HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Lift-off法により作製した単結晶CVDダイヤモンド放射線検出器の電荷キャリア輸送特性向上と核融合プラズマ診断への応用 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	嶋岡, 毅紘
Citation	北海道大学. 博士(工学) 甲第12307号
Issue Date	2016-03-24
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/61672
Rights(URL)	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	theses (doctoral - abstract and summary of review)
Additional Information	There are other files related to this item in HUSCAP. Check the above URL.
File Information	Takehiro_Shimaoka_abstract.pdf (論文内容の要旨)

Instructions for use

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　嶋岡 毅紘

学　位　論　文　題　名

Lift-off 法により作製した単結晶 CVD ダイヤモンド放射線検出器の電荷キャリア輸送特性向上と核融合プラズマ診断への応用

(Improvement of charge transportation properties of single-crystal chemical vapor deposited diamond radiation detector obtained by lift-off method and its performance evaluation for fusion plasma diagnostics)

ダイヤモンド放射線検出器は 5.5eV のワイドギャップによる高温動作、低漏れ電流、高い絶縁破壊電界強度、可視光不感等の特長をもつ。優れた中性子耐性 ($> 10^{14}$ fast neutron/cm^2) を有し、高移動度・高飽和ドリフト速度による高速応答性も持つ。さらに $^{12}C(n,\alpha)^{9}Be$ 反応を利用することで DT 中性子計測に基づくプラズマイオン温度測定も可能である。これらの特長からダイヤモンド放射線検出器は DT 中性子エネルギースペクトロメータや荷電交換中性粒子モニタ等の核融合プラズマ診断装置として応用が期待されている。

過酷環境でダイヤモンドが本来持つ特性を発揮するためには電子・正孔ともに電荷捕獲準位の限りなく少ない理想的な単結晶ダイヤモンドが求められる。高温動作に関して ITER 用 DT 中性子エネルギースペクトロメータでは 150 度以上での動作が求められる。ダイヤモンドはバンドギャップが 5.5 eV と 1.12 eV のシリコン、0.67 eV のゲルマニウムと比較し大きいため捕獲準位も相対的に深い。このような準位がある場合、動作温度上昇に伴う捕獲準位の活性化により漏れ電流、電荷捕獲が増加し計測が困難となる。また、プラズマ診断の測定環境下では数 kcps 以上の高計数率下で動作が求められる。結晶中にわずかな電荷捕獲準位が存在すると、短時間でチャージアップが発生し検出器動作が不安定になる。この電荷捕獲の原因は結晶中の構造欠陥・不純物であることが定性的に示されている。天然ダイヤモンド中、エネルギースペクトル計測に用いることができるのは数千に 1 つと非常に少ないためその使用は現実的ではない。

この状況を受け近年ではマイクロ波プラズマを用いた化学気相成長 (CVD) 法によるダイヤモンド成長技術の進歩により、単結晶 CVD ダイヤモンドが多く用いられるようになっている。一般的に単結晶 CVD ダイヤモンドは単結晶基板上へのホモエピタキシャル成長の後、成長層をレーザー切断・機械研磨により自立膜とし使用する。この方法では 100 マイクロメートルオーダの切りしろを要する。成長率数 μm/h の気相成長においてこれは大きな損失である。

一方、北海道大学では産総研関西センター協力のもと炭素イオン注入、電解エッチングを組み合わせたリフトオフ法により単結晶 CVD ダイヤモンド放射線検出器開発を行っている。この方法は切りしろ約 2μm と成長層のほとんどを利用でき、さらに切断・研磨では作製の困難な薄い自立膜を得ることもできる。リフトオフ法で得られた試料の電荷収集効率は正孔に対してはほぼ完全な電荷収集効率を得ているものの、電子については約 3 % 電荷捕獲があった。電子電荷キャリア輸送特性を劣化させる原因としては試料表面にステップバンチングが観測されたことから窒素不純物、カソードルミネッセンス (CL) スペクトルにおけるバンド A 発光から構造欠陥、そして NV 発光の存在から窒素と対をなす点欠陥等が示唆されていた。

本研究では生産性の高いリフトオフ法を用いた単結晶 CVD ダイヤモンド自立膜の電荷キャリア輸送特性について、上記の電荷捕獲準位を低減、電子電荷収集効率を改善した上で核融合プラズマ診断を念頭にした各種応答関数評価によりその適用可能性検討した結果について報告する。

第 1 章ではダイヤモンド放射線検出器の特長を引き出し過酷環境下で使用するためには電子に対する電荷捕獲を可能な限り低減することが重要であることを既存検出器の現状より示し、電子電荷収集効率改善の指針を述べた。

第 2 章では不純物、欠陥低減のため気相成長時の窒素汚染低減、0.2% 近傍での低メタン濃度成長並びに成長温度の上昇を行い、電荷キャリア輸送特性を評価した。これらの取り組みにより正孔 100.1%, 電子 99.8% の電荷収集効率を達成、電子電荷捕獲を従来の 10 分の 1 に改善、Lift-off 法においてもトップクラスの検出器性能を持つダイヤモンドの作製に成功した。

第 3 章では第 2 章で得られた試料に対し ϵ 値、Fano 因子の評価を行った。α 線誘導電荷量分布測定により ϵ=13.1±0.1eV を得た。エネルギー分解能は実測値で 0.31% とダイヤモンド検出器としてトップクラスの値を示した。さらに、回路系ノイズを差し引いた検出器固有分解能から求めたファノ因子は F = 0.4 でありダイヤモンド放射線検出器として初めて Fano 因子が 1 より小さくなることを実験的に示した。

第 4 章では DT 中性子エネルギースペクトロメータへの応用を目指し、第 2 章で得られた試料に対し 14MeV 中性子応答関数評価を JAEA/FNS において行った。^{12}C(n,α)^{9}Be 反応に対応するエネルギー分解能は最高で 1.5% を達成した。ビーム軸に対し 95 度に設置した場合の検出器固有エネルギー分解能は 0.79% であり人工ダイヤモンドとして初めて天然ダイヤモンドで報告されていたエネルギー分解能最良値を上回った。

第 5 章では荷電交換中性粒子モニタへの応用を目指し、3MeV プロトンによる高計数率照射試験、150-400keV の低エネルギープロトンに対する照射試験を行った。約 10% の電荷損失のある従来試料では数 kcps の計数率下で波高値が開始時の 8 割まで数分で低下、著しい電荷捕獲が起こった。一方で逆バイアス印加による波高値回復から数 MeV イオンによる照射では塑性的な損傷ではなく電荷捕獲が波高値低下の主な原因であることが明らかになった。低エネルギープロトンに対する照射では Al 電極によるエネルギーロスよりも十分高い 200keV からスペクトル形状が崩れ、不感層の存在が低エネルギー計測における課題として明らかになった。

第 6 章では高速点火方式慣性核融合中性子 burn ヒストリモニタへの適用を目指し、高強度 X 線、DD 中性子に対する応答関数を評価、実験で得られた応答関数から適用可能範囲と課題を明らかにした。高強度 X 線に対し半値幅 0.8ns, 減衰時定数 470ps の高速なパルス応答を得た。また、DD 中性子に対し 10^8 neutrons/shot 以上の中性子イールドで応答関数取得に成功した。イオン温度 5keV 時に中性子到達時刻のドップラー拡がりを 100ps に抑えて計測する場合、X 線の 2.5ns 後に中性子が到達する。実験的に求めた減衰時定数と中性子感度から中性子イールド 10^{11} neutrons/shot において X 線による波高値が 6V 未満であれば 100 以上の S/N で中性子信号を取得できる見込みを得た。以上より光検出器の使用が困難な高強度 X 線下において、単結晶 CVD ダイヤモンド放射線検出器の使用が有効であることが示された。

第 7 章では研究全体の結論と今後の展望について述べる。