

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：82108

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14914

研究課題名(和文)ダイヤモンドアバランシェダイオード実現に向けた衝突電離機構の研究

研究課題名(英文) Study of impact ionization process in diamond for developing diamond avalanche diodes

研究代表者

嶋岡 毅紘 (SHIMAOKA, Takehiro)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・外来研究員

研究者番号：80650241

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではダイヤモンドの衝突電離機構を明らかにすることを目指した。疑似縦型ダイヤモンドpinダイオードを作製し、電子ビーム照射下の電流-電圧特性から電荷増幅の指標である衝突イオン化係数の導出を試みた。電界強度 $\sim 2\text{MV/cm}$ までの電流-電圧特性評価を行ったものの、明瞭な電荷増幅は観測できなかった。派生テーマとして、作製したダイヤモンドpinダイオードの大きな内臓電位( $\sim 4.5\text{V}$ )に着目し、外部電圧なしで動作する放射線センサや変換効率の高い原子力電池などへ応用できることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題実施期間中に、当初目標としていた衝突イオン化係数の導出は達成できなかったものの、ダイヤモンドpn接合の内臓電位に着目した結果、高変換効率を有する原子力電池や外部からの印加電圧なしに動作する放射線センサなど、ダイヤモンドダイオードの新しい応用に関する知見が得られた。これらの成果は過酷環境で動作する耐環境性に優れたダイヤモンドセンサや、宇宙環境などの長期間電源の交換できないリモート環境で使用可能な電池などの実現に寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigated impact ionization phenomena in diamond. We formed diamond pin diodes and evaluated current-voltage characteristics under electron beam irradiation to extract impact ionization coefficient which determines charge multiplication factor in the diodes. Apparent charge multiplication was not observed in the diodes under  $2\text{MV/cm}$  of high electric field. The diamond pin diodes showed  $\sim 4.5\text{V}$  of high built in bias. Using the bias, we realized diamond radiation sensor operating as photovoltaic mode, and diamond betavoltaic cells with high conversion efficiency.

研究分野：原子力学

キーワード：衝突電離機構 ダイオード リーク電流 ベータボルト電池 原子力電池

### 1. 研究開始当初の背景

原子炉過酷事故対応、核融合炉、大強度加速器を用いた高エネルギー物理学等、幅広い分野において高温動作、放射線耐性や磁気耐性等の耐環境性に優れた放射線センサへの需要が高まっている。既存のプラナ型ダイヤモンド放射線検出器は耐環境性に優れるが、電荷を増幅できないため、測定系の耐環境性はシリコンからなる読み出し用エレクトロニクスに支配されてしまう。この問題に対し、内部利得を持つダイヤモンド検出器が実現できれば測定系全体のさらなる耐環境性向上が期待される。

### 2. 研究の目的

本研究ではダイヤモンドの衝突電離機構を実験的に明らかにし、耐環境性・高ゲインを合わせ持つアバランシェダイオード実現のための要素技術開発を目的とした。電荷増幅を制御するための単位長さあたりの電荷キャリア増幅度である衝突イオン化係数の評価、ならびにその温度依存性の評価を行うことで衝突電離機構を明らかにすることを目指した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 試料作製

化学気相成長、反応性イオンエッチングと電子ビーム蒸着によりダイヤモンド pin ダイオードを形成した。試料の作製工程を図 1 に示す。高压合成{111}単結晶ダイヤモンド基板上にマイクロ波プラズマ CVD (化学気相成長) 法によりホウ素ドープダイヤモンド(p 層)、アンドープダイヤモンド(i 層)、リンドープダイヤモンド(n 層)を成長した。直径 250 μm の円形領域をアルミニウムでマスクし、反応性イオンエッチングにより n 層、i 層をエッチングすることで疑似縦型構造を形成した。最後に、形成したメサ上、p 層上に直径 150 μm の Ti/Mo/Au 積層オーミック電極を形成した。

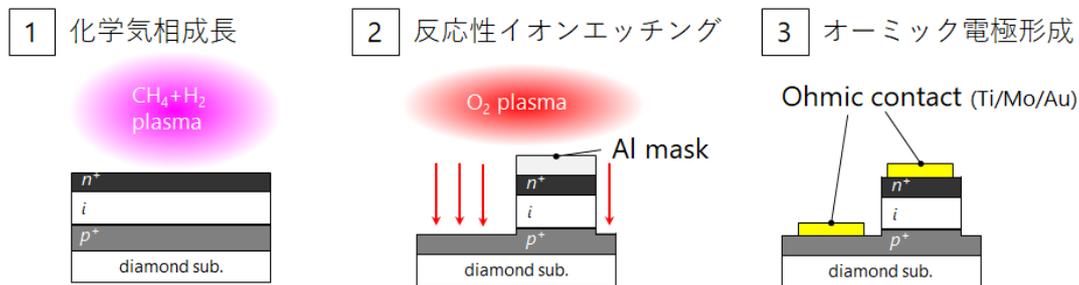


図 1 ダイヤモンド pin ダイオード作製工程

#### (2) 衝突イオン化係数評価

作製した pin ダイオードに対し、衝突イオン化係数評価を行った。直径 250 μm のメサ構造を有する pin ダイオードのうち、リーク電流の低いものを事前に選定し、電子ビーム照射下での電流値の電界強度依存性を評価した。室温での評価と並行して、温度依存性評価に向けた、高温下での評価系構築も研究課題実施中に行った。所属機関に既存のマイクロプローブチャンパーに重水素ランプを取り付け、昇温下で紫外線を照射できる系を構築した。

### 4. 研究成果

当初予定していた衝突イオン化係数の導出においては、期待していた成果が得られなかったが、派生する研究テーマに関し、下記 3 つの成果が得られた。

#### (1) 衝突イオン化係数評価

先に述べた方法により、i 層厚さ約 1 μm の試料を用いて、電界強度約 2MV/cm までの評価を行った。電子ビーム照射下での、I-V(電流-電圧)特性を図 2 に示す。明瞭な増幅現象の観察には至らなかった。また、リーク電流増加に伴う S/N 劣化により、それ以上の電界強度での測定を行うことができなかった。温度依存性の評価についても、紫外線照射下での電流の電界強度依存性を評価したものの、ダイオードのリーク電流増加に伴う S/N 劣化により、研究期間中での明瞭な増幅現

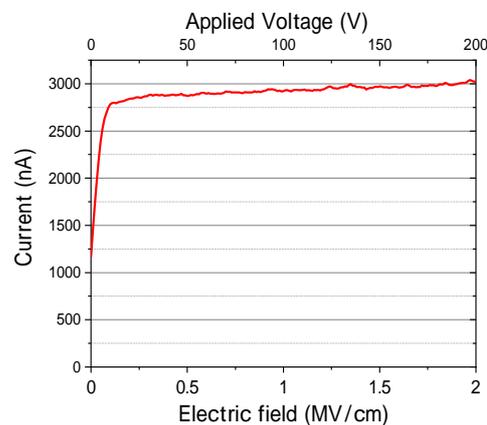


図 2 電子ビーム照射下における pin ダイオードの電流-電圧特性

象の観測には至らなかった。

## (2) 派生テーマ

### フォトルタイック動作可能なダイヤモンド放射線センサ

派生技術としてダイヤモンド pin ダイオードの大きな内蔵電位を利用した放射線検出器を試作し、外部からの電圧印加なしで放射線検出ができることを見出した。

### リーク電流を増加させる欠陥の検出

リーク電流を増加させる欠陥検出を電気特性評価とエッチピット形成の組み合わせにより試みたところ、転位が凝集した箇所でリーク電流が増加する傾向にあることを見出した。

### ベータボルト電池への応用

pn 接合ダイオードの電子ビーム照射下でのダイオードの順方向特性に着目し、ベータボルト電池としての特性を評価した。ベータボルト電池の変換効率はバンドギャップの増加に伴い向上することが理論的に予測されている。ダイヤモンド pn 接合ダイオードは内蔵電位が 4.5V と大きく、この用途に適した半導体材料である。図 3 には電子ビーム照射下でのダイオードの I-V, P-V(電力 電圧)特性を示す。形状因子、電子正孔対生成平均エネルギーから変換効率を算出したところ、28%の高い変換効率を示した。この値はベータボルト電池としてこれまでに報告されている中で最良の値であった。

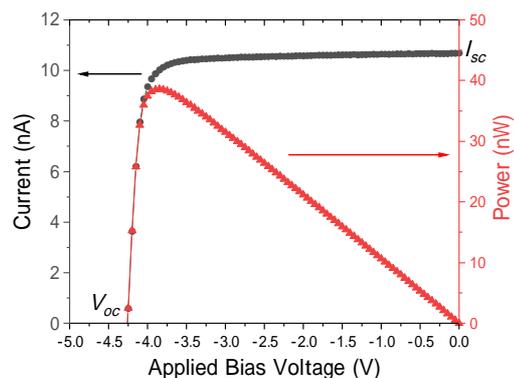


図 3 ダイヤモンド pin ダイオードの P-V, I-V 特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shimaoka Takehiro, Koizumi Satoshi, Tanaka Manobu M.	4. 巻 113
2. 論文標題 Diamond photovoltaic radiation sensor using pn junction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 093504 ~ 093504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5034413	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shimaoka Takehiro, Ichikawa Kimiyoshi, Koizumi Satoshi, Watanabe Kenji, Teraji Tokuyuki	4. 巻 216
2. 論文標題 Detection of Defects in Diamond by Etch Pit Formation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 physica status solidi (a)	6. 最初と最後の頁 1900247 ~ 1900247
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssa.201900247	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Takehiro Shimaoka, Satoshi Koizumi, Manobu Tanaka
2. 発表標題 Charge transport characteristic in diamond pn diodes
3. 学会等名 New Diamond and Nano Carbon conference (NDNC) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takehiro Shimaoka, Satoshi Koizumi, Manobu Tanaka
2. 発表標題 Diamond pn diodes for charged-particle measurement
3. 学会等名 Hasselt diamond workshop 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 嶋岡毅紘、市川公善、小泉聡
2. 発表標題 {111}ダイヤモンドにおけるホウ素取り込みの基板オフ角依存性
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 嶋岡毅紘、市川公善、小泉聡
2. 発表標題 {111}ホウ素ドーブダイヤモンド薄膜成長の基板オフ角依存性評価
3. 学会等名 第33回ダイヤモンドシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takehiro Shimaoka, Hitoshi Umezawa, Satoshi Koizumi
2. 発表標題 Betavoltaic characteristics of diamond pn diodes
3. 学会等名 JSPS-CNRS diamond detector workshop
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takehiro Shimaoka, Hitoshi Umezawa, Kimiyoshi Ichikawa, Julien Pernot, Satoshi Koizumi
2. 発表標題 Betavoltaic characteristics of diamond pn diodes
3. 学会等名 New Diamond and Nano Carbon conference (NDNC) 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takehiro Shimaoka, Hitoshi Umezawa, Kimiyoshi Ichikawa, Julien Pernot, Satoshi Koizumi
2. 発表標題 Nuclear battery applications of diamond junction devices
3. 学会等名 2020 MRS Spring and Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

AIP SciLight: Vol 2018, No 35 <a href="https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.5053688">https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.5053688</a>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	小泉 聡  (KOIZUMI Satoshi)		