

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 4月23日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2012

課題番号：22240062

研究課題名（和文）高性能大面積X線エネルギー識別画像検出器の開発

研究課題名（英文）Development of high performance large-area X-ray imaging detectors with energy discrimination capabilities

研究代表者

安田 和人（YASUDA KAZUHI TO）

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：60182333

研究成果の概要（和文）：有機金属気相成長法によりSi基板上に成長した単結晶CdTe厚膜層を用いて製作した、p-like CdTe/n-CdTe/n⁺-Si構造のヘテロ接合型ダイオード構造の放射線検出器の検出性能の高性能化を検討した。さらにその検出器を8×8に2次元配列したアレイ型画像検出器を製作し、その検出器アレイよって入射X線の光子エネルギー識別画像を検出できることを確認した。さらに検出器アレイの検出性能向上と高集積大面積化を検討し、24.5×24.5mm²の大面積CdTe層を用いた20×20の高集積2次元検出器アレイを実現した。

研究成果の概要（英文）：Improvement of performance of p-like CdTe/n-CdTe/n⁺-Si heterojunction diode type radiation detectors has been studied. The diode type detectors were fabricated with CdTe layers grown on Si substrates by metalorganic vapor phase epitaxy. 8x8 2-dimensional imaging detector arrays were also fabricated by integrating the diode type detectors. Energy discriminated X-ray images were obtained with these arrays. 2-dimensional detector arrays with large substrates size of 24.5x24.5 mm² and high integration density of 20x20 were also realized.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	24,200,000	7,260,000	31,460,000
2011年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2012年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
総計	31,600,000	9,480,000	41,080,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・医用システム

キーワード：検査・診断システム

1. 研究開始当初の背景

医療用X線撮影装置では装置の小型化、デジタル画像処理による診断精度と診断速度の向上を目的として、フラットパネル型固体画像検出器の開発が急速に進められており、既にa-Se光導電体を用いた画像検出器は実用段階に達し、またa-Seよりも光電変換効率が高いため高感度化が期待できる多結晶の

CdTeやCdZnTeを用いた画像検出器の開発も活発に行われている。

しかしながら、それら従来の検出器によるX線透視画像は、エネルギー識別能力を有しないため、X線が対象物を透過した後のX線の影絵（白黒画像／主に形状の情報）を観察しているに過ぎず、対象物の材質や密度等の相違（物質情報）を反映した詳細な情報を得て

はない。

一方、X線が対象物を透過する際、X線フォトンが吸収・散乱される割合は、透過する物質の元素およびその密度と、X線フォトンのエネルギーに依存する。従って、対象物質を透過したX線フォトンのエネルギーを高精度に識別できる画像検出器を開発した場合、透過フォトンのエネルギーごとの吸収、散乱特性を評価することが可能となり、透過した対象物質の材質（元素）や状態（密度）を区別し、さらにその分布状態に関する詳細な知見を得ることが可能となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、画素ごとに入射X線フォトンのエネルギーを識別（X線エネルギー識別）できる能力を有し、検出したX線フォトンの各エネルギーにおける吸収・散乱強度の変化をもとに、対象物の材質や状態に関する情報に換算し、それらの相違を画像化して表示することが可能な2次元アレイ型X線画像検出器を開発することである。更にその検出器の大面積高集積化と高性能化を図ることである。

3. 研究の方法

有機金属気相成長法により、シリコン基板上に成長したCdTe単結晶厚膜層を用いて、入射X線に対するエネルギー識別能力をもつ超高感度大面積の2次元アレイ型放射線画像検出器を実現する。すでに開発したp-like CdTe厚膜層/n-CdTeパッファ層/n⁺-Si基板の構造をもつダイオード型検出器の高性能化（高感度化、低暗電流化）を達成すると共に、この検出器を8×8に配列した2次元アレイ型画像検出器を製作し、そのエネルギー識別画像の検出特性向上を検討する。この検討を通じてさらに大規模な2次元アレイ型画像検出器を実現するための課題とその解決法を検討し、製作技術の開発を行う。またこれまで培った成長技術や検出器製作技術を基に、検出器超高感度化と低雑音化が期待できるCdTeダイオード検出器（CdTe-APD）開発を目指した基礎検討を行う。

4. 研究成果

本研究の研究成果は、

- ① 有機金属気相成長法によりSi基板上に成長した単結晶CdTe厚膜層を用いた、p-like CdTe/n-CdTe/n⁺-Si構造のヘテロ接合型ダイオード検出器の高性能化の検討、
- ② その検出器を8×8に配列した2次元アレイ型画像検出器の製作とその検出特性評価および検出性能の向上に関する検討、
- ③ それらの検討を基礎とした、高集積大面積の2次元検出器アレイの実現に関する検討、

に大別できる。以下ではそれらの概要について述べる。

①有機金属気相成長法によりSi基板上に成長した単結晶CdTe厚膜層を用いた、p-like CdTe/n-CdTe/n⁺-Si構造のヘテロ接合型ダイオード検出器について、検出器の製作技術の改善と検出性の向上を検討した。

検出性能の向上には動作時における検出器暗電流の低減が最大の課題であり、Si基板とCdTe層との格子不整合に起因するn-CdTe層中の転位密度の低減が必要である。そこでn-CdTe層成長後に実施するn-CdTe層のアニール方法とその条件を検討し、最適なアニール条件を見出した。その結果、従来と比較して大幅な暗電流の低減を達成した。またそのアニールにより、成長層の結晶性向上と成長層の基板からの剥離の防止できることも確認した。以上の検討により、CdTe/Si成長層高品質化と大面積化を達成した結果、この成長層を用いた大面積検出器アレイの実現が可能となった。

また、これまで開発を行ってきたn⁺-Si基板上の検出器の検出性能をしのぐ新規の検出器実現を目的として、p⁺-Si基板上に成長したCdTe層を用いた、n-CdTe/p-like CdTe/p⁺-Si構造の検出器の試作とその特性評価も実施した。試作した検出器ではまだ検出性能の改善の余地はあるが、入射γ線のエネルギー識別が可能であることが確認できた。また、この結果は本研究による検出器製作方法では、検出器の設計や製作の自由度を大幅に拡大できることを示しており、今後は従来性能を大幅にしのぐ超高性能の検出器の実現も期待できる。

②p-like CdTe/n-CdTe/n⁺-Si構造のヘテロ接合型ダイオード検出器について、この検出器を8×8に配列した2次元アレイ型画像検出器の製作とその特性評価および検出性能の向上を検討した。検出器アレイは、p-like CdTe/n-CdTe/n⁺-Si構造の成長層をダイシングにより、CdTe層表面からSi基板の途中までXとY方向にトレンチを形成することによって素子分離し、2次元の検出器アレイを製作した。アレイ製作技術として、CdTe成長層のSi基板からの剥離や、検出器電気特性の劣化を防止できるダイシング技術を開発し確立した。さらに製作したアレイと、信号取り出し回路及び検出特性評価用セラミックパッケージとの実装技術も確立した。これら開発した技術を用いて8x8の検出器アレイを試作しその電気特性評価を実施した。図-1に開発した8x8の2次元アレイ型検出器を示す。

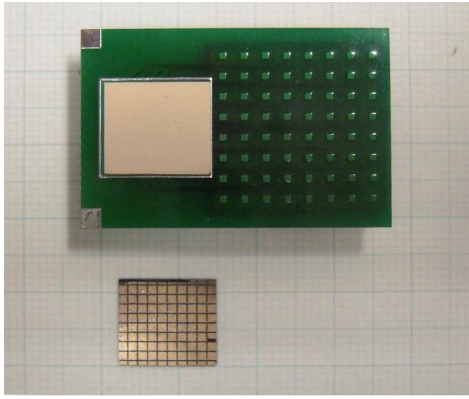


図-1 8x8 2次元アレイ型検出器。
アレイは測定用基板上に裏返しにセットしている。アレイは内部8x8の部分を検出部として使用した。

製作した2次元アレイ型検出器を用いて、PbとAl板を透過するX線スペクトルのX線管の管電圧依存性を測定した結果、この検出器アレイは入射X線の光子エネルギー識別画像が検出可能であることが確認できた。

また検出特性のさらなる高性能化を目的として、検出器暗電流の発生原因の解明とその低減を検討した。製作したアレイ上の個別検出素子の暗電流値の2次元分布を詳細に検討した結果、暗電流は活性化エネルギー約0.6eVの深い準位の密度に依存すること。またこの密度は、p-like CdTe 層成長時における、成長表面での原料TeとCdの比率に依存することを明らかにした。この結果から、アレイ上の検出素子暗電流を低減すると共に、暗電流特性の均一性を確保するためには、成長表面におけるTe/Cd比率の精密制御と均一化が必要であることがわかった。上記の知見を基に、p-like CdTe 層成長時における成長表面における原料TeとCdの比率分布を最適化した結果、暗電流分布の均一化と低減化を達成可能な、CdTe層成長条件を確立した。さらにその成長層を用いて検出器アレイを製作し、その検出器アレイの暗電流分布を評価した結果、均一かつ低い暗電流分布が実現できることを確認できた。

③ 以上の成果を踏まえて、Si基板サイズを従来の11.7x18mm²から24.5x24.5mm²に大面積化し、成長層を従来のほぼ4倍に大面積化できる成長条件を確立した。さらにその成長層を用いて20x20及び17x17の高集積2次元アレイ型画像検出器の製作を行い、その暗電流分布を評価した結果、暗電流分布は均一であることが確認できた。図-2に製作した17x17 2次元画像検出器アレイを示す。

以上、本研究で得た研究成果は、開発した検出器製作技術によって、さらに高集積大面

積の高性能2次元アレイ型X線画像検出器の実現が期待できることを示している。

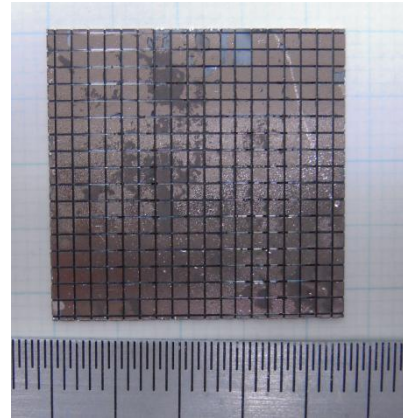


図-2 17x17 2次元画像検出器アレイ。
Si基板サイズは25.4x25.4mm²であるが、検出特性評価のため周辺部を除去している。

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10件)

- ① 後藤達彦、安田和人、ニラウラマダン、MOVPE法による大面積CdTeX線・γ線画像検出器に関する研究、電子情報通信学会技報、査読無、ED2010-29、2010、65-68
- ② K. Yasuda, M. Ni raul a, H. Oka, Electrical properties of halogen-doped CdTe layers on Si substrates grown by metal organic vapor phase epi taxy, J. Electron. Mater. 査読有、39(7)、2010、1118-1123、DOI: 10.1007/s11664-010-1241-1
- ③ 安田和人、ニラウラマダン、岡 寛樹、CdTe厚膜のMOVPE成長と放射線検出器への応用特性、放射線、査読有、36(2)、2010、41-48、(Invited)
- ④ 舘 忠裕、安田和人、ニラウラマダン、MOVPE法によるSi基板上的CdTe厚膜層を用いた放射線検出アレイの開発、電子情報通信学会技報、査読無、ED2011-26、2011、131-134
- ⑤ K. Yasuda, M. Ni raul a, Y. Agata, Development of radiation imaging devices with energy discrimination capability using thick CdTe layers grown on Si substrates by metal organic vapor phase epi taxy, Proc. SPIE, 査読有、7995、2011、79952T-1-79952T-6 (Invited)、DOI:10.1117/12.888229

- ⑥ K. Yasuda, M. Ni raula, T. Tachi, Fabrication of radiation imaging detector arrays using MOVPE grown thick single crystal CdTe layers on Si substrates, Phys. Status. Solidi、査読有、C9(8-9)、2012、1848-1851、DOI: 10.1002/pssc.201100517
- ⑦ K. Yasuda, M. Ni raula, N. Fujimura, Dark-current characteristics of radiation detector arrays developed using MOVPE grown thick CdTe layers on Si substrates, J. Electron. Mater. 査読有、41(10)、2012、2754-2758、DOI 10.1007/s11664-012-2121-7
- ⑧ 安田和人、ニラウラマダン、放射線エネルギーを識別可能な画像検出器の開発、光アイアランス、査読無、23(6)、2012、33-36、(依頼原稿)
- ⑨ M. Ni raula, K. Yasuda, N. Fujimura, Development of Spectroscopic Imaging Arrays Using Epitaxially Grown Thick Single Crystal CdTe Layers on Si Substrate, 査読有、IEEE Trans. Nucl. Sci. 59(6)、2012、3201-3204、(Invited) DOI: 10.1109/TNS.2012.2215628
- ⑩ M. Ni raula, K. Yasuda, S. Namba, Fabrication and characterization of X-ray spectroscopic imaging array based on thick single crystal CdTe epitaxial layers, IEEE Trans. Electron Devices、査読有、59(12)、2012、3450-3455、DOI: 10.1109/TED.2012.2222413

[学会発表] (計 15 件)

- ① K. Yasuda, M. Ni raula, Y. Agata、Development of radiation imaging devices with energy discrimination capability using thick CdTe layers grown on Si substrates by metal organic vapor phase epitaxy, 7th International Conference on Thin Film Physics and Application, (Tongji Univ., Shanghai, China)、(Sep. 24-27) Invited
- ② 藤村直也、ニラウラマダン、安田和人、MOVPE 法による大面積 CdTeX 線・ γ 線画像検出器に関する研究 (IX), 2011 春期応用物理学関係連合講演会 (神奈川工科大学) 2011/3/27
- ③ 館 忠裕、ニラウラマダン、安田和人、MOVPE 法による大面積 CdTeX 線・ γ 線画像検出器に関する研究 (X), 2011 春期応用物理学関係連合講演会 (神奈川工科大学) 2011/3/27
- ④ K. Yasuda, M. Ni raula, Dark-current characteristics of radiation detector arrays developed using MOVPE grown thick CdTe layers on Si substrates, 2011 US Workshop on the Phys. Chem. II-VI Materials (2011, Chicago), (Oct. 4-6)
- ⑤ M. Ni raula, K. Yasuda, N. Fujimura, Development of Spectroscopic Imaging Arrays Using Epitaxially Grown Thick Single Crystal CdTe Layers on Si Substrate, 18th International Workshop on the Room Temperature Semiconductor Detectors (RTSD) (2011, Valencia, Spain), (Oct. 23-29), Invited
- ⑥ 難波秀平、ニラウラマダン、安田和人、MOVPE 法による大面積 CdTeX 線・ γ 線画像検出器に関する研究 (XI) ~検出器アレイの暗電流特性(I)~, 2012 春期第 59 回応用物理学関係連合講演会 (早稲田大学) 2012/3/18
- ⑦ 館 忠裕、ニラウラマダン、安田和人、MOVPE 法による大面積 CdTeX 線・ γ 線画像検出器に関する研究 (XI) ~検出器アレイの暗電流特性(II)~, 2012 春期第 59 回応用物理学関係連合講演会 (早稲田大学) 2012/3/18
- ⑧ 村松慎也、ニラウラマダン、安田和人、MOVPE 法による CdTe/Si 厚膜層を用いたエネルギー識別能力をもつ X 線・ γ 線画像検出器の開発 (II), 2012 春期第 59 回応用物理学関係連合講演会 (早稲田大学) 2012/3/17
- ⑨ 近藤嵩輝、ニラウラマダン、安田和人、MOVPE 法による CdTe/Si 厚膜層を用いたエネルギー識別能力をもつ X 線・ γ 線画像検出器の開発 (I), 2012 春期第 59 回応用物理学関係連合講演会 (早稲田大学) 2012/3/17
- ⑩ 和嶋悠人、ニラウラマダン、安田和人、CdZnTe 層成長と特性評価, 2012 秋期第 73 回応用物理学学会学術講演会 (愛媛大学) 2012/9/14
- ⑪ M. Ni raula, K. Yasuda, S. Namba, MOVPE growth of thick single crystal CdZnTe epitaxial layers on Si substrate for Nuclear Radiation Detector development, 19th International Workshop on the Room Temperature Semiconductor Detectors (RTSD) (2012, Anaheim CA) (Oct. 29-Nov 2), Invited
- ⑫ K. Yasuda, M. Ni raula, S. Namba, Post-growth annealing of CdTe layers grown on Si substrates by metal organic vapor phase epitaxy, 2012 US Workshop on the Phys. Chem. II-VI Materials (2012, Seattle), (Nov. 27-29)
- ⑬ 山下隼、ニラウラマダン、安田和人、MOVPE 法による大面積 CdTeX 線 γ 線画像検出器に関する研究 (XIII), 2013 春期第

60 回応用物理学関係連合講演会（神奈川工科大学）2013/3/27

- ⑭ 和嶋悠人、ニラウラマダン、安田和人、MOVPE 法による大面積 CdTeX 線γ線画像検出器に関する研究 (XIII)-CdTe/Si 成長層のアニール処理の検討-, 2013 春期第 60 回応用物理学関係連合講演会（神奈川工科大学）2013/3/27
- ⑮ Madan Ni raul, 安田和人, Development of large-area imaging arrays using epitaxially grown thick single crystal CdTe layers on Si substrates, 2013 春期第 60 回応用物理学関係連合講演会（神奈川工科大学）2013/3/30

〔図書〕（計 1 件）

- ① K. Yasuda, A. Burger, M. Fiederle, ed, MRS Symp. Proceedings Nuclear Radiation Detection Materials (2011 MRS Spring Meeting), Vol. 1341, (2012)

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：放射線検出器の製造方法
発明者：安田和人, ニラウラマダン
権利者：名古屋工業大学
種類：特許
番号：特願 2011-109374
出願年月日：2011/5/16
国内外の別：国内

○取得状況（計 1 件）

名称：Method for manufacturing a semiconductor radiation detector
発明者：安田和人, ニラウラマダン
権利者：中部 TLO
種類：特許
番号：:1691422
取得年月日：July 6, 2011
国内外の別：国外
イギリス、ドイツ、フランス、イタリア

〔その他〕

ホームページ等
<http://yasuda.web.nitech.ac.jp/>

新聞報道

中日新聞 2011 年 11 月 4 日 掲載
日刊工業新聞 2011 年 11 月 4 日 掲載
科学新聞 2011 年 11 月 18 日 掲載

6. 研究組織

(1)研究代表者

安田 和人 (Yasuda Kazuhiro)
名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：60182333

(2)研究分担者

ニラウラ マダン (Ni raula Madan)
名古屋工業大学・工学研究科・准教授
研究者番号：20345945

(3)連携研究者

()

研究者番号：