

波多野 睦子

東京工業大学工学院電気電子系  
教授

炭素系ナノエレクトロニクスに基づく革新的な生体磁気計測システムの創出

## § 1. 研究実施体制

### (1)「東工大」グループ

- ① 研究代表者:波多野 睦子 (東京工業大学・工学院電気電子系、教授)
- ② 研究項目  
ダイヤモンドデバイス及びセンサ微弱信号検出技術
  - (1) 高感度センサアレイデバイス
  - (2) 高品質ダイヤモンド試料の作製
  - (3) センサ微弱信号検出技術

### (2)「京大」グループ

- ① 主たる共同研究者:水落 憲和 (京都大学・化学研究所、教授)
- ② 研究項目  
NV センタ評価技術及び電気検出技術
  - (1) 高品質窒素ドーパダイヤモンド試料の評価
  - (2) スピン情報の電気検出に向けた要素技術

### (3)「阪大」グループ

- ① 主たる共同研究者:原田 慶恵 (大阪大学・蛋白質研究所、教授)
- ② 研究項目  
超高感度磁気センサナノアレイデバイスを使った生物試料への応用
  - (1) 細胞内磁性微粒子の測定

(4) 「産総研」グループ

① 主たる共同研究者: 牧野 俊晴

(産業技術総合研究所・先進パワーエレクトロニクス研究センター・上級主任研究員)

② 研究項目

センサデバイス性能向上及びプロセス基盤技術

(1) 電子スピン位相緩和時間の向上の理論的検討

(2) デバイス設計及び作製プロセスの構築

(5) 「ルネサス」グループ

① 主たる共同研究者: 安田 晋

(ルネサスエレクトロニクス株式会社・第一ソリューション事業本部 コア技術事業統括部・シニアスペシャリスト)

② 研究項目

NV センタを用いた計測システムの性能向上

(1) システム詳細設計・試作 1(高精度化)

## § 2. 研究実施の概要

ナノエレ技術を活用し、生物・医療などでニーズが高い、常温で動作し、高い感度と空間分解能を有するセンサモジュールを開発することが本研究の目標である。このようなセンサの実現に必要な NV センタの条件は、(1)NV の高密度形成(信号強度向上)、(2)原子レベルで NV 軸が高配向(検出コントラスト向上)、(3) ダイヤ表面の微細構造形成により光検出効率向上、(4) 負電荷付加による電子スピンをもつ NV の増大と安定化(信号強度向上)、(5)高品質ダイヤモンド膜(電子スピン緩和時間向上)、であり、それぞれ推進中である。

今年度は(1)(2)の最適化のため、(111)基板上へのダイヤモンド CVD 膜合成の温度条件検討を行った<sup>1)</sup>。マイクロ波電力を調整し、ダイヤモンド基板温度を 1040~700°C に設定した。各温度で形成した CVD 膜の AFM 観測の結果 1040~800°C では [111] 配向に必要な 2 次元方向のステップフロー成長が実現されたのに対し、700°C では 3 次元的な島状成長となった。また、PL 観測で 1040~800°C では NV 生成が確認された。NV 密度、NV 生成率とも 800°C で最大となった。さらに ODMR 観測から配向率は 81~91% であったが、900°C 及び 800°C では 99.9% 以上であった。

本 CVD 膜を薄く形成し、近接する原子核からの核磁化(NMR)信号の検出に成功した。アンサンブルの NV センタを含む CVD 膜による磁気計測で実現される位置分解能は概ね NV センタ層の厚さとなる。500  $\mu\text{m}$  の(111)基板上に厚さ 3-4  $\mu\text{m}$  のノドープ層を形成した上に 12nm の厚さの NV 層を形成した。ODMR ではほぼ 100%の[111]配向率、CPMG 法で位相コヒーレンス時間  $T_2=50 \mu\text{s}$  という NV センタの良好な特性が確認された。この CVD 膜の表面に薄い油膜を塗布し、外部磁場を印加した状態で、外部磁場と対応するラーモア周波数の微弱な RF 電磁波の振幅を検出した。CVD 膜試料に印加する静磁場 B と、検出される RF 電磁波周波数の線形関係からプロトンの NMR 信号を計測できていることが確認された。

さらに(5)に関し、電子スピン緩和時間向上のため、核スピンによる環境のスピンを制御する手法の有効性を確認した。核スピンの幾何学的位相を振動する電場と磁場により制御する手法を提案し、電子スピンから核スピンへの転写のスピードを従来方法より向上させる可能性があることを示した。また外部環境の揺らぎに対する耐性についても優れていることを数値解析により明らかにした<sup>3)</sup>。また、電子スピンと核スピンを共用することにより、磁場センサの感度の向上を可能にする手法に検討を加え、ゲートエラー率が一定値を下回る条件では、本提案は従来手法に比べて高い感度をもたらしうることを明らかにした<sup>2)</sup>。

NV センタはシュタルク効果を利用し、電界センサとしても機能する。この特性を利用し、デバイス内部の電界ベクトル成分の検出に成功した。pin ダイオード中の電界集中箇所単一 NV センタを形成し、逆バイアス下での ODMR 測定により、共鳴周波数のスプリットとシフトを確認し、この結果から電界ベクトルを導出した<sup>3)</sup>。この結果は、ScienceDaily など 80 以上の海外サイト、日刊工業新聞などにニュース掲載され、全論文中トップ 5% の高い Attention score を得た。またパワーデバイスへの応用が期待され、産業界からのニーズが高い。

○代表的な論文

1. H. Ozawa, K. Tahara, H. Ishiwata, M. Hatano, T. Iwasaki, "Formation of perfectly aligned nitrogen-vacancy center ensembles in chemical-vapor-deposition-grown diamond (111)" *Appl. Phys. Express.* 10, 045501, 2017. doi:10.7567/APEX.10.045501

2. T. Shimo-Oka, Y. Tokura, Y. Suzuki, N. Mizuochi, "Fast Phase-manipulation of the Single Nuclear Spin in Solids by Rotating Fields" *Physical Review A*, 95, 032316 (2017). doi: 10.1103/PhysRevA.95.032316

3. T. Iwasaki, W. Naruki, K. Tahara, T. Makino, H. Kato, M. Ogura, D. Takeuchi, S. Yamasaki, M. Hatano, "Direct Nanoscale Sensing of Internal Electric-Field in Operating Semiconductor Devices Using Single Electron Spins" *ACS Nano*, 11, 1238-1245, 2017. doi: 10.1021/acsnano.6b04460