する卓越した特性を示す構造を参考にする手法がある．本論文は，UVの反射率がきわめて低い蝶の翅の構造を確認し，その構造のレプリカを作製する手法を提案した．実験では，海抜2000 mに生息するウスバシロチョウ属の蝶を用いた．可視光および赤外線に対する翅の反射率は60％以上で，UVに対しては20％以下であり，翅はUVに選択的な反射防止効果を示した．鱗粉を電子顕微鏡で確認したところ，約2 μm間隔の平行で細い回折格子のような凸部が存在した．凸部を詳しく調べると，各歯が45°傾いた櫛歯構造であった．この構造を上部から見ると，傾いた歯が折り重なり，歯と空気の多層構造とみなせる．すなわち，蝶の翅は回折と反射を利用して，可視光に対する高反射率，UVに対する低反射率を実現していると考えられる．次に，ゾル・ゲル法により，蝶の翅自体をテンプレートとする SiO_2 反転レプリカを作製した．翅には，エーテルと脱イオン水による洗浄，エタノールによる脱水操作，12時間の乾燥が施された．その後，翅をスライドガラスで挟み，シリカ前駆体を浸透させた．加水分解によるゾル化後，硝酸と過塩素酸を用いて蝶の翅を選択的にエッチングすることにより，蝶の翅の微細構造を有した反転レプリカの作製に成功した．（図4，文献36）

生物をテンプレートとして用いて構造を複製する方法は，一般的に大量生産・大面積化などの工業用途には向かない．しかしながら本研究の手法は，得られた反転レプリカに機能性材料等を充填し，選択エッチングにより反転レプリカを取り除くことにより，機能性材料を骨格にした精密な蝶の翅のレプリカ作製の可能性を有している．今後，そのような発展研究により，蝶の翅自体の性能を超える機能性デバイスの開発などが期待される．（中山　敬三）

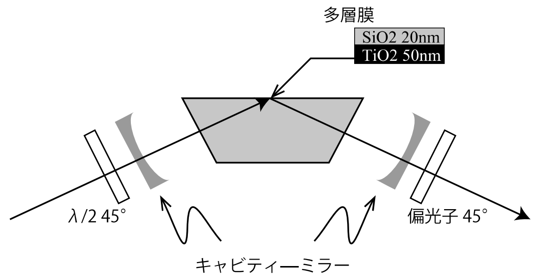
エバネセント光を利用したエリプソメトリーのキャビティーリングダウンを用いた感度向上

Sensitivity Enhancement for Evanescent-Wave Sensing Using Cavity-Ring-Down Ellipsometry

[D. Sofikitis, K. Stamataki, M. A. Everest, V. Papadakis, J.-L. Stehle, B. Loppinet and T. P. Rakitzis: Opt. Lett., **38**, No. 8 (2013) 1224–1226]

キャビティーミラー内に全反射プリズムで構成されたエリプソメーター（CRDE）は，エバネセント光をプローブ光として用いることにより，サンプル表面近傍の物性情報を選択的に取得できる手法である．最近，サンプルステージに多層膜を形成することで測定感度を向上させる手法が提案された．著者らは，図に示す通り，キャビティーミラーの間に配置したプリズム上に TiO_2 および SiO_2 薄膜を積層することにより感度を向上できることを，理論的および実験的に示している．実験では，パルス幅0.6 ns，波長532 nmのYAGレーザーを測定光源として用い，アルコールと水の混合溶液をサンプルとして屈折率を変化させることで感度を検証したところ，0.034°/RIUの感度特性が得られた．また，高分子電解質の多層膜形成過程をその場測定したところ，ほぼリアルタイムでの計測が可能であることを示している．（図3，文献13）

CRDEに多層膜を形成するだけで高感度化できたことは物理的にも興味深く，また，応用範囲の広がりが期待できる．今後，サンプル粒子による散乱などを考慮できるミュラー行列計測と組み合わせることで，応用発展が期待される．（水谷　康弘）



多層膜を用いたリングダウンエリプソメーター

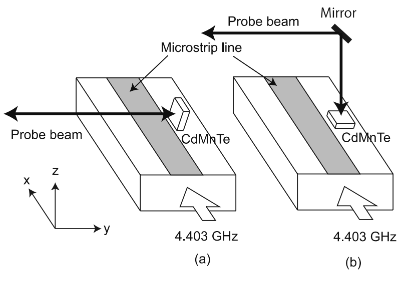
CdMnTe結晶を用いた光プローブ型マイクロ波ポインティングベクトルセンサー

An Optically-Interrogated Microwave-Poynting-Vector Sensor Using Cadmium Manganese Telluride

[C.-C. Chen and J. F. Whitaker: Opt. Express, **18**, No. 12 (2010) 12239–12248]

メタマテリアルの理解とその特性向上のために，エバネセント波を含む近接場の振る舞いに関心が集まっている．ポインティングベクトル（PV）の可視化に関しては，数値的研究が一般的であり，実験例は多くない．本論文は，ポッケルス効果とファラデー効果を示す⟨110⟩カドミウムマンガンテルライド（CdMnTe）結晶を用いることで，磁界と電界を同一結晶により計測する手法を提案している．開放端マイクロストリップ線路と50 Ω終端マイクロストリップ線路を対象に，それぞれについてPVの振幅と位相を可視化している．図にマイクロストリップ線路を伝搬するPVを可視化した際のセンサーの配置を示す．図（a）の配置で E_z, H_y を，（b）の配置で E_y, H_z 成分をそれぞれ測定し，これら電磁界成分からPVを計算により求める．センシングの手法はパルスレーザーを用いた一般的な電気光学サンプリングである．開放端と50 Ω終端マイクロストリップ線路に対して，それぞれエネルギーの流れの有無が示された．（図7，文献20）

CdMnTe結晶は少なくとも2 THz以下の周波数領域において利用可能であり，今後は，メタマテリアルやプラズモニクスの研究がさかんに行われているテラヘルツ波帯への展開が期待される．（久武信太郎）



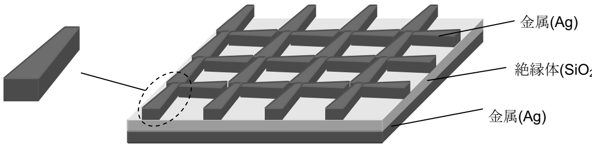
CdMnTe結晶をセンサーとする光プローブ型電磁界計測．（a）E_z, H_y 成分の計測，（b）E_y, H_z 成分の計測

偏光に依存せずに広帯域の光を吸収する薄膜プラズモニック吸収体

Broadband Polarization-Independent Resonant Light Absorption Using Ultrathin Plasmonic Super Absorbers
[K. Aydin, V. E. Ferry, R. M. Briggs and H. A. Atwater: Nat. Commun., **2** (2011) 517]

太陽電池の性能向上に向けて，プラズモン共鳴を利用した光吸収制御に関する研究がさかんに行われている．一般的に，プラズモン共鳴は狭い波長域でしか起きないため，可視光全域にわたって大きな光吸収を得ることは困難であった．本論文では，図のように上面の金属層に微細な台形が格子状に並んだパターンを施した金属－絶縁体－金属（MIM）の薄膜積層構造で，プラズモン共鳴による光吸収が広い波長領域で起きることを実証した．この構造では，上面金属の台形パターンにおける広帯域の局在共鳴モードと，台形パターンと下面の平面金属の間における共鳴モードが混在しており，プラズモン共鳴の広帯域化が実現されている．実験では，400〜700 nm の波長領域で平均 71% の吸収率が得られており，また吸収率は入射光の波長，偏光，入射角度に対してほとんど依存しないことを確認している．（図 6，文献 28）

このように薄膜で波長，偏光，入射角度に依存せず高い吸収率を実現する技術は，太陽電池のみならず，黒体輻射による放熱体の性能を向上する技術として期待できる．（稲田　安寿）



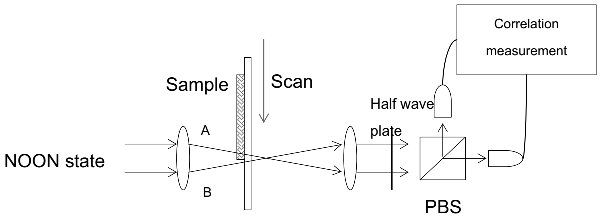
MIM コートした回折格子の断面図

エンタングルメント顕微鏡

An Entanglement-Enhanced Microscope
[T. Ono, R. Okamoto and S. Takeuchi: Nat. Commun., **4** (2013) 2426]

量子力学的な効果を利用することによって高い測定精度や解像度を実現しようとする数々の手法が提案されている．著者らは，微分干渉顕微鏡の光源として NOON 状態とよばれる光を用い，標準量子限界を超える SN 比での画像取得を実現した．基本的な原理は，NOON 状態とよばれるエンタングルした状態の N 個の光子を用いた位相差計測である．2 つの経路 A と B に対して，光子 N 個をすべて経路 A に振り分ける状態と，すべて経路 B に振り分ける状態の重ね合わせである NOON 状態を作り，2 つの経路を通ってきた光を干渉させて，各出力ポートの光子数が特定の条件を満たす頻度を計測することによって，2 経路の光路長差を計測するものである．各経路を通る状態は光子数演算子の固有状態なので，コヒーレント状態の場合の N 倍の位相差がつく．つまり，位相差をパラメーターとして出力値を描くと，通常の N 倍の本数の縞ができる．同時に，その縞は高い可視度をもち，位相差の計測精度は標準量子限界の $\sqrt{N}$ 倍になることが知られている．本論文では $N=2$ の NOON 状態を用い，2 つの経路が標本上で近接した異なる点を通るように設定し，2 経路が合流する PBS の 2 つの出口に設置した測定器の両方が 1 光子を同時検出する頻度を測定することで，2 経路の光路長差を観測している．標本を平行移動させながらこの測定を繰り返すことで，標本上各点の段差を計測していき，画像を構成する．（図 5，文献 45）

エンタングルメントを活用することによって，実際に顕微鏡の SN 比を向上させられることを示した画期的な研究であり，論文でも述べられている通り，より大きな光子数による実現など，さらなる発展が期待される．（奥平　陽介）



模式図

レイリー限界に挑め：起動角運動量に基づく超解像回折トモグラフィー

Beating the Rayleigh Limit: Orbital-Angular-Momentum-Based Super-Resolution Diffraction Tomography
[L. Li and F. Li: Phys. Rev. E, **88**, No. 3 (2013) 033205]

この論文は，従来の回折トモグラフィーにおけるレイリー限界を超えるための手段として，起動角運動量（orbital-angular-momentum: OAM）に基づく超解像法を提案するものである．OAM は電磁波を取り扱う新たな自由度として近年注目を集めており，さまざまな分野で応用が始まっている．本論文では，OAM を用いた超解像回折トモグラフィー（OAM-DT）について，理論的な解析と数値シミュレーションによる検証結果を示す．レイリー限界とは，波動場の回折の影響により，撮影像の分解能が物理的に制限されるときの限界であり，使用している波の波長で決定される．この限界を超える分解能を得るためにさまざまな手法が提案されており，それらの手法は超解像法とよばれている．OAM-DT は，通常の超解像法で用いられる格子パターン等の代わりに，回転位相をもつ渦場を観測平面に重畳する．超解像が達成される原理については，近接場伝達の観点と重ね合わせ共振による周波数空間の解釈の両方から説明され，数学的にも明らかにされる．このとき，OAM による超解像法が，回転位相の中心に対する回転方向にのみ分解能を向上させる一方で，動径方向には一切の改善が得られないことが示される．数値シミュレーションにおいては，ボクセルで表現した位相物体を想定し，OAM-DT による分解能の向上が示される．動径方法に分解能の向上が得られない問題については，重畳する渦場を移動させながら複数回の撮像を行い，これらを合成することで対処することを提案しており，数値シミュレーションにおいてこの改善方法が実際に機能することが示されている．（図 5，文献 22）

渦場を重畳して超解像を得る方針について，物理的数学的解釈が簡潔にまとまっている．そこで得られた「動径方法には全く分解能が向上しない」という結論に対して，渦場の中心を移動させるという改善案が提案されている．渦場の移動指針をうまく設計すれば，局所的に分解能を上げることが可能であり，選択的高分解能撮像が実現できる．実験による実証と発展を期待したい．（和田　篤）