

平成22年 6月 1日現在

研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19200044  
 研究課題名（和文） エネルギー識別能力をもつ医療用大面積X線画像検出器の開発  
 研究課題名（英文） Development of large-area X-ray imaging detectors with energy discrimination capability for medical use.  
 研究代表者  
 安田 和人 （ YASUDA KAZUHITO ）  
 名古屋工業大学・大学院工学研究科・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るSi基板上の単結晶CdTe厚膜層を用いて、入射X線に対するエネルギー識別機能を持つ、アレイ型大面積X線画像検出器を実現することを目的として、p-CdTe高抵抗厚膜層/n-CdTe低抵抗バッファ層/n<sup>+</sup>-Si構造の検出器の高性能化を検討した。ヨウ素を不純物としたp-CdTe高抵抗層とn-CdTe低抵抗層の成長条件を確立した。さらに大面積の高品質CdTe層の成長に不可欠なSi基板の成長前処理技術を確立した。

## 研究成果の概要（英文）：

Large scale X-ray imaging detector arrays with energy discrimination capabilities have been studied using single crystal thick CdTe layers grown on Si substrate by metalorganic vapor phase epitaxy. Structure of the detector was high-resistive thick p-CdTe/n-buffer CdTe/n<sup>+</sup>-Si substrates. Growth and iodine doping conditions for p-CdTe and n-CdTe layers were established. Pretreatment of Si substrates for high quality CdTe growth was also established.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	21,100,000	6,330,000	27,430,000
2008年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2009年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	27,400,000	8,220,000	35,620,000

## 研究分野：半導体工学

科研費の分科・細目：人間医工学・医用システム

キーワード：放射線検出器、カドミウムテルル、ヘテロ接合ダイオード、有機金属気相成長法、エネルギー弁別機能、放射線画画像検出器

## 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、2次元アレイ型（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-S

e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いない。

一方、X線が対象物を透過する際、X線フォトンが吸収・散乱される度合いは、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よって決まる。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新規の高性能大面積のX線画像検出器の開発することである。

## 3. 研究の方法

有機金属気相成長法により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-like CdTe厚膜層/n-CdTeバッファ層/n<sup>+</sup>-Si構造のヘテロ接合型ダイオードX線検出器について、検出性能およびエネルギー分解能の向上を検討した。さらに、上記構造の成長層をX及びY方向にダイシングすることにより、上記の検出器を2次元アレイ化し、画素ごとに入射X線フォトンエネルギーを識別できる能力をもつ、高性能大面積の2次元アレイ型X線画像検出器を開発することを目的として研究を行った。

## 4. 研究成果

p-CdTe厚膜層/n-CdTeバッファ層/n<sup>+</sup>-Si構造のヘテロ接合型ダイオードX線検出器について、(1)検出性能と(2)エネルギー分解能の向上を目的として検討を行った。さらに、(3)高性能大面積の2次元アレイ型X線画像検出器実現を目的とした成長層大面積化と高品質化技術について検討を行い、検出器ア

レイの試作を行った。

その結果、

(1)検出感度向上にはp-like CdTe層を100 $\mu$ m以上に厚膜化しX線吸収効率を増加すると共に、動作時にはこの層全体に電界を印加し、X線により発生したキャリアの取り出し効率を向上する必要がある。実用的バイアス電圧のもとでその条件を満足するためには、p-CdTe層中のイオン化不純物密度( $N_A-N_D$ )を極力低減し、高抵抗化することが必要である。ここではp-CdTe層成長時にn型不純物であるヨウ素の添加を行い、その際に生じる自己補償効果を利用した $N_A-N_D$ の低減について詳細に検討を行った。

その結果、p型層高抵抗化は成長温度510 $^{\circ}$ C以上でTe過剰の成長条件(VI/II比3.0)で、エチルヨウ素添加量を $10^{-6}$ mol/min以上とすることにより達成でき、 $N_A-N_D$ は $10^{13}$ cm $^{-3}$ 以下に低減できることを確認した。

また以上の検討を通じて、CdTe層電気特性のヨウ素添加量依存性からCdTeにおける自己補償機構を明らかにした。

(2)エネルギー分解能の向上には、動作時の暗電流の低減が必要である。そのためにはCdTe層中に存在する転位密度の低減と共に、n-CdTe層を高電子密度化し、この層への空乏層の広がり防止を低減することが必要である。

n-CdTe層の高電子密度化については、n-CdTeの成長温度を325 $^{\circ}$ Cと低温化し、さらにVI/II比を0.15以下に低減することによって電子密度 $10^{17}$ 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。

またn-CdTe層中の転位密度の低減では、n-CdTe層成長時に成長を中断し、この間に成長温度から常温まで数回昇降温を繰り返すアニールを導入することにより達成できることを確認できた。

(3)成長層高品質化と大面積化については以下の検討を実施した。

これまでSi基板上の成長層では基板からの成長層の部分的剥離や、成長面内での結晶性の不均一の発生防止が課題であった。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。

この問題の改善を目的として新規の前処理装置を開発し、成長前処理の精密制御化を実現すると共に、基板面内における前処理の均一性と再現性の向上を図った。その結果基板と成長層の部分的な剥離を防止すると共に、良好かつ均一な結晶性をもつCdTe層を実現した。さらにこの成長層によって検出器アレイを製作し、その特性の評価からも均一かつ良好な特性が得られていることを確認した。

以上の結果は本研究で提案した方法により、最終目的とする高性能大面積X線画像検

出器が実現可能であることを強く示唆している。

#### 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 11 件)

- ① K. Yasuda, M. Niraula, 他 7 名, 1 番目, “Electrical properties of halogen-doped CdTe layers on Si substrates grown by metalorganic vapor phase epitaxy”, J. Electron. Mater. 39 (2010) in-press, 査読有
- ② M. Niraula, K. Yasuda, 他 11 名, 2 番目, ” Development of X-ray, Gamma Ray Spectroscopic Detector Using Epitaxially Grown Single Crystal Thick CdTe Films” Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1164 (2009)35-44, 査読有
- ③ M. Niraula, K. Yasuda, 他 11 名, 2 番目, “MOVPE Growth of CdTe on Si Substrates for Gamma Ray Detector Fabrication” IEEE Trans. Nuclear Science 56(3) (2009) 836-840, 査読有
- ④ M. Niraula, K. Yasuda, 他 11 名, 2 番目, “Electrical Properties of Iodine-Doped CdTe Epitaxial Films on Si Substrates Grown by MOVPE” IEEE Trans. Nuclear Science 56(4) (2009) 1731-1735, 査読有
- ⑤ M. Yokota, K. Yasuda, 他 8 名, 2 番目, “Fabrication and Characterization of MOVPE-Grown CdTe-on-Si Heterojunction Diode-Type Gamma-Ray Detectors” J. Electron. Mater. 37(9) (2008) 1391-1395, 査読有
- ⑥ 渡邊彰伸, 甲斐康寛, 安田和人, 他 7 名, 10 番目, ” MOVPE 法による Si 基板上の CdTe 層へのヨウ素ドーピング特性 (I)” 信学技報, ED2008-17 (2008) 81-84, 査読無
- ⑦ 市橋 果, 山田 航, 安田和人, 他 7 名, 10 番目, ” MOVPE 法による Si 基板上の CdTe 層へのヨウ素ドーピング特性 (II)” 信学技報, ED2008-17 (2008) 85-88, 査読無
- ⑧ M. Niraula, K. Yasuda, 他 9 名, 2 番目, “Characterization of CdTe/n+-Si Heterojunction Diodes for Nuclear Radiation Imaging Detectors” IEEE Trans. Nuclear Science, 54(4) (2007) 817-820, 査読有
- ⑨ K. Yasuda, M. Niraula, 他 7 名, 1 番目, “Excimer Laser Etching Process of CdTe Crystals for Formation of Deep Vertical Trenches” J. Electron. Mater. 36(8) (2007)837-840, 査読有
- ⑩ 大村翔洋, 中村公二, 安田和人, 他 3 名, 6 番目, ” MOVPE 法による厚膜 CdTe 層を用い

た大面積 X 線・線画像検出器に関する研究 (I)” 信学技報, ED2007-10 (2007) 7-10, 査読無

⑪ 箕浦晋平, 大橋寛之, 安田和人, 他 4 名, 7 番目, ” MOVPE 法による厚膜 CdTe 層を用いた大面積 X 線・線画像検出器に関する研究 (II)” 信学技報, ED2007-11 (2007) 11-15, 査読無

[学会発表] (14 件)

- ① 小川博久, 安田和人, 他 12 名, ” MOVPE 法による大面積 CdTeX 線・ $\gamma$  線画像検出器に関する研究 (VIII) ”, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, (2010. 3. 19) 東海大学
- ② K. Yasuda, M. Niraula, 他 6 名, “Electrical properties of halogen-doped CdTe layers on Si substrates grown by metalorganic vapor phase epitaxy” 2009 US Workshop on the Phys. Chem. II-VI Materials (2009, Oct. 6-8, Chicago)
- ③ 安田和人, ニラウラマダン, 他 7 名, “CdTe 厚膜の MOVPE 成長と放射線検出器への応用特性” 第 70 回応用物理学学会学術講演会, シンポジウム 9p-TF-3, (2009. 9. 9), 富山大学(招待講演)
- ④ M. Niraula, K. Yasuda, 他 11 名, “Development of X-ray, Gamma Ray Spectroscopic Detector Using Epitaxially Grown Single Crystal Thick CdTe Films” 2009 MRS Spring Meeting (2009, Apr. 13-17, San Francisco), (Invited)
- ⑤ 松本和也, 安田和人, 他 11 名, ” MOVPE 法による大面積 CdTe x 線・ $\gamma$  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. 3. 30), 筑波大学
- ⑥ 仲島甫, 安田和人, 他 7 名, ” MOVPE 法による大面積 CdTeX 線・ $\gamma$  線画像検出器に関する研究 (V) ” 第 69 回応用物理学学会学術講演会 (2009. 3. 30) 中部大学
- ⑦ 岡寛樹, 安田和人, 他 6 名, ” MOVPE 法による大面積 CdTeX 線・ $\gamma$  線画像検出器に関する研究 (VI) ” 第 69 回応用物理学学会学術講演会 (2009. 3. 30) 中部大学
- ⑧ M. Niraula, K. Yasuda, 他 11 名, “Electrical Properties of Halogen-Doped CdTe Epitaxial Films on Si Substrates Grown by MOVPE” IEEE 2008 16th Intern. Workshop on Room-Temperature Semiconductor X- and gamma-Ray Detectors (RTSD) (2008, Ocy. 19-25, Dresden), (Invited)
- ⑨ M. Niraula, K. Yasuda, 他 11 名, “MOVPE Growth of CdTe on Si Substrates for Gamma Ray Detector Fabrication” 2008 Symposium

on Radfiation Measurement and Applications (SORMA WEST 2008) (2008, Jun. 2-5, Barkeley)

⑩ 山田航, 安田和人, 他 12 名, ” MOVPE 法による大面積 CdTeX 線・γ 線画像検出器に関する研究 (V) ” 第 55 回応用物理学関係連合講演会 (2008. 3. 29) 日本大学理工学部

⑪ 甲斐康寛, 安田和人, 他 12 名, ” MOVPE 法による大面積 CdTeX 線・γ 線画像検出器に関する研究 (VI) ” 第 55 回応用物理学関係連合講演会 (2008. 3. 29) 日本大学理工学部

⑫ M. Yokota, K. Yasuda, 他 9 名, “Fabrication and Characterization of MOVPE-Grown CdTe-on-Si Heterojunction Diode-Type Gamma-Ray Detectors” 2007 US Workshop on the Phys. Chem. II-VI Materials (2007, Oct. 30-Nov. 1, Baltimore)

⑬ 市橋果, 安田和人, 他 12 名, ” MOVPE 法による大面積 CdTe x 線・γ 線画像検出器に関する研究 (IV) ” 第 68 回応用物理学学会学術講演会 (2007. 9. 6) 北海道工業大学

⑭ 渡邊彰伸, 安田和人, 他 12 名, ” MOVPE 法による大面積 CdTe x 線・γ 線画像検出器に関する研究 (III) ” 第 68 回応用物理学学会学術講演会 (2007. 9. 6) 北海道工業大学

○取得状況 (計 3 件)

①名称: 半導体放射線検出器及びその製造方法 (Semiconductor Radiation Detector and Process for Producing the Same)

発明者: 安田和人, ニラウラマダン

権利者: 中部 TLO

種類: 米国特許

番号: 7, 355, 185

出願年月日: Nov. 24. 2004 (PCT)

国内外の別: 国外 (アメリカ合衆国)

②名称: 半導体放射線検出器

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: 日本国特許番号第 4131498 号

出願年月日: 2003 年 11 月 27 日

国内外の別: 国内

③名称: 半導体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: 中部 TLO

種類: 特許

番号: 日本国特許番号第 4107616 号

出願年月日: 2003 年 11 月 27 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等:

<http://www-yasuda.elcom.nitech.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

安田 和人 (YASUDA KAZUHITO)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 60182333

### (2) 研究分担者

ニラウラ マダン (NIRAULA MADAN)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 20345945

### (3) 連携研究者 なし