

## 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 6月10日現在

機関番号: 12601  
 研究種目: 基盤研究(B)  
 研究期間: 2010~2012  
 課題番号: 22360025  
 研究課題名(和文) ウェファボンディングを用いた遠赤外線BIB型検出器の開発

研究課題名(英文) Far-Infrared BIB Detector Fabrication by Wafer-Bonding Technique

研究代表者  
 土井 靖生(DOI YASUO)  
 東京大学・大学院総合文化研究科・助教  
 研究者番号: 70292844

研究成果の概要(和文): 様々な科学・工業応用が期待されるテラヘルツ波長帯の検出器の中で、最も高感度且つ大規模化を実現している検出器の1つが、ゲルマニウムの不純物半導体を用いた検出器である。我々はウェファボンディング技術を応用する事により、これまで製造が困難であった Ge 半導体を用いた遠赤外線 BIB 型検出器の製作実現性を確認した。これにより、これまで安価且つ大規模な検出器の製作が事実上不可能であった 100~300  $\mu$ m 帯における検出器製作の目処が得られた。

研究成果の概要(英文): The Ge extrinsic photoconductor are among the most sensitive as well as large-formatted array detectors that are sensitive to the tera-hertz wavebands and thus are applicable for many scientific and industrial measurements. We have developed Ge BIB photoconductor detectors by utilising the wafer-bonding technique and have confirmed the feasibility of the large-scale low-cost fabrication of the photoconductor detectors potentially be sensitive to 100 -- 300  $\mu$ m wavebands.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2011年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	7,100,000	2,130,000	9,230,000

研究分野:工学

科研費の分科・細目: 応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

### 1. 研究開始当初の背景

近年テラヘルツ帯 (100~300  $\mu\text{m}$  帯) の科学・工業応用の重要性が広く指摘されている。様々に開発が進んでいるテラヘルツ帯の検出器の中で、最も高感度且つ大規模化を実現している検出器の1つが、Ge:Ga と呼ばれる、Ge 結晶に極微量の Ga をドーピングした外因性半導体素子を用いた検出器である。一方で研究開始当初、その有感波長帯は  $\sim 200 \mu\text{m}$  までに留まっており、且つ多素子アレー検出器の実現困難性、低背景放射下に於ける強い非線形応答特性の存在、検出器の大規模アレー化に必要なモノリシック構造に於ける素子間クロストークの存在等、多くの好ましくない特性が精度の高い測定 of 妨げとなっていた。これらの問題点を一挙に解決する方策として、Blocked Impurity Band 型検出器 (BIB 型検出器 : Madarsz and Szmulowicz, 1987) の有用性が指摘されており、複数の試作例が報告されていたが、何れも単発の製作に留まり、安定した製作方法の確立が求められていた。

### 2. 研究の目的

BIB 型検出器の特徴は、検出器素子構造を 1) 光子を吸収する為の高不純物度の層と、2) 暗電流を遮断する為の高純度 (低不純物濃度) の層の 2 層構造とすることにある。これら不純物濃度が大きく違う 2 層を重ね合わせて結晶成長させる事は Si 半導体では一般に行われているが、Ge 半導体に於ける製造技術は確立されていない。我々はこの困難を避け、安価且つ大量精算可能な方式による BIB 型検出器の製造方法を確立することを目的とした。

### 3. 研究の方法

製造方法として、ウェファボンディング技術を応用することを計画した。ウェファボンディングは、2 枚の独立に形成した異なる組成の半導体結晶を貼り合せ、

熱及び圧力を掛ける等の方法により単一結晶化させる技術である。我々は特に表面活性化法と呼ばれる、結晶化させる際に高熱を用いることなく常温で接合する方法を採用する事により、接合界面に於ける不純物の熱拡散を避け、急峻な不純物濃度を達成する事を目指した。接合後の界面の濃度分布を電子顕微鏡等による直接観察や質量分析により調べ、且つ接合の物理的・電気的特性を調べる事で接合の健全性を調査した。接合したウェファから検出素子サンプルを切り出し、これの極低温下に於ける電気的特性、更には光応答特性を調べることで、遠赤外線検出器の実現可能性を調査した。

### 4. 研究成果

接合時の表面活性化の為のアルゴン高速電子ビーム (Ar-FAB) の照射時間を変化させ、接合界面の表面粗さの変化を原子間力顕微鏡により調べた。その結果、600 秒以下の照射時間で表面あらさに変化の無いことを確認した (表1)。一方 100 秒~600秒の照射時間の範囲内で、ウェファ全面に於いて気泡等の接合不良を含まない、健全な接合結果が得られる事を確認した。接合界面の機械的強度を確認し、14MPa 以上の強固な接合が得られている事を確認した。

一方で接合界面の TEM 観察画像からは、界面に厚さ 8nm 程度のアモルファス層の存在が認められた (図1)。エネルギー分散型X線分析装置による解析からはアモルファス層へのアルゴン原子の混入が認められ、従って

表1 Ge ウェハの表面粗さ測定結果

Ar FAB 照射時間 (s)	Rms表面粗さ (nm)
0	0.28
600	0.29
2,000	0.37

Ar-FAB 照射によるダメージ層であると考えられる。

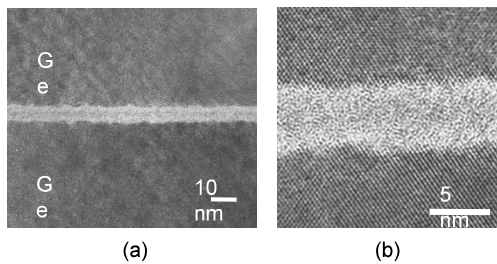


図1 表面活性化接合した Ge/Ge 接合界面の TEM 画像 ( Ar-FAB 電圧 : 1.5 kV )、(a) TEM 画像一例、(b) 接合界面拡大図

接合したウェファから検出素子を試作し、極低温下に於ける電気特性、光応答特性を調べた。その結果、 BIB 検出器として健全な電気的特性を得る一方、光検出感度は最大でも 0.7[A/W]程度に留まった。この接合ウェファに 500°C1時間の熱アニールを施す事により、中間アモルファス層がほぼ消失すると共に、光検出感度も ~7[A/W]と大幅に向上する事が認められた。このためより低い Ar-FAB 照射エネルギーを用いて接合界面のダメージを最小にする事を目指し、照射エネルギーを 1.5kV→0.75kV と半減させたサンプルを作成し、これが 1.5kV 接合時と同様な接合健全性を示し、且つ中間アモルファス層が 3nm 程度にまで減少する事、更には 1.5kV アニール素子と同程度の光感度を示す事を確認した。

以上により、これまで世界的に安定した成功例の無い Ge 不純物半導体を用いた BIB 検出器製作について、工業的に安価且つ大量生産可能な方式による実現の目処を付けたという点で、今回の研究は評価に値すると考える。一方光検出の時間応答特性については、アモルファス層の存在する検出素子とアニール後の素子との間で明確な差異が見られ、その物理的理解の為の更なるデータ蓄積が必要である。また長波長への伸展が期待される波長感度特性、及び二次元素子に於ける素子間クロストークについては評価未了となった。これらについては早急に評価を完了すべく現在評価

試験中である。

## 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6件)

- ① Eiji Higurashi, Low-Temperature Bonding Technologies for Photonics Applications, ECS Transactions, Semiconductor Wafer Bonding 12: Science, Technology, and Applications, 査読有, vol.50, no. 7, 2013, pp. 351-362, DOI: 10.1149/05007.0351ecst
- ② Yuta Sasaki, Wang Chenxi, Eiji Higurashi, Tadatomo Suga, Yasuo Doi, Iwao Hosako, Mechanical and Electrical Characteristics of Direct Bonded Ge/Ge interface, Proceedings of the Joint Conference of 12th International Conference on Electronics Packaging and 1st IMAPS ALL Asia Conference (ICEP-IAAC 2012), 査読有, 2012, pp. 254-258, <http://www.inemi.org/events/icep-iaac-2012>
- ③ 日暮栄治、須賀唯知、低温接合技術と高機能センサへの応用、スマートプロセス学会誌、査読無し、第 1 巻、第 3 号、2012、pp. 106-113、[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jspmee/1/3/1\\_106/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jspmee/1/3/1_106/_article/-char/ja/)
- ④ 佐々木優太、王晨曦、日暮栄治、須賀唯知、土井靖生、寶迫巖、Geウエハ常温接合界面の機械的・電気的特性評価、2011年度精密工学秋季大会学術講演会講演論文集、査読無し、2011、p39、<http://rnavi.ndl.go.jp/books/2012/09/000011291622.php>
- ⑤ 日暮 栄治、倉山 竜二、王 英輝、須賀 唯知、澤山 慶博、土井 靖生、寶迫 巖、遠赤外線検出器応用をめざした Ge ウエハの常温直接接合、第 28回「センサ・マイクロマシ

ンと応用システム」シンポジウム(電気学会センサ・マイクロマシン部門)、査読無し、2011、pp.328-333、<http://jglobal.jst.go.jp/public/20090422/20110224161496269>

⑥ Sawayama, Y., Doi, Y., Kurayama, R., Higurashi, E., Patrashin, M., Hosako, I., Wafer-bonded Ge:Ga blocked-impurity-band far-infrared detectors, Proceedings of Infrared Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2010 35th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, IEEE Xplore, 査読無し、2010, pp.1-2, DOI: 10.1109/ICIMW.2010.5612767 [学会発表](計 13件)

①日暮栄治、低温接合技術と高機能センサへの応用、第 196 回有機エレクトロニクス材料研究会(招待講演)、2012年10月05日、早稲田大学研究開発センター (東京)

②日暮栄治、低温接合技術と高機能センサへの応用、マイクロマシン /MEMS 展 第 4 回 MEMS 実装・パッケージングフォーラム(財団法人マイクロマシンセンター)(招待講演)、2012年07月12日、東京ビックサイト (東京)

③日暮栄治、低温接合に基づく異種材料集積技術と三次元構造光マイクロシステムへの応用、社団法人日本オプトメカトロニクス協会光センシング技術部会平成 24年度第 1 回技術部会(招待講演)、2012年06月22日、機械振興会館 (東京)

④ Eiji Higurashi、Low-Temperature Bonding Technologies for Photonics Applications、12th International Symposium on Semiconductor Wafer Bonding: Science, Technology and Applications, 222th Electrochemical Society Fall Meeting (招待講演)、2012年10月07日～2012年10月12日、Hilton Hawaiian Village Hotel and Hawaii Convention Center(アメリカ)

⑤Iwao Hosako、Terahertz detectors and its targeted applications、the GDR-I

Semiconductors sources and detectors of THz radiation Workshop (招待講演)、24-27 April, 2012、Hotel Montana, Tignes, France

⑥佐々木優太、王晨曦、日暮栄治、須賀唯知、土井靖生、寶迫巖、Geウエハ常温接合界面の機械的・電気的特性評価、2011年度精密工学秋季大会、2011年9月20日～22日、金沢大学

⑦日暮栄治、倉山 竜二、王 英輝、須賀 唯知、澤山 慶博、土井 靖生、寶迫 巖、遠赤外線検出器応用をめざした Ge ウエハの常温直接接合、第 28回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム(電気学会センサ・マイクロマシン部門)、2011年9月26日～27日、東京・タワーホール船堀

⑧Yuta Sasaki, Wang Chenxi, Eiji Higurashi, Tadatomo Suga, Yasuo Doi, Iwao Hosako、Mechanical and Electrical Characteristics of Direct Bonded Ge/Ge interface、Joint Conference of 12th International Conference on Electronics Packaging and 1st IMAPS ALL Asia Conference、April 17-20, 2012、Tokyo, Japan

⑨澤山慶博、他、ウエファボンディングによる遠赤外線 BIB 型 Ge:Ga 検出器の開発(4)、日本天文学会 2011年春季年会、2011年3月17日、筑波大学

⑩寶迫巖、テラヘルツイメージング・分光技術の現状と将来、防衛技術シンポジウム、2010年11月19日、グランドヒル市ヶ谷新館

⑪寶迫巖、テラヘルツ波センシングの現状と超高速無線への展望、第 4 回超高速フォトンクスシンポジウム、2010年11月4日、早稲田大学 西早稲田キャンパス

⑫澤山慶博、他、ウエファボンディングによる遠赤外線 Ge:Ga BIB 型検出器の開発(3)、日本天文学会 2010年秋季年会、2010年9月24日、金沢大学

⑬ Yoshihiro Sawayama et al. 、 Wafer-bonded Ge:Ga blocked-impurity-band far-infrared detectors、 IRMMW-THz 2010、 2010年 9 月 6 日、ローマ（イタリア）  
[図書] (計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

土井 靖生( DOI YASUO )

東京大学・大学院総合文化研究科・助教  
研究者番号: 70292844

### (2) 研究分担者

日暮 栄治( HIGURASHI EIJI )

東京大学・先端科学技術研究センター・准教授  
研究者番号: 60372405

### (3) 連携研究者

寶迫 巖( HOSAKO IWAO )

情報通信研究機構・新世代ネットワーク研究センター・研究マネジャー

研究者番号: 00359069