

研究報告書

「量子近接場光学顕微鏡の実現とその展開」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2015年12月～2019年3月

研究者: 岡本 亮

1. 研究のねらい

近接場光学顕微鏡(SNOM)は、光の回折限界をはるかに超えた顕微イメージングが可能であり、大気圧化や液中での測定が可能なることから、磁性微細構造の読みとり(書き込み)から、生体1分子の観察まで、広く用いられている。しかし、SNOMでは、波長以下の先端径を用いるために、スループットが低く、また、分解能を高めるために先端系を小さくする程、スループットも低下する。従って、高分解能域では、微弱な背景光でも容易に信号雑音比が低下するという問題がある。

本研究は、近接場光学顕微鏡に量子もつれ合い光と量子測定器を組み込んだ「量子近接場光学顕微鏡」を開発、古典的な光では決して到達できない領域まで信号光検出感度を向上させるものである。本研究により、これまで、信号雑音比の問題で、低い分解能でしかイメージングすることができなかった試料に対しても、飛躍的に分解能を高めることができる。特に、外部から背景光になるような強い光を照射しても、高い信号雑音比が実現できるようになる。これにより、例えば、光照射環境下における、分子の形状変化や、吸収分光測定が可能になる。本研究は、これまでのSNOMでは不可能だった新たな応用を切り開くことで、光を使ったナノイメージングにイノベーションをもたらすものである。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、非常に微弱な信号光を背景光下で高感度に検出する量子計測法を実現、それを近接場光学顕微鏡(SNOM)に組み込むことで、「量子 SNOM」を実現、新たな応用を切り拓くことを目標としている。まず、マイケルソン型の特殊な量子干渉計を採用することで、目的とする量子計測法を実現、信号光検出感度の背景光耐性を評価した(研究項目 A)。その結果、従来のSNOMに対して飛躍的に高い信号雑音比が期待できることを実証した。さらに、最近注目されている別の量子計測法である同時計数法と比較しても、背景光耐性の大幅な向上が実現できることを明らかにした。次に、構築した量子光源と量子測定系を組み込むために、SNOM系の設計・立ち上げを行った(研究項目 B)。SNOM系部分は、量子光源と、量子測定系を組み込むことが可能な特別な設計になっている。SNOM系を立ち上げ、光子検出器を用いたイメージング実験を行い、良好なイメージング結果を得ている。以上から、本研究の量子計測法の性能の実証に成功、さらに、SNOM系を立ち上げ、イメージングを行うことができる。後は、両者を組み合わせるのみというところまで研究が進んでおり、ほぼ当初の目標を達成しつつあるといえる。

本研究では上記に加え、当初計画にはなかった新しい量子吸収計測法を提案、理論的にその性能評価に成功している(研究項目 C)。上記の量子計測法は、量子光源と量子測定系

からなるが、その量子測定系の位相差を制御し、測定条件を変えることで、微弱な吸収を古典的な限界(ショットノイズ限界)を超えて計測可能なことを見出した。本研究は、単一分子といった微弱な吸収をもった対象のイメージングや、吸収係数の同定を可能にするものであり、非常に重要である。

さらに、本さがけ内での議論から共同研究として、本研究を発展させた新たな研究を提案した。光ホログラフィが専門のさがけ領域の田原 樹 氏と、本提案の量子計測法とホログラフィ技術を融合することで、古典的な限界を超えたホログラフィ技術の創成をかねて、いくつかの基礎実験に成功している(研究項目 D)。

(2) 詳細

研究テーマ A「量子計測法の実現と評価」

研究テーマ A では、本研究の量子計測法を用いることで、微弱な信号光の検出感度がどの程度向上するかを評価した。そのために、まず、もつれ合い光を生成する量子光源と、もつれ合いを測定する量子測定器を構築した。これらを組み合わせ安定かつ精密な動作を実現するために、マイケルソン型の特殊な量子干渉計を採用した(図 1)。また、背景光耐性向上の工夫として、光子対は非縮退条件で発生させた(照明光子中心波長:805nm、参照光子中心波長:815nm)。そして、参照光子を、サンプルであるガラス基板(反射率3%)に入射し、そこからの微弱な反射光を、古典的には区別がつかない、同じ周波数スペクトル、同じ偏光を持った背景光下で検出できるかを評価した。その結果、約 1 兆個の背景光子に埋もれた約 2000 個の光子を検知することに成功した。さらに、比較実験として、通常の SNOM に用いられている古典的な方法と、同時計数法と呼ばれる、別の量子計測法でも同様の測定を行い、信号雑音比(SNR)を比較した。その結果、本手法では、SNR が 10 になる背景光子数は、 5.78×10^{12} 個となった。一方、同時計数法(同時計数窓:2ns)では、 5.83×10^6 個、古典法では、 5.38×10^4 個であった。これにより、本手法は、同時計数法に対して、約 100 万倍、古典法に対して、約 1 億倍の背景光耐性があることが分かった。また、上記は SNR の評価であったが、より直接的な確認として、反射率の異なる領域のイメージングを行い、同様の結果を得ている。本成果は、国内・国際会議での発表に加え、現在論文にまとめているところである。

研究テーマ B「SNOM 系の設計、立ち上げ」

上記のように、量子光源と、量子測定系により、通常

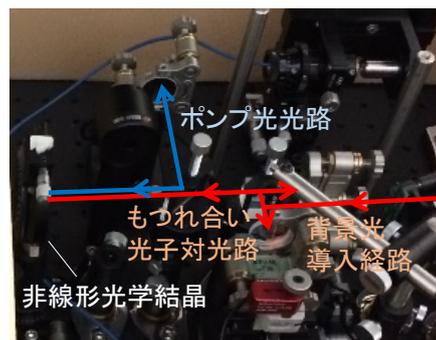


図 1. マイケルソン型の量子干渉計実験装置写真。

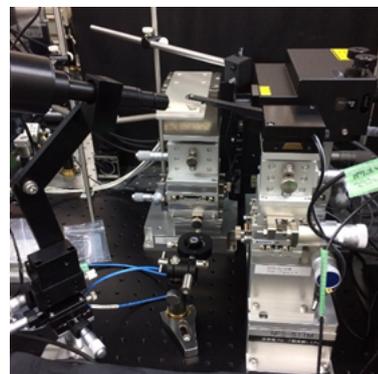


図 2. SNOM 系装置写真。

の SNOM より飛躍的に高い信号雑音比が得られることを実証した。そこで、次に、それらを組み込むべく、SNOM 系部分の設計・立ち上げを行った(日本分光社と共同)。SNOM 系部分は、量子光源と、量子測定系を組み込むことが可能な特別な設計になっている(図 2)。立ち上げた SNOM 系の動作確認のため、微弱光検出が可能な光子検出器を用いて、イメージング実験を行った。250nm 径の SNOM プローブを用いて、テストサンプルとして、ロンキー板の測定を行い、良好なイメージング結果を得ている。

研究テーマ C「新規量子吸収計測法の提案」

当初の研究計画にはなかったが、上記の研究成果に加えて、新しい量子吸収計測法を提案、計算によって、その有効性を実証している。本さきがけ研究での量子計測法は、量子光源と量子測定系からなるが、その量子測定系の位相差を制御することで、測定条件を変えることで、微弱な吸収を古典的な限界を超えた高い信号雑音比で計測可能なことを見出した。そして、生成消滅演算子を用いた、量子光学的な計算手法を用いることで、信号雑音比の定式化下に成功した。そして、実際に、様々な実験パラメータでその有効性を実証した。本研究は、単一分子といった微弱な吸収をもった対象のイメージングや、吸収係数の同定を可能にするものであり、非常に重要である。本成果は、国内会議での発表に加え、現在論文にまとめているところである。

研究テーマ D「量子計測と光ホログラフィの融合」

本さきがけ内での共同研究として、本研究を発展させた新たな提案をした。光ホログラフィが専門のさきがけ領域の田原 樹 氏と、本提案の量子計測法とホログラフィ技術を融合することで、古典的な限界を超えたホログラフィ技術の創成をきっかけ、いくつかの理論検討を行い、基礎実験にも成功している。これらの成果についての一部は、現在論文にまとめている所である。

3. 今後の展開

本研究では、量子計測法の高い信号雑音比の実証に成功、さらに、SNOM 系を立ち上げ、イメージングを実現している。今後は、両者を組み合わせることで、量子 SNOM を構築したい。本研究期間中に、量子 SNOM による測定に適した試料の検討を進めており、それらを実際に測定することで、量子 SNOM の性能を示したい。また、本量子計測法のもつれ合い光子対の波長は、上述の通り、異なる波長を選択することができる。例えば赤外領域における測定試料の応答を、可視域の検出器で「視る」ことも可能である。赤外領域では、適切な検出器が入手困難な場合もあり、本研究を発展させることで、背景光下に埋もれた微弱な赤外領域の信号光を、可視域の検出器で検知することが可能になる。赤外領域でも特に、黒体輻射が強い領域では、本手法の高い背景光耐性がその性能を発揮することが期待できる。また、ポンプ光をパルス光にすることで、過渡吸収計測への展開も興味深い。研究テーマ C の新規量子吸収計測法や、研究テーマ D の量子光ホログラフィにも同様の特長を持たせることが可能であり、様々な展開が期待できる。研究テーマ C については、理論的な検討を終えているので、実際に実装することので、単一分子のイメージングや、吸収係数の測定といった、従来では非常に困難であった課題の解決が期待できる。また、研究テーマ D についても、共同研究をさらに発展させることで、従来のホログラフィに

あった古典光学的な限界を超える量子光ホログラフィの創成を実現したい。

4. 自己評価

本研究では、非常に微弱な信号光を背景光下で高感度に検出する量子計測法の実現に成功、さらに SNOM 系を設計し立ち上げ、イメージングが可能であることを確認している。後は、両者を組み合わせるのみというところまで研究が進んでおり、ほぼ当初の目標を達成しつつあるといえる。また、当初計画になかった研究として、新規量子吸収計測法を提案、その有効性を理論的に明らかにした。また、同さきがけ領域の田原 樹 氏と共同研究を進め、互いの専門分野を横断する形で議論を進めることで、量子光ホログラフィと言える、新たな着想を得ることができた。これらの全ての研究は、どれも従来の限界を打ち破る新しい計測・イメージング手法への道を切り拓くものであり、今後大きく発展することが期待できる。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

該当なし

(2) 特許出願

研究期間累積件数:0 件

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

学会発表

【国際会議(招待講演)】

1. R. Okamoto:

Quantum optical measurement technologies using entangled photons

OIST-JST Presto Joint Symposium on Frontiers in Optics and Photonics, (OIST, Japan)

(2016/10/31).

2. R. Okamoto:

Photonic quantum circuits for quantum measurement: a quantum shutter closing two slits simultaneously and adaptive quantum state estimation

14th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing, (Louisiana State University, USA) (2018/3/13).

3. R. Okamoto

Photonic quantum circuits for quantum measurement

11th Asia Pacific Laser Symposium, (Xi'an, China) (2018/5/28).

【国内会議(招待講演)】

4. 岡本亮、“量子もつれ光子を用いた計測技術”、一般社団法人レーザー学会学術講演会

第 37 回年次大会(徳島大学)(2017/1/9)

5. 岡本亮、“量子的な光を用いたイメージング技術”、Optics & Photonics Japan 2017 (筑波大

学東京キャンパス文京校舎)(2017/11/1)

受賞

1. 平成29年4月 文部科学大臣表彰 若手科学者賞