

グラフェン/ダイヤモンド接合を用いた 新規光イメージングメモリの作製

所属： 早稲田大学 大学院情報生産システム研究科

助成対象者：植田 研二

概要

本研究で我々は、グラフェン/ダイヤモンド接合が、重要な光情報のみを記憶し不要な情報を忘却する脳型光記憶素子となることを新たに見出すと共に、グラフェン/ダイヤモンド素子を画素として配列したアレイ構造で、画像（文字パターン）が検出可能であり、光刺激の頻度に応じて選択的に記憶・忘却される脳型光記憶機能を有する事を明らかにした。今後、本研究が進展していく事で、光刺激の強弱、即ち情報の重要度に応じて画像等の光情報が選択的に記憶・忘却されるイメージセンサや新型光コンピュータなどの開発が期待される。

abstract

In this study, we newly found graphene/diamond junctions can function as optoelectronically controllable synapses, in which information given through weakly stimuli (low interest) is lost immediately and only important information given through strongly stimuli (high interest) is maintained optoelectronically, and arrays fabricated from these junctions were found to function as image sensors that could provide an optoelectronic memory function and selectively memorize information depending on importance of the data. These results are expected to assist for fabrication of neuromorphic optical computers simulating human visual memory

systems that are modulated by specific interests.

研究内容

【研究背景と目的】

近年、グラフェン／ダイヤモンド（炭素 sp^2 - sp^3 ）界面で様々の新物理現象が発現する事が理論予測されており、炭素 sp^2 - sp^3 界面は新機能の宝庫と考えられている[1, 2]。しかし理論予測は多数存在するが、炭素 sp^2 - sp^3 界面を積極的に利用し新機能を創出しようとする実験報告は殆どない。この様な状況の中、近年我々は、グラフェン／ダイヤモンド接合を新規に作製し、その電気特性について詳細に調査した所、光照射（+バイアス印可）により接合の電気伝導度が大きく変化（抵抗変化率： $\sim 10^4$ ）する事及び、変化後の抵抗値が光の遮断後も不揮発記憶される事を初めて見出した[3]。また最近、接合の抵抗値が光パルスに応答して段階的に変化する事も見出した[4]。これらの結果は、グラフェン／ダイヤモンド接合が、光強度等の光情報を多段階の抵抗値として保持、即ち光検出と記憶機能を併せ持つ新型の光イメージングデバイスになり得る事を示唆している。

本研究で我々は、このグラフェン／ダイヤモンド接合の有する光検出－記憶機能を基に、新型の光イメージングデバイスを創製する事を目的とした。具体的には、ダイヤモンド／グラフェン接合を二次元配列したアレイ構造が、画像や文字等の光情報を電気抵抗値として二次元配列を保ったまま不揮発記憶する新型の光記憶デバイス(光イメージングメモリ)となる事を示す試みを行った。この様なデバイスが開発されれば微小な光センサ内で光検出と同時に高効率に情報記憶が行われる為、情報技術社会の更なる発展に繋がると思われる。現在、この様な光検出－記憶特性を併せ持つ材料は殆どなく、遷移金属カルコゲナイド(TMD)で類似の特性が報告されているのみである[5]。我々のグラフェン／ダイヤモンド接合はTMDと同等以上の特性を示す事に加えて低電圧動作が可能かつデバイス構造が単純で接合作製が容易である等の優位点がある。しかし、グラフェン／ダイヤモンド接合の光検出・記憶機能の発現機構は明らかになっておらず、実用デバイスの作製に向け大きな課題となっている。

【方法】

マイクロ波プラズマ CVD 法を用いた in-situ 成長により、垂直配向グラフェン (VG) /ダイヤモンド半導体積層構造を作製した[3, 4]。ラマン分光等により構造評価を行った。

その後、フォトリソグラフィと反応性イオンエッチング (RIE) により VG/ダイヤモンド接合及びアレイ構造を作製し、光伝導特性評価等を行った [4]。

【結果と考察】

ラマン分光、TEM測定等からVG/ダイヤモンド積層構造が作製できていることを確認した [3, 4]。パルス光照射下でのVG/ダイヤモンド接合の伝導特性評価を行ったところ、照射した光パルス数に応じて抵抗保持 (記憶) 時間が

短期記憶から長期記憶に変化する、脳型光記憶特性が現れることが分かった (図 1)。記憶 (接合伝導度) の減衰特性は、 $G(t)/G_0 = \exp[-(\tau/t)^\beta]$ 型 ($G(t)$: 時間 t での伝導度、 G_0 : 初期伝導度、 β : $0 \sim 1$ の指数) の減衰関数で良く記述でき、緩和時間 τ は、低パルス数 (< 4) と高パルス数 (> 7) で2桁程度変化 (短期→長期記憶に変化) した (図 1 挿入図)。

更に我々は、グラフェン/ダイヤモンド接合 6 個を画素として用い、 2×3 型に配列した構造で、画像 (文字パターン、I 及び L) の検出を試みた (図 2)。文字パターン “I” の場合は、I 字マスクを用いてパルス光数を多く照射し、強い光刺激を与え (重要な情報に対応)、“L” の場合は、L 字マスクを用いてパルス光数を少なく照射し、弱い光刺激を与える形 (不要な情報に対応) とした (図 2 (a))。結果として、Lパターンは記憶後すぐに忘却 (短期記憶) されたのに対して、Iパターンは長時間記憶 (長期記憶) されることが明らか

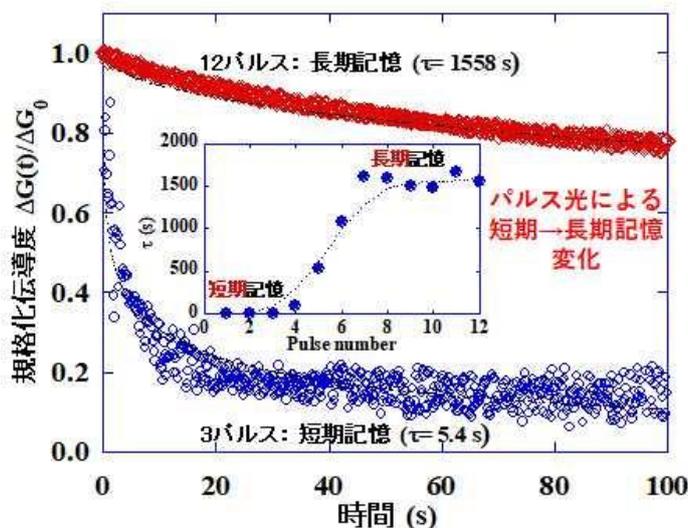


図 1 : 3 パルス又は 12 パルス光照射後の接合伝導度の時間変化、挿入図は緩和時間 (記憶保持時間) τ のパルス光数依存性

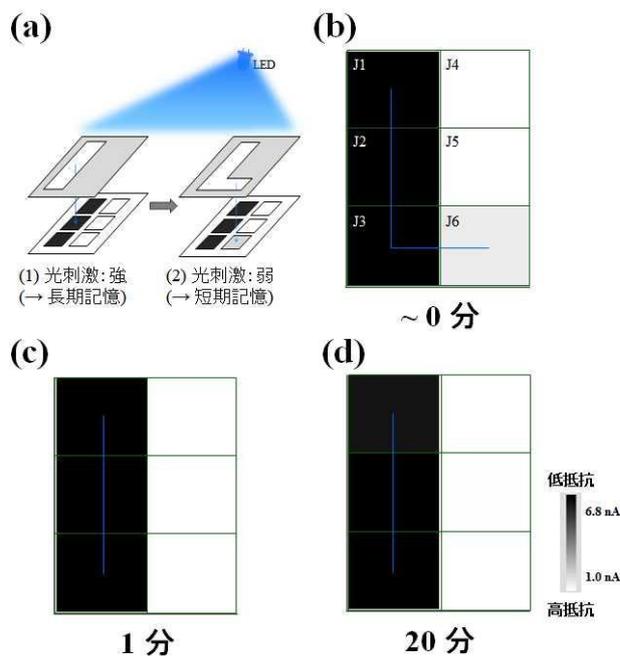


図 2 (a)~(d): グラフェン/ダイヤモンド配列構造による光情報の検出・記憶実験、I 字パターン (光刺激: 強) は長期 (≥ 20 分) 記憶されたのに対し、L 字パターン (光刺激: 弱) は短期記憶された後すぐ忘却された (1 分以内)

かとなった。この結果は、グラフェン/ダイヤモンドアレイが光検出と記憶機能を併せ持つイメージングメモリとして機能しており、更に光刺激の頻度に応じて光情報が選択的に記憶・忘却される脳類似記憶機能を有することを示している。

本成果を発展させていくことで、センサ側で光情報を取捨選択して瞬時に記憶する新型イメージセンサなどの作製が可能となり、現代情報社会において溢れかえる膨大な情報を自動で取捨選択し重要な情報のみを検出・記憶、即時処理する新型光コンピュータや高性能カメラの創出に繋がっていくと思われる。

最後になりましたが、本研究に助成頂いた住友電工電工グループ社会貢献基金の皆様には厚く御礼申し上げます。

引用文献

- [1] S. Konabe et al., APEX 6 (2013) 045104.
- [2] T. Shiga et al., Appl. Phys. Lett., 100 (2012) 233101.
- [3] K. Ueda et al., J. Mater. Res. 34 (2019) 626.
- [4] K. Ueda et al, Appl. Phys. Lett., 108 (2016) 222102.
- [5] W. Wang et al. Sci. rep., 6 (2016) 31224.

本助成に関わる成果物

[論文発表]

1. Optoelectronic synapses using vertically aligned graphene/diamond heterojunctions, Y. Mizuno, Y. Ito, and K. Ueda, Carbon, 182 (2021) 669.

[口頭発表]

1. Various optoelectronic memory functions of vertically aligned graphene/diamond heterojunctions, K. Ueda, Y. Mizuno, and Y. Ito, International conference on new diamond and nano carbons 2020/2021 (NDNC2020/21), Virtual conference (Kanazawa, Japan), 7-9 June. 2021 (8 June).
2. Optically controllable synaptic characters of vertically aligned graphene/diamond junctions, K. Ueda, Y. Mizuno, and Y. Ito, Memrisys 2021, Virtual conference (Tsukuba,

Japan), 1-4 Nov. 2021 (4 Nov.).

3. 垂直配向グラフェン／ダイヤモンド接合の光記憶特性制御、伊藤 悠河、水野 雄貴、植田 研二、2021年度第82回応用物理学会秋季学術講演会、オンライン開催、9/10-13、12p-S101-4

[ポスター発表]

1. Brain-mimic optoelectronic memory functions of vertically aligned graphene/diamond heterojunctions, Y. Ito, Y. Mizuno, and K. Ueda, 2021 MRS fall meeting, On-site, virtual hybrid conference (Boston, USA), 6-8 Dec. 2021 (7 Dec., virtual).

[その他]

(プレスリリース)

1. 名古屋大学プレスリリース(2021.7.2): 重要な情報だけを検出・記憶する脳型光記憶素子を発見 ～脳のように動く新型光コンピュータやカメラの開発に期待～
2. 名古屋大学英文プレスリリース(2021.8.3): Towards next-gen computers: Mimicking brain functions with graphene-diamond junctions

(報道発表等)

1. 電波新聞 (DEMPA DIGITAL) で記事掲載(2021.7.9): 名古屋大 脳型光記憶素子を発見、重要な光情報だけを検出・記憶
2. つくばサイエンスニュース、わかる科学(2021.8.15): 重要な情報を選択的に覚える記憶素子
3. OPTRONICS onlineで記事掲載(2021.7.6): 名大、重要な情報だけ検出・記憶する光素子を発見

(関連して、その他 20 件超のインターネットメディアニュース等への掲載有)