



丸文研究奨励賞 受賞者

岩崎 孝之  
東京工業大学 工学院  
准教授

## ダイヤモンド中のスズ-空孔中心を用いた量子光源の研究

量子ネットワークに向けた新しい固体量子光源の創出

### 研究の背景

量子ネットワークは、量子状態を送受信することで安全な通信を実現する情報ネットワークである。量子中継を利用した長距離量子状態伝送などその機能をより高度なものに拡張することが期待され、世界中で活発に研究が行われている。固体物質中に形成される量子光源は、このような量子ネットワークにおいて必要となる発光源や量子中継構築のための有望な系として期待されている。しかしながら、量子ネットワーク応用に必要な優れた光学特性およびスピン特性を両立する系は見出されていなかった。これまで最も研究されている系のひとつであるダイヤモンド中の窒素-空孔(NV)中心は、大きなフォノンサイドバンドを有しており、量子光源として利用できるゼロフォノン線(ZPL)の割合が4%のみで発光強度が小さいという問題があった。ワイドギャップ半導体であるダイヤモンドは、そのギャップ中に多数の発光中心のエネルギーレベルを形成することができる。しかし、再現性良く形成できる不純物で単一光子放出を示す光源は、主に古くから知られているNV中心とシリコン-空孔

(SiV)中心、さらに我々が発見したゲルマニウム-空孔(GeV)中心に限られていた[1]。NV中心に対し、IV族元素からなるSiVおよびGeV中心は鋭いZPLを有し、全発光に対するZPLの割合が数十%におよぶ[2]。しかしながら、これらIV族発光中心は、量子状態を保存するスピコヒーレンス時間が冷却温度2 Kにおいてもマイクロ秒以下に制限されていた。IV族発光中心のスピコヒーレンス時間を制限しているのは、基底状態分裂間でのフォノン吸収である。本研究では、この問題を解決するために、重いIV族元素であるスズに着目することでダイヤモンド中の新しい量子光源であるスズ-空孔(SnV)中心を創出した[3]。

### 研究の成果

基底状態でのフォノンの影響を抑制し、長いスピコヒーレンス時間を達成するために、ハーバード大学を中心とするグループでは以下のように研究を推進していた。Marco Loncar教授グループでは、ナノ加工構造によるストレインエンジニアリングによってSiV中心のスピコヒーレンス時間の伸長に成

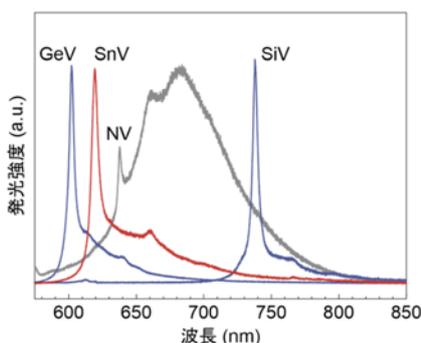
功したが、スピコヒーレンス時間は1  $\mu$ s以下に留まっている[4]。Mikhail Lukin教授グループでは、SiV中心を400 mK以下まで冷却することでミリ秒の長スピコヒーレンス時間を達成した[5]。しかしながら、この方法は大型の希釈冷凍機が必要となってしまう。上記の手法はSiV中心の特性を制御していたが、本研究では異なるアプローチを取り、フォノン吸収を抑制できる大きな基底状態分裂幅を有するSnV中心を形成した。Siよりも重いGeを用いたGeV中心の創出[1]も重要な成果のひとつであるが、さらにスピン-軌道相互作用を増加させるためにGeよりも重いSnを用いた(図1(a))。SnV中心は波長619 nmにシャープなZPLを示し、全発光において大きな割合を占めていることを観測した(図1(b))。第一原理計算により、Sn原子が格子間位置に存在し、炭素位置の2つの空孔に挟まれた $D_{3d}$ 対称性を取ることを明らかにした(図1(c))。この構造は、反転対称性により外部ノイズに強く安定した発光波長を示すという特長を有している。

ダイヤモンドは非常に密に炭素原子が配列している結晶であり、導入される不純物にとっては結晶中を拡散しづらい環境

図1 (a) IV族元素の周期律表

6	C
	炭素
14	Si
	シリコン
32	Ge
	ゲルマニウム
50	Sn
	スズ

(b) ダイヤモンド中のIV族発光中心とNV中心の室温発光スペクトル



(c) SnV中心の原子レベル構造の模式図

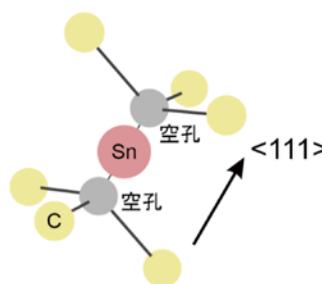
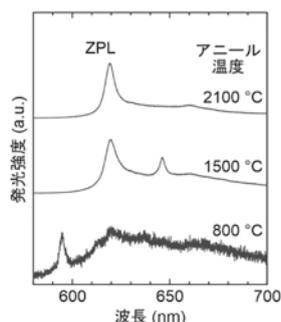


図2 高温高圧アニールによる高品質SnV中心の形成



となる。特に本研究で使用したスズは周期律表で炭素よりも3行下に位置する重い元素であり、高品質な発光中心を形成することは困難であると予想された。実際、イオン注入後のアニールを、通常発光中心を形成するために使用する800°C程度で行ったところ明確なスペクトルが現れなかった(図2)。そこで、本研究では、高品質なSnV中心を形成するために新しい形成手法を実施した。7.7 GPaの高圧下において2100°Cという高温でアニールする方法である。炭素からなる固体物質では、大気圧において最も安定な材料はグラファイトである。よって、ダイヤモンドのグラファ

イト化を防ぎ、かつ2000°Cを超える高温でアニールするために高圧下において処理を行った。温度が上昇するにしたがって、SnV中心からのZPLの線幅が細くなり、高品質化していることを確認した。導入するスズの量を制御することで、量子光源として機能する単一SnV中心の形成も実現した。さらに、発光励起分光による共鳴励起計測において、本手法で形成したSnV量子光源は物理的な限界であるフーリエ限界線幅を有する高品質なものであることを確認した[6]。

微細構造の観察による基底状態分裂幅の決定をもとにSnV中心のスピンの特性の評価を行った。低温での発光スペクトルの観察から、SnV中心の基底状態分裂幅は850 GHzであり、SiVおよびGeV中心よりも圧倒的に大きいことを明らかにした(図3)。この大きな基底状態分裂幅から、SnV中心においてはフォノン吸収が大幅に抑制され、ミリケルビン温度まで冷却することなく、ケルビン領域において長いスピニコヒーレンス時間が期待できることを示した(図3)。以上より、SnV中心はこれまでの問題を解決できる優れた量子光源となる可能性を有していることを明らかにした。

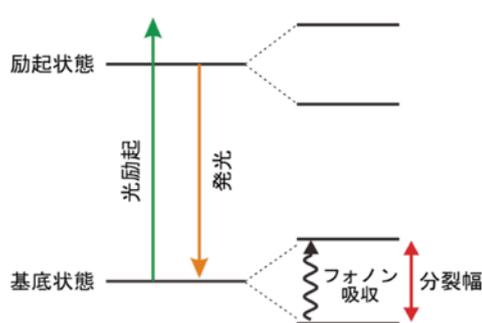
## 将来の展望

光の量子性を用いる量子情報ネットワークでは、別々の量子光源から発せられる光が同一の特性を有している区別できない状態である必要がある。本研究で開発した高温高圧アニール技術による高品質SnV中心の区別できない光子生成の確認や、さらにこれまで開発してきた電子デバイス[7, 8]などを用いた光学特性のアクティブ制御に取り組む。これら技術により、異なる量子光源からの光子を用いた量子干渉計測を実施する。さらに、SnV中心の長いスピニコヒーレンス時間の実証を通して量子ネットワーク応用へ向けた研究を推進する。

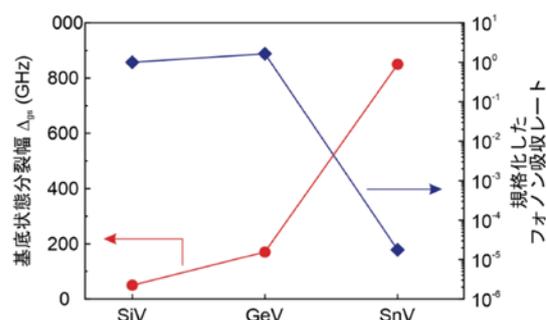
## 謝辞

本研究は多くの方々のご支援およびご協力を頂きながら得られた成果です。東京工業大学の波多野睦子教授、物質・材料研究機構の谷口尚博士、産業技術総合研究所の宮本良之博士、京都大学の水落憲和教授、ウルム大学のFedor Jelezko教授、ザールラント大学のChristoph Becher教授をはじめ、本研究の推進にご協力頂いた皆様はこの場を借りて心から御礼申し上げます。

図3 (a) SnV中心のエネルギーレベル



(b) IV族発光中心のスピニコヒーレンスを支配する基底状態でのフォノン吸収レート(温度2 K)



## References (参考文献)

- [1] T. Iwasaki, F. Ishibashi, Y. Miyamoto, Y. Doi, S. Kobayashi, T. Miyazaki, K. Tahara, K. D. Jahnke, L. J. Rogers, B. Naydenov, F. Jelezko, S. Yamasaki, S. Nagamachi, T. Inubushi, N. Mizuochi, M. Hatano, *Sci. Rep.* 5, 12882, 2015.
- [2] T. Iwasaki, *Semiconductors and Semimetals*, 103, 237, 2020. Chapter Eight in *Diamond for Quantum Applications Part 1*.
- [3] T. Iwasaki, Y. Miyamoto, T. Taniguchi, P. Siyushev, M. H. Metsch, F. Jelezko, M. Hatano, *Phys. Rev. Lett.* 119, 253601, 2017.
- [4] Y. Sohn, S. Meesala, B. Pingault, H. A. Atikian, J. Holzgrafe, M. Guendogan, C. Stavrakas, M. J. Stanley, A. Sipahigil, J. Choi, M. Zhang, J. L. Pacheco, J. Abraham, E. Bielejec, M. D. Lukin, M. Atatuer, M. Loncar, *Nat. Comm.* 9, 2012, 2018.
- [5] D. D. Sukachev, A. Sipahigil, C. T. Nguyen, M. K. Bhaskar, R. E. Evans, F. Jelezko, M. D. Lukin, *Phys. Rev. Lett.* 119, 223602, 2017.
- [6] J. Goerlitz, D. Herrmann, G. Thiering, P. Fuchs, M. Gandil, T. Iwasaki, T. Taniguchi, M. Kieschnick, J. Meijer, M. Hatano, A. Gali, C. Becher, *New J. Phys.* 22, 013048, 2020.
- [7] T. Iwasaki, W. Naruki, K. Tahara, T. Makino, H. Kato, M. Ogura, D. Takeuchi, S. Yamasaki, M. Hatano, *ACS Nano*, 11, 1238, 2017.
- [8] B. Yang, T. Murooka, K. Mizuno, K. Kim, H. Kato, T. Makino, M. Ogura, S. Yamasaki, M. E. Schmidt, H. Mizuta, A. Yacoby, M. Hatano, and T. Iwasaki, *Phys. Rev. Applied* 14, 044049, 2020.