

気になる論文コーナー

PMMA フィルム中での多光子吸収によるプラズモンアンテナの近接場光マッピング

Near-Field Mapping of Plasmonic Antennas by Multiphoton Absorption in Poly (methyl methacrylate)

[G. Volpe, M. Noack, S. S. Acémovicé, C. Reinhardt and R. Quidant: Nano Lett., 12, No. 9 (2012) 4864-4868]

近年、金属ナノ構造体と光との相互作用によるプラズモン共鳴を利用したプラズモンアンテナが注目を集めている。プラズモン共鳴とは、金属内部の自由電子が光とカップリングすることで共鳴的に振動し電場を増強する効果であり、特にナノ構造体の場合、光は局在化しホットスポットを形成する。このプラズモン共鳴による電場増強効果および局在化を利用した、高密度光記録、高感度バイオセンサー、高変換効率太陽電池、ナノフォーカシングなどが注目を集めている。このプラズモン共鳴現象を制御・応用するには、増強電場分布を実験的に観察する必要があるが、光の波動性に基づく回折限界のため空間分解能が十分ではないため、観察することは困難である。著者らは、PMMA の四光子吸収によるポリマー鎖切断を利用することで、金ナノロッドのプラズモン増強近接場光分布を観察することに成功した。サンプルとして、さまざまな長さの金ナノロッドを基盤に固定し、その上から PMMA を 80 nm コートしたフィルムを用いた。まずこのフィルムに波長 860 nm の近赤外パルスレーザー光を照射することで

プラズモン増強近接場光を金ナノロッド周囲に誘起し、増強近接場光による PMMA の四光子吸収によって PMMA の主鎖 (最大吸収波長 215 nm) を切断した。次にディベロッパを用いて切断部位を取り除き、最後に電子顕微鏡で観察した。著者らはこの方法で、異なる長さの金ナノロッドに誘起された異なるプラズモンモードによる増強近接場光分布の観察に成功した。具体的には、金ナノロッドの長さが 130 nm では $\lambda/2$ モード、515 nm では $3\lambda/2$ モード、880 nm では $5\lambda/2$ モードによるプラズモン増強近接場光分布の観察に成功した。また 2 つの金ナノロッドを近接させることで、ギャップモードによる増強近接場光分布の観察にも成功した。(図 4, 文献 23)

高次の非線形光学効果である四光子吸収を利用することで空間分解能を高めている点が興味深い。今後は、PMMA の分子量、フィルム膜厚、温度などのパラメーターを最適化することによって、さらなる空間分解能の向上が期待される。(石飛 秀和)

広帯域ベッセルテラヘルツビームと位相コントラストを用いた計算機断層撮像法

Computed Tomography Using Broadband Bessel THz Beams and Phase Contrast

[A. Bitman, S. Goldring, I. Moshe and Z. Zalevsky: Opt. Lett., 39, No. 7 (2014) 1925-1928]

計算機断層撮像法 (CT) により物体の三次元情報の取得が可能となる。X 線 CT はソフトマテリアルへの適用が難しいという問題があったが、テラヘルツ波 (0.1~10 THz の電磁波) を用いればソフトマテリアルを含む多くの物体の三次元情報の取得が可能となる。ところがテラヘルツ CT は回折、散乱、フレネル損からの強い制限を受けるといった問題があった。本論文では、テラヘルツ CT において非回折ビームを用いることのメリットを、ガウシアンビームを用いた場合と比較して明らかにしている。実験では、光伝導アンテナにより発生されたテラヘルツパルスを用いている。非回折ビームはアキシコンを用いて生成された 0 次ベッセルビームである。テラヘルツパルスのスペクトルは 1.5 THz までの帯域を有し、ピークは 0.1228 THz である。外径 1.5 mm, 肉厚 0.35 mm のガラス管をおよそ 2 mm の間隔を隔てて埋

め込んだ発泡スチロール製の一辺 40 mm の立方体をサンプルとして、2 つのガラス管がガウシアンビームを用いたときには分解できない一方で、非回折のベッセルビームを用いたときに分解可能となることを示している。加えて、強度情報よりも位相情報に基づく解析により、いくぶんシャープな像が得られることを二次元イメージで示している。本論文では、ベッセルビームを用いた位相情報に基づく CT が最適な結果を生むと結論づけている。(図 8, 文献 24)

非回折ビームを用いることで空間分解能が向上することが実験的に示されており興味深い。定量的評価が望まれる。ベッセルビームを用いた位相情報に基づくテラヘルツ CT への展開が期待される。

(久武信太郎)

偏光ゴーストイメージング

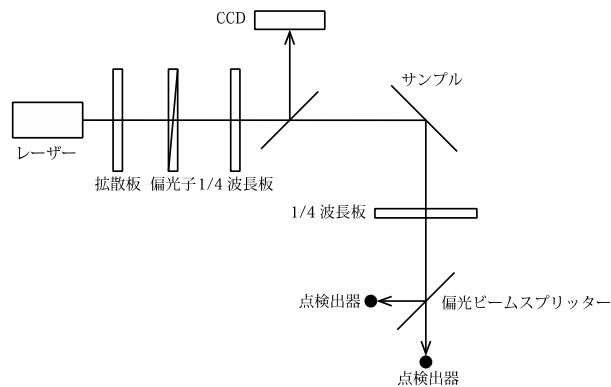
Polarimetric Ghost Imaging

[D. Shi, S. Hu and Y. Wang: Opt. Lett., 39, No. 5 (2014) 1231-1234]

ゴーストイメージングは、空間的に変調された光強度分布を複数回物体に照明し、物体からの散乱光を点検出器で検出した後に、照明光と検出光の強度相関からイメージングする手法である。20 年前に基本原理が提唱された手法であるが、近年のプロジェクター技術の進展に伴い急速に適用範囲が拡大しつつある測定法である。これまでに、三次元形状測定、蛍光計測やセキュリティ分野などに用いられてきたが、最近、偏光計測への応用例が報告された。著者らは、図に示す通り、レーザーから出射された光を拡散板に照明し偏光子と波長板を用いてランダムな光強度分布の円偏光を発生させている。ランダムな光強度分布は、分岐光路中に設けられた CCD カメラで取得される。また、測定光は、測定対象物に照明した後に反射光を偏光ビームスプリッターで P 偏光と S 偏光に分離され、点検出器で光強度が測定される。10 万回の相関計算を行った後に各偏光強度の和と差を計算することで、偏光別の像を再現している。本論文では、測定対象物として木に埋め込まれた石と金属を用いて、偏光による識別に成功している。(図 4, 表 1, 文献 20)

ゴーストイメージングはこれまでに位相物体の測定などに用いられてきたが、偏光計測に応用されたという点が意義深い。偏光計測と位相物体の測定が組み合わせられると、適用範囲がさらに拡大すると考えられる。そのためには、本報告のような P 偏光と S 偏光の測定だけ

でなく、フルストークスペクトルやミュラー行列計測への応用発展を期待したい。(水谷 康弘)



偏光ゴーストイメージング光学システム

亜酸化銅中の青色励起子ポラリトンのコヒーレント伝搬

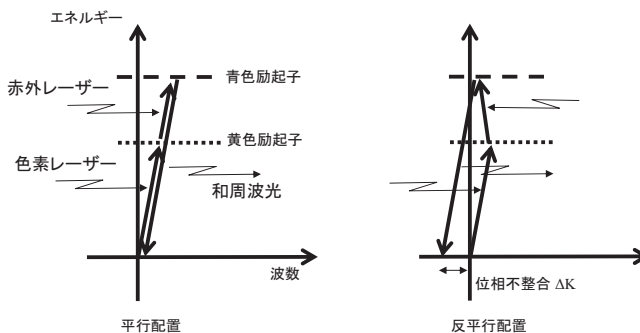
Signatures of Coherent Propagation of Blue Polaritons in Cu_2O

[J. Schmutzler, D. Fröhlich and M. Bayer: Phys. Rev. B, **87**, No. 24 (2013) 245202]

通常、和周波生成は反転対称性のない結晶を用いて行われる。本論文では、反転対称性のある半導体亜酸化銅の結晶 Cu_2O に対して共鳴条件の下で行われる和周波発生について報告された。実験では、狭帯域色素レーザーを Cu_2O 結晶中の黄色励起子に共鳴させて四重極子遷移させた後、狭帯域の赤外レーザーを用いて双極子遷移によって青色励起子へ遷移させた。その結果、青色励起子はバンドギャップより上方に位置し、光吸収が非常に強いにもかかわらず明瞭な和周波信号が観測された。興味深いことに、2つのレーザーが反平行に配置された場合、赤外レーザーの励起波長に対して和周波光強度が振動構造を示した。この振動が位相不整合によるメーカフリンジであると解釈されることから、青色励起子が $60\ \mu\text{m}$ 厚の結晶中をコヒーレントに伝搬していることが明らかにされた。このことは、強い吸収のため青色励起子の伝搬長はたかだか $100\ \text{nm}$ 程度しかないというこれまでの透過測定研究による見解を大きく変えるものである。(図5、文献27)

本論文で行った狭帯域レーザーを用いた和周波生成による測定結果は、透過測定から見積もった吸収長では説明できず、新たな見解を示すこととなった。今後、この手法はバンドギャップより上のエネルギー

ギーに位置するバンド構造や電子状態をより詳細に解析するこれまでにない手法へと展開することが期待される。(東海林 篤)



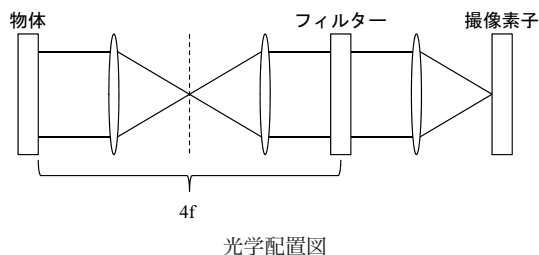
圧縮センシングによる相補的な観測量の同時計測

Simultaneous Measurement of Complementary Observables with Compressive Sensing

[G. A. Howland, J. Schneeloch, D. J. Lum and J. C. Howell: Phys. Rev. Lett., **112**, No. 25 (2014) 253602]

位置と運動量のような共役な物理量は、不確定性関係のため、両方の分散をゼロにすることができない。普通の測定では、一方の測定を行うと他方に影響を与えてしまうため、両方を測定したい場合は、同一の確率密度分布に従うアンサンブルを用意して、位置と運動量の計測を別々の測定手段で行うことが多い。本論文では、光学系における共役な2つの物理量を同時に計測する測定手段を提案している。基となる圧縮センシングを用いた単一ピクセルカメラは、4f光学系の物体共役面にランダムパターンのフィルターを置き、パターンを変えるたびにその透過光量を計測して物体の位置座標上での強度分布を測定するものである。本手法ではこれに加え、パターン透過後のフーリエ変換像を撮影することで、運動量空間での強度分布も同時に測定できるようにしている。位置計測に必要な物体共役面のフィルターは、運動量計測にとっては擾乱となるのだが、このノイズは、フィルターのランダム性のおかげで元々小さく、複数のパターンによる測定値を平均化することでさらに減らすことができる。(図5、文献34)

位置計測のための情報取得を少しずつ行うことにより、運動量計測への悪影響を抑え、少ない情報から効率よく元の情報を復元するために圧縮センシングを利用しているところが巧妙である。(奥平 陽介)



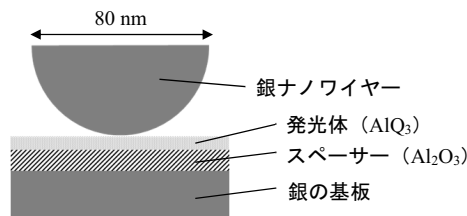
プラズモンナノ共振器による大幅な自然放出増強

Large Spontaneous Emission Enhancement in Plasmonic Nanocavities

[K. J. Russell, T. Liu, S. Cui and E. L. Hu: Nat. Photonics, **6**, No. 7 (2012) 459-462]

共振器により発光制御することで、低閾値レーザーや単一光子光源が実現できる可能性がある。本論文では、図のように銀のナノワイヤーと銀の基板から構成されるプラズモンナノ共振器に発光体を導入することで、発光レートを約1000倍に増強できることを実証した。プラズモンナノ共振器を用いれば、発光レートを増強できるが、光が表面プラズモンに結合しロスすることによる非輻射レートも大きくなる。基板とナノワイヤーの間にスペーサー (Al_2O_3) を $1.8\sim 22\ \text{nm}$ 、有機蛍光色素 (AlQ_3) を $2.5\ \text{nm}$ 積層した構成において、発光の時間分解測定により発光準位の緩和レートを測定した。測定結果は、計算により求めた発光レートと非輻射レートの和から得た緩和レートと定量的に一致した。また、スペーサー厚みが $1.8\ \text{nm}$ のときに、緩和レートが約2000倍になったことを確認しており、これは発光レートが約1000倍に増強され、表面プラズモンへの結合による非輻射レートは発光レートと同程度であることによる効果であると分析している。(図4、文献22)

共振器やプラズモンの効果を利用し発光レートを高める方法は、量子効率が低い発光体の活用の可能性が広がるという観点からも、興味深い。(稲田 安寿)



プラズモンナノ共振器の断面図