

# 透過型電子顕微鏡での空孔形成を用いた 2次元高密度 NV アンサンブル の作製

## Fabrication of 2D High-Density NV Ensemble Using Vacancies Created by a Transmission Electron Microscope

(1 早大, 2 量研, 3 筑波大, 4 早大材研)

○早坂京祐<sup>1</sup>, 金久京太郎<sup>1</sup>, 立石哲也<sup>1</sup>, 齋藤悠太<sup>1</sup>, 谷井孝至<sup>1</sup>, 小野田忍<sup>2</sup>, 磯谷順一<sup>3</sup>,  
榎本心平<sup>4</sup>, 河野省三<sup>4</sup>, 川原田洋<sup>1,4</sup>

(<sup>1</sup>Waseda Univ., <sup>2</sup>QST, <sup>3</sup>Univ. of Tsukuba, <sup>4</sup>ZAIKEN)

Kyosuke Hayasaka<sup>1</sup>, Kyotaro Kanehisa<sup>1</sup>, Tetsuya Tatsuishi<sup>1</sup>, Yuta Saito<sup>1</sup>, Takashi Tanii<sup>1</sup>,  
Shinobu Onoda<sup>2</sup>, Junichi Isoya<sup>3</sup>, Shinpei Enomoto<sup>4</sup>, Shozo Kono<sup>4</sup>, Hiroshi Kawarada<sup>1,4</sup>

E-mail: kyosuke.fse@akane.waseda.jp

ダイヤモンド中の NV アンサンブルは磁気センサや量子情報通信への応用が期待される。特に、2次元に存在する NV センター同士がエンタングル状態を形成するとき、磁気センサの磁気感度が約 200 倍向上することが予測されている[1]。また 2次元に配列させた NV アンサンブルで構成される量子コンピュータも提案されている[2]。これらの実現には $1.0 \times 10^{12} [\text{cm}^{-2}]$ 以上の高密度な 2次元 NV アンサンブルの作製が必要である[1]。そこで、我々は窒素終端(111)ダイヤモンド上に高純度ダイヤモンドを堆積することで、2次元かつ高密度に NV センターが存在する NV アンサンブルの作製を試みた[3]。しかしながら、NV センターの面密度は $3 \times 10^9 [\text{cm}^{-2}]$ 程度に留まっている。一方で、XPS 測定結果から求めた窒素終端(111)ダイヤモンドの窒素面密度は $4 \times 10^{14} [\text{cm}^{-2}]$ であった。窒素面密度に対して NV センターの面密度が少ないことから、空孔密度が少ないことが示唆される。すなわち、多量の窒素が P1 センターとして 2次元的に残存していると考えられる。この窒素デルタ dope 層に集中して原子空孔を導入することで 2次元 NV アンサンブルの密度増加が見込まれる。そこで、透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて局所的に原子空孔を導入し、2次元 NV アンサンブルの密度増加を試みた。

本研究では HPHT 法で作製された  $\Pi$  a(111)基板に対して、分子線エピタキシー装置で窒素ラジカル暴露[4]を行うことにより窒素終端処理を施した。次に MPCVD 法により、窒素終端化された表面に高純度(111)ダイヤモンド薄膜を約 100 nm ホモエピタキシャル成長させ、2次元 NV アンサンブル試料を作製した。その後、試料のチャージアップ対策として、試料表面に水素終端処理を施した後、加速電圧 300 keV の TEM(JEM-3010)を用いて直径 2 $\mu\text{m}$ 、10 $\mu\text{m}$  の円領域に $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2} \sim 1.0 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ の dose 量の電子をそれぞれ 30 $\mu\text{m}$ 、60 $\mu\text{m}$  の間隔をあけて照射した。

その結果、電子線照射領域で発光強度の増加が確認された(Fig.1)。ゆえに電子線照射領域において NV 面密度が増加した。また、電子線照射を行っていない領域、および各電子 dose 量での NV 面密度とコヒーレンス時間  $T_2$  を比較した(Table 1)。NV 面密度は電子線照射前の面密度  $2.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  と比較して最大で 100 倍程度 ( $3.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ) 増加した。一方で、 $T_2$  は電子線照射有無で大きな差がなかった。したがって、磁気感度はセンシングに寄与する NV センターの個数  $N$  と  $T_2$  について  $\sqrt{NT_2}$  に比例する[5]ため、TEM により電子線照射を行った領域において磁気感度の向上が期待できる。

[謝辞]本研究は Q-LEAP の支援を受けて行われた。CFM 装置の立ち上げに協力いただいた Liam

P. McGuinness 博士と Fedor Jelezko 教授に感謝いたします。

[1] S. Choi, M. D. Lukin, et al., arxiv:1801.00042 (2018).

[2] N. Y. Yao, M. D. Lukin, et al., Nat Commun. 2012 Apr 24;3:800 (2012).

[3] 金久 京太郎, 川原田 洋, 応用物理学会秋季学術講演会, 19p-E312-3(2019).

[4] T. Kageura, H. Kawarada, et al., APEX, 10, 5:055503 (2017).

[5] D. Budker, M. Romalis, Nature Phys 3, 227–234 (2007).

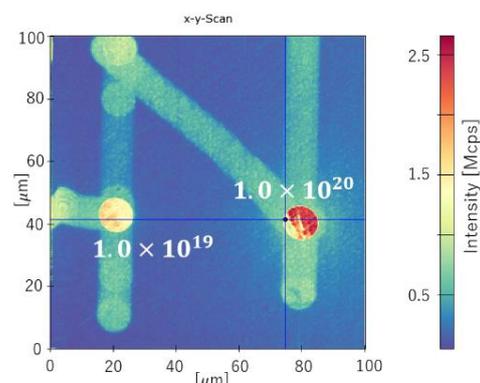


Fig1. CFM image of electron irradiation area( $\phi 10\mu\text{m}$ )

Table1. Relationship between electron doses and NV area density

electron irradiation area ( $\mu\text{m}$ )	electron dose ( $\text{cm}^{-2}$ )	NV area density ( $\text{cm}^{-2}$ )	$T_2$ ( $\mu\text{s}$ )
-	w/o irradiation	$2.8 \times 10^9$	3.7
10	$1.0 \times 10^{18}$	$1.6 \times 10^{11}$	4.6
10	$1.0 \times 10^{19}$	$1.9 \times 10^{11}$	3.8
10	$1.0 \times 10^{20}$	$1.9 \times 10^{11}$	3.8
10	$1.0 \times 10^{21}$	$2.1 \times 10^{11}$	-
2	$1.0 \times 10^{20}$	$2.0 \times 10^{11}$	3.8
2	$1.0 \times 10^{21}$	$3.0 \times 10^{11}$	2.9
2	$1.0 \times 10^{22}$	$1.1 \times 10^{11}$	3.0