

波多野 睦子

東京工業大学 大学院理工学研究科  
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・大学院理工学研究科、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)「阪大」グループ

- ① 主たる共同研究者:水落 憲和 (大阪大学・大学院基礎工学研究科、准教授)
- 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)「京大」グループ

- ① 主たる共同研究者:原田 慶恵 (京都大学・物質細胞統合システム拠点、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) (細胞用 2 次元磁性)計測系設計

### (4)「産総研」グループ

- ① 主たる共同研究者:牧野 俊晴

(独立行政法人産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門、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) 単一イオン注入による単一センタ規則配列技術の構築
- (3) 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:波多野 雄治

(ルネサスエレクトロニクス株式会社・第1事業本部 新コア推進事業部・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) 信号処理システム概念設計
- (2) 受発光素子評価

## § 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2次元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。前年度には、高感度化の基礎として、NV センタの NV 軸が、(111)ダイヤモンド基板上に CVD 法でホモエピタキシャル成長することにより、ほぼ100%で(111)方向に揃えられることに成功した1)。本年度は、上記技術を高感度・高空間分解能光検出磁気共鳴イメージング(ODMR)に発展させる、物性理論、材料物性、デバイス、システムの各面での以下の進捗を得た。

物性理論においては、第一原理計算により、(111)面基板上に堆積するダイヤモンド膜中の NV センタの方向制御のメカニズムを解明した。(111)基板において NV センタが[111]方向へ配列するには N が最表面の C[図 1(a)の  $\alpha$  層]を置換して二層目の C[図 1(a)の  $\beta$  層]に三配位することが必要である。[-1,-1,2]方向を向いた二重層ステップに沿ったキンクフローを構造モデルとして用い、キンクの  $\alpha$  サイトに N が入る[図 1(a)]のを皮切りに、最表面への N 取込み[(b)、炭素二重層の成長[(c)]を経て V が[111]方向に配置する[図(d)]までの構造発展が他のルートより低いエネルギーで起こり得ることを見出した 2)。

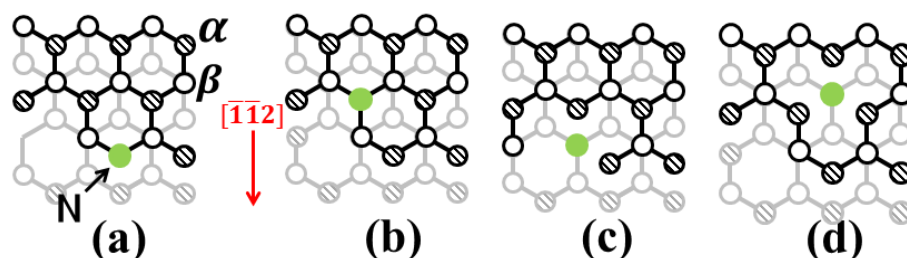


図1 C(111)表面近傍での NV 生成過程。窒素原子を緑色の円で表す。

(a)で  $\alpha$  と  $\beta$  はそれぞれ最表面と第二層の炭素原子副格子を表す。

材料物性・デバイスにおいては、磁気感度向上に重要な電子スピンを有する NV<sup>-</sup>センタの高密度化と安定化を図った。NV センタ自体の高密度化は、(111)基板上に N<sub>2</sub> ガスを窒素源とした CVD 合成を実施し、ダイヤモンド薄膜内に濃度 10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup> 程度の窒素が導入されていることを確認した。NV<sup>-</sup>センタの安定化に関しては、リンドープ n 型膜を用いることにより、NV<sup>-</sup>電荷状態を制御し、n 型ダイヤモンドでは光励起下において、全測定時間の 99%以上を NV<sup>-</sup>にすることに成功した。さらに nin 接合を利用して i 層中のフェルミレベルを NV<sup>-</sup>の基底状態より押し上げることによって、i 層中に形成した NV センタを NV<sup>-</sup>で安定化させる基本コンセプトを提案し、デバイスを試作した。さらにデバイスにおいては、ナノ構造による NV<sup>-</sup>安定化とともに、蛍光出力の集光効率改善を図った。ダイヤモンド膜の選択成長により 1  $\mu$ m 以下の傘型構造が得られ、バルクダイヤの約 5 倍の蛍光強度が得られた。

システムにおいては、将来のモジュール化検討のためトランク程度の大きさの ODMR 計測装置を試作した。また ODMR による NV 軸計測の生体への応用として、線虫腸管の回転運動を検出することができた 3)。

なお関連特許は国内 5 件、海外 1 件を出願済みである。

○代表的な論文

1. T. Fukui, Y. Doi, T. Miyazaki, R. Miyamoto, H. Kato, T. Matsumoto, T. Makino, S. Yamasaki, R. Morimoto, N. Tokuda, M. Hatano, Y. Sakagawa, H. Morishita, T. Tashima, S. Miwa, Y. Suzuki, N. Mizuochi, “Perfect selective alignment of nitrogen–vacancy center in diamond”, *Applied Physics Express*, 7, 055201 (2014). (doi:10.7567/APEX.7.055201)
2. Takehide Miyazaki, Yoshiyuki Miyamoto, Toshiharu Makino, Hiromitsu Kato, Satoshi Yamasaki, Takahiro Fukui, Yuki Doi, Norio Tokuda, Mutsuko Hatano and Norikazu Mizuochi, “Atomistic mechanism of perfect alignment of nitrogen–vacancy centers in diamond”, *Applied Physics Letters*, vol.105, No.26, pp.261601–261601–4, 2014 (doi: 10.1063/1.4904988)
3. Yosuke Yoshinari, Shigeyuki Mori, Ryuji Igarashi, Takuma Sugi, Hiroaki Yokota, Kazuhiro Ikeda, Hitoshi Sumiya, Ikue Mori, Hidehito Tochio, Yoshie Harada and Masahiro Shirakawa “Optically Detected Magnetic Resonance of Nanodiamonds In Vivo; Implementation of Selective Imaging and Fast Sampling.” *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 15, 1014–1021, 2015 (doi: 10.1166/jnn.2015.9739)