

小型核融合中性子源を用いた単一光子源の形成

Development of single-photon emitters using neutrons from a compact nuclear fusion reactor

○須藤 凧斗¹, 福田 悠斗², 渡部 政行³*Nagito Suto¹, Yuto Fukuda², Masayuki Watanabe³

Single photons are regarded as promising quantum carriers in the field of quantum information science. Therefore, the development of highly controllable and stable single-photon emitters has become increasingly important. In this study, we focused on single-photon emission originating from atomic defects in Silicon carbide (SiC) crystals. To induce these types of defects, 4H-SiC chips were irradiated with neutrons using a compact nuclear fusion reactor. Photoluminescence from the atomic defects was observed using a confocal laser scanning microscope, and emission characteristics indicative of single-photon emitters were detected. This result indicates that single-photon emitters can be formed via irradiation with 2.45 MeV monochromatic neutrons generated by nuclear fusion reactor. Future work will focus on identifying optimal sample conditions, improving detection methods, and investigating the most suitable neutron irradiation energies for efficient defect formation.

1. はじめに

近年、量子情報科学等に用いられる量子として単一光子が期待されている。この技術の実現には、制御性が高く、安定的な単一光子源の開発が重要である。そこで本研究では、Silicon carbide (SiC) 結晶内の原子欠陥で形成可能な単一光子発光に注目し、小型核融合実験装置を用いて 4H-SiC チップに 2.45MeV の単色中性子を照射して、単一光子源の形成を図った。

2. 試料

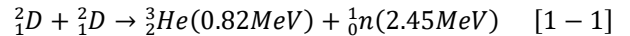
試料では約 10mm 四方の SiC チップを中性子照射用の試料として用いた。SiC をはじめとするワイドギャップ半導体を母材とした発光中心は、室温においても高輝度で発光し、電子スピンの操作が可能といった特徴を持つ。その中でもダイヤモンド中の窒素空孔中心を用いた単一光子源の研究が先行しているが、成長技術の確立など未だ課題が残っている[1]。

そこで本実験ではワイドバンドギャップ半導体として広く用いられる SiC を使い、その中でもスピン制御が可能である六方晶(4H)SiC[2]を試料とした。この 4H-SiC の励起光のピークは 785nm であり、蛍光波長は 850nm~950nm である。

3. 実験装置

図 1 に本実験で用いる小型核融合実験装置の概略図を示す。装置中心部にリング状陰極を設置し、その両側に設置された 2 つの陽極を配置している。リング状

陰極に印加する負の高電圧により原子核を陰極中心に収束させ、核融合反応を起こす。使用ガスは重水素ガスである。重水素がガス同士の核融合反応により 2.45MeV の単色中性子が発生する。重水素を用いた核融合反応の反応式を以下に示す。



実験では、核融合装置の真空容器内部を 10-4Pa 台に減圧した状態にし、重水素ガスを所定の気圧まで充填させる。その後、リング状陰極に高電圧を印加することで放電を形成する。電圧の増加に伴い、プラズマ中のイオンはリング状陰極を中心に往復運動を始める。印加電圧が 10kV を超える条件で、一定の確率でイオン同士が衝突し、核融合が発生する。その際に式[1-1]に示す 2.45MeV のエネルギーを持った中性子が放射される。

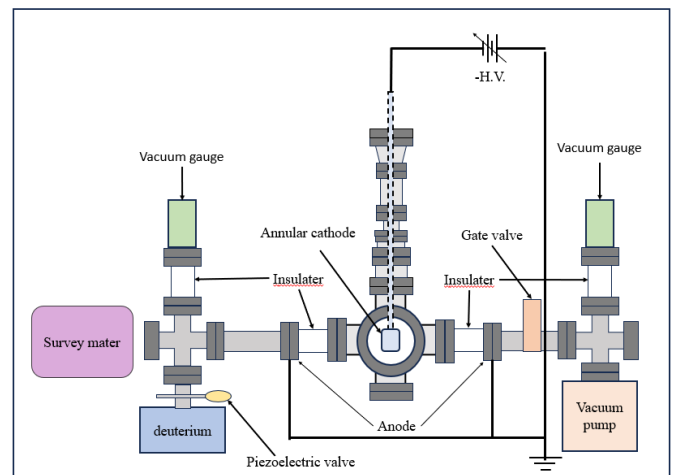


Figure. 1 Schematic diagram of a small-scale fusion reactor

中性子線の照射実験では、リング状陰極の直下 80mm の位置に設置台を設け、試料を設置した。試料に対して 30 時間程度の中性子照射を行った。

4. 原子欠陥の観測

SiC 上に形成する原子欠陥の観測及び単一光子の確認には共焦点型レーザー顕微鏡を用いた。図 2(a)に本研究で構築した共焦点型レーザー顕微鏡の概略図を、図 2(b)に写真を示す。試料の特性より、780nm のレーザー光を SiC 試料に照射した。試料に欠乏が存在すれば照射したレーザー光により照射点で蛍光が発生し、発生した蛍光及びレーザーの反射光はダイクロイックミラーによって蛍光のみが単一光子カウンター (SPCM) に向かう。

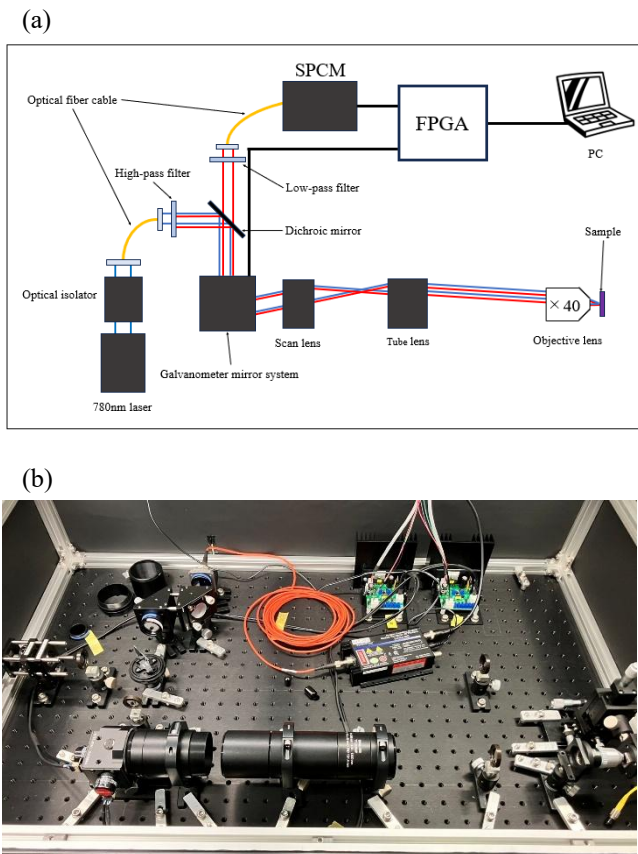


Figure. 2 Schematic diagram (a) and photograph (b) of a confocal laser microscope

中性子線は1点ではなく SiC 試料の1面に照射される。そこで FPGA で制御されたガルバノミラーを用い、計測位置を変化しつつ、原子欠陥を計測した。得られた信号の画像化も FPGA を用いて行った。この共焦点型レーザー顕微鏡は従来の走査型レーザー顕微鏡と比較して分解能が高く、奥行き方向の観測性能も高い。

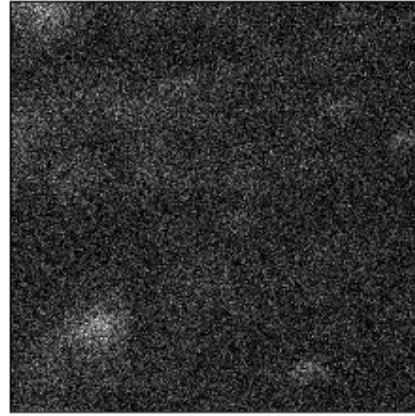


Figure. 3 Luminescence originating from atomic defects in SiC carbide

5. 結果と考察

SiC 上に形成された原子欠陥を、共焦点型レーザー顕微鏡を用いて計測した結果を図 3 に示す。試料表面に蛍光が発生したことが画像よりわかる。この蛍光は、現在のところ 10mm 四方のチップに対して数か所しか観測されていない。今後は中性子の照射時間に応じて原子欠陥がどれだけの頻度で起きるのかを観測し、体系化していく予定である。

6. 今後の実験方針

今回中性子照射実験に使用した試料は 4H-SiC である。SiC は結晶構造が多岐にわたり、中でも半導体として生産が盛んな 3C-SiC や 6H-SiC、ワイドバンドギャップ半導体として有名な窒化ガリウムなど、異なる試料においても中性子の照射による単一光子の発生を確認していく予定である。また、それぞれの試料ごとに照射時間の増減による影響の観測を行っていく。

さらに、照射するエネルギーによる影響も考えていきたい。これに際して 4H-SiC について、産業総合研究所にて重水素の D-T 反応による 14.06MeV の単色中性子照射、および核融合研究所にて Californium(cf252)の α 崩壊と自発核分裂による中性子照射を行っている。

将来的には最も効率良く原子欠乏を発生させる素材、照射方法を特定したい。

文献

- [1] 水落憲和:応用物理 87,251 (2018)
- [2] H.J. von Bardeleben, V. Ivady, N. Stavrias, T. Umeda, A. Gali E. Rauls, and U. Gerstmann: Phys. Rev. B 94, 121202(R) (2016)