

半導体中性子検出器のためのダイヤモンド薄膜合成の研究

[1] 組織

代表者：岡野 健

(国際基督教大学大学院)

対応者：増澤 智昭

(静岡大学電子工学研究所)

分担者：山田 貴壽

(産業技術総合研究所)

[2] 研究経過

中性子線は、従来の放射線と異なる検査手段として、非破壊検査や医療用イメージングへの応用が期待されている。中性子をイメージングに用いた場合、X線やガンマ線と異なり、重元素による散乱が起きにくいとされる。CTやMRIでは、インプラントやペースメーカー等がある場合に重元素の散乱によるアーチファクトが問題となるが、中性子イメージングによって従来の検査技術が苦手とする検査が可能となる。このように、中性子は新たなイメージング技術をもたらす可能性を持つ一方で、電荷を持たないという性質から、その他の放射線に比べ検出が難しいという課題がある。本プロジェクトでは、中性子イメージングへの応用が可能な半導体型中性子検出器の開発を目指し、ダイヤモンド薄膜の合成と評価を行う。

効果的な中性子検出のためには、以下の条件を満たす材料が必要である。なお、中性子は運動エネルギーによって相互作用の効率が異なるが、本研究では主に熱中性子～熱外中性子を対象とする。

(1)中性子と相互作用を起こす確率が高いこと(中性子捕獲率)

(2)発生した信号電荷を効率的に取り出せること(信号取り出し効率)

(3)中性子とガンマ線が同時に入射した際に、中性子のみを信号として検出できること(ガンマ線に対する選択比)

(4)放射線照射による結晶格子欠陥などの劣化が起きにくいこと

不純物を含まないダイヤモンドは炭素のみによって構成されるため、そのままでは熱～熱外中性子に対して感度を持たない。しかし、ダイヤモンドには不純物としてホウ素が高濃度に添加できることが知られており、 ^{10}B は中性子と高い効率で相互作用を起こすことから、ホウ素を添加したダイヤモンドを用

いることで、高い中性子捕獲率を実現できると考えられる。また、炭素は高速中性子の減速材としても用いられることから、ダイヤモンドを材料とすることで中性子の減速と検出を同時に行える可能性が示唆される。(2)については、ダイヤモンドは電子・正孔ともに $1500\text{ cm}^2/\text{V}$ 程度の高い移動度を持つことが知られており、他の検出器材料と比較しても信号取り出し効率が高いと考えられる。また、 5.47 eV という半導体としても大きなバンドギャップのために、ノイズや暗電流の低減も期待される。(3)については、中性子の発生に伴ってガンマ線が発生する機会が多いことから、中性子のみを検出できる必要がある。ダイヤモンドを構成する炭素は、比較的原子番号が小さく、ガンマ線の吸収率が低いと考えられることから、ガンマ線に対する選択比も他の材料と比べて優れるものと考えられる。さらに、(4)の劣化耐性については、ダイヤモンドの結晶構造が共有結合による強固な結晶格子を持つことから他の物質に比べても高い耐放射線性を示すことが期待される。

このように、ホウ素添加ダイヤモンドを用いることで、中性子検出器に要求される種々の条件が満たされ、優れた固体型検出器の開発が期待される。以下に本プロジェクトの実施内容を報告する。

本プロジェクトは、本年度が初年度であるため、中性子検出器開発のための準備としてダイヤモンド薄膜の合成と基礎物性の評価を行った。また、中性子検出の前段階として、中性子と同じく電荷を持たない粒子である光子の検出について議論することで、中性子検出器開発の予備的議論を行った。さらに、コンピューターシミュレーションを用いてホウ素添加ダイヤモンドの中性子検出器への応用可能性を検討した。

[3] 成果

(3-1) 研究成果

本年度は、以下に示す研究成果を得た。

第1に、化学気相成長法(CVD法)によりダイヤモンド薄膜を合成するための合成装置を作成した。高濃度窒素添加に実績のある熱フィラメント方式を採用した。原料ガスとして用いた水素のメタンの流量比を調整し、ダイヤモンドの結晶性の変化を調べた。図1に、異なる条件で合成されたダイヤモンドのラマンスペクトルの例を示す。ラマン分光の結果から、水素に対してメタンの流量比が1%の場合が

最も結晶性がよいことがわかった。

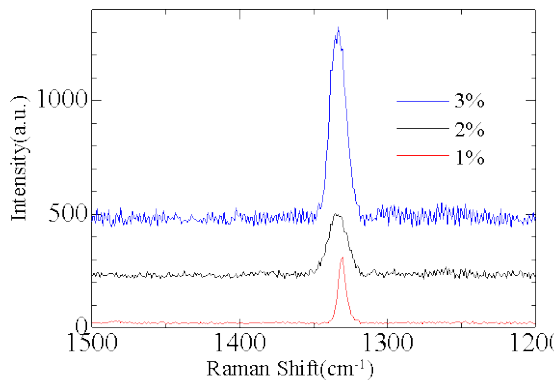


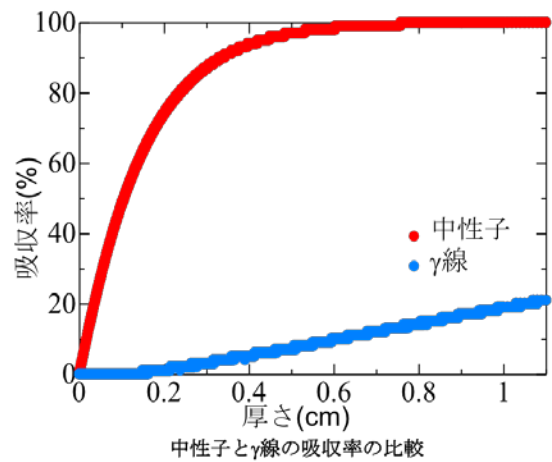
図1 水素に対するメタンの流量比を変えて合成されたダイヤモンドのラマンスペクトル。励起波長 532nm, 露光時間 5 秒。

第2に、中性子検出原理の予備検討として、光子の検出に関する検討を行った。ダイヤモンドはバンドギャップが 5.47 eV と大きいため、キャリア励起に紫外線の照射が必要となる。このため、高濃度窒素添加ダイヤモンドと同様に高い抵抗率を持ち、バンドギャップの小さいアモルファスセレンを題材として、ワイドギャップ半導体を用いた光子検出のモデルを検討した。

アモルファスセレンを用いた真空管型光検出器の動作特性から、ワイドギャップ半導体を用いた光検出では、半導体薄膜の片側に電圧を印加するだけでは、表面の帯電によって正しく電荷が読み取れず、対向電極を設けるか、定常的に暗電流を流すことで、薄膜内部に電位勾配を発生させることで電荷が読み出されることがわかった。

第3に、モンテカルロシミュレーションを用いた計算により、ホウ素を高濃度に添加したダイヤモンドの中性子検出効率を見積もった。粒子輸送・衝突計算を目的とした PHITS コード(バージョン 2.82)を用い、ホウ素添加ダイヤモンドに熱中性子 (25 meV) とガンマ線 (478 keV) を垂直に照射した場合の吸収率を計算した。ホウ素濃度は、現在報告されている添加濃度の上限よりやや低い 4.7 % ($8.3 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$)とした。シミュレーションの結果を図2に示す。ホウ素添加ダイヤモンドの膜厚が 3 mm の場合では、入射中性子の 85%以上がダイヤモンド内で吸収されるのに対し、ガンマ線の吸収は 5%程度であった。シミュレーションの結果から、ホウ素添加ダイヤモンドを用いて高い中性子捕獲率を持つ検出器の開発が示唆された。また、膜厚を 3 mm 以上にすることは合成速度の観点から難しいが、大面積に合成したダイヤモンド薄膜の、横方向(断面方向)から中性子を入射させるという検出器構造について

図2 ホウ素添加ダイヤモンドの膜厚に対する中性子・ガンマ線吸収率の変化



の着想が得られた。

(3-2) 波及効果と発展性など

本プロジェクトの実施により、ホウ素添加ダイヤモンドによる高感度な中性子検出器開発の可能性が示された。また、本プロジェクトで予備検討として行った、アモルファスセレンを用いた高感度光検出は、アモルファスセレンの表面電位を操作することで、光検出器のさらなる高感度化が可能であることを示唆するものであり、今後のさらなる発展が見込まれる。

[4] 成果資料

論文

- [1] T. Yamada, T. Masuzawa, H. Mimura and K. Okano, J. Phys. D: Appl. Phys. 49, 045102 (2016).
- [2] T. Masuzawa, H. Mimura, K. Okano and T. Yamada, phys. stat. solid A 213, pp. 2063-2068 (2016).

学会発表

- [3] 岡野 健, 遠山 諒, 増澤 智昭, 斎藤 市太郎, Joshua D. John, 山田貴寿, “ダイヤモンド冷陰極を用いた X 線検出器試作に向けた課題”, 第 14 回真空ナノエレクトロニクスシンポジウム, アクトシティー浜松, 2017 年 3 月 2 日~3 日
- [4] T. Masuzawa, T. Ebisudani, J. Ochiai, I. Saito, Ti Yamada, D. H. C. Chua, H. Mimura and K. Okano, Proc. SPIE 9957, Wide Bandgap Power Devices and Applications, 99570D (November 2, 2016); doi:10.1117/12.2237545

出張報告

氏 名：山田 貴壽

所 属：産業技術総合研究所

期 間：2016/07/07 - 2016/07/08

用務先：静岡大学電子工学研究所

用務内容：ダイヤモンドの気相合成実験への立会い、およびダイヤモンド物性評価に関する研究打合せ

主たる対応者：増澤 智昭