

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656604

研究課題名（和文） 耐照射損傷性を有する高効率半導体ガンマ線電池の開発

研究課題名（英文） Development of high efficient gamma-ray cells with anti-radiation damage

研究代表者

橋爪 健一（HASHIZUME KENICHI）

九州大学・総合理工学研究院・准教授

研究者番号：70243912

研究成果の概要（和文）：ガンマ線をエネルギー源とするシリコン半導体およびテルル化カドミウム半導体を用いた放射線電池を開発し、5%以上のエネルギー変換に成功した。発電効率は、素子の厚さ、照射温度に顕著に依存した。これらの特性は、照射によって生成した電子・正孔のキャリアの寿命、拡散長に起因することが分かった。また、長期照射に伴う発電効率の低下は避けられなかったが、素子の加熱焼鈍によって回復することが分かった。

研究成果の概要（英文）：Gamma cells using Si and CdTe semiconductors have been developed, and the best energy conversion ratios from gamma ray to electricity successfully reach over 5%. The energy conversion ratios depended on the cell thickness and ambient temperature. These characteristics are attributed to the life time and diffusion length of the carriers (electron-hole pairs) generated during the gamma ray irradiation. Although the decrease of the conversion ratio by long term irradiation is not avoided, it is found that the conversion ratios could be recovered by means of the heat treatment of the cells.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・エネルギー学

キーワード：放射線電池、シリコン、テルル化カドミウム、ガンマ線、コバルト 60

## 1. 研究開始当初の背景

従来よりプルトニウムなど $\alpha$ 放射体線源を用いた放射線電池が使用されてきた。これは熱電素子を利用して $\alpha$ 崩壊時の自己発熱による熱を電気として取り出すもので、人工衛星や心臓ペースメーカーの電源として使用実績もある。 $\alpha$ 線源の放射線電池は小型、長寿命という特徴を有するが、大電力を取り出すことには適していない。一方、高レベル放射性廃棄物などから発生する大量の $\gamma$ 線を電気に変換する方法が注目されている。例え

ば、シンチレータと太陽電池とを組み合わせ電気エネルギーを取り出す研究が行われている。しかし、この方法では、シンチレータの発光効率と太陽電池の発電効率の2つの積となるため変換効率が低いという欠点があった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、高レベル放射性廃棄物などから発生する $\gamma$ 線をエネルギー源とし、これを効率よく電気に直接変換できる半導体

放射線電池の開発にある。その発電原理は、 $\gamma$ 線との相互作用により半導体内部に発生する電子-正孔対を、太陽電池と同様、直接発電に利用するものである。この電池は構造も単純であることから、従来提案されている変換方法よりも高効率かつ長寿命が期待できる。電池材料には、できる限りガンマ線吸収が高く高変換効率かつ高耐照射損傷性が期待できる重元素ワイドバンドギャップ半導体を用い、計算機シミュレーションを加え変換効率向上を図り、高い変換効率を持つ放射線電池開発を目指した。

### 3. 研究の方法

高性能半導体放射線電池の開発を目指すため、物性的に優れ安定的供給されているシリコン (Si)、テルル化カドミウム (CdTe) 単結晶基板を用いた。この2種にも、ゲルマニウム、インジウム燐、ガリウムヒ素、ガリウム燐などの代表的半導体を素子として作製したが、結果的に、ガンマ線照射時に十分な電気出力を得ることができなかった。そこで、ここではSiとCdTeについての成果を述べていく。

半導体基板ウエハに、真空蒸着、スパッタリングなどの方法にて電極製膜を行って素子を作製し、また、X線・ガンマ線検出素子を電池としての基本特性である整流特性を調べた。ガンマ線照射実験では、九州大学加速器・ビーム応用研究センターの $^{60}\text{Co}$ 照射実験施設(185TBq)で、線源からの距離、負荷抵抗を変えながら発生電力(電流-電圧(I-V)特性)を測定した。

素子の長期照射実験による性能劣化を測定するために、各ガンマ線素子の出力変化、Siウエハの抵抗値変化、加熱焼鈍による回復効果などを調べた。

これらの実験とともに、コンピュータシミュレーション(Monte Carlo Simulation for N Particle, MCNP)を用いて、想定される材料、幾何学的配置、線量率などの項目をパラメータとして解析を行い、電子、光子の流束およびエネルギー付与率についてデータの蓄積を行った。

### 4. 研究成果

(1) 実験結果を述べる前に、MCNPコードを使った各種半導体についてのエネルギー付与の計算値(厚さ10mmとして、1.3MeVガンマ線が左側から $10^6$ 個入射、右側へ抜けるときの様子)を図1に示す。よく知られているように、エネルギー付与率は材料の密度とともに増加するが、CdTeではSiに対して、単位厚さあたり2倍程度の付与エネルギーの差がある。従って、同一形状の素子の場合、1個当たりの発電量は、エネルギー変換効率が同じであれば2倍となる。放射線電池は、線

源の周りに配置され、発電とともに線源の遮蔽を兼ねることになるので、密度の高い素子の方が、この点でも有利となる。

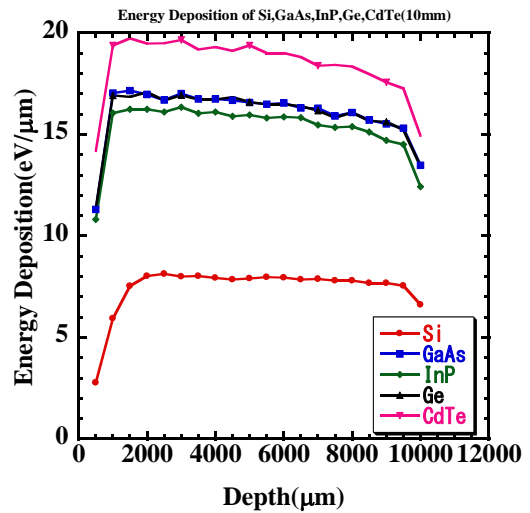


図1 各半導体材料中のガンマ線のエネルギー付与の計算値

### (2) ガンマ線電池の I-V 特性

準備した半導体素子を、図2に示したような回路構成で、室温のガンマ線照射実験施設内の線源からの距離10~20cmの位置で、負荷抵抗を変えながら、電流(I)、電圧(V)を測定した。図3に電気抵抗値を0.01~1000Ωcmの範囲で変えて作製したSi素子について得られたI-V特性を示す。50~100Ωcmの素子が最も高い出力を示していることが分かる。

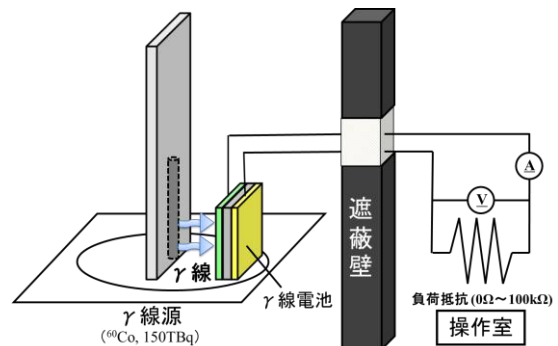


図2 ガンマ線照射実験の構成

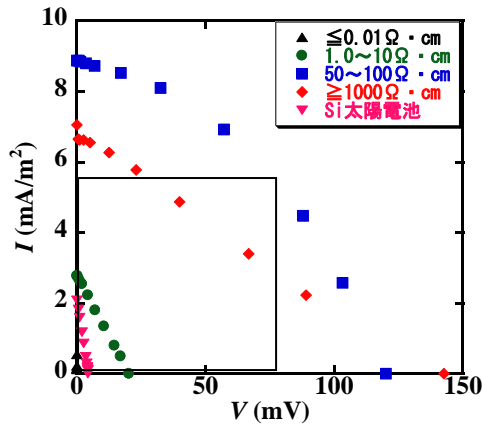


図3 Si製ガンマ線電池の  $I$ - $V$ 特性  
(□の面積が  $50\sim 100\ \Omega\text{cm}$  の素子の最大出力  $P_{\text{max}}$  を示す)

(3) 基板電気抵抗値と最大起電力の関係

図3で得られた Si 素子の最大出力(起電力  $P_{\text{max}}$ )の抵抗値依存性を示す。高抵抗の素子で起電力が大きくなっていることが分かる。

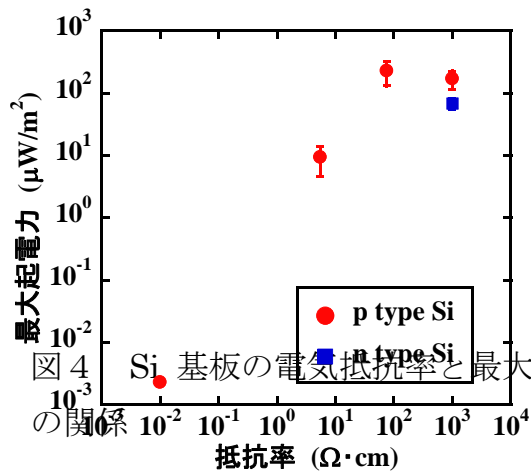


図4 Si 基板の電気抵抗率と最大出力の関係

図4 基板抵抗率と起電力の関係

(4) 最大起電力  $P_{\text{max}}$  (発電効率 ECE) と素子厚さの関係

図1に示したように、エネルギー付与の積分値は、素子の厚さにほぼ比例して増加する。図5は Si と CdTe 素子の厚さごとの最大出力を示し、図6はそれらを MCNP コードを用いて算出したエネルギー付与値を用いて、エネルギー変換効率 (ECE) を求めたものである。Si では厚みが増すと出力が増加し、結果として、ECE の値は約 1.5%と厚さにあまり依存しないことが分かる。一方、CdTe では厚

くなるほど出力は低下し、結果として ECE は極端に低下することが分かる。これらの性質の違いは、半導体のキャリアの寿命、拡散距離に起因すると考えられる。すなわち、Si のキャリアの寿命、拡散距離は CdTe より数桁長く、拡散距離で mm から cm 程度はあるためこの範囲内で厚さが変化しても素子内で生成したキャリアは電極に到達できたものと考えられる。CdTe の場合はより薄い素子のほうが高い ECE を期待でき、たとえば、CdTe 多層素子の作製が有効であると考えられる。

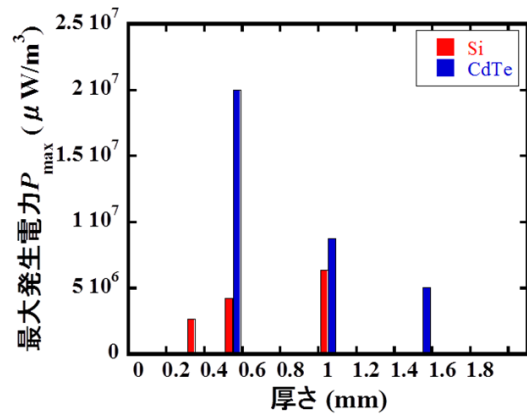


図5 素子厚さと最大起電力

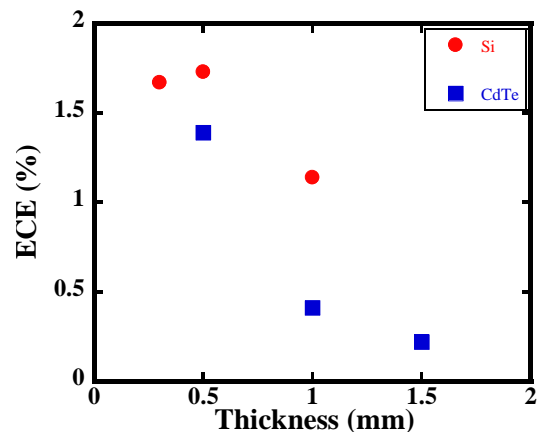


図6 素子厚さとエネルギー変換効率 (ECE) の関係

(5) 最大起電力 (発電効率) と温度の関係

素子温度は、キャリアの寿命、拡散距離を反映して最大出力に大きく影響する。図7は Si と CdTe 素子の最大出力の照射温度依存性を示している。キャリアの寿命、拡散距離の点からは、低温のほうが高起電力を得られるはずであるが、実際には、素子の内部抵抗も上昇するため、CdTe では緩やかに、Si では

急激に出力が低下し、結果として、出力を最大にする最適温度が存在することが分かった。なお、高温域ではバンドギャップのおきな CdTe のほうが高い起電力を示した。高レベル放射性廃棄物のように自己発熱で温度が上がる線源では、CdTe のようにバンドギャップが高い必要があると考えられる。

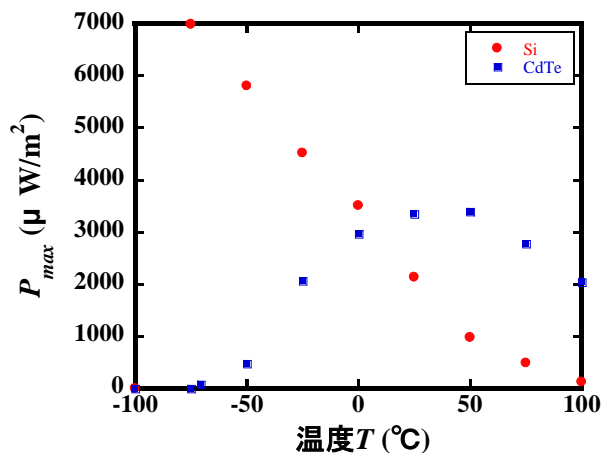


図7 最大起電力の照射温度依存性

(6) 長期間照射の影響

市販の太陽電池ではガンマ線照射で十分な出力が得られないが、X線・ガンマ線素子では大きな出力を示すものがあることが分かった。図8にSi製X線・ガンマ線素子の発電特性の一例を示す。この素子では照射初期で5%を超える変換効率ECEが得られているが、照射とともに低下していることが分かる。

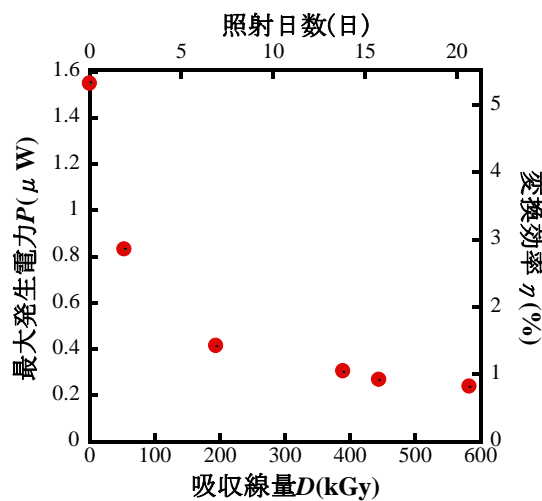


図8 長期照射にともなう出力低下 (Si製X線・ガンマ線素子)

図9は、各素子 (Si製市販太陽電池、Si製ガンマ線電池およびCdTe素子) の照射に伴う出力低下を示している。CdTeはSiに比べ低下速度が低いことが分かるが、いずれにしても、現状では照射に伴う低下を避けることはできなかった。図10は出力低下の原因を調べるため、Siについて基板の電気抵抗値の変化を測定したものであり、照射によって抵抗値が上昇していることが分かる。図4では高抵抗のほうが素子の効率が高いことを示したが、この場合はガンマ線による照射損傷で生じたと考えられる欠陥によってキャリアの運動が阻害され抵抗が上昇したものと考えられる。(図4では、ドーパント濃度の減少により抵抗が上昇しており、キャリアの運動の阻害原因は低下している)

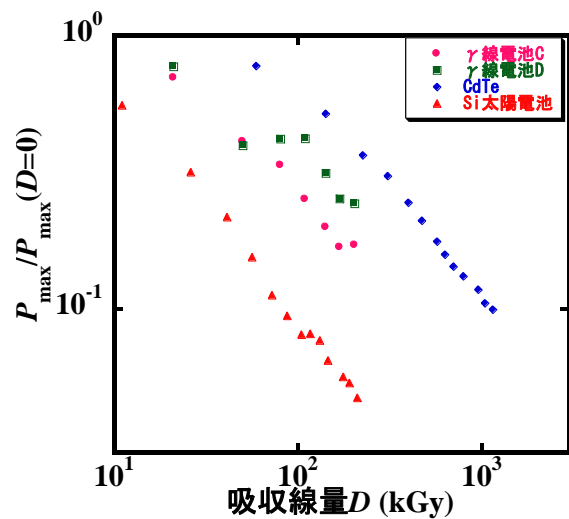


図9 各素子の長期照射にともなう出力低下

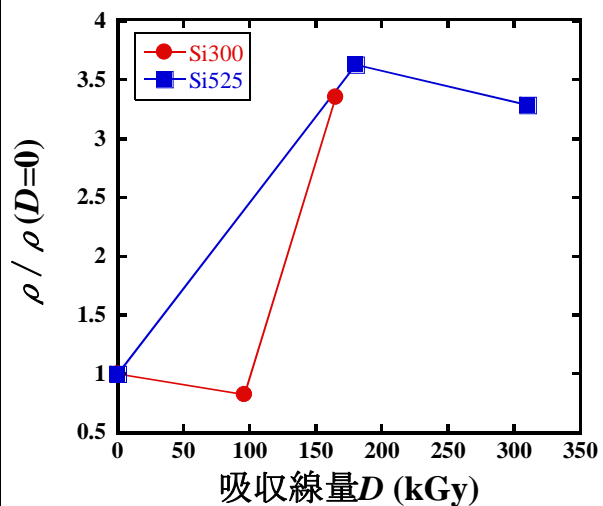


図10 Si基板の照射による抵抗値変化

照射による出力低下は防ぐことができなかつたが、CdTe 素子では 100℃程度の過熱焼鈍によって出力が回復した。一方、Si では明確な回復は見られなかつた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

Y. Taniguchi, T. Tanabe, K. Hashizume, T. Okai, Effect of cell thickness on energy conversion efficiency for semiconductor gamma cells, Proc. 13<sup>th</sup> Cross Straits Symposium、査読無、(2011) 133-134.

[学会発表] (計 3 件)

- ① Y. Taniguchi, T. Tanabe, K. Hashizume, T. Okai, Effect of cell thickness on energy conversion efficiency for semiconductor gamma cells, 13<sup>th</sup> Cross Straits Symposium (2011, 11, 23), Kyushu Univ.
- ② 富永康平、谷口祐樹、橋爪健一、田辺哲朗、岡井富雄、Si および CaTe 製ガンマ線電池の発電特性、日本原子力学会秋の大会 (2012 年 9 月 19 日) 広島大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

橋爪 健一 (HASHIZUME KENICHI)

九州大学・総合理工学研究院・准教授

研究者番号：70243912

### (2) 研究担当者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：