

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008 年度～2010 年度

課題番号：20244016

研究課題名(和文) 次世代遠中間赤外線検出器の開発

研究課題名(英文) Development of next generation far-infrared detector

研究代表者

和田武彦(WADA TAKEHIKO)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：50312202

研究成果の概要(和文)：

高感度遠中間赤外線検出器であるゲルマニウム BIB 検出器を分子線エピタキシャル結晶成長(MBE)と表面活性化常温接合(SAB)法を用いて開発した。MBE 法により暗電流低減に必要な高純度($5 \times 10^{14}/\text{cc}$)と透明電極に必要な急峻な界面を達成した。また、SAB 法により BIB 構造を形成し、BIB 検出器に特有の I-V 特性、カットオフ波長の増大、そして暗電流の低減を確認した。(Wada et al. 2010, doi:10.1109/ICIMW.2010.5612570; Watanabe et al. 2011, JJAP, 50, 015701; Kaneda et al. 2011, JJAP accepted)

研究成果の概要(英文)：

We have developed germanium BIB detector for future mid- and far-infrared astronomical missions. In order to obtain clear interface between blocking and IR active layers, we have tested two new methods, surface activated bonding (SAB) and molecular beam epitaxial (MBE) crystal growth. We have fabricated a germanium BIB detector with SAB technique bonding a pure wafer (carrier concentration $< 8 \times 10^{12}/\text{cc}$) and a highly doped wafer ($\text{Ga } 10^{16}/\text{cc}$) and found that that device had a typical I-V characteristic for BIB detector, extended cut-off wavelength, and reduction of dark current. We have also achieved a high-purity germanium crystal growth on a high doped wafer with MBE technique that have a carrier concentration low enough for a blocking layer in BIB detector ($5 \times 10^{14}/\text{cc}$).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2009 年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2010 年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
年度			
年度			
総計	19,500,000	5,850,000	25,350,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：赤外線天文学 分子線エピタキシー 表面活性化常温接合 赤外線検出器

1. 研究開始当初の背景

赤外線天文衛星 AKARI や Spitzer による観測で、赤方偏移 $z=1-2$ 付近で大光度赤外線銀河が大発生していたことが明らかとなってきた(Wada et al. 2007, Goto et al. 2010, Popovich et al. 2004). それらのエネルギー

源を明らかにするためには、ダスト吸収の影響の少ない遠中間赤外線で、高感度(輝線感度 10^{-19} W/m^2)の分光観測を行う必要がある。遠中間赤外線で高感度な観測を行うには、大気圏外から大口径の冷却望遠鏡で観測を行う必要がある。その実現のため、次世代赤外線

望遠鏡 SPICA 計画が進められていた。SPICA では高感度な赤外線検出器として TES ボロメーターとゲルマニウム光伝導素子が候補に挙がっていた。TES ボロメーターは極低温(100mK 以下)が必要であり開発が難航していた。ゲルマニウム検出器は比較的高温(2K)での動作が可能である一方、量子効率の向上と暗電流の低減の両立が難しかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、このゲルマニウム検出器に Blocked impurity band (BIB)構造を導入することで、高い量子効率と低い暗電流を両立した超高感度赤外線検出器を開発することである。BIB 型検出器はシリコン検出器では開発に成功し赤外線天文衛星 AKARI や Spitzer に使われ、自然背景放射限界の観測を達成した。もしゲルマニウムでも実現できれば、SPICA にも搭載可能な高感度赤外線検出器が実現できる。本研究では、将来の多画素画像センサーへの応用に必要な極低温動作読み出し集積回路との組み合わせも視野に入れつつ、単素子でのゲルマニウム BIB 検出器の実現を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、BIB 構造の形成に molecular beam epitaxy (MBE)法と surface activated bonding(SAB)法を用いることとした。BIB 構造は光を吸収する active layer と暗電流を低減する blocking layer で構成される(図 1)。Active layer には不純物による光吸収を行う層である。不純物濃度を高く ($Ga\ 10^{16}/cc$)することで、量子効率を高めること、impurity band conduction による過渡応答の軽減、検出器体積を小さくできることから宇宙線の影響の低減などが期待できる。一方、impurity band conduction により暗電流の増加が発生するが、これを高純度層である blocking layer で遮断する。BIB 型検出器で高感度を得るポイントは高品質な高濃度層(実効的な受光部分となる空乏

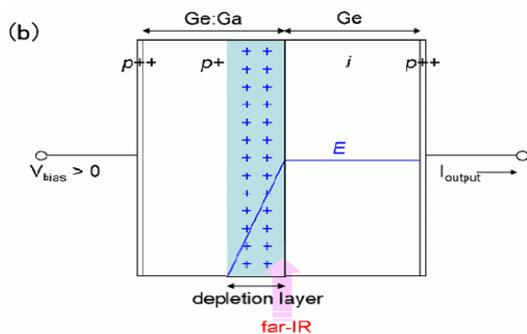


図 1 BIB 型ゲルマニウム検出器の構造
層を厚くするためには、低い minor dopant

濃度をもつことが必要)、impurity band conduction を遮断できるだけの純度をもつ blocking layer の実現、そして、急峻な濃度勾配をもちかつポテンシャル障壁の小さい界面である。従来は、Liquid Phase Epitaxy (LPE), Chemical vapor deposition (CVD), ion implantation などが用いられてきたが、それらを実現できなかった。

本研究では、新しい技術である MBE 法と SAB 法を用いてこれらの実現を目指した。高い量子効率を目指すため、active 層には高品質を期待できる Czochralski (CZ)法により作られた単結晶 wafer を用いた。

MBE 法ではその上に blocking layer となる non-dope 層を epitaxial 成長する方式をとった。課題は、epitaxial 界面を実現すること、高濃度層からの dopant 拡散を抑えること、そして、impurity band conduction を遮断できる純度を達成することである。

SAB 法では、その上に blocking layer となる CZ 法でつくられた高純度単結晶 wafer を張り合わせる方式をとった。課題は界面のポテンシャル障壁の抑制である。

4. 研究成果

MBE 法

基板温度を調整することで高濃度基板から epitaxial 層への不純物拡散が抑えられ急峻な濃度勾配を実現できることが明らかとなった(図 2)。wafer 投入前の表面処理の工夫により界面での不純物量を大幅に削減できることが明らかとなった。また成長直前に基板温度を高め、表面の酸化膜を除去することで、epitaxial crystal growth を実現できることが明らかとなった(図 3, 4)。さらに、結晶成長室の真空度を高め、分子線源のるつぽ材質の選択や電子銃加熱の採用などにより、impurity band conduction の遮断に十分な純度 ($5 \times 10^{14}/cc$) を達成した(図 5)。

これらの確認には、ESCA, RHEED, TEM, SIMS, SRA の各方法での観察/測定を用いた。(Wada et al. 2010)

また、同時に Ge 結晶成長中に Al 分子ビームを適切に照射することで透明電極に必要な不純物濃度と層厚みをもつ epitaxial 層の形成にも成功した。上記により表面入射型ゲルマニウム BIB 検出器の実現に必要な技術を獲得できた。

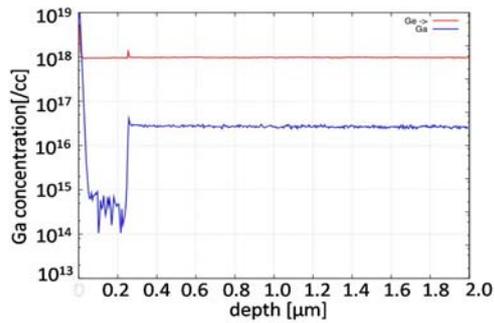


図 2 SIMS による濃度プロファイルの観察。MBE 法では高濃度($Ga\ 10^{16}/cc$)基板から epitaxial 層への Ga 拡散が少ないことが明らかとなった。

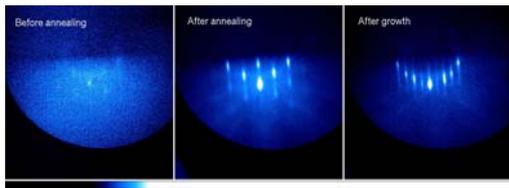


図 3 反射高速電子線回折(RHEED)による結晶性の評価。アニール前(左)は酸化膜に起因するアモルファス構造に特徴的な拡散した回折像を示す。アニール後(中)は表面の酸化膜が除去され、結晶に特有なスポット状の回折像を示すようになる。MBE 結晶成長後(右)は原子レベルで平坦な結晶面に特徴的なストリーク状の回折像を示す。

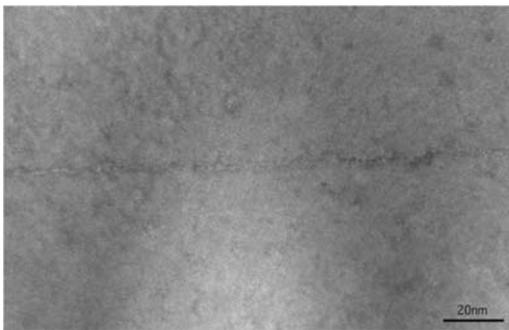


図 4 基板と epitaxial 層の界面の TEM 画像。界面での明瞭な格子欠陥は認められない。

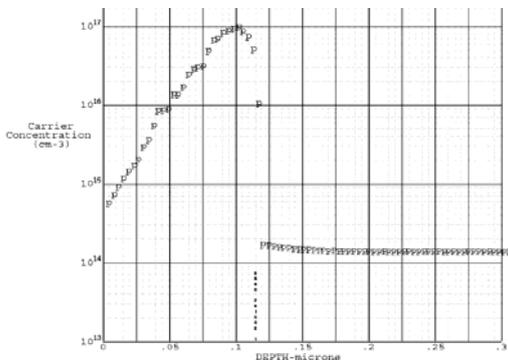


図 5 MBE サンプルの SRA によるキャリア密度プロファイル。Impurity band conduction の遮断に必要な $5 \times 10^{14}/cc$ を達成した。

SAB 法

三菱重工業製の表面活性接合装置を用いて真空中($10^{-4}Pa$)で SAB 法により張り合わせ素子を作成し、BIB 素子としての評価を行った。その結果、SAB 法は BIB 素子作成方法として有望であることが明らかとなった。

まず、界面でのポテンシャル障壁の有無を明らかにするため、光伝導素子に使われる wafer ($Ga\ 2 \times 10^{14}/cc$)を張り合わせたサンプルを作成し、TEM による界面の観察と 77K での電流電圧特性を測定した。その結果、界面には 3nm 程度のアモルファス層が形成されているものの、ポテンシャル障壁はほとんど存在しないことが明らかとなった(図 6)。

(Watanabe et al. 2011)。

続いて、高品質高濃度基板 ($Ga\ 10^{16}/cc$)と高純度基板 ($< 8 \times 10^{12}/cc$)を張り合わせたサンプルを作成し、2K での電流電圧特性、光感度の波長依存性、暗電流を測定した。その結果、BIB 素子に特有の電流電圧特性を持つこと、有感波長の増大、暗電流の低減を確認した(図 7)。(Kaneda et al. 2011)。

これらの成果をまとめ、学会発表(Wada et al. 2010)や論文出版(Watanabe et al. 2011, Kaneda et al. 2011)を行った。

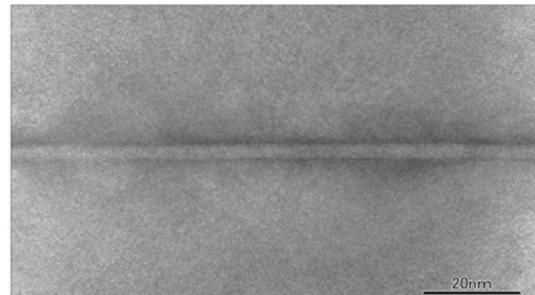


図 6 SAB 法で張り合わせた素子の界面の TEM 画像。界面に 3nm 程度のアモルファス層が見られる。

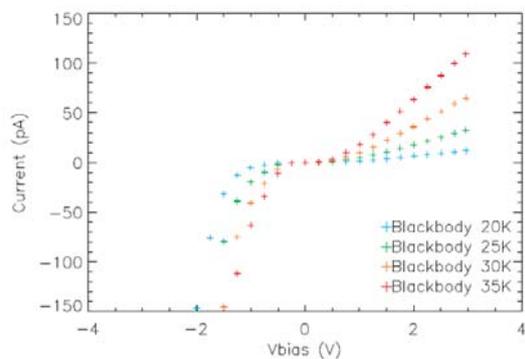


図 7 SAB 法による BIB 検出器の I-V 特性

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 4 件)

- ① Kentaroh Watanabe, Kensuke Wada, Hidehiro Kaneda, Kensuke Ide, Masahiro Kato, and Takehiko Wada, "Microscopic and electrical properties of Ge/Ge interfaces bonded by surface-activated wafer bonding technology", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読有, 50 巻, 2011, 論文番号 015701
 - ② Hidehiro Kaneda, Takehiko Wada, Shinki Oyabu, Ryoko Kano, Yuichi Kiriyama, Yasuki Hattori, Toyooki Suzuki, Kensuke Ide, Masahiro Kato, and Kentaroh Watanabe, "Electrical and Photoconductive Properties at 2 K of Germanium p+ -i Junction Device Fabricated by Surface-Activated Wafer Bonding", *JJAP*, 査読有, 掲載決定, 2011
 - ③ T. Wada, H. Kaneda, R. Kano, K. Wada, T. Suzuki, K. Watanabe, and Y. Kiriyama, "Development of Germanium BIB detector with surface activated bonding and Molecular-Beam Epitaxial crystal growth", *IRMMW 2010*, 査読無し, 2010, DOI(10.1109/ICIMW.2010.5612570)
 - ④ Nagata, H., Wada, T., Ikeda, H., Arai, Y., and Ohno, M., "Development of cryogenic readout electronics using fully-depleted-silicon-on-insulator CMOS process for future space borne far-infrared image sensors", *AIPC*, 査読有, 1185 巻, 2009, page 286-289, DOI: 10.1063/1.3292335
- [学会発表] (計 16 件)
- ① 桐山雄一、他、常温ウエハ接合による Ge p+-i 接合素子の遠赤外線感度特性の評価, 日本天文学会 2011 年春季年会予稿集, 2011 年 3 月 17 日 筑波大学(東日本大震災のため会場での発表は行わず)
 - ② 鈴木仁研、他、次世代遠赤外線ゲルマニウム検出器の開発 VI-分子線エピタキシー法による透明電極の形成-日本天文学会 2011 年春季年会予稿集, 2011 年 3 月 17 日 筑波大学(東日本大震災のため会場での発表は行わず)
 - ③ R. Kano, et al., Development of Germanium BIB Detector with Surface Activated Wafer Bonding, 名古屋大学第 2 回グローバル COE 国際会議, 2011 年 3 月 3-5 日 名古屋大学
 - ④ 長勢晃一、他、MBE 技術を用いた中間-

遠赤外線検出器における透明電極形成の検証, 第 11 回宇宙科学シンポジウム, 05 Jan, 2011 - 07 Jan, 2011, JAXA 宇宙科学研究所 相模原キャンパス (相模原市)

- ⑤ 永田洋久、他、次世代の遠赤外線イメージセンサーへの応用を目指した極低温電子回路の開発(II), 第 11 回宇宙科学シンポジウム 05 Jan, 2011 - 07 Jan, 2011, JAXA 宇宙科学研究所 相模原キャンパス (相模原市)
- ⑥ 桐山雄一、他、常温ウエハ接合技術を用いた新しい Ge:Ga 遠赤外線検出素子の評価, 第 11 回宇宙科学シンポジウム, 05 Jan, 2011 - 07 Jan, 2011, JAXA 宇宙科学研究所 相模原キャンパス (相模原市)
- ⑦ 永田洋久、他、高感度遠赤外線カメラへの応用を目指した極低温 CMOS 回路の開発(奨励賞受賞), 第 20 回日本赤外線学会研究発表会, 2010 年 11 月 4-5 日, 立命館大学びわこくさつキャンパス
- ⑧ Nataga, H., et al., Cryogenic readout electronics for space borne far-infrared image sensors (invited paper), International Conference on Space, Aeronautical and Navigational Electronics 2010, October 27-29, 2010 Jeju, Korea
- ⑨ Takehiko Wada, Development of cryogenic readout electronics for space infrared astronomical observations (invited paper), The 10th Taiwan-Japan Microelectronics International Symposium, October 27-28, 2010 Hsinchu, Taiwan
- ⑩ 狩野良子、他、常温ウエハ接合による遠赤外線 Ge:Ga 接合素子の光感度特性の評価, 名古屋大学ものづくり博'10 2010 年 10 月 8-9 日 名古屋大学
- ⑪ Wada, T., et al., Development of Germanium BIB detector with surface activated bonding and Molecular-Beam Epitaxial crystal growth, The 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW 2010, 5-10 Sept. 2010 Roma, Italy
- ⑫ 和田 健介、和田 武彦、他、次世代遠赤外線ゲルマニウム検出器の開発 V, 日本天文学会 2010 年春季年会, 2010 年 3 月 27 日, 広島大学
- ⑬ 狩野良子、和田武彦、他、常温ウエハ接合による遠赤外線 Ge:Ga 接合素子の光感度特性の評価, 日本天文学会 2010 年春季年会, 2010 年 3 月 27 日, 広島大学
- ⑭ 和田 健介、和田 武彦、他、遠赤外線

Ge:Ga 接合素子の電気特性の評価, 日本天文学会 2009 年秋季年会, 2009 年 9 月 14 日, 山口大学

⑮ 狩野良子、和田武彦、他、遠赤外線 Ge:Ga 接合素子の光感度特性の評価, 日本天文学会 2009 年秋季年会 2009 年 9 月 14 日 山口大学

⑯ 和田健介, 次世代遠赤外線ゲルマニウム検出器の開発 IV, 日本天文学会 2009 年春季年会, 2009 年 3 月 25 日, 大阪府立大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

和田 武彦 (WADA TAKEHIKO)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号: 50312202

(2) 研究分担者

金田 英宏 (KANEDA HIDEHIRO)

名古屋大学・理学研究科・准教授

研究者番号: 30301724

(3) 連携研究者

廣瀬 和之 (HIROSE KAZUYUKI)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・准教授

研究者番号: 00280553

(4) 研究協力者

渡辺 健太郎 (WATANABE KENTAROH)

東京大学・先端科学技術研究センター・特任助教