HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	単結晶CVDダイヤモンド放射線検出器の大型化に向けた基板欠陥の影響評価と検出器応用［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	平野, 慎太郎
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14439号
Issue Date	2021-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/81386
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Hirano_Shintaro_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学　位　論　文　内　容　の　要　旨

博士の専攻分野の名称　　博士（工学）　　氏名　平野　慎太郎

学　位　論　文　題　名

単結晶 CVD ダイヤモンド放射線検出器の大型化に向けた基板欠陥の影響評価と検出器応用
(Substrate effects on charge carrier transport properties for large single-crystal CVD diamond detector and detector applications)

単結晶ダイヤモンド半導体検出器は高速応答性、耐放射線性、可視光不感など優れた特長を持つことから原子力、加速器、宇宙など過酷環境での応用が期待される。

加速器においては素粒子反応を実験するための衝突型加速器である KEK-B ではこれまで数 cm サイズの Si バーテックス検出器が粒子衝突最近傍に使用されてきたが、耐放射線性の向上が要求されている。原子炉においては福島原発の事故後、半導体センサに対する要求仕様が厳しくなり、耐熱性、耐放射線性の向上が要求されている。また福島原発廃炉作業においては臨界近接モニタとして 1000 Gy/h と非常に強いガンマ線環境下で数 cps/nv 程度の熱中性子検出効率をもつ検出器が必要とされる。また蛍光 X 線分析においては検出器冷却機構の除外と大面積化による検出効率の向上が求められる。このように大面積ダイヤモンド検出器には幅広い適用領域が存在する。さらに大面積ダイヤモンド結晶が実現されれば、ダイヤモンド結晶の価格の低下や性能の均一性も向上する。また検出器グレードの結晶は非常に純度が高く、量子センサへの展開が期待できる。

現在 Element Six 社から検出器グレードの単結晶ダイヤモンド結晶が販売されており、業界の標準として扱われている。しかし大きさが 5 mm 角程度に制限されることや 220 度以上では電荷捕獲により波高値が低下することから応用が制限されている。また合成に使用される HPHT IIa 型基板はサイズが 5 mm 角程度と小さく、価格が高い。HPHT Ib 型基板や CVD 基板やヘテロエピ基板などさらに大きな基板も販売されているが、使用に際しては不純物、貫通転位などの欠陥影響を無視できなくなる。

本論文では単結晶 CVD ダイヤモンド放射線検出器の大面積化を目指した基板欠陥影響の評価とダイヤモンド検出器の応用研究について報告する。

本論文は全 5 章で構成されている

第 1 章では単結晶ダイヤモンド放射線検出器の諸特性に触れつつ、その特長を明らかにする。また試料作製に使用したマイクロ波プラズマ CVD 法の説明、検出器の性能評価に使用した α 線による誘導電荷量分布測定、検出器作製プロセスを紹介する。

第 2 章では検出器大型化に向けた基板欠陥影響の評価について報告する。検出器大型化を目的として Element Six 社製光学グレード大型単結晶ダイヤモンド結晶上にダイヤモンドを成長させ、その電荷キャリア輸送特性を評価した。5.5 MeV α 線に対する電荷収集効率は電子正孔ともに 99.9% を示し、エネルギー分解能は正孔では 0.39%、電子では 0.50% であった。エネルギー分解能はエネルギースペクトロメータとしての使用に十分な値を示した。また試料の $\mu\tau$ 積は正孔、電子に対し、それぞれ $(5.0\pm0.4)\times10^{-5}$ cm^2/V と $(1.8\pm0.2)\times10^{-5}$ cm^2/V であり、HPHT IIa 型基板上に合成した結果より劣るものとなった。加えて HPHT Ib 型基板上に合成した試料との電界強度に対する応答変化から基板の欠陥影響について議論した。

第 3 章では原子炉格納容器雰囲気モニタ用ダイヤモンド積層ガンマ線検出器の応答シミュレーションと検出器作製、評価について報告する。300 度以上での高温動作とガンマ線核種弁別の両方を実現するため、株式会社日立製作所と共同で PHITS を用いたモンテカルロシミュレーションの結果からダイヤモンド薄膜を 4 枚積層させた総厚さ 300 μm の検出器を考案した。実際に約 9 mm 角 HPHT IIa 型基板上に合成した薄膜試料を 4 枚にレーザー切断し、検出器を作製した。切断後の試料は RT~300 度で安定した動作を示し、レーザー切断の影響が限定的であることが明らかとなり、均一な検出器性能を持つ試料作製が可能となった。検出器は ^{137}Cs から放出される 662 keV ガンマ線のコンプトン端をはっきりと観察できた。^{60}Co と ^{137}Cs の 2 種のガンマ線核種を用いた測定から、ガンマ線核種の弁別が可能であることを実証した。

第 4 章では福島原発廃炉に向けた燃料デブリの臨界近接モニタへの適用、更にその後の原子炉での中性子計測を目指したダイヤモンド熱中性子検出器の応答シミュレーションと試作、その評価について報告する。ダイヤモンド上に $^{10}B_4$C 熱中性子変換層を作製した構造を用いて熱中性子、原子炉内を想定した 662 keV ガンマ線に対する応答シミュレーションからダイヤモンド有感層厚さ、$^{10}B_4$C 層厚さの最適化や中性子とガンマ線の弁別方法について議論した。また 40 μm 厚のダイヤモンド試料の 500 度までの高温動作性を α 線を用いた誘導電荷量分布測定で評価し、RT~350 度まで電子正孔ともに安定した動作を示した。しかしそれ以降はリーク電流が原因とみられる波高値の低下が観察された。更に同試料の両面に $^{10}B_4$C 層を作製した検出器を用いて ^{252}Cf から放出される中性子の測定を行った。波高分布は熱中性子と ^{10}B の反応で発生する荷電粒子のエネルギーと一致しており、熱中性子測定が可能であることを確認した。

第 5 章では厚さ 300 μm の検出器グレードダイヤモンド単結晶に小型 CMOS プリアンプを接続した検出器を用いて、5.9 keV~59.5 keV までの X 線、ガンマ線に対する応答を評価した。59.5 keV ガンマ線に対するエネルギー分解能は (3.4±0.1) keV であり、5.9 keV X 線に対するエネルギー分解能は最高で (481±10) eV であった。5.9 keV~59.5 keV 間の放射線のエネルギーに対するピークチャンネルをプロットして得られたエネルギー線形性はエネルギー計測に十分なものであった。一方で電界強度が低い領域によりピークの低チャンネル側で多量のカウントが発生した。改善すべき点は多いが、単結晶ダイヤモンド検出器を用いた X 線エネルギースペクトロメータの可能性を示した。