

令和 2 年 4 月 9 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13787

研究課題名（和文）量子コンピューティングに向けたダイヤモンドオンチップ光回路に関する研究

研究課題名（英文）Studies on diamond on-chip optical circuit for quantum computing

研究代表者

稲葉 優文（Inaba, Masafumi）

九州大学・システム情報科学研究所・助教

研究者番号：20732407

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：ダイヤモンド基板上に、量子ビットになる窒素-空孔中心を配し、それを光回路で結ぶことを目指した基礎検討として、ダイヤモンドの選択成長技術と、ダイヤモンド微粒子の配列技術に関して研究を遂行した。
SiO₂をマスクとして、マスクへのダメージが小さい尖端放電型リモートプラズマ化学気相成長法を用いて、高品質なダイヤモンドの選択成長を達成した。
また、所属が変わったため、誘電泳動によるダイヤモンド微粒子の配列技術に関する基礎検討を行い、ダイヤモンドが配列する条件を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年急速に発展しつつある量子コンピュータ開発において、室温で汎用量子ビットになりうるダイヤモンド中の窒素-空孔中心（NVセンタ）の研究が行われている。NVセンタを量子操作する際、互いの距離が10nm程度と非常に近い報告、別々の場所の量子テレポーテーションに関する報告はなされているものの、実用的な、数マイクロメートル程度の距離での量子通信技術は検討されていない。本研究では、その、中間的な距離範囲での量子ビット同士の量子通信・エンタングルメントが可能なプラットフォームとして、ダイヤモンドのオンチップの光回路の形成に関する技術を検討した。

研究成果の概要（英文）：A homo-epitaxial selective growth method of diamond and arrangement of diamond particles by dielectrophoresis were investigated.

研究分野：電気・電子材料工学

キーワード：ダイヤモンド 選択成長

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ダイヤモンドの NV センタは、他の量子ビットの候補に比べて非常に長いコヒーレンス時間を持ち、室温で量子操作可能で、さらに初期化など、量子ビットの要件をクリアできる系である。NV センタは世界的には量子センシングの応用検討が進められていて、欧米では莫大な予算により精力的に研究が進んでいる。これは全く新しい原理で動作するセンサへの期待の表れであるが、量子コンピューティングに取り組むグループはまだ少ない。対して、量子コンピューティングの研究は現在世界的に再加熱しており、NV センタ研究への新規参入は今後急速に進むと考えられるため、この研究の緊急性は非常に高い。量子ビットとしての必要要素として、大きく読み出し、書き込み、保持、制御性、拡張性が挙げられるが、このうち2つの NV センタをエンタングルさせることにより、拡張性が担保される。偶然生じる 2 量子ビットのエンタングルを観測した報告はすでに存在するが、両者の距離は~10 nm 程度と非常に近く、分離しての操作が困難である。

2. 研究の目的

ダイヤモンド窒素-空孔中心(NV センタ)を用いた汎用量子コンピュータの実現に向けて、ダイヤモンドオンチップの光導波路に NV センタを閉じ込めた構造を作製し、評価する。また、オンチップでの複数量子ビットの制御を可能にする、集積量子コンピューティングの原理検証を行う。NV センタは固体中の電子スピンでありながら室温で量子操作が可能な欠陥であり、汎用量子コンピュータの量子ビットへの応用が期待されている。汎用量子コンピューティングには 2 量子ビットのエンタングル状態の実現が不可欠である。エンタングルに電子スピンの磁場を用いる場合、NV センタ間の距離は 10 nm と非常に近い必要があり、これらを同時に観測することが困難である。そこで、2つの NV センタ間に光子を介在させることでそれらをエンタングルさせられれば、現実的な量子コンピューティングの量子ビット系を構築可能である。

3. 研究の方法

① ダイヤモンド基板上光導波路構造作製技術の構築

ダイヤモンドは 2.42 という高い屈折率を持つため、物質との界面での光を全反射しやすく、導波路の材料として好適である。すでにダイヤモンドの加工技術により、光導波路を形成した報告がなされている(Loncar et al. Nano Lett. 13, 5791 (2013))が、導波路端からの NV センタの光取り出しに応用した例はない。ダイヤモンド導波路構造の作製には、選択成長法を試行する。

研究開始当初は、これに加え、導波路構造のひずみ評価、オンチップでの 2NV センタのエンタングル状態の実現を行う計画であったが、研究代表者が異動したため、研究方針を、ダイヤモンド微粒子の誘電泳動による配列可能性の検討に転換した。

② ダイヤモンドの誘電泳動の基礎特性の評価

直径数 100 nm~数 μm 程度の微粒子ダイヤモンドの誘電泳動特性を取得し、高い熱伝導率を活かしたフレキシブル伝熱シートへの応用可能性を検討する。ダイヤモンド微粒子の粒径、溶液を変化させ、誘電泳動の交流印加周波数を変化させることで誘電泳動特性の正負(微粒子が高電界部に移動する場合が正)が判定できる。

4. 研究成果

① ダイヤモンド基板上光導波路構造作製技術の構築

尖端放電型リモートプラズマ CVD 法による、SiO₂ をマスクとした、高品質な選択成長を実現した。ダイヤモンドの成長に用いられるプラズマ CVD 法は、高品質なダイヤモンド成長が可能である反面、選択成長の際にマスクを高速でエッチングする問題があり、選択成長には向かない。これに対し、リモートプラズマによるダイヤモンド成長では、マスクのエッチングを大きく低減でき、高品質なダイヤ

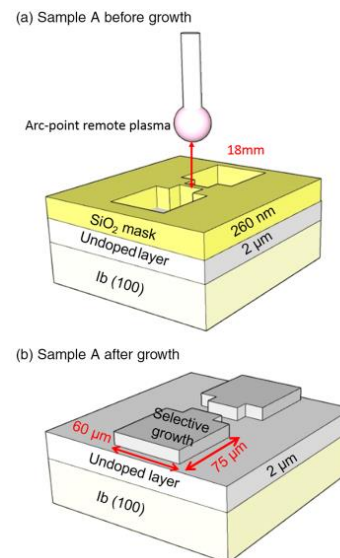


図 1 尖端放電型リモートプラズマ CVD 法によるダイヤモンドの選択成長

ンド選択成長が実現できることに着目し、これを実施した。

リモートプラズマを、SiO₂ マスクを形成したダイヤモンド (100) 基板上 18 mm 程度の位置に固定し、メタン/水素中でマイクロ波放電により点灯した。このとき、基板温度を 750°C~850°C で変化させた。実験の模式図を図 1 に示す。選択成長したエピ層の SEM 像は図 2 に示した。マスクの形状に追従したエピ層の成長が確認できた。さらに、EDX によるエピ層の組成分析、ラマン分光による結晶性の評価、エピ層中の、尖端放電アンテナ材料である Mo 濃度の SIMS 分析により、高品質なダイヤモンドを選択成長できたことを確認した。

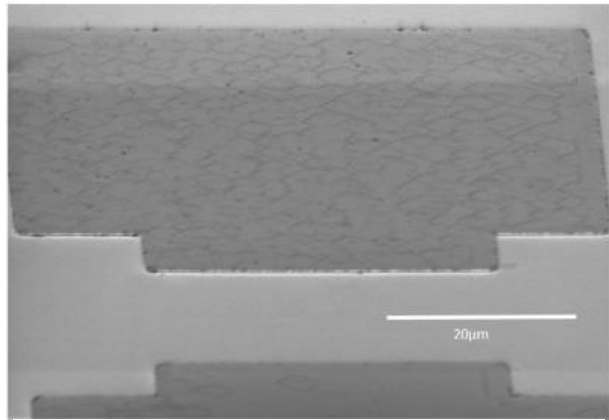


図 2 選択成長領域の SEM 像 (斜め上から撮影)

② ダイヤモンドの誘電泳動の基礎特性の評価

ダイヤモンドはその生体適合性と、NV センタによる量子操作可能性から注目されている。特に、微粒子ダイヤモンドを用いたバイオイメージング、トレーシングが進展しつつあり、今後の発展が期待される。微粒子を操作する手段として、不平等電界中に、微粒子に働く駆動力である誘電泳動力がある。ダイヤモンドの微粒子を集積し、また 1 次元的に整列

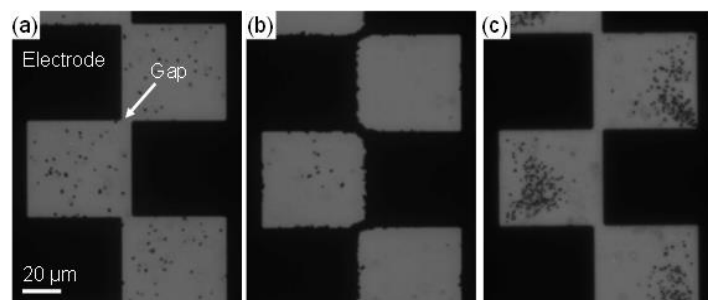


図 3 櫛歯電極の透過顕微鏡像 (a) 電界印加前、(b) 正の誘電泳動力発生時、(c) 負の誘電泳動力発生時

させることが出来れば、ダイヤモンド光導波路構造の構築につなげられる可能性がある。本研究では、その第 1 段階として、ダイヤモンド微粒子に対する誘電泳動力が働く条件を見定めるために、塩化ナトリウム水溶液中でのダイヤモンドの誘電泳動特性を調査した。

誘電泳動力は以下の式で表される。

$$F_{\text{DEP}} = 2\pi r^3 \epsilon_m \text{Re}[K(\omega)] \nabla E^2$$

ここで、 r , ϵ_m , ω , E は粒子半径、溶媒の誘電率、交流信号の各周波数、電界である。 $K(\omega)$ はクラウジウス-モソッティ係数で、以下のように表され、正負の値をとる。

$$K(\omega) = \frac{\epsilon_p^* - \epsilon_m^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_m^*}$$

ϵ_p^* , ϵ_m^* は複素誘電率であり、周波数依存性がある。 $K > 0$ のときに正の誘電泳動力 (高電界部に粒子が集積)、 $K < 0$ のときに負の誘電泳動力 (低電界部に粒子が集積) は働く (図 3) が、直接誘電泳動力を評価することは困難であるため、評価が比較的簡単な、 $K = 0$ の周波数 (クロスオーバー周波数) を調査し、そこから粒子の導電率 (複素誘電率の虚部に相当) が評価可能である。クロスオーバー周波数と溶液の導電率の関係を図 4 に示す。ここから得られた粒子の導電率はダイヤモンドのバルクの導電率よりも非常に大きかった。これはダイヤモンド表面の溶液による伝導性に起因していることが推測され、その表面伝導性は 1nS 程度であった。この値は、先行研究で、スチレンビーズに対して求められている値に近いものであり、妥当な結果であると考えられる。

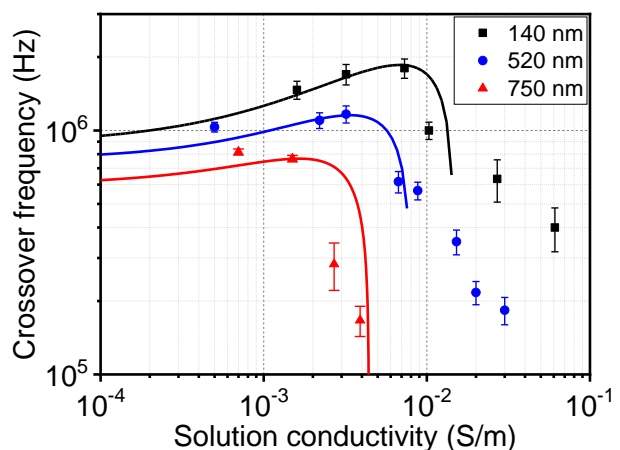


図 4 誘電泳動クロスオーバー周波数の溶液導電率依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Fei Wenxi, Inaba Masafumi, Hoshino Haruka, Tsuyusaki Ikuto, Kawai Sora, Iwataki Masayuki, Kawarada Hiroshi	4. 巻 216
2. 論文標題 Point Arc Remote Plasma Chemical Vapor Deposition for High Quality Single Crystal Diamond Selective Growth	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 physica status solidi (a)	6. 最初と最後の頁 1900227 ~ 1900227
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssa.201900227	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Inaba Masafumi, Kawarada Hiroshi, Ohno Yutaka	4. 巻 114
2. 論文標題 Electrical property measurement of two-dimensional hole-gas layer on hydrogen-terminated diamond surface in vacuum-gap-gate structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 253504 ~ 253504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5099395	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nakano Michihiko, Ding Zhenhao, Matsuda Kenya, Xu Jingwen, Inaba Masafumi, Suehiro Junya	4. 巻 13
2. 論文標題 Simple microfluidic device for detecting the negative dielectrophoresis of DNA labeled microbeads	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Biomicrofluidics	6. 最初と最後の頁 064109 ~ 064109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5124419	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Inaba Masafumi, Ochiai Takumi, Ohara Kazuyoshi, Kato Ryogo, Maki Tasuku, Ohashi Toshiyuki, Kawarada Hiroshi	4. 巻 15
2. 論文標題 Correlation between the Carbon Nanotube Growth Rate and Byproducts in Antenna Type Remote Plasma Chemical Vapor Deposition Observed by Vacuum Ultraviolet Absorption Spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Small	6. 最初と最後の頁 1901504 ~ 1901504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/smll.201901504	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Inaba Masafumi, Hayashi Shohei, Li Henan, Kamimura Mikoto, Nakano Michihiko, Suehiro Junya	4. 巻 59
2. 論文標題 Dielectrophoretic properties of submicron diamond particles in sodium chloride aqueous solution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 046502 ~ 046502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab7baf	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakano Michihiko, Ding Zhenhao, Inaba Masafumi, Suehiro Junya	4. 巻 10
2. 論文標題 DNA-induced changes in traveling wave dielectrophoresis velocity of microparticles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 015236 ~ 015236
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5129725	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Inaba Masafumi, Ohara Kazuyoshi, Shibuya Megumi, Ochiai Takumi, Yokoyama Daisuke, Norimatsu Wataru, Kusunoki Michiko, Kawarada Hiroshi	4. 巻 123
2. 論文標題 Electrical contact properties between carbon nanotube ends and a conductive atomic force microscope tip	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 244502 ~ 244502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5027849	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Falina Shaili, Kawai Sora, Oi Nobutaka, Yamano Hayate, Kageura Taisuke, Suaebah Evi, Inaba Masafumi, Shintani Yukihiro, Syamsul Mohd, Kawarada Hiroshi	4. 巻 18
2. 論文標題 Role of Carboxyl and Amine Termination on a Boron-Doped Diamond Solution Gate Field Effect Transistor (SGFET) for pH Sensing	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 2178 ~ 2178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s18072178	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Oi Nobutaka, Inaba Masafumi, Okubo Satoshi, Tsuyuzaki Ikuto, Kageura Taisuke, Onoda Shinobu, Hiraiwa Atsushi, Kawarada Hiroshi	4. 巻 8
2. 論文標題 Vertical-type two-dimensional hole gas diamond metal oxide semiconductor field-effect transistors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 10660-1~10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-28837-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fukuda Ryosuke, Balasubramanian Priyadharshini, Higashimata Itaru, Koike Godai, Okada Takuma, Kagami Risa, Teraji Tokuyuki, Onoda Shinobu, Haruyama Moriyoshi, Yamada Keisuke, Inaba Masafumi, Yamano Hayate, Jelezko Fedor, Tanii Takashi, Isoya Junichi et al.	4. 巻 20
2. 論文標題 Lithographically engineered shallow nitrogen-vacancy centers in diamond for external nuclear spin sensing	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 083029 ~ 083029
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/aad997	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nishimura Keita, Ushiyama Takuya, Viet Nguyen Xuan, Inaba Masafumi, Kishimoto Shigeru, Ohno Yutaka	4. 巻 295
2. 論文標題 Enhancement of the electron transfer rate in carbon nanotube flexible electrochemical sensors by surface functionalization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Electrochimica Acta	6. 最初と最後の頁 157 ~ 163
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.electacta.2018.10.147	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kono Shozo, Kageura Taisuke, Hayashi Yuya, Ri Sung-Gi, Teraji Tokuyuki, Takeuchi Daisuke, Ogura Masahiko, Kodama Hideyuki, Sawabe Atsuhito, Inaba Masafumi, Hiraiwa Atsushi, Kawarada Hiroshi	4. 巻 93
2. 論文標題 Carbon 1s X-ray photoelectron spectra of realistic samples of hydrogen-terminated and oxygen-terminated CVD diamond (111) and (001)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Diamond and Related Materials	6. 最初と最後の頁 105 ~ 130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.diamond.2019.01.017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計7件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 林 将平, 李 赫男, 稲葉 優文, 中野 道彦, 末廣 純也
2. 発表標題 ダイヤモンド微粒子の誘電泳動特性評価
3. 学会等名 令和元年基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 稲葉 優文, 林 将平, 李 赫男, 中野 道彦, 末廣 純也
2. 発表標題 微粒子ダイヤモンドの誘電泳動特性
3. 学会等名 第80回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 李 赫男, 林 将平, 稲葉 優文, 中野 道彦, 末廣 純也
2. 発表標題 アクリル溶媒中におけるダイヤモンド微粒子の高電界整列挙動観察
3. 学会等名 第72回電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林 将平, 李 赫男, 稲葉 優文, 中野 道彦, 末廣 純也
2. 発表標題 ダイヤモンド微粒子の誘電泳動による物性調査
3. 学会等名 第72回電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林 将平, 李 赫男, 稲葉 優文, 中野 道彦, 末廣 純也
2. 発表標題 ダイヤモンド微粒子の誘電泳動による電気的特性調査
3. 学会等名 第33回ダイヤモンドシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 李 赫男, 林 将平, 稲葉 優文, 中野 道彦, 末廣 純也
2. 発表標題 ダイヤモンド微粒子フィラーの電界整列が複合材料の熱伝導特性に及ぼす影響
3. 学会等名 誘電体・絶縁材料 / 放電・プラズマ・パルスパワー / 高電圧 合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Inaba, H. Kawarada, Y. Ohno
2. 発表標題 真空キャップゲート構造による2次元正孔ガスダイヤモンドデバイスの評価
3. 学会等名 第32回ダイヤモンドシンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	末廣 純也 (Suehiro Junya)	九州大学・大学院システム情報科学研究所・教授 (17102)	

6. 研究組織 (つづき)

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	中野 道彦 (Nakano Michikiko)	九州大学・大学院システム情報科学研究所・准教授 (17102)	
研究協力者	大野 雄高 (Ohno Yutaka)	名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授 (13901)	
研究協力者	川原田 洋 (Kawarada Hiroshi)	早稲田大学・理工学術院・教授 (32689)	