

機関番号：13903

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20310095

研究課題名（和文） 半導体放射線検出器の高性能化に関する研究

研究課題名（英文） Investigating ways to improve the performance of semiconductor nuclear radiation detectors

研究代表者

ニラウラ マダン (Niraula Madan)

名古屋工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20345945

研究成果の概要（和文）：有機金属気相成長法により Si 基板上の厚膜単結晶 CdTe 成長層を用いて作製した、エネルギー識別能力を持つ、放射線検出器の高性能化を目的とし、検出器動作時における暗電流の低減と成長層高品質化に関する検討を行った。成長条件の最適化と成長層アニールにより、成長層内に存在する結晶欠陥の不活性化による暗電流を低減できる成長条件及びアニール条件を確立した。これに伴い、作製した検出器の性能の向上を確認した。

研究成果の概要（英文）： Investigations were performed to improve the performance of semiconductor nuclear radiation detectors that possess energy discrimination capability. These heterojunction diode type detectors are based on epitaxially grown thick CdTe layers on Si substrates. Efforts were made to improve the CdTe crystal quality and decrease the detector dark current noise by optimizing crystal growth parameters and annealing the grown crystals. We found the best conditions for the crystal growth and the annealing, which help to deactivate the crystal defects, and reduce the detector dark current. As a result, improvement of the detector performance was confirmed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	9,200,000	2,760,000	11,960,000
2009 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	11,900,000	3,570,000	15,470,000

研究分野：半導体デバイス工学、放射線検出器、半導体結晶成長

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システム

キーワード：安全・セキュリティ、放射線検出器、テルル化カドミウム、ヘテロ接合ダイオード、エネルギー識別、アニール効果

1. 研究開始当初の背景

X線γ線画像検出器は医療分野を始め産業、保安など幅広い分野で利用されている。近年では室温動作可能で高感度かつ高エネルギー分可能を持つ検出器の開発が急速に

進められており、既に CdTe を用いた画像検出器の開発が行われている。従来の結晶成長法で育成したバルク CdTe 高抵抗単結晶を用いた単一素子、やこれらを数十個並べた小規模のアレイ型検出器が既に実用化されてお

り、優れた検出特性をもつことが確認されている。しかしながらバルク CdTe 結晶は均一かつ良好な電気特性を持つ結晶の成長が極めて困難なため、バルク結晶を用いて大規模なアレイ型検出器を製作することは困難である。

一方、有機金属気相成長法では Si などの大面積基板上に単結晶の厚膜 CdTe 層の成長が可能のため、成長層の大面積が可能である。また、成長層の電気特性や成長層厚さの精密制御が可能であるため、エネルギー識別能力を持つ、高性能大面積検出器アレイ作製が可能となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は有機金属気相成長法 (MOVPE 法) により Si 基板上の厚膜単結晶 CdTe 成長層を用いて作製した、エネルギー識別能力を持つ、放射線検出器の高性能化及び画像検出器アレイ作製を目指すものである。ここでは p-CdTe/n-CdTe/n⁺-Si ヘテロ接合ダイオード型検出器について、逆バイアス印加時の暗電流の低減を図ると共に、高い電圧を印加することでキャリア輸送特性の改善により検出器性能の向上を目指す。

3. 研究の方法

MOVPE 法より Si 基板上に直接成長した CdTe 厚膜単結晶成長層を用いた p-CdTe/n-CdTe/n⁺-Si ヘテロ接合ダイオード型検出器の性能の向上、また、上記構造を持つ高性能大面積の 2 次元アレイ型画像検出器の作製に関して以下の検討を行った。

- (1) 電子ビーム蒸着による CdTe 用電極材料形成技術の検討
- (2) 検出器の暗電流低減を目的とした CdTe 成長層の熱アニール条件の検討
- (3) 成長層の高品質化、均一化及び検出器作製プロセス改善の検討
- (4) 検出器アレイの作製及びアレイの実装技術に関する検討

4. 研究成果

p-CdTe/n-CdTe/n⁺-Si ヘテロ接合ダイオード型検出器の高性能化及び画像検出器アレイ作製に関して以下の結果が得られた。

(1) 一般的に CdTe 検出器用電極材料としてはインジウム、アルミニウム又は金が用いられているが、これらの金属は CdTe 結晶内に拡散しやすく、検出器の検出特性劣化の原因となる。検出特性の劣化を防ぎ、信頼性の向上を図るためには、拡散を防止できる電極材料と電極の作製技術の開発が必要である。本検討では電子ビーム蒸着により金、白金、チタン、などの金属材料の蒸着条件及びこれらの材料を用いた単層や多層膜電極の形成

条件を確立した。

(2) Si 基板と CdTe 成長層の間に大きな格子定数差や熱膨張係数差があるため接合界面や成長層中には高密度の転位や結晶歪みが存在する。これらの転位は検出器動作時の暗電流を増加させ、検出器特性を劣化させる。これらを防止するためには接合界面や成長層の転位密度の低減と共に、n-CdTe 層を高電子密度化し、検出器動作時における n-CdTe 層中への空乏層の広がり防止が必要である。転位密度の低減に関しては、① n-CdTe 層のアニールの検討を行った。また、② n-CdTe 層の成長条件の検討を行い、高電子密度化を図った。

① n-CdTe 層のアニールに関しては、n-CdTe 層成長時に成長を中断し、バルク CdTe 結晶で成長層を被覆して、800~900°C の高温で数分の熱処理を行った。その結果、n-CdTe 成長層の結晶性及び電気特性改善が見られた。また、本条件でアニール処理後、厚膜 p-CdTe 層を成長行い作製したダイオード型検出器ではアニール処理を行っていない検出器に比べて暗電流の低減と検出特性改善を確認できた。

② n-CdTe 成長層の高電子密度化に関しては、n-CdTe の成長温度を 325°C と低温化し、さらに Te 及び Cd 原料供給比を Cd 過剰状態 (Te/Cd=0.10) として成長を行うことによって 10^{17}cm^{-3} 以上の高電子密度の n-CdTe 層が成長できることを確認できた。

(3) これまで Si 基板上の CdTe 成長層では成長層の高品質化、また、成長面内での電気特性の均一化により検出器特性再現性の向上の課題があった。これは主として CdTe 成長に先だてて実施する Si 基板の成長前処理における基板面内での処理条件の変動や不均一が発生によって生じる。この問題を解決のために、前処理装置の温度プログラムの最適化により前処理時の基板面内の温度分布の均一性や安定性の改善、さらに使用するガス類の高純度化に伴い処理環境の改善を図ることによって高品質、かつ均一な電気特性を持つ成長層を実現できた。

一方、検出器作製プロセスに関する検討としては過酸化水素による表面処理を行い検出器表面保護、また、それに伴い検出器の表面漏れ電流の低減を確認した。

(4) 上記の結果を基に高性能放射線検出器の作製が可能であることが分かる。しかし本方法で作製した検出器は画像検出器としての応用するためにはアレイ型検出器作製方法及びアレイの各素子を信号読出回路へ接続する技術に関する検討が必要である。そのため

、CdTe成長層をウェーハダイサーを用いてX-Y方向に素子分離用の溝を形成し、2次元アレイ製検出器の試作を行った。さらに、画像検出器の実現に向けて、ディスプレイ及び高性能多機能4軸ステージコントローラを用いて検出器素子と信号読出回路を接合する技術の検討を行った。その結果、検出器素子の表面が適切に保護できると共に高集積した素子でも対応できる接合条件を確立した。

以上の結果は本研究で提案した方法によりエピタキシャル成長層を用いた CdTe 系半導体放射線画像検出器の作製及び検出特性の高性能化の実現は可能であることを示す。

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 8 件)

- ① K. Yasuda, M. Niraula, and Y. Agata, “Development of radiation imaging devices with energy discrimination capability using thick CdTe layers grown on Si substrates by metalorganic vapor phase epitaxy”, SPIE Proceedings, 審査有, vol. 7995, 2011, 79952T1-79952T6.
- ② 安田 和人, ニラウラ マダン, 他 7 名, 2 番目, “CdTe 厚膜の MOVPE 成長と放射線検出器への応用特性”, 放射線, 審査有, vol. 36, no. 2, 2010, 41-48.
- ③ K. Yasuda, M. Niraula, 他 7 名, 2 番目, “Electrical Properties of Halogen-Doped CdTe Layers on Si Substrates Grown by Metalorganic Vapor-Phase Epitaxy”, J. Electron. Materials, 審査有, vol. 39, no. 7, 2010, 1118-1123.
- ④ 後藤達彦, ニラウラ マダン, 安田和人, 他 8 名, 10 番目, “MOVPE 法による大面積 CdTe X 線・ γ 線画像検出器に関する研究—Si 基板上の厚膜 CdTe 層高品質化の検討”, 電気情報通信学会 信学技報, 審査無, ED2010-29, CPM2010-19, SDM2010-29, 2010, 65-68.
- ⑤ M. Niraula, K. Yasuda, 他 11 名, 1 番目, “Electrical Properties of Iodine-Doped CdTe Epitaxial Films on Si Substrates Grown by MOVPE”, IEEE Trans. Nucl. Sci., 審査有, vol. 56, no. 4, 2009, 1731-1735.
- ⑥ M. Niraula, K. Yasuda, 他 11 名, 1 番目, “MOVPE Growth of CdTe on Si Substrates for Gamma Ray Detector Fabrication”, IEEE Trans. Nucl. Sci., 審査有, vol. 56, no. 3, 2009, 836-840.
- ⑦ M. Niraula, K. Yasuda, 他 11 名, 1 番目, “Development of X-ray, Gamma Ray Spectroscopic Detector Using Epitaxially Grown Single Crystal Thick CdTe Films”,

Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 審査有, vol. 1164, 2009, 1164-L05-01.

- ⑧ M. Niraula, K. Yasuda, 他 11 名, 1 番目, “Electrical Properties of Halogen-Doped CdTe Epitaxial Films on Si Substrates Grown by MOVPE”, IEEE2008 Intl. Workshop on Room-Temp. Semicond. X-, Gamma-Ray Detectors, 審査無, 2008, R07-2.

[学会発表] (計 13 件)

- ① 館忠裕, 他, “MOVPE 法による大面積 CdTe X 線・ γ 線画像検出器に関する研究 (X) ~アレイ型検出器の暗電流低減及び高性能化への検討(I)~”, 2011 年春季第 5 8 回応用物理学関係連合講演会, 2011 年 3 月 27 日, 神奈川工科大学.
- ② 藤村直也, 他, “MOVPE 法による大面積 CdTe X 線・ γ 線画像検出器に関する研究 (X) ~アレイ型検出器の暗電流低減及び高性能化への検討(II)~”, 2011 年春季第 5 8 回応用物理学関係連合講演会, 2011 年 3 月 27 日, 神奈川工科大学.
- ③ K. Yasuda, M. Niraula, and Y. Agata, “Development of radiation imaging devices with energy discrimination capability using thick CdTe layers grown on Si substrates by metalorganic vapor phase epitaxy”, 7th International Conference on Thin Film Physics and Applications, 2010 年 9 月 26 日, Tongi University, Shanghai, China. (招待講演)
- ④ K. Yasuda, M. Niraula, and Y. Agata, “Hetero-epitaxial Growth and Doping Properties of CdTe Layers by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy”, The 2010 International Symposium on Optoelectronic Materials and Devices, 2010 年 7 月 12 日, Chicago, USA. (招待講演)
- ⑤ 小川 博久, 他, “MOVPE 法による大面積 CdTe x 線・ γ 線画像検出器に関する研究 (VII)、Si 基板上の厚膜 CdTe 層高品質化の検討”, 2010 年春季第 5 7 回応用物理学関係連合講演会, 2010 年 3 月 19 日, 東海大学.
- ⑥ K. Yasuda, M. Niraula 他, “Electrical properties of halogen-doped CdTe layers on Si substrates grown by metalorganic vapor phase epitaxy”, The 2009 US Workshop on the Physics and Chemistry of II-VI Materials, 2009 年 10 月 6 日, Chicago, USA.
- ⑦ 安田 和人, 他, “CdTe 厚膜の MOVPE 成長と放射線検出器への応用特性”, 2009 年第 70 回応用物理学学会学術講演会、シンポジウム「室温動作半導体放射線検出器の最新動向」, 2009 年 9 月 9 日, 富山大学. (招待講演)
- ⑧ M. Niraula, 他, “Development of X-ray,

Gamma Ray Spectroscopic Detector Using Epitaxially Grown Single Crystal Thick CdTe Films”, Mater. Res. Soc. Symp. (Spring Meeting), 2009年4月15日, San Francisco, USA. (招待講演)

⑨ 松本 和也, “MOVPE 法による大面積 CdTe x 線・γ線画像検出器に関する研究 (VII)”, 第56回応用物理学関係連合講演会, 2009年3月30日, 筑波大学.

⑩ M. Niraula, 他, “Electrical Properties of Halogen-Doped CdTe Epitaxial Films on Si Substrates Grown by MOVPE”, IEEE 2008-16th Intern Workshop on Room-Temp Semiconductor X-and Gamma-Ray Detectors, 2008年10月22日, Dresden, Germany. (招待講演)

⑪ 仲島 甫, 他, “MOVPE 法による大面積 CdTe x 線・γ線画像検出器に関する研究 (VI)、p-CdTe 層 PL 特性とエネルギー分解能の関係 (I)”, 第69回応用物理学学会学術講演会, 2008年9月3日, 中部大学.

⑫ 岡 寛樹, 他, “MOVPE 法による大面積 CdTe x 線・γ線画像検出器に関する研究 (VI)、p-CdTe 層 PL 特性とエネルギー分解能の関係 (II)”, 第69回応用物理学学会学術講演会, 2008年9月3日, 中部大学.

⑬ M. Niraula, 他, “MOVPE Growth of CdTe on Si Substrates for Gamma Ray Detector Fabrication”, 2008 Symposium on Radiation Measurements and Applications (SORMA WEST 2008), 2008年6月2日, Berkeley, USA.

[その他]

ホームページ等:

<http://yasuda.web.nitech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

ニラウラ マダン (Niraula Madan)

名古屋工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 20345945

(2) 研究分担者

安田 和人 (Yasuda Kazuhito)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号: 60182333

(3) 連携研究者

()

研究者番号: