

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610046

研究課題名(和文) Ge-Siヘテロ接合による遠赤外線アレイ検出器の均質・広帯域化への挑戦

研究課題名(英文) Development of far-infrared detectors using Ge-Si junctions

研究代表者

金田 英宏 (Kaneda, Hidehiro)

名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30301724

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：Ge-Siヘテロ接合を用いて、従来の遠赤外線Ge検出器よりも長波長側まで感度を持つ検出器を開発した。GeとSiの熱膨張係数の違いによって、カットオフ波長が110ミクロンよりも有意に長くなることを実証するために、接合素子を試作し、低温試験を行うためのセットアップを構築した。遠赤外線フーリエ分光器を用いて、外部から赤外線を導入して波長感度を調べたが、データのS/Nが悪く、確定的な結果は得られなかった。その原因を探るべく、さまざまな電極を用いて試験素子を製作した。また、近赤外線LED照射によって感度が変化することを利用して、SiとGeの界面の状態を調査した。

研究成果の概要(英文)：We develop new far-infrared detectors using Ge-Si junctions. We expect to significantly elongate the cut-off wavelength of the detector beyond 110 microns, utilizing the mechanical stress applied to Ge due to the difference in the coefficient of thermal expansion between Si and Ge. In order to verify that, we have fabricated test junction devices and established a setup for measurement at low temperatures. As a result, we have obtained a hint of the elongation of the cut-off wavelength beyond 120 microns, using a Fourier transform spectrometer. However we could not obtain a decisive result due to rather poor signal-to-noise ratios. We have investigated the cause of the low sensitivity, fabricating junction devices with various kinds of electrodes.

研究分野：スペース赤外線天文学

キーワード：遠赤外線検出器 Ge検出器

### 1. 研究開始当初の背景

さまざまな電磁波による天文研究のなかで、遠赤外線(50 - 200  $\mu\text{m}$ )は未開波長域である。IRAS から最新の Herschel 衛星まで、遠赤外線観測では高感度な Ge:Ga 検出器が使われてきた。Ge にドーパされた Ga 不純物のエネルギー準位を用いて光を検出する原理だが、波長 110  $\mu\text{m}$  よりも長い赤外線を検出するには、Ge に機械圧縮を加えて不純物深さを実効的に浅くする必要があった。つまり、短波長側の非圧縮アレイと、長波長側の圧縮アレイが必要であった。しかし、圧縮アレイでは、素子ごとに均等に圧力を加えることは難しく(とくに極低温で)、ピクセル間の個性のばらつきが問題となった。また、大規模な外部圧縮機構が必要となるため、将来に向けた大フォーマットなアレイの実現が困難であった。

### 2. 研究の目的

外部から圧力をかけずに、Ge - Si ヘテロ接合による熱膨張係数の違いから生じる内部応力を用いることで、実効的に長波長側に感度を持つ非圧縮 Ge:Ga 検出器の実現可能性を探る(図1)。この原理によって、感度カットオフ波長が長波長側へ十分に延びることが実証できれば、外部圧縮機構がなくなるため、コンパクトかつ大フォーマットなアレイが実現可能となる。また、ピクセルごとに均等に圧力を加えることが可能となり、感度を長波長側へ様に広帯域化し、均質なアレイを実現できる。

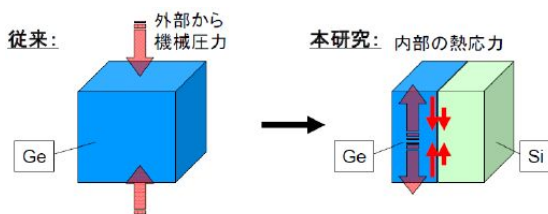


図1：本研究で調査する原理を概念化したもの。

### 3. 研究の方法

(1) 表面活性常温ウエハ接合技術を用いて、高ドーパ Ge:Ga と高純度 Si を接合させたウエハを製作する。1 mm 角の立方体に切りだして、対面へオミック電極処理を施して試験素子とする。

(2) 接合素子の遠赤外線検出器としての性能を評価するために、液体ヘリウム冷却クライオスタットを用いて、極低温の測定系を構築する。クライオスタットは研究室に既存の物を活用し、その内部に極低温読み出し回路、赤外線光源、温度計、光入射窓、光学フィルターを設置する。検出器のマウント次具を製作して、システムを組み上げる。

(3) 黒体光源を用いて、温度 4 K での接合

素子の遠赤外線絶対感度を測定する。また、研究室に既存の遠赤外線フーリエ分光器を用いて、接合素子の遠赤外線波長感度曲線を測定する。感度カットオフ波長を評価し、長波長側への伸びを調べる。

(4) 電流 - 電圧特性から、電極の健全性を確認する。ホール効果測定を実施し、半導体基礎特性を理解する。必要に応じて、できるだけ高い感度が得られるように電極の最適化(金属の変更、処理方法・パラメータの変更)を行う。

(5) 2 x 2 のフォーマットに素子間分離し、各ピクセルの性能を評価して、個体差を調査する。

### 4. 研究成果

(1) 複数の接合デバイスを製作した。この素子を低温試験するためのマウント次具を作成した(図2)。検出器ハウジングや温度計、読み出し回路などを液体ヘリウム冷却クライオスタットにインストールし、試験セットアップを構築した(図3)。液体リウムによる冷却試験を実施し、クライオスタット内部の装置が正常に冷えることを確認した。外部の遠赤外線黒体光源やフーリエ分光器からの赤外線を導入するために、光学フィルターや入射窓を設置した(図4)。

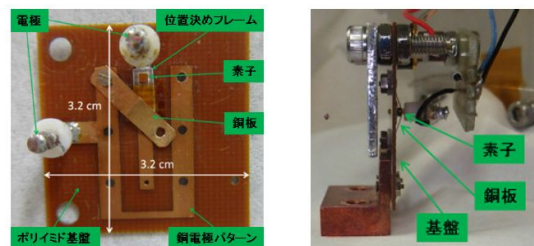


図2：マウント次具。(左)入射面裏側、(右)横側から見た写真。

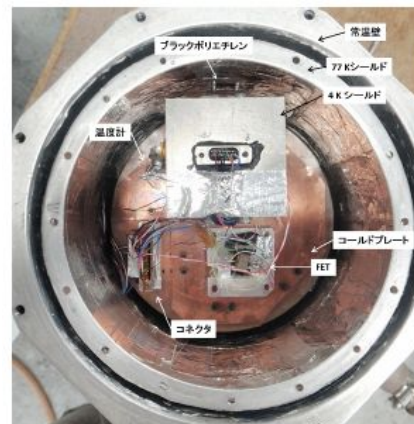


図3：クライオスタット内部のコールドプレート上の配置。

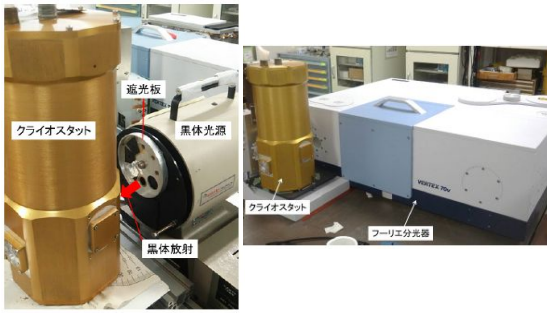


図4：(左)赤外線黒体光源、(右)赤外線フーリエ分光器とクライオスタットの配置。

(2) 接合素子を試験システムにインストールして、遠赤外線絶対感度測定、および赤外線波長感度測定を行った。その結果、従来のGe:Ga 検出器の性能から期待していた感度よりも一桁以上悪いことが分かった。赤外線フーリエ分光器によって得られた波長感度曲線の一例を図5に示す。

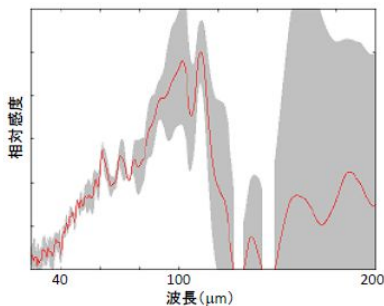


図5：接合素子に対して、赤外線フーリエ分光器を用いて波長感度を測定した結果の一例。グレーでハッチをかけた領域は200回測定のみばらつき、赤線はその平均値を示す。

図5を見ると、感度カットオフ波長そのものは120  $\mu\text{m}$  よりも長波長側へ伸びている傾向は見られるが、データのS/Nが悪く、確定的な結果は得られていない。良好な感度が得られなかった原因は、電極のオミックコンタクトが良好でなくショットキー障壁で電圧が使われてしまったため、接合部にバイアス電圧がほとんどかからなかったことにあると考えられる。また、電流-電圧特性の測定結果から、半導体接合界面でのポテンシャル障壁の存在も示唆された。

(3) さまざまな電極金属の種類、および形成方法や処理パラメータを用いて、電極が異なる複数の試験素子を製作した。これらの素子に対して測定して得られた電流-電圧曲線の例を図6に示す。調査の結果、これまで使用してきたAuGa電極は、個体差が大きく性能が悪いことが分かった。電極処理パラメータや半導体物性値の差に影響を受けやすいことを示唆する。また、図6は、相対的

にAuSb電極のほうが良好な特性を示すことを示している。ホール効果なので測定された半導体物性値と照らし合わせて、電極特性の違いが生じる原因を考察した。それらの結果をもとに、最終的にSnGa電極を用いた素子の作成を実施した。

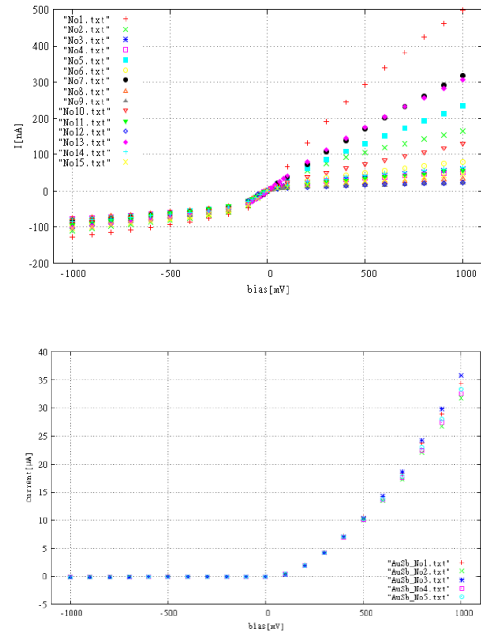


図6：Si+Ge:Ga 接合素子の電流-電圧特性。(上) AuGa電極、(下) AuSb電極。色の違いは電極処理パラメータの違い、および、個体差を示す。

(4) 感度が悪いことに対する問題調査の過程において、半導体接合部に外部から近・中間赤外線を照射すると感度が有意に増加する現象を発見した。そこで、さまざまな波長の赤外線LEDを用いて、クライオスタット内部から赤外線を照射して感度増加率を定量的に評価し、接合部の物理状態と感度上昇の原因についての理解を進めた。また、半導体パラメータの詳細をホール効果などによって評価した。格子欠陥などが原因で接合部に深いエネルギー準位が存在し、空間電荷が生じてポテンシャル障壁を形成していることを示唆する結果を得た。つまり、深い準位にトラップされた空間電荷に対して、赤外線LEDの光が作用して励起させると、障壁に変化が生じて、感度が上昇することが考えられる。さらなる理解のためには、背景赤外線を変化させながら、波長感度特性の違いを測定する必要がある。

(5) 以上の問題に対して、追加測定や調査などが発生したため、研究期間内に2x2ピクセルのフォーマットに素子間分離するところまで、到達しなかった。電極特性の問題はほぼ解決したが、Si-Ge半導体接合界面が赤外線検出性能に与える影響について、定量

的な評価はまだ不十分である。ただし、本研究によって、必要な測定システムの構築は完了したので、感度低下の原因が解決できれば、均一性の評価へと進むことは比較的、容易である。

#### 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 1件)

M. Hanaoka, H. Kaneda, S. Oyabu, M. Yamagishi, Y. Hattori, S. Ukai, K. Shichi, T. Wada, T. Suzuki, K. Watanabe, K. Nagase, S. Baba, & C. Kochi, "Development of Blocked-Impurity-Band-Type Detectors Fabricated with the Surface-Activated Wafer Bonding Method for Far-Infrared Astronomy", *Journal of Low Temperature Physics*, Online First, pp.1-6, (2016), 査読有  
DOI: 10.1007/s10909-016-1484-1

〔学会発表〕(計 3件)

M. Hanaoka, H. Kaneda, S. Oyabu, Y. Hattori, K. Tanaka, T. Wada, T. Suzuki, T. Watanabe, K. Nagase, S. Baba, & C. Kochi, "Evaluation of far-infrared BIB-type Ge detectors fabricated with the surface-activated wafer bonding technology", *THE UNIVERSE IN THE LIGHT OF AKARI AND SYNERGY WITH FUTURE LARGE SPACE TELESCOPE*, 9 - 11 July 2014, Univ. of Oxford, UK.

花岡美咲、金田英宏、大藪進喜、服部和生、田中琴未、鶴飼壮太、和田武彦、鈴木仁研、渡邊健太郎、長勢晃一、公地千尋、馬場俊介、「宇宙観測用接合型 Ge 遠赤外線検出器のアレイ化に向けた物理パラメータの決定」、日本天文学会春季年会、2015年3月18-21日、大阪大学

M. Hanaoka, H. Kaneda, S. Oyabu, M. Yamagishi, Y. Hattori, S. Ukai, K. Shichi, T. Wada, T. Suzuki, K. Watanabe, K. Nagase, S. Baba, & C. Kochi, "Development of Blocked-Impurity-Band-Type Detectors Fabricated with the Surface-Activated Wafer Bonding Method for Far-Infrared Astronomy", *16th international workshop Low Temperature Detectors*, 18 - 25 July 2015, Grenoble, France

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者  
金田 英宏 (KANEDA, Hidehiro)  
名古屋大学・理学研究科・教授  
研究者番号：30301724

(2) 研究分担者  
( )

研究者番号：

(3) 連携研究者  
大藪 進喜 (OYABU, Shinki)  
名古屋大学・理学研究科・助教  
研究者番号：10396806

(4) 研究協力者  
服部 和生 (HATTORI, Yasuki)  
木幡 洸大 (KOBATA, Kodai)  
花岡 美咲 (HANAOKA, Misaki)