

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 ●● 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 : xx-xxxx-xxxx (広報室)

## ダイヤモンドLEDで光子を1個ずつ室温発生させることに 世界で初めて成功 ～絶対に盗聴不可能な量子暗号通信への応用に道～

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個を必要なときに自由かつ確実に発生させる単一光子源が求められています。しかし、これまで量子ドットや有機分子を用いた単一光子源は、室温では殆どの場合、不安定で光らなくなるため、極低温での冷却が必要でした。また、これまで光励起方式ではレーザーが必要で、その結果、装置全体のサイズや省エネルギーなどの観点から実用化には大きな課題がありました。

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)を単一光子源として用いました。そして、これまでのレーザーを用いる光励起方式に代わり、電流で動作する電流注入方式に挑戦しました。

鍵となったのは、これまで技術的に困難であった、LEDのダイヤモンド半導体への応用を可能にした高度な製造技術と電流注入方式による単一光子の発生を可能にした精密な測定法、それら世界トップレベルの技術を採用し革新的な融合を図った発想でした。それが、高品質ダイヤモンドの薄い発光層をn層とp層で挟んだLED素子を生み出し、発光層に電気を流すことを成功させ、世界で初めて室温で電氣的に動作する単一光子源を実現しました(図2)。

本研究により、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拓かれました。今後は既存の量子暗号システムの高速度化や効率化が加速し、実証実験を経て、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。

さらに、本研究ではNV中心にはスピンの機能もあることが分かりました。これは本成果が量子暗号通信に止まらず、将来的には光やスピンを室温で電氣的に操作して演算や記録を行う量子コンピューティングや量子計測等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(さきがけ)

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、量子暗号通信<sup>注1)</sup>により、理論上どのような技術でも盗聴できない究極の暗号通信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ます。量子暗号通信については、基本的なシステムが既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大手の電機メーカーが関心を持ち、基盤技術開発を行っています。量子暗号には、光子を一つ一つ規則正しく生成する単一光子<sup>注2)</sup>源を用いるのが理想で、さらなる量子暗号通信の高速化や長距離化には、確実に1パルスに1個の光子のみが存在する単一光子発生素子の実現が期待されています。また、単一光子源はある種の計算において、既存のコンピュータよりも桁違いに速く計算できる量子コンピュータ<sup>注3)</sup>や、従来の計測技術の理論限界の壁を突破する量子計測への応用も期待されています。これまで量子ドットなどを用いて開発されてきた単一光子発生素子は極低温での冷却が必要でした。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＞

一つの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、リンをドーピングしたn形層とホウ素をドーピングしたp形層で挟んで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<sup>注4)</sup>によるアンチバンチング<sup>注5)</sup>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。

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成功しました。

## ＜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拓かれました。今後、さらなる通信速度の高速化に向け、ドーピング条件の最適化や素子構造の最適化により、電気的特性の改善を図っていきます。既存の量子暗号システムの高速化や効率化が進み、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、今回単一光子源として用いたNV中心は電子スピン<sup>注6)</sup>を持っており、その単一スピンの操作を室温で行えるという他の物理系にはない際立った特徴も持っています。スピンは量子情報の演算や記録に用いることができるため、今回の成果は単一光子発生素子

のみならず、将来的には室温で電氣的に光やスピンを操作して演算や記録を行う量子情報素子の実現へ道を拓くものです。量子暗号通信、量子コンピューティング、量子計測に必要とされる素子の研究開発およびその集積化への貢献も期待できます。

#### <付記>

本研究成果において、LEDの製作にあたり、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>

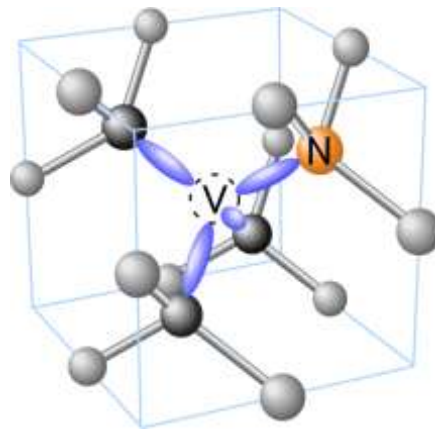


図1 ダイヤモンド中のNV中心（窒素 - 空孔複合体）

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。

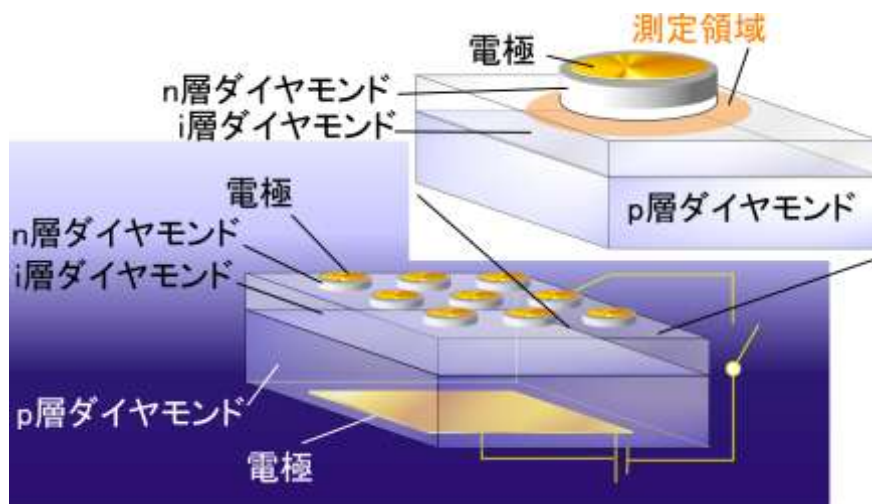
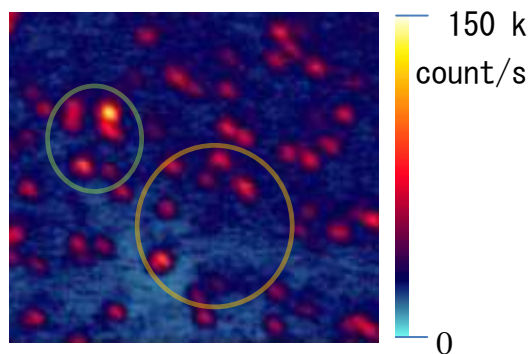


図2 電流注入型単一光子発生素子の概略図

高品質ダイヤモンド（i層）を、リンをドーブしたn形層とホウ素をドーブした形層で挟んだ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

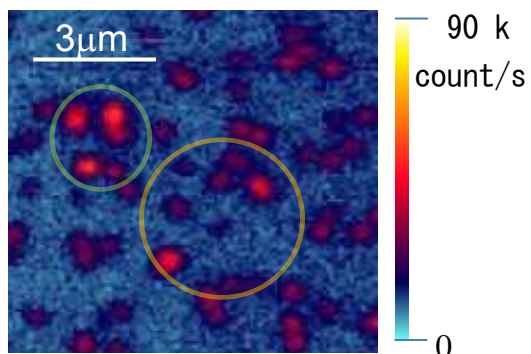


図3 単一NV中心の共焦点顕微鏡蛍光像

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見て取れる。

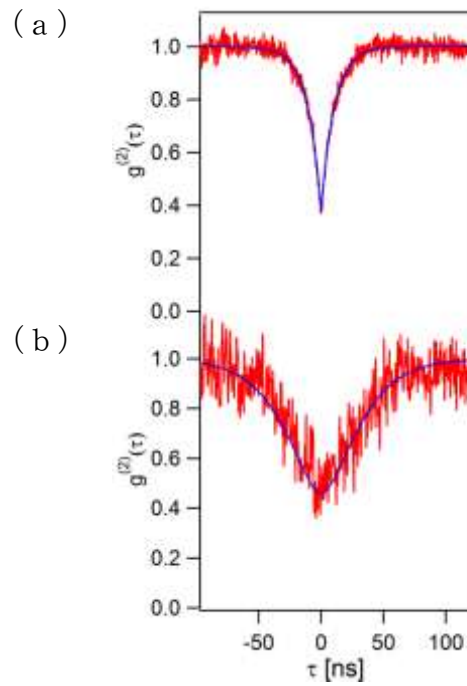


図4 光子相関法によるアンチバンチングの観測

(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。盗聴された痕跡を検知できるため、物理的に安全性が保障された究極の鍵配付方式である。

### 注2) 単一光子

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個を意味する。

### 注3) 量子コンピュータ

量子情報処理を行うコンピュータのこと。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が苦手とする素因数分解やデータ検索などのある種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4) 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5) 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6) 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。

<論文名>

“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: J S T さきがけ研究員)

〒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 (ヤマザキ 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 産総研TC-2

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

Email : s-yamasaki@aist.go.jp

<J S T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