



京 都 大 学
物質・材料研究機構 (NIMS)

量子もつれ光を用いた、超高分解能光断層撮影技術を開発

概要

京都大学大学院工学研究科の竹内繁樹教授、岡野真之特定研究員ら、物質・材料研究機構の栗村直主幹研究員ら、および名古屋大学の西澤典彦教授からなる研究グループは、量子もつれ光を用いた 2 光子干渉により、分解能 $0.54\mu\text{m}$ に相当する 2 光子量子干渉縞を実現、また、群速度分散耐性を実証しました。本研究成果により、光断層撮影技術の分解能の飛躍的な向上が期待され、将来は緑内障などの早期診断など、医療分野をはじめとする様々な計測技術への波及が期待されます。なお本研究は、科学技術振興機構戦略的基礎研究推進事業 CREST の元行われました。

1. 背景

光干渉断層撮影技術（光コヒーレンストモグラフィ）は、眼科分野において、網膜など様々な組織の診断技術として急速に普及しています。さらに、肺や消化管の表層組織の断層撮影への応用も進められており、早期がんの診断などへの検討も進められています。より高い深さ分解能の実現は非常に重要です。例えば、網膜の厚みのより精密な測定が可能になれば、緑内障を発症前からその進行を予測することなども期待されます。

光干渉断層撮影技術の深さ分解能を向上させるには、より広帯域の光源を用いる必要があります。しかし光源の帯域を広げると、光の波長ごとに光の進行速度が異なる群速度分散により、分解能が逆に劣化するというジレンマがあり、分解能は $5\mu\text{m}$ から $10\mu\text{m}$ 程度に制限されていました。

それを解決する方法として、量子もつれ光の量子干渉を利用する量子光干渉断層技術が、2002 年に提案されました。この方法では、原理的に群速度分散による分解能の劣化がなく、高い分解能を得られることが期待されます。

2. 研究手法・成果

我々は、今回、非常に広い帯域を持つ量子もつれ光源を開発、世界記録となる、 $0.54\mu\text{m}$ の分解能に相当する量子干渉縞を実現しました。これは、従来の光断層撮影の原理検証で記録されていた世界記録 $0.75\mu\text{m}$ を超える値です。さらに、この超高分解能が、分散媒質（水）などによってほぼ影響を受けないことも実証しました。

量子もつれ光源としては、今回、物質・材料研究機構は、電子ビーム露光法により形成した微細電極を用いた高精度分極反転技術により、高効率な擬似位相整合素子を開発しました。素子の材料は、物質・材料研究機構で独自に研究開発した定比組成タンタル酸リチウムを用いており、安定した量子もつれ光子の発生が実現されています。実験では、その擬似位相整合素子から発生させた、波長 660nm から 1040nm

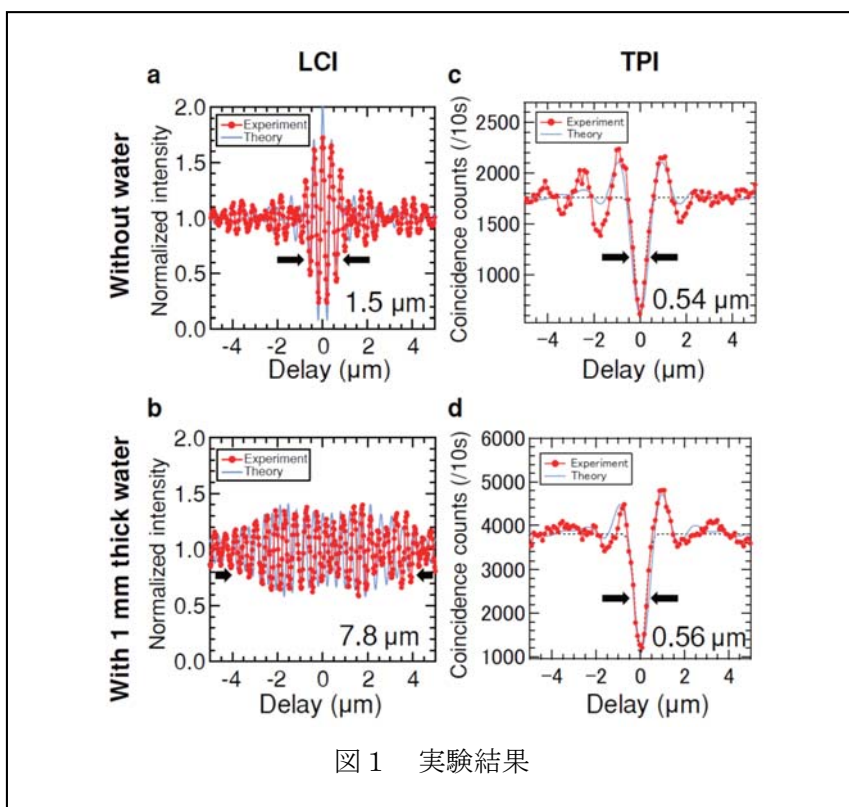


図1 実験結果

と、可視広域から近赤外光域にわたる超広帯域量子もつれ光子対を用いて、従来の光断層撮影法で用いられる低コヒーレンス干渉、および量子光断層撮影法で用いられる2光子量子干渉を、今回開発した高安定高精度干渉計を用いて実施しました。

実験結果を図1に示します。図1(a)は、得られた低コヒーレンス干渉縞です。横軸は光路長差、縦軸は干渉光強度を表します。この干渉縞の幅 ($1.5\mu\text{m}$) が、光断層撮影の深さ分解能を与えます。図1(b)は、光路中に1mm厚の水を挿入した場合の結果です。水の群速度分散の影響で、干渉縞は著しく拡がり、分解能も $1.5\mu\text{m}$ から $7.8\mu\text{m}$ に大きく劣化しています。図1(c)は、量子もつれ光子対の2光子量子干渉の結果です。横軸は、光路長差、縦軸は光子を同時に検出した回数(同時計数)を示しています。2光子量子干渉では、光路長が一致するところで同時計数が0になり、その窪みの幅が、分解能を与えます。この実験では、量子光断層撮影の深さ分解能 $0.54\mu\text{m}$ に相当する2光子干渉が得られています。図1(d)は、光路中に1mm厚の水を挿入した場合の結果です。低コヒーレンス干渉の場合(図1(b))と大きく異なり、分解能は $0.56\mu\text{m}$ と、水が存在しない場合と比べ殆ど変化していません。

このように、世界記録となる、 $0.54\mu\text{m}$ の分解能に相当する量子干渉縞を実現しました。これは、従来の光断層撮影の原理検証で記録されていた世界記録 $0.75\mu\text{m}$ を超える値です。さらに、この超高分解能が、分散媒質(水)などによってほぼ影響を受けないことも実証しました。

3. 波及効果

今回の成果により、これまで $5\sim 10\mu\text{m}$ に制限されていた、光断層撮影の深さ分解能を大幅に向上させ、 $1\mu\text{m}$ を切る分解能をもつ量子光断層撮影装置の開発が期待されます。それにより、網膜の厚みの高精度モニタリングによる緑内障の発症前診断の実現などが期待されます。

4. 今後の予定

今後は、量子もつれ光源の大光量化の研究を進め、量子光断層撮影装置の実現を目指します。

<論文タイトルと著者>

タイトル： 0.54 μm resolution two-photon interference with dispersion cancellation for quantum optical coherence tomography (量子光干渉断層計のための、分散耐性をもった 0.54 μm 分解能 2 光子量子干渉)

著者： Masayuki Okano, Hwan Hong Lim, Ryo Okamoto, Norihiko Nishizawa, Sunao Kurimura & Shigeki Takeuchi

(岡野真之 (京都大学)、イム ホワン ホン (物質・材料研究機構)、岡本亮 (京都大学)、西澤典彦 (名古屋大学)、栗村直 (物質・材料研究機構)、竹内繁樹 (京都大学))

公表雑誌： Scientific Reports

公表日： 日本時間 (現地時間) 2015 年 12 月 14 日 (月) 19 時 (英国時間 12 月 14 日 (月) 10 時)

<用語解説>

- 1) **光子**： 光のエネルギーの最小単位で、素粒子の 1 つ。1 ワットの光 (可視光) は、毎秒約 10^{19} 乗個の光子から出来ています。
- 2) **光干渉断層撮影**： 光コヒーレンストモグラフィ (Optical Coherence Tomography, OCT) は、広帯域光源による光の干渉縞が、2 つの経路が一致した所でのみ生じる事を利用して、物質中での光の反射位置を検出することで、物体内部の構造を画像化する手法です。眼底の網膜組織や、眼球とそれを取りまく周辺組織の画像診断に有用な技術として診断に活用されています。さらに、消化管や気管などの表層組織の診断などへの応用も進められています。
- 3) **群速度分散**： 水をはじめとする媒質中では、一般に光の速度はその波長に依存します。群速度分散を与える媒質を特に分散媒質と呼びます。分散により、広帯域光源を用いた低コヒーレンス干渉縞は、大きく広がります。
- 4) **半透鏡**： 入射した光の一部を反射、一部を透過させる鏡をビームスプリッターと呼びます。特に、透過率、反射率が共に 50% のビームスプリッターを、半透鏡と呼びます。
- 5) **2 光子量子干渉**： 2 つの光子を半透鏡の別々の方向から、経路が完全に重なるように同時に入射すると、2 つの光子は、どちらかの出力から必ず一緒に出力されます。これを、2 光子量子干渉と呼びます。この時、半透鏡の 2 つの出力に設置した光子検出器が同時に光子を検出する確率は 0 になります。
- 6) **量子光断層撮影計**： 光干渉断層撮影と原理はよく似ていますが、低コヒーレンス干渉の代わりに、2 光子量子干渉を利用します。波長に関してもつれ合った光子対 (量子もつれ光) を利用すると、2 光子量子干渉の干渉縞の幅は、群速度分散の影響を受けないため、分散媒質中でも高分解能を維持することが期待できます。
- 7) **擬似位相整合**： 量子もつれ光子を高効率に発生させる手法で、今回半導体の微細加工技術と真空電界印加技術を用いて、材料内にプラスマイナスの極性が反転した領域をつくりこむことで実現されました。極性反転のパターンをかえることで、発生させる量子もつれ光子の波長や帯域を設計することができます。

8) 定比組成タンタル酸リチウム： 物質・材料研究機構が独自に研究開発した材料で、結晶内の欠陥が少なく光の吸収が少ないことから、安定した量子もつれ光子の発生が可能になりました。