

## イオン注入による単一不純物欠陥の規則的配列形成とその応用 —ダイヤモンド中浅い単一 NV センターの配列形成—

Fabrication of single impurity defects in a regular array by ion implantation and its quantum application

早大理工<sup>1</sup>, 東北大<sup>2</sup>, 物材機構<sup>3</sup>, 量研<sup>4</sup>, ウルム大<sup>5</sup>, 華東師範大<sup>6</sup>, 群大<sup>7</sup>, 筑波大<sup>8</sup>  
 ◦谷井 孝至<sup>1</sup>, 品田 高宏<sup>2</sup>, 寺地 徳之<sup>3</sup>, 小野田 忍<sup>4</sup>, 大島 武<sup>4</sup>, Liam P. McGuinness<sup>5</sup>,  
 Fedor Jelezko<sup>5</sup>, Yan Liu<sup>6</sup>, E Wu<sup>6</sup>, 加田 渉<sup>7</sup>, 花泉 修<sup>7</sup>, 川原田 洋<sup>1</sup>, 磯谷 順一<sup>8</sup>

Waseda Univ.<sup>1</sup>, Tohoku Univ.<sup>2</sup>, NIMS<sup>3</sup>, QST<sup>4</sup>, Ulm Univ.<sup>5</sup>,  
 East China Normal Univ.<sup>6</sup>, Gunma Univ.<sup>7</sup>, Univ. of Tsukuba<sup>8</sup>

◦T. Tani<sup>1</sup>, T. Shinada<sup>2</sup>, T. Teraji<sup>3</sup>, S. Onoda<sup>4</sup>, T. Ohshima<sup>4</sup>, L. P. McGuinness<sup>5</sup>,  
 F. Jelezko<sup>5</sup>, Y. Liu<sup>6</sup>, E. Wu<sup>6</sup>, W. Kada<sup>7</sup>, O. Hanaizumi<sup>7</sup>, H. Kawarada<sup>1</sup>, J. Isoya<sup>8</sup>

Si ウェハへのドーパント原子注入として発展したイオン注入法は、今日、ワイドバンドギャップ半導体などの母材の電気伝導特性制御に利用されるだけでなく、多種の不純物イオンを導入できる特長の下、例えばダイヤモンド中へのカラーセンター形成や酸化チタンの光触媒能への可視光応答性付与といった光物性制御にも活用されている。加えて、リソグラフィやドライエッチングとのプロセス整合性はナノ構造に局所的に不純物を導入することを可能にし、不純物がもたらす電子光物性とナノ構造特有の量子物性とを融合した新しい物性制御の可能性を拓きつつある。特に、不純物イオンを1個ずつ照準位置に注入できるシングルイオン注入法<sup>1-2)</sup>は単一の不純物原子を1個ずつ母材半導体中に注入することを可能にし、このようにして形成されるバンドギャップ中の孤立不純物準位系は、あたかも固体中に埋め込まれた1分子のように振る舞い<sup>3)</sup>、単電子輸送、単一光子放出、または、単一スピン操作の場となる。そこでは、精緻なイオン注入と熱処理により、残留欠陥や複合欠陥の生成が精密に制御される。

単一複合欠陥の中でも、近年、活発に研究されているのがダイヤモンド中のカラーセンターの1つである窒素-原子空孔中心（以下、NV センター）である。1価の負に帯電したダイヤモンド中のNV<sup>-</sup>センターの電子スピン ( $S=1$ ) は室温でも比較的長いコヒーレンス時間を示し、ミッドギャップ付近に位置する不純物準位を介して、有機色素なみの量子効率の下に、例えば励起波長 532 nm に対して中心波長 637 nm で蛍光する。単一のNV<sup>-</sup>センターであれば複数の光子が同時に放出されることがない。特に際立った特長は、蛍光強度がNV<sup>-</sup>センターのスピン副準位 ( $M_s = 0, \pm 1$ ) に依存すること（単一光子計測によりスピン状態を読み出せること）、および、光照射により基底状態 ( $M_s = 0$ ) に初期化できることである。静磁場印加により  $M_s = \pm 1$  の2準位をZeeman分裂させれば、マイクロ波照射により、これら3準位のうち、例えば  $M_s = 0$  と  $M_s = -1$  の2準位間で単一電子を遷移させることができ、光による初期化・読み出しと合わせて、1量子ビット量子レジスターとしての要件を満足する。双極子双極子相互作用により近傍のNV<sup>-</sup>センターと結合させることができればマルチ量子ビット化が可能であるほか、表面近傍の浅い領域に単一のNV<sup>-</sup>センターを形成すれば、ダイヤモンド表面上の試料の核磁気共鳴計測（通称、ナノNMR）のスピンプローブとして機能する。

筆頭著者はダイヤモンドの研究では後発であるが、電子線リソグラフィと不純物イオン注入を中心に、数年前より共著者らの協力を得て、単一NVセンターや単一SiVセンターの規則的配列形成を試みてきた。前者は量子レジスターまたは量子センシング応用、後者は単一光子源としての応用を目的として試作された。講演では、私たちの取り組み<sup>4, 5)</sup>を中心に、上記の単一欠陥の規則的配列作製プロセスならびに評価結果に関して紹介する。

なお、本研究は科研費(17H02751, 18H03766, 26220903, 18K19026)の助成を受けている。

1) I. Ohdomari: *J. Phys. D* **41** (2008) 043001.

2) T. Shinada *et al.*: *Nature* **437** (2005) 7602.

3) E. Prati *et al.*: *Nat. Nano.* **7** (2012) 443.

4) S. Tamua *et al.*: *Appl. Phys. Express* **7** (2014) 115201.

5) R. Fukuda *et al.*: *New J. Phys.* **20** (2018) 083029.