

解禁時間 (テレビ、ラジオ、WEB) : 平成 24 年 4 月 16 日 (月) 午前 2 時
(新聞) : 平成 24 年 4 月 16 日 (月) 付 朝刊



平成 24 年 4 月 13 日

科学技術振興機構 (JST)
Tel : 03-5214-8404 (広報課)

大阪大学基礎工学研究科
Tel : 06-6850-6131 (庶務係)

産業技術総合研究所
Tel : 029-862-6216 (広報部)

ダイヤモンドLEDで光子を1個ずつ室温で電氣的に発生させることに 世界で初めて成功 ～盗聴不可能な量子暗号通信に向けて加速～

JSTの課題達成型基礎研究の一環として、大阪大学の水落 憲和 准教授と産業技術総合研究所の山崎 聡 主幹研究員らのグループは、人工ダイヤモンドを用いて室温で電氣的に単一光子を発生させることに世界で初めて成功しました。

近年、量子暗号通信^{注1)}は理論上、どのような技術でも盗聴できない究極の通信技術として期待されており、世界的にも多くの企業が研究開発を行っています。この実現には、情報を載せる光子の1個1個を必要なときに簡易かつ確実に発生させる単一光子源^{注2)}が求められています。ところが、これまでの量子ドットや有機分子を用いた単一光子源は、室温では不安定でほとんど光らなくなるため、極低温での冷却が不可欠でした。また、室温で単一光子を発生できても、光励起のためのレーザーが必要なものしか実現されておりません。つまり、エネルギーやコストの制約が単一光子源の実用化・普及の課題となっていました。

今回、ダイヤモンドを材料とし、そこに埋め込まれている炭素原子の抜け穴と窒素原子の複合体(NV中心・図1)が室温でも安定に発光することに着目、単一光子源として用いて、電流で動作させることに挑戦しました。具体的には、高度な製造技術によって高品質ダイヤモンドの薄い発光層をn層とp層で挟み、発光層に電気が流せるLED素子を作製しました。さらに、光子相関法^{注3)}などの精密な測定法により、単一光子源として世界で初めて室温で電氣的に動作していることを実証しました(図2)。

世界トップレベルの技術の融合により、単一光子源で課題となっていた、極低温やレーザーを使用する際の問題を克服し、量子暗号通信の省エネルギー・低コスト化への道が開かれました。今後、素子の集積化によって、システムの高速度化や効率化が進み、実証実験を経た近い将来には、国家機密の通信や個人情報に関わる秘匿通信などへの利用が期待されます。さらにNV中心には優れたスピン^{注4)}の機能があります。これは本成果が量子暗号通信にとどまらず、将来的には室温で電氣的にスピンや光を操作して演算や記録を行う量子コンピューター^{注5)}や量子計測などで必要な素子の実現にも貢献する可能性を示すものです。

本研究成果は、2012年4月15日(英国時間)発行の英国科学雑誌「Nature Photonics」のオンライン版で公開されます。

本成果は、以下の事業・研究領域・研究課題によって得られました。
戦略的創造研究推進事業 個人型研究(さががけ)

研究領域:「革新的次世代デバイスを目指す材料とプロセス」

(研究総括:佐藤 勝昭 東京農工大学 名誉教授)

研究課題名:「ワイドギャップ半導体中の単一常磁性発光中心による量子情報素子」

研究者:水落 憲和(大阪大学 基礎工学研究科 准教授)

研究実施場所:大阪大学 基礎工学研究科

研究期間:平成21年1月~平成24年3月

この研究領域は、CMOSに代表される既存のシリコンデバイスを超える革新的な次世代デバイスを創成することを目標として、環境やエネルギー消費に配慮しつつ高速・大容量かつ高度な情報処理・情報蓄積・情報伝達を可能とする新しい材料の開拓およびプロセスの開発を図る挑戦的な研究を対象とするものです。

＜研究の背景と経緯＞

近年、インターネットの普及に伴い、より安全性の高い通信に対する需要が高まっています。現在の公開鍵暗号方式^{注6)}では、将来的には技術の進歩に伴い解読されるリスクがあります。一方、量子暗号技術では、情報を光子一つ一つに載せて伝送するため、仮に盗聴が試みられても、その痕跡が絶対に残るといふ量子力学的原理によって、受信側で盗聴を確実に検知することができます。そのため、その原理を用いた量子暗号通信は、理論上盗聴できない究極の暗号通信として、その実現と普及が期待されています。また、将来的には現行通信を大幅に超えた低消費電力化も期待できるとの理論報告もあります。量子暗号通信については、基本的なシステムがすでに海外の数社のベンチャー企業から販売され、日本においても数多くの企業が関心を持ち、基盤技術開発や量子暗号鍵伝送実験を行っています。

従来の量子暗号鍵伝送実験では、レーザー光を極限まで弱めた擬似的単一光子源が主に使われています。擬似的単一光子源による問題点は、1パルスに2個以上の光子が入る場合があるため、盗聴の可能性が生じることです。従って量子暗号には、確実に1パルスに1個の光子のみが存在する単一光子を発生させる単一光子源の実現が期待されています。

ところが、これまで研究されてきた量子ドットや有機分子を用いた単一光子源は、室温では不安定でほとんど光らなくなるために極低温での冷却が不可欠なもの、室温で単一光子を発生できても、光励起のためのレーザーが必要なものしか実現されておらず、エネルギーやコストの制約が単一光子源の実用化・普及の課題となっていました。

今回研究グループはダイヤモンドを材料とし、そこに埋め込まれている単一発光中心(NV中心、図1)を単一光子源として用いることにより、デバイス集積化、低消費電力化といった実用化に要求される電流注入型の固体素子において、初めて室温での単一光子発生の実証に成功しました。

＜研究の内容＞

1つのNV中心のみを観測するためには、不純物のない極めて高品質なダイヤモンド(i層)にNV中心が埋め込まれていることが必要ですが、ダイヤモンドは不純物(ドーパント)がないと絶縁体であるため電気が流れません。今回、高品質ダイヤモンド(i層)を、リンをドーブしたn層とホウ素をドーブしたp層で挟んでpin構造の素子を作製することにより(図2)、i層に電気を流せるようにしたところが重要です。自作の共焦点顕微鏡装置を用いることにより、一つ一つのNV中心を光学検出できます。図3(a)は光励起による単一NV中心からの発光をモニターした蛍光像で、図3(b)は同じ位置での電流注入による単一NV中心からの発光をモニターした蛍光像です。電流注入による単一NV中心からの発光も光励起と同じ単一NV中心から光っている様子が見て取れます。光子相関法によるアンチバンチング^{注7)}の観測から、単一のNV中心からの発光であることが証明され、単一光子源として動作していることが示されました(図4)。

今回の成果は、室温でも安定に発光するダイヤモンド中のNV中心に着目し、産業技術総合研究所の高品質ダイヤモンド半導体合成技術・デバイス作製技術と、大阪大学のNV中心を一つ一つ観測する技術を用いることにより得られました。

＜今後の展開＞

本成果によって、極低温などの制限のない室温で、しかもレーザーでなく電気をを用いた単一光子源の動作が実証されたことで、省エネルギー・低コストの素子の集積化に道が開かれました。今後、さらなる通信速度の高速化やより確実な一つ一つの光子発生の制御に

向け、ドーピング条件、素子作製プロセス工程、素子構造の最適化により、電気的特性、光学的特性の改善を図っていきます。また、光ファイバーを用いた量子暗号通信の長距離化には発光波長を通信波長帯の波長（1.5ミクロン帯）に変換にする必要性が考えられますが、その場合は、近年実現している量子波長変換素子^{注8)}により、量子情報を保持したまま波長を変換できます。既存の量子暗号システムの高速度化や効率化が進み、実証実験を経ることで、近い将来、国家機密の通信や個人情報に関わる秘匿通信などへの利用が期待されます。

また、NV中心は優れたスピンの特性も持っています。スピンは量子情報の演算や記録に使えるため、その機能を使った量子暗号通信のさらなる長距離化や、高速化に必要な量子中継器^{注9)}の実現も期待されています。この場合、NV中心は単一光子源としてではなく、量子中継器としての機能を果たすことも期待されます。今回の成果は、このスピン特性を生かすことで、将来的には量子レジスタ、量子メモリー^{注10)}といった、量子コンピューターや量子計測の実現に結びつく量子情報素子への展開を示唆するものです。

<付記>

本研究において、LED製作にあたり、JST戦略的創造研究推進事業 チーム型研究(CREST)「二酸化炭素排出抑制に資する革新的技術の創出」研究領域(研究総括:安井 至(独)製品評価技術基盤機構 理事長/国際連合大学 名誉副学長)における研究課題「超低損失パワーデバイス実現のための基盤構築」(研究代表者:山崎 聡)の支援を受けました。

<参考図>

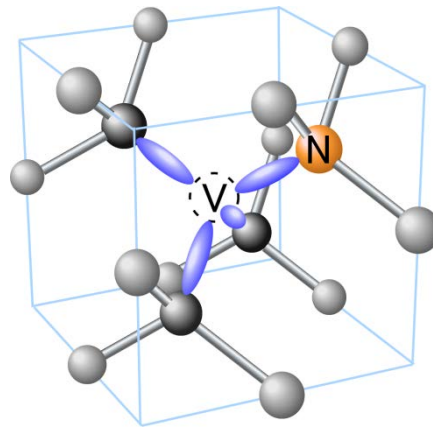


図1 ダイヤモンド中のNV中心（窒素 - 空孔複合体）

Nは窒素原子でダイヤモンド格子中の炭素原子の置換位置に入っている。Vは炭素原子が抜けた空孔（V）である。

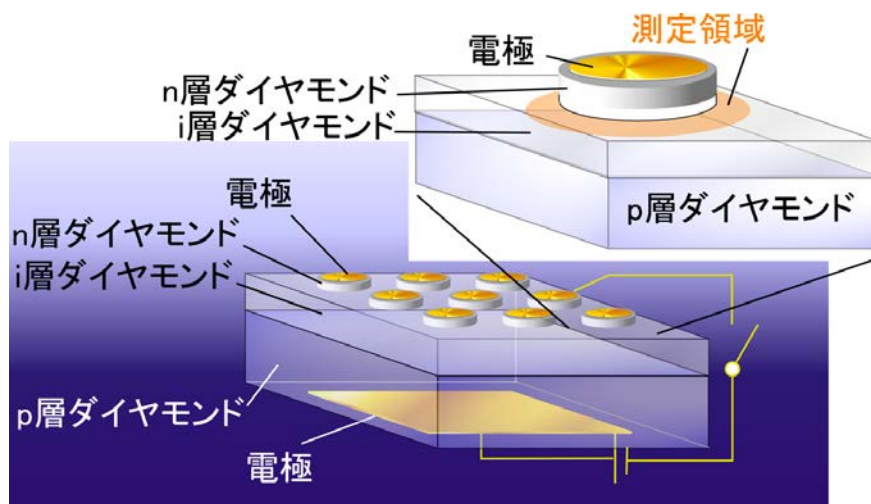
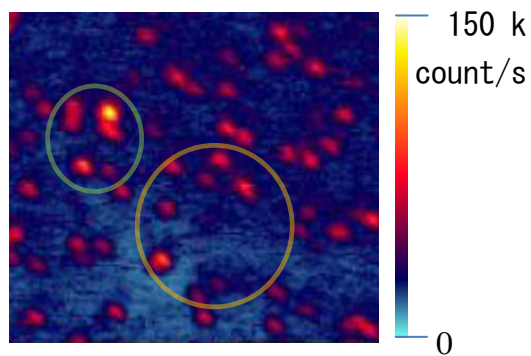


図2 電流注入型単一光子発生素子の概略図

高品質ダイヤモンド（i層）を、リンをドーピングしたn層とホウ素をドーピングしたp層で挟んだp-i-n形ダイオード構造を用いた。i層の単一NV中心からの発光を共焦点顕微鏡により観測している。

(a) 光励起による
単一NV中心からの発光



(b) 電流注入による
単一NV中心からの発光

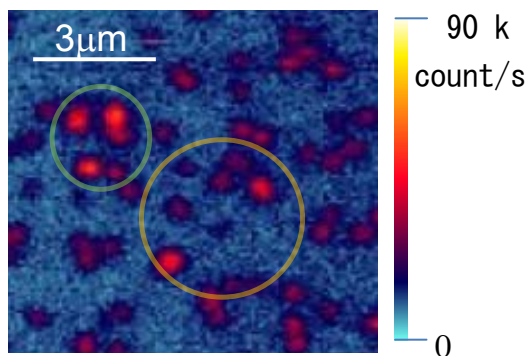


図3 単一NV中心の共焦点顕微鏡蛍光像

自作の共焦点顕微鏡を用いることにより、一つ一つのNV中心を光学検出できる。

(a) は光励起による単一NV中心からの発光をモニターした蛍光像。(b) は同じ位置での電流注入による単一NV中心からの発光をモニターした蛍光像。丸は視覚的な補助。電流注入による単一NV発光からの発光も光励起と同じ単一NVから光っている様子が確認できる。

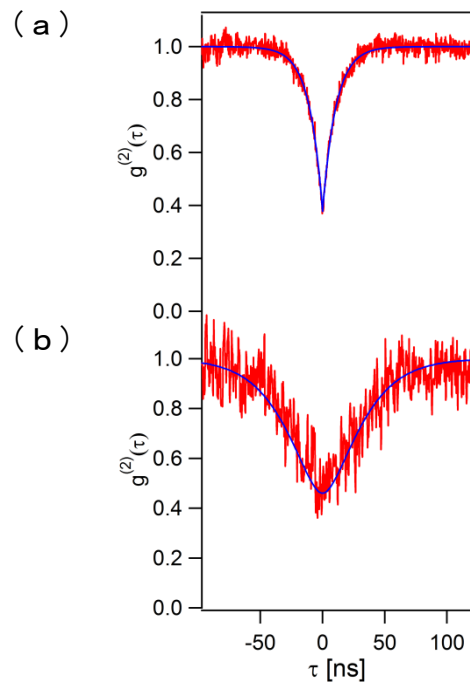


図4 光子相関法によるアンチバンチングの観測

(a) は光励起による単一NV中心のアンチバンチング。(b) は電流注入による単一NV中心のアンチバンチング。 $\tau=0$ における値が0.5未満であることから単一のNV中心からの発光であることが証明された。

<用語解説>

注1) 量子暗号通信

量子力学という物理法則の原理により、通信途中での盗聴を完全に防ぐ方式。盗聴された痕跡を確実に検知できるため、暗号化および復号化を行う秘密鍵を送信側と受信側で量子暗号通信により安全に共有できる。

注2) 単一光子源

光は波動性と共に粒子性を持っている。単一光子は光の粒子1個を意味し、単一光子源は光子1個を発生する光源。

注3) 光子相関法

光子数の時間的ばらつきを測定する技術。1つの光子を観測した後に別の光子を観測するまでの時間を計測することにより、相関を見積もることができる。

注4) スピン

荷電粒子である電子や原子核は、“電荷”と同時に“スピン”という自由度を持つ。それら荷電粒子が自転することにより小さな磁石として振る舞いスピンとしての性質を持つ。

注5) 量子コンピューター

量子情報処理を行うコンピューターのこと。演算途中の状態で0と1の「重ね合わせ」という量子力学特有の状態を使うことが可能なため、現状のコンピューターが苦手とする素因数分解やデータ検索などの計算を桁違いの速さで実行できると考えられている。

注6) 公開鍵暗号方式

暗号化鍵と復号化鍵が異なる暗号方式で、暗号化用の鍵は第三者に公開されてもかまわないという方式。現在、公開鍵暗号方式の中でも代表的なRSA暗号方式では、素因数分解の計算が難しいことを安全性の根拠としているが、将来的にはコンピューターの演算処理速度の高速化や量子計算機の実現などにより、破られる危険性がある。

注7) アンチバンチング

光子相関法による測定において、1個の光子を検出したとき、その近くにもう1個別の光子を検出する確率が小さくなっている場合に観測される強度相関。NV中心の場合、励起後に光子を1個放出した後は励起状態から基底状態に戻ってしまうので、再び励起状態に戻るまではもう1個別の光子を放出することができない、つまり時間的に近接した2つの光子の存在する確率が小さくなり、アンチバンチングが観測される。

注8) 量子波長変換素子

量子情報を保持したまま波長変換する素子。近年、周期分極反転ニオブ酸リチウムといった光学材料を用いることにより実現している。

注9) 量子中継器

量子情報通信の距離を延長したり、量子ルータとして通信路の交換を可能とするための中継器。量子中継器には量子メモリーや量子情報処理を行う量子レジスタが必要になる。

注10) 量子メモリー

量子コンピューターの構成要素であり、情報の保持を担う、現在のコンピューターのハードディスクに相当するもの。水落 憲和准教授ら大阪大学は、2011年にNTT物性科学基礎研究所および国立情報学研究所とスピンを利用した量子メモリーの原理実験に成功し、プレスリリースを行っている

(<http://www.ntt.co.jp/news2011/1110/111012a.html>)。

<論文タイトル>

“Electrically driven single photon source at room temperature in diamond”
(ダイヤモンドを用いた室温動作する電流注入型単一光子発生源)

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

水落 憲和 (ミズオチ ノリカズ)

大阪大学 基礎工学研究科 物質創成専攻 准教授 (兼任: JST さきがけ研究者)

〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町1-3

Tel : 06-6850-6426 Email : mizuochi@mp.es.osaka-u.ac.jp

基礎工学研究科物質創成専攻鈴木研究室HP

<http://www.suzukiylab.mp.es.osaka-u.ac.jp/>

山崎 聡 (ヤマサキ サトシ)

産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門 主幹研究員

〒305-8568 つくば市梅園1-1-1 中央第2

Tel : 029-861-2632 Fax : 029-861-2773

Email : s-yamasaki@aist.go.jp

<JSTの事業に関すること>

原口 亮治 (ハラグチ リョウジ)、木村 文治 (キムラ フミハル)、橋本 典親 (ハシモト ノリチカ)

科学技術振興機構 戦略研究推進部

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

Tel : 03-3512-3525 Fax : 03-3222-2063

E-mail : presto@jst.go.jp