

## 大学の研究・動向

# 光子を用いた量子技術

工学研究科 電子工学専攻  
 教授 竹内 繁 樹  
 准教授 岡本 亮  
 助教 高島 秀 聡

## 1. はじめに

光子や電子などの「量子」は、古典的な粒子とは全く異なる振る舞いをします。それらの「量子状態」を完全に制御し、従来のコンピュータでは時間がかかりすぎ解くことのできない問題を解く「量子コンピュータ」や、観測出来なかった現象を観察する「量子計測」などの実現が期待されています。竹内研究室では、光子を用いた量子技術に関する研究を推進しています。本稿では、その中で、量子的な光を用いることで、分散による分解能劣化を克服することができる量子光断層撮影の研究、および、ナノテクノロジーを駆使した単一光子状態生成に向けた研究について紹介します。

## 2. 量子光断層撮影の研究

光干渉断層撮影 (Optical Coherence Tomography, OCT) は、低コヒーレンス光干渉に基づく距離計測法を応用したものであり、MITのHuang、Fujimotoらによって断層撮影技術として開発されました[1]。OCTは、その基本構成がマイケルソン干渉計と類似しています (図1 (a))。マイケルソン干渉計では、光源の光をビームスプリッタで2つの経路に分岐し、再び合流して干渉させた後、出力光の強度を光検出器で測定します。このとき、一方の経路長を掃引すると、2つの経路の光路長が一致する近傍で干渉信号が得られます。OCTでは、一方の光路にサンプルを設置し、もう一方の光路に設置された遅延ミラーを走査することで、サンプル内での光の反射位置を測定します。つまりサンプルの深さ方向に対する測定対象物の構造を知ることができます。分解能は干渉信号幅に対応するが、信号幅と光源の帯域は反比例するため、高分解能を得るためには、広帯域光源が必要となります。一方で、光が広帯域になるほど、分散の影響が大きくなり分解能が低下するというトレードオフの関係があり、これが現在、OCTの分解能が $5\ \mu\text{m}$ から $10\ \mu\text{m}$ 程度に制限されている主な理由です。

それを解決する方法として、周波数でもつれ合った光子対を利用する量子光干渉断層撮影 (Quantum

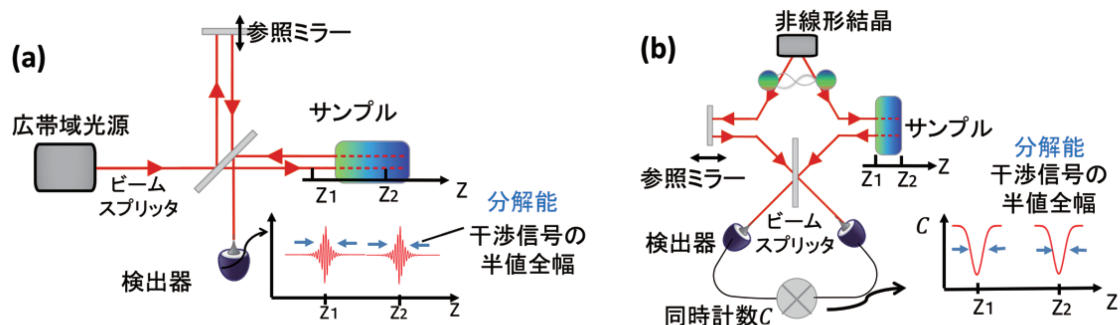


図 1: (a) OCT 測定系の概念図; (b) QOCT 測定系の概念図。

optical coherence tomography、以下では量子 OCT と呼ぶ)が2002年に提案された[2]。量子 OCT では、2光子間の周波数もつれを巧みに利用することで、群速度分散の影響を物理的に打ち消すことが可能であり、分散環境下でも高い分解能を維持することが可能です。図1(b)は量子 OCT の概念図を示しています。非線形光学結晶にポンプレーザー光を入射すると、パラメトリック下方変換過程を介して、光子対が発生します。この時、エネルギー保存則が満たされるため、ポンプレーザー光の周波数と、光子対に含まれる個々の光子の周波数の和は等しくなります。その結果、光子対に含まれる個々の光子の周波数の間に相関が生まれ、それら様々な相関状態が、重ね合わせ状態としてコヒーレントに生成されるため、「周波数もつれ状態」となります。発生した光子対の一方は、参照ミラーへ、もう一方はサンプルに導かれた後、ビームスプリッタに入射される。光子をビームスプリッタの両側のポートから同時に入射すると、2光子量子干渉と呼ばれる現象[3]が起き、二つの光子がビームスプリッタのどちらかのポートに偏って出力されます。従って、この時、ビームスプリッタの出力部で二つの光子検出器を用いて同時計数を行うと、同時計数が観測されません。そのため図1(b)のように参照ミラーを掃引すると、2つの経路の光路長が一致する場合にのみ2光子量子干渉が起き、ディップ形状が観測される(図1(b)右下)。このようにして、サンプルの断層構造を可視化することができます。量子 OCT の分解能は、2光子量子干渉によるディップの幅で決まりますが、上で述べた通り群速度分散耐性があるため、群速度分散下でもこの幅が変化せず、分解能が低下しません。さらに、同程度の帯域の光源を用いた場合、OCT よりも $\sqrt{2} \sim 2$  倍程度高い分解能が実現できます[4]。これらの特徴から量子 OCT は、従来の OCT が直面している分解能の限界を超えることが期待できます。

これまで、量子 OCT に関する様々な研究が報告されてきました。2003年、Boston大学のTeichらにより、量子 OCT の分散耐性が初めて実証されました[4]。また、2009年には同グループにより生体サンプル(玉ねぎの表皮)の量子 OCT による撮像が報告されました[5]。しかし、これらの研究では、分散耐性の実証は、 $20 \mu\text{m}$  程度の分解能に限られていました。その様な中、我々は、パラメトリック下方変換の位相整合条件の最適化、及び光子検出システムの広帯域化により、 $3 \mu\text{m}$  という高分解能域での量子 OCT の分散耐性の検証に成功しています[5]。その後、周波数もつれ光源のさらなる広帯域化を実現するために、物質材料研究機構の栗村グループとの共同で、分極反転周期をチャープさせた特殊な擬似位相整合素子を開発、帯域  $380 \text{ nm}$  の超広帯域周波数もつれ光子対を生成しました[6]。図2(a)は、この超広帯域周波数もつれ光源により取得された2光子干渉信号です[6]。図から、2光子量子干渉信号のディップ幅(半値全幅)は  $0.54 \mu\text{m}$  でありこれが、量子 OCT の分解能に対応します。超広帯域光源

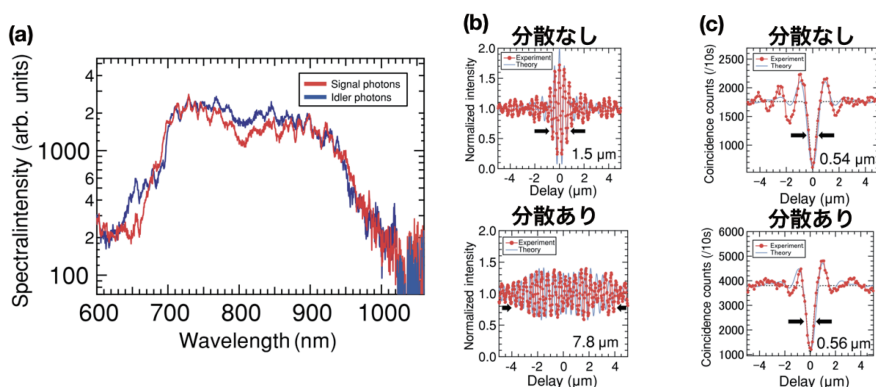


図2: (a)  $166 \text{ THz}$  ( $\lambda = 660\text{--}1040 \text{ nm}$ ) の超高帯域周波数もつれ光子対スペクトル; (b) OCT の測定信号、分散がない時に  $1.5 \mu\text{m}$  の分解能を観測したことに對して、 $1 \text{ mm}$  の水の分散に分解能は  $78 \mu\text{m}$  まで劣化した; (c) QOCT の測定信号は分散の影響をほぼ受けずに、 $0.54 \mu\text{m}$  ( $0.56 \mu\text{m}$ ) 程度の分解能を確認した。

を用いることで、従来の量子 OCT の光源由来の限界を超える分解能を実現しました。次に、分散の影響を検証するために、1 mm 厚の水サンプルを挿入しました。この場合の実験結果を図 2 (b) に示します。図から、2 光子量子干渉のディップ幅がほぼ変化していないことが分かります。一方、同じ帯域を持った古典光による OCT の干渉信号は、水の群速度分散の影響で、干渉縞の幅が著しく拡がり、その半値全幅は  $1.5 \mu\text{m}$  から  $7.8 \mu\text{m}$  へと大きく劣化しました (図 2 (c)、(d))。今回実現した  $0.54 \mu\text{m}$  という分解能は、我々の知る限りにおける従来の OCT の分解能記録である  $0.75 \mu\text{m}$ [7] を超える値です。そしてこのような超高分解能域においても、量子 OCT の分散耐性が保持されることを明らかにしました。

以上のように我々は、超高分解能量子 OCT を実現するための基盤技術を開発してきました。現在我々は、周波数もつれ光源の高輝度化に取り組んでおり、既に顕著な成果を得ています [8]。高輝度化により、量子 OCT のボトルネックであった測定スピードの問題が解決され、超高分解能・高速量子 OCT システムの実現が視野に入ります。これにより、将来的には眼底や皮膚深部のような分散の影響が顕著な状況でのリアルタイム超高分解能イメージングへの路が拓かれます。

### 3. ナノフォトニクスを用いた単一光子状態生成に向けた研究

光子を用いた量子技術を実現する上で重要なデバイスの一つが、単一の光子を効率良く発生させる「高効率単一光子源」です。我々は、この実現を目指し、単一の光子を発生させる単一発光体と、ナノスケールの構造体 (ナノ光デバイス) とを結合させたハイブリッドデバイスの開発を行ってきました。次に、これらの研究に関し、新規単一発光体として注目されている欠陥中心を導入した六方晶窒化ホウ素 (hBN) を用いた研究、ならびに、ナノ光ファイバブラッグ共振器 (NFBC) の高  $Q$  値化に関する研究を紹介します。

hBN とは、窒素とホウ素が六角形の格子状に交互に並んだ層状物質です。熱処理などにより hBN 中に欠陥中心を導入すると、バンドギャップ内にサブバンドが形成され、光子が発生するようになります。この発光は極めて明るく、また、スペクトル幅も狭く単色性に優れます。このため、単一欠陥中心含有 hBN は、近年、室温動作単一光子源を実現する物質として注目されています。

まず、hBN 中の欠陥中心に作られる電気双極子の方向推定について紹介します。欠陥中心から発生した光子がナノ光デバイスへ結合する効率は、電気双極子の向きに大きく依存します。しかし、これまで、

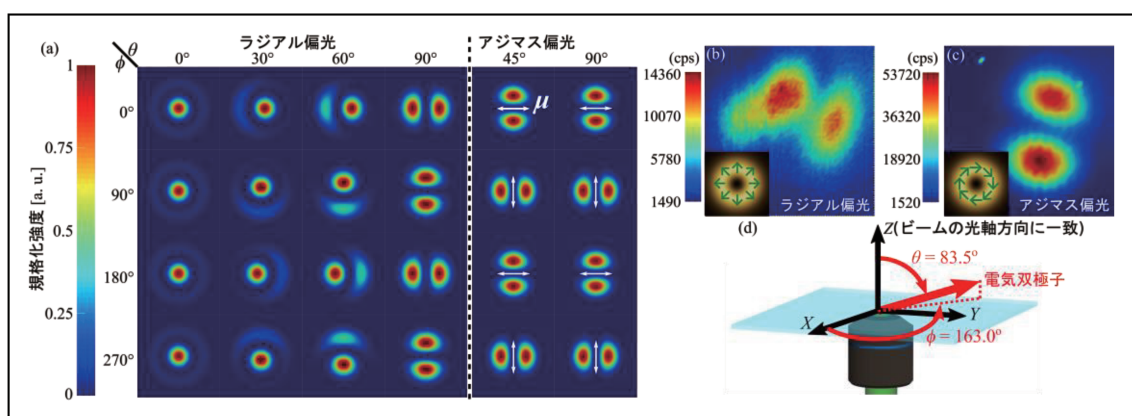


図 3 (a) 蛍光イメージの計算結果。左側はラジアル偏光ビーム、右側はアジマス偏光ビームの場合。図中の矢印は電気双極子 ( $\mu$ ) の向きを表します。(b) および (c) は、ラジアル偏光およびアジマス偏光ビームを用いた場合の蛍光イメージ (実験)。(c) 推定された電気双極子の向き。



hBN 中の欠陥中心に作られる電気双極子の向きは、十分に明らかにされていませんでした。

そこで、我々は、ビームの中心から動径方向に電場が振動するラジアル偏光ビームと、ビームの円周方向に電場が振動するアジマス偏光ビームを用い、電気双極子の方向推定を行いました [9]。これらの偏光ビームを倍率が高い対物レンズを用いて集光すると、通常の直線偏光とは異なり、蛍光イメージが電気双極子の向きにより変化します (図 3 (a))。そのため、得られた蛍光イメージを、パターン解析することで電気双極子の向きを明らかにすることが可能になります。

我々は、半波長板の向きを連続的に変化させた特殊な偏光光学素子を用い、直線偏光のビームから、ラジアル偏光ビームおよびアジマス偏光ビームを作り出しました。そして、それぞれの偏光ビームを、開口数 (NA) が大きい対物レンズを用いて集光し、蛍光イメージを測定 (図 3 (a) および (b))、理論結果との比較を行いました。その結果、電気双極子の向きが、ビームの光軸から 83.5 度、垂直な面内で 163 度傾いていることが明らかになりました (図 3 (c))。さらに、複数の試料についても調査した結果、電気双極子がビームの光軸から平均で約 80 度傾いていることもわかりました。

次に、欠陥中心含有 hBN ナノ微粒子と、ナノ光ファイバとの結合に関する研究を紹介します [10]。ナノ光ファイバとは、単一モード光ファイバを加熱延伸することで、一部を光の波長以下まで細くした光ファイバのことです。通常の単一モード光ファイバは、屈折率がわずかに高いコアと、その外側にシリカガラスからできたクラッドからなる二重構造をしているため、光はコア中を伝搬します。一方、ナノ光ファイバでは、ファイバの直径が細くなるにつれ、コアから光が漏れ出し、ファイバ全体をコア周囲の媒質をクラッドとして伝搬します。この時、ファイバの直径を断熱的に変化させることで、ほぼ 100% に迫る高い透過率を実現できます。また、ファイバの直径が細い部分では、電場がファイバ外部に大きくしみ出していることから、単一発光体から発生した光子を、高い効率 (最大約 30%) で光ファイバに結合させることも可能です [11]。

我々は、光ファイバをセラミックヒーターで加熱延伸することでナノ光ファイバを作製しました。そして、ナノマニピュレーション技術を用いて、作製したナノ光ファイバの表面に、単一欠陥中心含有 hBN ナノ微粒子を結合させました。その結果、hBN ナノ微粒子から発生した光子を、約 10% の効率で光ファイバへ結合させることに成功しました (図 4) [10]。この効率は、通常の対物レンズを用いて得られる 2~3% よりも大きい値です。ただし、この研究では hBN 中の電気双極子の向き最適化されていません。この向きを最適化することで、理論限界に迫る (30% 程度) 結合効率も可能になると考えられます [11]。

最後にナノ光ファイバブラッグ共振器 (NFBC) の高  $Q$  値化に関する研究を紹介します。NFBC とは、ナノ微細加工技術によって、ナノ光ファイバの一部に微小光共振器を書き込んだものです。共振器によって光ファイバ方向への発光が増強されるため、ナノ光ファイバよりの結合効率を著しく向上させることが可能となります。

これまで我々は、Ga イオンを用いた集束イオンビーム (FIB) 装置を用いて NFBC の開発を行ってきました [12]。しかし、作製された NFBC の光閉じ込め効率 ( $Q$  値) は 250 程度に限られていました。そこで、NFBC の高  $Q$  値化を目指し、1 nm 以下の高い分解能と残留イオンの影響がないヘリウム (He)

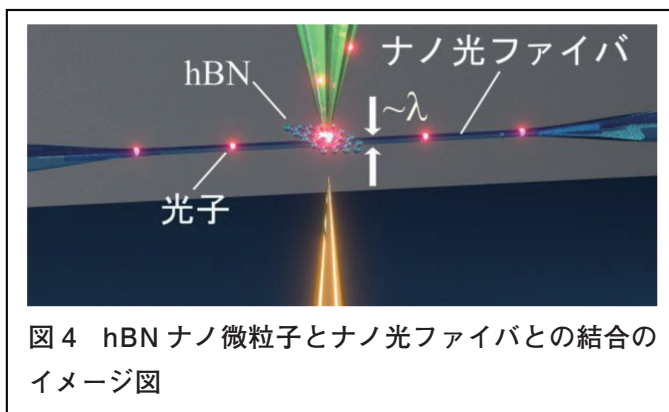


図 4 hBN ナノ微粒子とナノ光ファイバとの結合のイメージ図

イオンを用いた FIB 装置を用い、NFBC の作製を行いました [13]。

図 5 (a) に、片側 80 周期のグレーティングを作製した NFBC の走査イオン顕微鏡像を示しました。320 nm 周期のグレーティングが間隔をあけて二組加工されていることがわかります。図 5 (b) は、作製した NFBC の透過スペクトルです。Ga イオン FIB 装置を用いた場合に比べ、 $Q$  値は 450 に向上しました。また、我々は、片側 320 周期のグレーティングからなる NFBC を作製、4000 以上の  $Q$  値をもつ NFBC の作製にも成功しました。これにより、単一発光体から発生する光子を 80% 以上の効率で単一モード光ファイバへ結合できるようになります [14]。

#### 4. まとめ

本稿では、まず、量子光断層撮影について紹介

しました。上記でも述べましたが、現在我々は、周波数もつれ光源の高輝度化に取り組んでおり、既に顕著な成果を得ています [8]。高輝度化により、量子 OCT のボトルネックであった測定スピードの問題が解決され、超高分解能・高速量子 OCT システムの実現が視野に入ります。これにより、生命科学分野への貢献が十分期待できます。たとえば、群速度分散耐性をもつ量子 OCT により、サブミクロンの垂直・水平分解能で、表面から数十から数百  $\mu$  十下にある細胞形状の 3 次元立体像を得ることも可能となるかもしれません。

次に、単一欠陥中心を導入した hBN を用いた研究として、電気双極子の方向推定、ならびに、ナノ光ファイバとの結合を紹介しました。また、He イオン FIB 装置を用いた NFBC の高  $Q$  値化に関する研究を紹介しました。本編でも述べたように、hBN 中の電気双極子の方向推定を、発光体の位置を制御するナノマニピュレーション技術と融合させると、理論限界に迫る高い効率 (約 30%) で光子を光ファイバへ結合させることが可能となります [3]。また、NFBC との結合により、結合効率のさらなる向上も可能となります。それにより、量子技術の不可欠な高効率単一光子源の実現も期待できます。

また、今回は紙面の都合で述べなかったが、最近、周波数量子もつれ状態を、集積化可能なチップ上にて、同種の素子において世界最大の波長域とモード数で実現しています [15]。他にも、時間的に変化する量子状態を推定できる「連続適応量子状態推定」を提案、シミュレーションおよび実験で、物理学の限界の精度で推定できることを実証しています [16]。また、光子の量子もつれ状態を、従来に比べて著しく高い効率で検証する方法の実証に、構築した 6 つの光子間量子ゲートを含む光量子回路を用いて成功しています [17]。

#### 参考文献

- [1] D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C. A. Puliafito, and J. G. Fujimoto, *Science*, **254** (1991) 1178.
- [2] A. F. Abouraddy, M. B. Nasr, B. E. A. Saleh, A. V. Sergienko, and M. C. Teich, *Phys. Rev. A*, **65** (2002) 053817.
- [3] C. K. Hong, Z. Y. Ou, and L. Mandel, *Phys. Rev. Lett.*, **59** (1987) 2044.

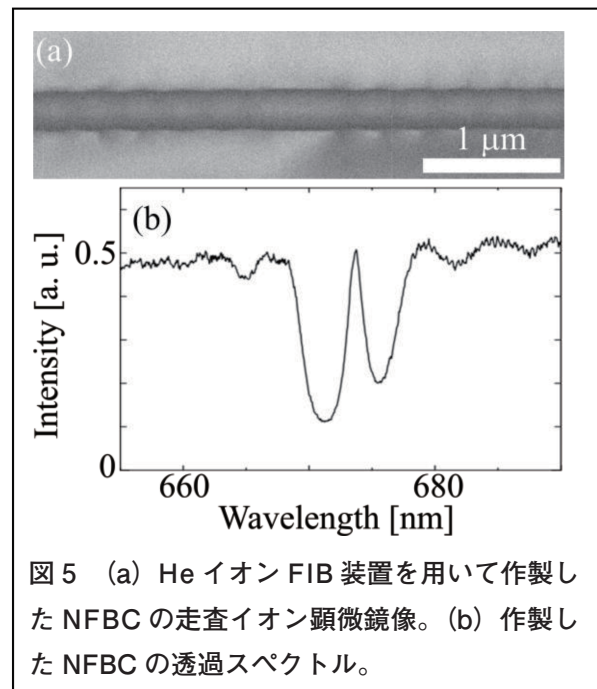


図 5 (a) He イオン FIB 装置を用いて作製した NFBC の走査イオン顕微鏡像。(b) 作製した NFBC の透過スペクトル。

- [4] M. Okano, R. Okamoto, A. Tanaka, S. Ishida, N. Nishizawa, and S. Takeuchi, *Phys. Rev. A*, **88** (2013) 043845.
- [5] M. B. Nasr, D. P. Goode, N. Nguyen, G. Rong, L. Yang, B. M. Reinhard, B. E. A. Saleh, and M. C. Teich, *Opt. Commun.*, **282** (2009) 1154.
- [6] M. Okano, H. H. Lim, R. Okamoto, N. Nishizawa, S. Kurimura, and S. Takeuchi, *Sci. Rep.*, **5** (2015) 18042.
- [7] B. Povazay, *et al.*, *Opt. Lett.*, **27** (2002) 1800.
- [8] B. Cao, R. Okamoto, M. Hisamitsu, K. Tokuda, and S. Takeuchi, 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference, OSA Technical Digest (Optical Society of America), paper eb\_p\_25 (Munich, 2019).
- [9] Hideaki Takashima, Hironaga Maruya, Keita Ishihara, Toshiyuki Tashima, Konosuke Shimazaki, Andreas W. Schell, Toan Trong Tran, Igor Aharonovich, and Shigeeki Takeuchi, *ACS Photonics*, **7**, 2056-2063 (2020).
- [10] Andreas W. Schell, Hideaki Takashima, Toan Trong Tran, Igor Aharonovich, and Shigeeki Takeuchi, *ACS Photonics*, 2017, **4** (4), pp 761-767.
- [11] Mohamed Almokhtar, Masazumi Fujiwara, Hideaki Takashima, and Shigeeki Takeuchi, *Optics Express*, **22**, 20045-20059 (2014).
- [12] Andreas W. Schell, Hideaki Takashima, Shunya Kamioka, Yasuko Oe, Masazumi Fujiwara, Oliver Benson and Shigeeki Takeuchi, *Scientific Reports* **5**, 9619 (2015).
- [13] Hideaki Takashima, Atsushi Fukuda, Hironaga Maruya, Toshiyuki Tashima, Andreas W. Schell, and Shigeeki Takeuchi, *Optics Express*, **27**, 6792-6800 (2019).
- [14] Hideaki Takashima, Masazumi Fujiwara, Andreas W. Schell, and Shigeeki Takeuchi, *Optics Express*, **24**, 15050 (2016).
- [15] K. Sugiura, Z. Yin, R. Okamoto, L. Zhang, L. Kang, J. Chen, P. Wu, S. T. Chu, B. E. Little, and S. Takeuchi, *Applied Physics Letters*, **116**, 224001 (2020).
- [16] S. Nohara, R. Okamoto, A. Fujiwara, and S. Takeuchi, *Physical Review A*, **102**, 030401 (2020).
- [17] T. Kiyohara, N. Yamashiro, R. Okamoto, H. Araki, J.-Y. Wu, H. F. Hofmann, and S. Takeuchi, *Optica*, **7**, 1517-1523 (2020).