

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 6 月 4 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011 ~ 2012

課題番号：23760065

研究課題名（和文） Gd 中性子コンバータをドーピングした半導体熱中性子検出器

研究課題名（英文） Gd neutron converter doped semiconductor thermal neutron detectors

研究代表者

三宅 亜紀 (MIYAKE AKI)

静岡大学・工学部・学術研究員

研究者番号：60441606

研究成果の概要（和文）：新規構造の熱中性子イメージング用の半導体検出器として、Gd（中性子コンバータ）ドーピング CdTe 半導体検出器を作製した。作製した検出器は整流性を示し、従来の CdTe 検出器と同様に γ 線のエネルギースペクトルを得ることができた。熱中性子の測定では、積層構造の検出器では検出できなかった内部転換電子の検出に成功した。本研究により、コンバータをドーピングすることで、半導体検出器の中性子検出効率の向上が可能であると示された。

研究成果の概要（英文）：Gd-doped CdTe semiconductor detector was prepared as a new structure detector for thermal neutron imaging. The detector showed clear rectifying property and it was able to measure the energy spectra of gamma-ray sources like a conventional CdTe detector. In the measurement of the neutron source, the internal conversion electrons which can't be detected by conventional CdTe detector were detected. This study indicated that doping of neutron converter is possible to improve the detection efficiency of thermal neutron.

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	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎／応用物理学一般

キーワード：放射線・中性子検出

1. 研究開始当初の背景

広く普及している X 線イメージングにおいて可視化が困難な水素やリチウム、水といった軽元素の画像化が可能な中性子イメージングの産業応用が求められている。

実用化に向け、中性子線源と検出器の両方の開発が求められており、検出器においては動画撮像に要求される高分解能・高検出率・高速応答を満たす検出器が求められている。しかし、未だこれら全てを満たす検出器は実現されていない。

動画撮像のための中性子検出器の候補に

はシンチレーション検出器と半導体検出器が挙げられる。シンチレーション検出器については国内外で盛んに研究が行われている。一方、半導体検出器は検出効率の低さからシンチレーション検出器と比べて注目度は低いが、検出効率が改善されれば、高精細なイメージング用検出器として非常に有用な検出器となる。

半導体検出器の検出効率は中性子コンバータの中性子捕獲効率と二次放射線の放出確率、検出器での二次放射線の検出効率によって決定する。このため、検出効率は検出器

とコンバータ材料との組み合わせや、素子構造を工夫することによる検出効率向上が報告されている。

2. 研究の目的

本研究は半導体検出器の熱中性子検出効率の向上を目指し、新しい素子構造を持つ半導体検出器の創出を目的とした。従来の半導体検出器のように中性子コンバータ層を検出器上に形成するのではなく、コンバータ材料をドーピングにより半導体内部に導入することで、二次放射線の検出効率向上を目指した。

3. 研究の方法

研究は三つの段階で行なった。まずはドーピング型半導体検出器の作製を行ない、次に作製した素子の γ 線検出能力の評価を行い、検出器として動作することを確認した。最後に、作製した素子を用いて熱中性子検出能力の評価を行なった。

(1) 熱中性子用半導体検出器の作製

中性子コンバータには熱中性子の捕獲断面積の最も大きいGdを、二次放射線である即発 γ 線と内部転換電子を検出する半導体検出器として γ 線検出器として研究実績のあるCdTeを選択した。

γ 線検出器としてのCdTe検出器は、p型CdTe基板にInドーピングを行い、PN接合を形成したものを作製してきた。本研究では、Inの代わりに中性子コンバータであるGdをドーピングし、中性子コンバータの内部導入を行うとともに、GdをPN接合形成を担うn型ドーパントとして利用し、これまでInで行なってきた素子作製条件などを参考に、検出素子の作製を試みた。ドーピングにCdTe基板上に形成したGd薄膜を、KrFエキシマレーザを用いてCdTe基板に拡散させるレーザドーピング法を用いた。

本研究では当初、Gd薄膜の成膜を抵抗加熱法で試みたが、膜の剥がれなどが発生し、CdTe基板上への一様なGd薄膜の作製が困難であった。そのため、一様なGd薄膜を得るために、外部委託を行い、イオンプレーティング法を用いた成膜によりGd薄膜を準備した。

PN接合形成後、素子の $-V$ 特性の評価を行ない、接合形成を確認した。

(2) γ 線検出器能力の評価

中性子検出はGdコンバータが中性子を捕獲した時に放出する内部転換電子と即発 γ 線を検出することによって行う。このため、素子の γ 線検出能力は中性子検出能力に大きく影響する。そこで、まずは作製した検出器の γ 線検出能力の評価として、 γ 線源

(Am-241、Ba-133)の測定を行った。

γ 線検出器として研究を行なってきたInドーブCdTe素子と新規GdドーブCdTe素子の γ 線検出能力の比較することで、Gdドーブ素子の γ 線検出能力を評価した。

(3) 中性子検出能力の評価

GdドーブCdTe素子により、中性子線源(Cf-252)の測定を行い、作製した素子の中性子検出特性を評価した。

中性子コンバータをドーピングする効果を明らかにするため、従来の中性子コンバータと検出器の層構造を持つGd箔をCdTeに貼りつけた素子との比較を行なった。

4. 研究成果

(1) 素子作製

p型CdTe基板上(0.5mm厚)に成膜したGd薄膜(50nm)をレーザドーピングし、素子を作製した。KrFエキシマレーザの照射条件は、 $90\text{mJ}/\text{cm}^2 \sim 180\text{mJ}/\text{cm}^2$ で行なった。

図1はレーザ照射条件が $180\text{mJ}/\text{cm}^2$ で作製した素子のI-V曲線である。他の照射条件で作製した素子においても同様な結果が得られた。作製した素子は整流性を示しており、ドーピングされたGdがn型ドーパントとして働き、接合を形成したと考えられる。

また、作製した素子は、逆バイアス200V印加時においても電圧の降伏は見られなかった。200Vの逆バイアスを印加した場合、素子全体に空乏層が広がるのが計算からわかっており、GdドーブCdTeは素子全体を検出器として利用できることが示された。

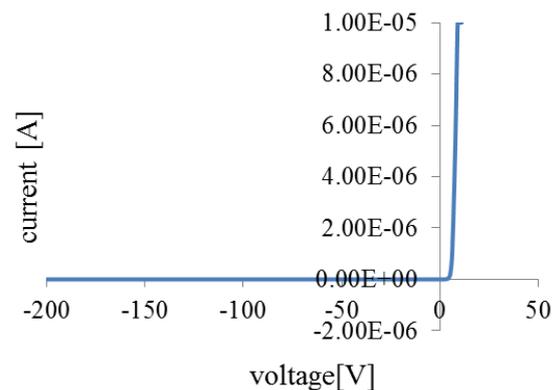


図1 GdドーブCdTe素子のI-V曲線

(2) γ 線検出

作製したGdドーブCdTe素子の γ 線検出能力を評価するため、これまでのInドーブCdTe素子との比較を行なった。図2はそれぞれの素子で γ 線源Am-241とBa-133の測定を行った結果である。両素子とも、レーザ照射条件を $120\text{mJ}/\text{cm}^2$ でドーピングを行なったものを

用いた。両素子から、同じようなスペクトルが得られ、Gd ドープ素子が In ドープ素子と同様に、 γ 線検出能力を有することが示された。

一方で、今回作製した Gd ドープ素子では、In ドープ素子に比べてエネルギー分解能にあたるピークの半値幅が広がっていた。これは、In ドープ素子がこれまでの研究で最適なドーピング条件で作製しているのに対して、Gd ドープ素子では十分な最適化が行われていないためであると考えられる。

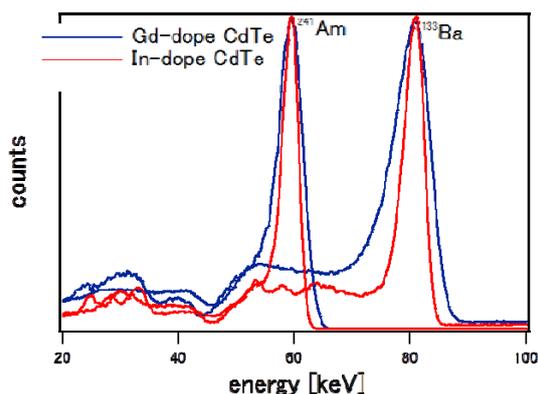


図 2 各素子で測定した ^{241}Am 及び ^{133}Ba のエネルギースペクトル

(3) 中性子検出

作製した Gd ドープ素子の熱中性子検出能力の評価は、中性子源 Cf-252 の測定により行なった。中性子コンバータのドーピングによる素子内部への導入が熱中性子検出にどのような影響を及ぼすかを調べるため、コンバータ層を素子上部に貼り付けた素子との比較を行なった。二つの素子の測定結果を図 3 に示す。

Gd を貼り付けた素子からは、Gd が中性子捕獲をした際に放出する即発 γ 線 (80keV、89keV、182keV) 及び Gd 内部で発生した特性 X 線 (42keV) に対応するピークが見られた。一方で Gd ドーピング素子では、Gd が中性子を捕獲した際に放出する内部転換電子のピーク (71keV) と母材である CdTe に含まれる ^{113}Cd の即発 γ 線 (95keV) が測定され、貼り付け素子で見られた Gd の即発 γ 線や特性 X 線は観察されなかった。

これらの観測されたピークの違いは、ドーピングの効果を示していると考えられる。Gd からは中性子捕獲時に内部転換電子または即発 γ 線が放出されるが、その割合は内部転換電子のほうが多い (~90%)。しかし、貼り付け型素子では、即発 γ 線は検出されているが、内部転換電子のピークは見られない。これは貼り付け型素子は厚さ $25\mu\text{m}$ の Gd 箔を用いており、熱中性子の捕獲によって放出さ

れた Gd の内部転換電子は厚みのある Gd 箔内部で再吸収されて特性 X 線となって放出されるためと考えられる。これに対して Gd ドープ素子ではコンバータが素子内部に導入されていることから、中性子捕獲によって放出された内部転換電子をそのまま検出でき、少量の Gd でも内部導入することにより、内部転換電子を検出して熱中性子検出器として利用できることが示された。

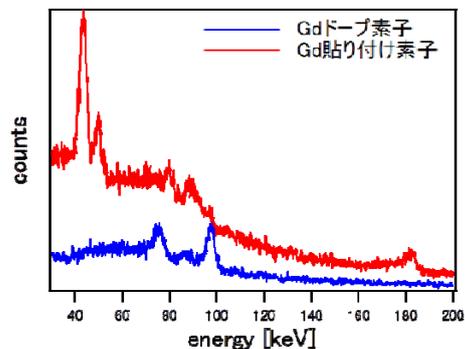


図 3 各素子で測定した ^{252}Cf のエネルギースペクトル

中性子コンバータの内部導入により、二次放射線を効率よく検出できることが今回の研究から示された。今後、より高濃度ドーピング、もしくは母材全体へのドーピングを行うことにより、より高い検出感度を達成することができると期待できる。

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 3 件)

(1) Aki Miyake, Takahiro Nishioka, Shailendra Singh, Hisashi Morii, Hidenori Mimura, Toru Aoki, Development of a CdTe thermal neutron detector for neutron imaging, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 査読有, 677, 2012, 41-44

DOI: 10.1016/j.nima.2012.02.031

(2) Aki Miyake, Takahiro Nishioka, Shailendra Singh, Hisashi Morii, Hidenori Mimura, Toru Aoki, A CdTe detector with a Gd converter for thermal neutron detection, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 査読有, 654, 2011, 390-393

DOI: 10.1016/j.nima.2011.06.083

(3) Takahiro Nishioka, Aki Miyake, Shailendra Singh, Hisashi Morii, Hidenori Mimura, Toru Aoki, Thermal Neutron Detection by CdTe Detector, Advanced Materials Research, 査読有, 222, 2011, 246-249

DOI:

10.4028/www.scientific.net/AMR.222.146

〔学会発表〕(計5件)

渥美勝浩, 小杉尚史, 三宅亜紀, 三村秀典, 井上 翼, 青木徹, 中野貴之, 中性子検出半導体に向けた BGaN 結晶の作製と検出特性の評価, 第 60 回応用物理学関係連合講演会 (2013 年 3 月 29 日)

三宅亜紀, 三村秀典, 青木 徹, スタック型 Gd/CdTe を用いた即発 γ 線同時計測による熱中性子検出, 第 73 回応用物理学学会学術講演会 (2012 年 9 月 12 日)

金子 寿, 西岡孝浩, 渥美勝浩, 三宅亜紀, 青木徹, 中野貴之, BGaN を用いた中性子半導体検出器の開発, 第 59 回応用物理学学会関係連合講演会 (2012 年 3 月 17 日)

西岡孝浩, 金子寿, 三宅亜紀, シン シャイレンドラ, 森井久志, 中野孝之, 根尾陽一郎, 三村秀典, 青木徹, GaGdN 半導体を用いた中性子検出器 II, 第 72 回応用物理学学会学術講演会 (2011 年 8 月 31 日)

三宅亜紀, 西岡孝浩, 森井久志, 三村秀典, 青木徹, Gd コンバータを用いた CdTe 半導体検出器による熱中性子検出, Gd コンバータを用いた CdTe 半導体検出器による熱中性子検出, 第 48 回 アイソトープ・放射線 研究発表会 (2011 年 7 月 6 日)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三宅亜紀 (MIYAKE AKI)

静岡大学・工学部・学術研究員

研究者番号: 60441606

(2) 研究分担者

なし ()

研究者番号:

(3) 連携研究者

なし ()

研究者番号: