

令和 2 年 6 月 7 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18773

研究課題名(和文) 接合型Ge検出器の2次元構造展開による未開拓波長帯の高感度化とその実用化

研究課題名(英文) Development of the junction-type Ge detector with a two-dimensional structure sensitive to the unexplored waveband and the practical use of the detector

研究代表者

鈴木 仁研 (Toyoaki, Suzuki)

名古屋大学・理学研究科・助教

研究者番号：30534599

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：波長 \sim 30-60 μm 帯での天体観測は、天文学的に重要な窓であるにも関わらず、他の波長帯に比べて大きな遅れをとっている(未開拓な波長帯)。その理由は、未開拓波長帯に高感度かつ実用的な検出器がいまだに存在しないからである。

本研究では、赤外線検出素子の構造の刷新により、未開拓な波長帯に高い光感度を有する赤外線検出器の実現とその実用化に挑戦する。検出器の試作を行い、検出器を温度2 Kまで冷却し、光応答特性を評価した。その結果、未開拓波長帯における光感度は従来型検出器の未開拓波長帯でのそれよりも1桁程度高いことを実証できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

未開拓波長帯の高感度化の実証に成功したことによって、今までアクセスできなかったガス輝線や固体物質のバンド放射を観測でき、宇宙空間の物質・物理状態の重要な情報を取得でき、現代天文学が掲げる宇宙の物質・生命進化の研究分野を切り開くことができる。

研究成果の概要(英文)：Astronomical observations in the wavelength range of 30-60 microns (unexplored waveband) are an important window for astronomy, but have never been performed. The reason is that there is no IR detectors sensitive to the unexplored waveband. Therefore, the goal of this study is to develop high-sensitive IR detectors which cover the unexplored waveband by changing the detector structure and is to demonstrate the practical use of the detector. The detector has been successfully fabricated and was cooled down to 2 K to measure IR responsivity. As a result, the detector responsivity in the unexplored waveband shows one-order of magnitude higher than conventional IR detectors.

研究分野：赤外線天文学

キーワード：赤外線天文学 遠・中間赤外線検出器 ゲルマニウム

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

波長 $\sim 30-60\ \mu\text{m}$ 帯での天体観測は、天文学的に重要な窓である。同波長帯には、大質量星によって暖められたダストからの熱放射に加え、濃い星間ガスの重要な冷却線である中性酸素 [OI] $63\ \mu\text{m}$ や 1 階電離珪素 [SiII] $35\ \mu\text{m}$ 、大質量星の輻射場の硬さをプローブする 2 階電離窒素 [NIII] $57\ \mu\text{m}$ や 2 階電離酸素 [OIII] $52\ \mu\text{m}$ などの禁制線が存在し、星間空間の物理状態の診断に欠かせない。さらに、 H_2O 氷 ($43, 62\ \mu\text{m}$ 帯) やシリケート系 ($33, 37, 43, 69\ \mu\text{m}$ 帯) のバンド放射も含まれる。固体物質のバンド放射から組成や結晶状態の診断が可能となる。こうした情報にアクセスできることで、銀河の多様な星生成と物理状態の因果関係の理解や、系外惑星系における H_2O 氷の普遍性や惑星における水起源の理解および、熱履歴の検証が可能になる。しかし、このような天文学的な重要性にも関わらず、他の波長帯に比べて観測的に大きな遅れをとっている (未開拓な波長帯)。

これまでの接合型 ゲルマニウム(Ge) 素子 (図 1) は、高濃度に不純物をドーピングした受光層に加え、高純度 Ge 層を接合した 3 次元構造になっている (e.g. Watson et al. 1993)。従来型 Ge 素子の有感波長帯 ($60-100\ \mu\text{m}$) の長波長側を拡張させるため、Ge ヘドープする不純物濃度を従来の濃度よりも 2 桁高い、 $10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ 程度にしている。実際、期待通りに波長 $\sim 180\ \mu\text{m}$ まで拡張していることが報告されている。従来型 Ge 素子では、未開拓波長帯の光エネルギーは、主に Ge のフォノン吸収に使われてしまうため、光を電気信号として検出できないが、Ge に添加する不純物濃度を $\sim 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ まで上げれば、フォノン吸収よりも不純物吸収による過程が支配的になる (図 2)。つまり、接合型 Ge 素子は、原理的に、有感波長帯が $60-100\ \mu\text{m}$ から $30-180\ \mu\text{m}$ へ大きく拡張するはずである。しかしながら、この予測に反して、これまでに有感波長帯の短波長側へ拡張した報告例はない。

2. 研究の目的

未開拓な波長帯は、従来のシリコン(Si)系検出器がカバーする中間赤外線波長帯 ($\lambda \leq \sim 30\ \mu\text{m}$) と、Ge 系検出器がカバーする遠赤外線波長帯 ($\lambda \geq \sim 60\ \mu\text{m}$) とのギャップ波長域に位置している。そのため、波長 $\sim 30-60\ \mu\text{m}$ 帯に高感度かつ実用的な検出器が存在しない。これが観測的に大きな遅れをとっている要因である。同要因を解消すべく、本研究では、接合型 Ge 素子の従来の構造を刷新し、同素子が未開拓な波長帯で高い光感度を有する赤外線検出器の実現に挑戦する。また、同素子を格子状に配置したアレイ検出器の実用性を検証する。

3. 研究の方法

本研究では、素子の構造を従来の 3 次元構造 (図 1) から、2 次元平面的に展開する新たな接合型 Ge 素子 (2 次元接合型 Ge 素子, 図 3) を提案する。2 次元構造により、赤外線を受光する空乏層への直接照射 (フォノン吸収の阻止) と厚い空乏層 (光吸収長の増大) の実現が可能になる。結果、従来の 3 次元構造よりも一桁高い量子効率 ($\sim 10\%$) が期待される。さらに、2 次元構造への展開によって、2 次元アレイフォーマット化が極めて容易になる利点もある。つまり、中間-遠赤外線の広い波長範囲をカバーする、実用性の高い超高画素のアレイ検出器の実現が期待される。

3-1. 2D 接合型 Ge 検出器の試作

素子は、2 種類のデザインを設けた (図 4 左・真中)。'Design 1' は、'Design 2' に比べて感度の点で有利だが、配線の断線によ

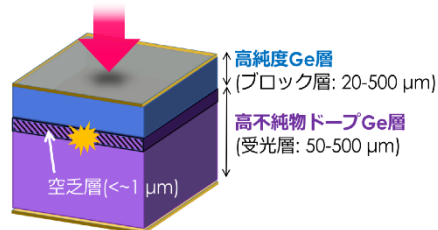


図 1: これまでの接合型 Ge 素子の構造。赤外線は、高純度 Ge 層を通過して高不純物ドーピング Ge 層で不純物によって吸収され、電気信号へ変換される。

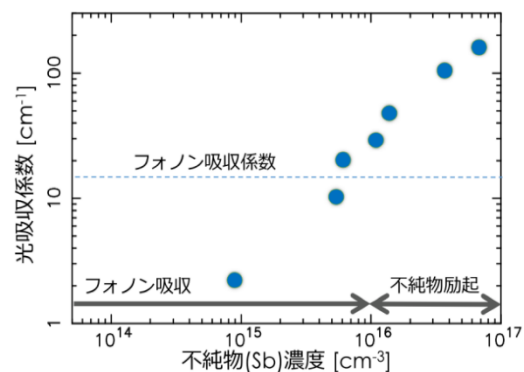


図 2: Ge 半導体の未開拓波長帯における光吸収係数 (波長 $50\ \mu\text{m}$) の不純物濃度依存性 (Bandaru et al. 2002)。不純物濃度 $\sim 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ 以上で、不純物による吸収係数がフォノン吸収を上回る (Fray et al. 1965)。つまり、原理的には、未開拓波長帯に高い光感度が得られるはず。

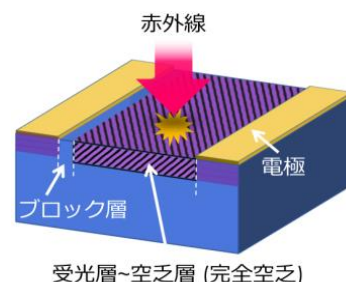


図 3: 本研究で提案する 2 次元接合型 Ge 素子の構造。従来の 3 次元構造から 2 次元構造への展開によって、未開拓波長帯で高い量子効率を得る。

る dead pixel のリスクがある。確実に成果を出すために、断線に対する冗長が高い 'Design 2' をバックアップとして提案した。外注先の超微細パターンニングの仕様に基づき、受光層幅 w とブロック層幅 d を、それぞれ、3通りの値(挑戦値, 標準値, 安全値)に設定した。

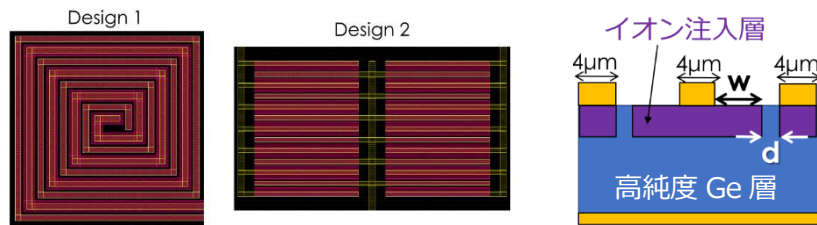


図 4: 素子のデザイン(左・真中)と、断面図(右)。デザイン図にて、赤色が受光層、黒色が高純度 Ge 層(含むブロック層)および、黄色が電極である。白線は、断面の箇所を示す。断面図における受光層幅 w とブロック層幅 d を、それぞれ、3通りの値に設定した。

受光層の不純物濃度は、平均的なフォノン吸収係数よりも一桁高い光吸収係数になるように設定し、 $\sim 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ とした。受光層の厚さ(光の吸収長)は、未開拓な波長帯での量子効率を一桁程度($\sim 10\%$)まで向上させるため、 $1.5 \mu\text{m}$ に設定した。これらの仕様を満たすため、受光層の濃度と厚さの制御性が高いイオン注入にて、受光層を形成した。注入イオンのフラックスとエネルギーは、それぞれ、ドーピングの濃度と深さを決める。最大 700 keV までの複数のエネルギーで注入すれば、受光層の厚さ要求を満たす。なお、ドーパントは、イオン注入時における Ge へのダメージを極力抑えるため、3価で最も軽いボロンを用いた。

素子は、図 5 に示す工程で製作した。高純度 Ge 基板は、極低温下での電気特性が既に評価され(Suzuki et al. 2018)、メジャー・マイナー不純物濃度が低く($\sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$)、比較的高い補償比(~ 0.7)を示す高性能なものを使用した。従来の接合型 Ge 素子では、数 10 もの工程を踏むが、本研究提案の素子はわずか 6 工程で済む。つまり、シンプルな工程によって、時間および予算の削減を図った。

試作した検出器は、単素子および、単素子を 5×5 の格子状に配置した 2 次元アレイである。

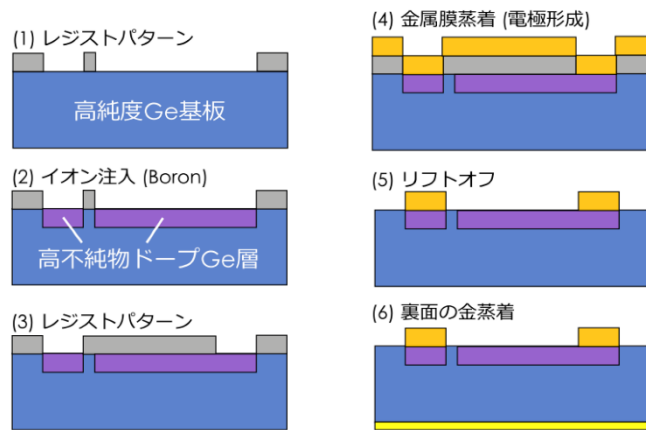


図 5: 2D 接合型 Ge 素子の製作手順。

3-2. 2D 接合型 Ge 検出器の電気特性と相対波長感度特性の測定

試作した検出器は、液体ヘリウムを用いて温度 $\sim 2 \text{ K}$ の極低温まで冷却され、その電流-電圧特性および、波長感度特性を評価した。図 6 に示すような、極低温環境を実現するためのクライオスタット、フーリエ分光器、黒体光源および、信号読み出し回路 (Trans Impedance Amplifier 方式) を使用した。これらは、従来の接合型 Ge 検出器の評価で用いられてきた既存のものであるために、試験のセットアップのためのコストや準備期間を大幅にカットできた。クライオスタットには、外から光を導入できる光入射窓が設置されており、中間・遠赤外線帯を良く透過するフィルター(ブラックポリエチレンとホワイトポリエチレン)が設置されている。素子チップをマウントする治具(アルミニウム筐体)および、信号読み出しのための基板は、新たに設計・製作を行った(図 6 左)。素子チップはアルミニウム筐体上に固着され、 2 K に冷えるようにした。同筐体に、温度計(セルノックス抵抗温度計)を設置することで、素子の温度としてモニターできるようにした。

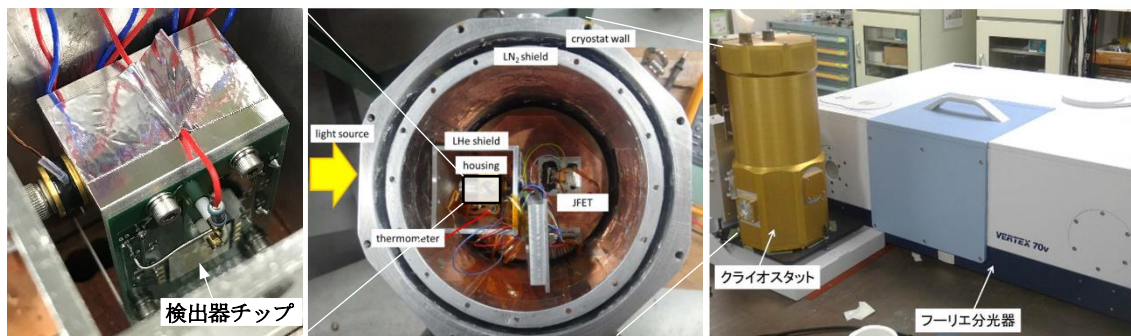


図 6: 2D 接合型 Ge 検出器の性能評価試験のセットアップ図。温度 2 K に冷却されるハウジングの中に、素子チップがマウントされ(左)、ハウジングはクライオスタットの 2 K コールドプレート上に設置される(真中)。クライオスタットには、外部から光を導入できる光入射窓が設置されている。右図は、フーリエ分光器を用いた波長感度特性の測定の様子。

電流-電圧特性は、クライオスタットの光入射窓を遮光板で閉じた状態、光入射窓に黒体光源 (温度 300 K, 500 K, 600 K)からの光を照射した状態で調べた。また、相対波長感度特性は、大学に既存のフーリエ分光器 (ブルカー・オプティクス製) を用い、水銀ランプを光源として、赤外線波長感度特性を測定した。検出器の相対波長感度特性を得るために、全てのフィルターの透過特性 (ただし常温) と、水銀ランプの波長感度特性を実測し、それらのスペクトル応答関数で補正した。

4. 研究成果

4-1. 2D 接合型 Ge 検出器の試作

製作した検出器 (単素子:28 個, 5x5 アレイ:36 個)の外観および、5x5 アレイ検出器を図7に示す。素子のデザイン、受光層幅とブロック層幅、および、素子のサイズが異なる検出器を製作した。図7 (右) の 5x5 アレイ検出器は、'Design 1'の受光層幅 3 μm , ブロック層幅 4 μm である。1素子のサイズは $\sim 500 \mu\text{m} \times \sim 500 \mu\text{m}$ である。顕微鏡による目視検査で、正常にパターンニングされていることを確認

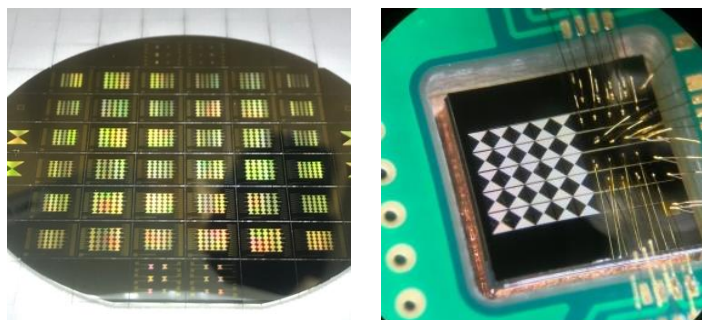


図7: 高純度 Ge 基板 (2 インチウエハ) 上に形成された試作検出器群 (左) と、その一つである 5x5 アレイ検出器チップ (右)。1 素子のサイズは、 $\sim 500 \mu\text{m} \times \sim 500 \mu\text{m}$ である。

できた。実際、常温での評価素子の電極間の抵抗を測定したところ、期待される抵抗値 ($\sim 40 \Omega$) と矛盾がないことを確認し、電氣的にも問題がないことが分かった。この結果を受け、評価対象の検出器は、単素子および 5x5 アレイ共に、'Design 1'の受光層幅 $w=3.0 \mu\text{m}$ (安全値) とブロック層幅 4.0 μm (安全値) を選択した。

4-2. 2D 接合型 Ge 検出器の電気特性および、相対波長感度特性の測定

単素子の温度 2 K での電流-電圧特性を図8に示す。全体的な形は、従来の接合型 Ge 素子に印加される順方向と逆方向 (BIB mode) バイアスで期待される電流-電圧特性を示しており、極低温下でも正常な電氣的動作が確認できた。また、入射する光強度の増加に従って、単素子に流れる電流が増加することが確認できた。これらの結果から、絶対感度を見積ると $\sim 3 \text{ A/W}$ (バイアス電圧 = -35 mV) であった。

単素子の相対波長感度特性を図9に示す。印加バイアス電圧による波長感度特性の形の違いを見るために、波長 110 μm で規格化している。赤、緑、青線は、それぞれ、素子にバイアス電圧 -15 mV 、 -25 mV 、 -35 mV を印加した際の特性を表す。波長感度特性から、期待通りに、未開拓波長 30–60 μm 帯に光感度を有していることが分かった。また、長波長側 ($>110 \mu\text{m}$) にも感度を有している。これは、Ge ヘドープした B 不純物濃度を高くすることで不純物バンドが形成し、不純物バンド-価電子帯間のエネルギーギャップが小さくなるためである。また、印加バイアス電圧が増加するにつれて、より長波長側にも光感度を有している。これは、Poole Frenkel Effect と呼ばれ、電場を加えることで、不純物準位の基底準位から価電子帯上端までのポテンシャル障壁が減少するためである (Frenkel 1938)。以上の結果から、2D 接合型 Ge 検出器は、中間一遠赤外線波長帯の幅広い波長帯で光感度を有していることが確認できた。

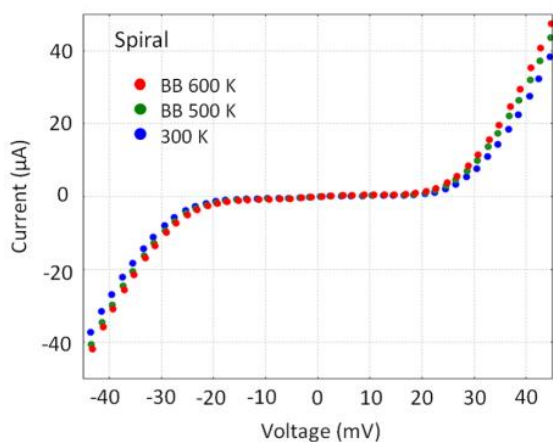


図8: 温度 2K における電流-電圧特性。水色, 緑, 赤は、それぞれ、黒体光源の温度 300, 500, 600 K で検出器に照射時の電流-電圧特性である。

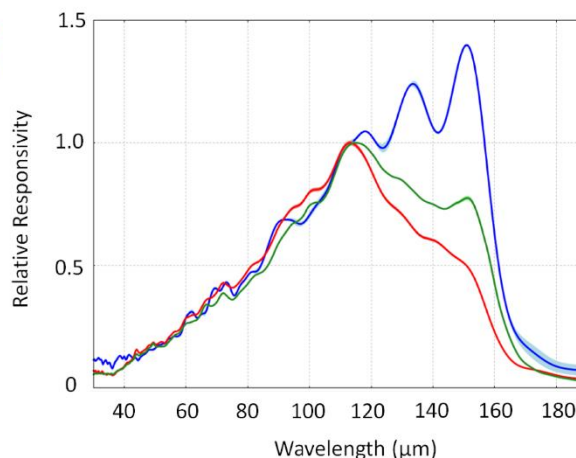


図9: 温度 2K における相対波長感度特性。赤, 緑, 青線は、それぞれ、検出器の印加バイアス電圧 -15 , -25 , -35 mV に対応する。

4-3. 2D 接合型 Ge 検出器の量子効率の波長依存性

単素子の絶対感度と相対波長感度特性の結果から、量子効率の波長依存性を見積もった。その結果を図 10 に示す。

図中の青・紫線は、それぞれ、従来の Si 系検出器(青: BIB 型 Si:As 素子、紫: BIB 型 Si:Sb 素子)を示し、橙・赤は、それぞれ、従来の Ge 系検出器(橙: 非加圧型 Ge:Ga 素子、赤: 加圧型 Ge:Ga 素子)における量子効率である (Rogalski 2013, Rogalski et al. 2018)。

この図から、本研究で開発した 2D 接合型 Ge 素子は、従来の Si 系検出器や Ge 系検出器の間に存在している未開拓波長帯を 10%以上の高い量子効率で埋めていることがわかる。素子の 2 次元構造展開化による空乏層への赤外線への直接照射や、長い光吸収長の実現によって、波長 30–60 μm 帯の光吸収がフォノン吸収よりも支配的になったと考えられる。以上の成果から、本研究目的である未開拓波長帯の高感度化の実証に成功した。

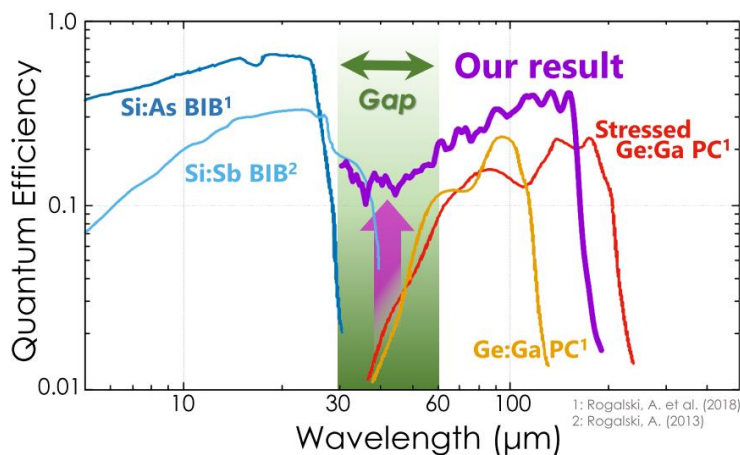


図 10: 量子効率の波長依存性。紫線は、本研究で試作した 2D 接合型 Ge 検出器、水・青線は、Si 系検出器[*]、橙・赤線は、Ge 系検出器[*]である。2D 接合型 Ge 検出器の量子効率が未開拓波長帯で高い。

4-4. 2D 接合型 Ge 検出器の素子毎の波長感度特性のばらつき

5x5 アレイ検出器における絶対感度および相対波長感度特性から、検出器への印加バイアス電圧 -35 mV における全 25 素子の波長感度特性を調べた(図 11)。5x5 アレイ検出器の波長感度特性の形は、単素子のそれと大局的には矛盾はない。また、注目すべき点は、波長感度特性の形が素子間でよく一致していることである。このことは、実際の天体観測を想定した時、波長方向における素子間の相対感度の校正を大幅に軽減できることを意味する。一方、素子毎の絶対感度のばらつきは 10–20% (1 σ) 程度であった。参考として、赤外線天文衛星「あかり」に搭載された遠赤外線検出器の場合、非加圧型 Ge:Ga 検出器 (波長 60–110 μm) で~20%、加圧型 Ge:Ga 検出器 (波長 110–180 μm) で~60% であることから (Verdugo et al. 2007)、本検出器の感度ばらつきは、比較的、小さいといえる。

非加圧型 Ge:Ga 検出器は、モノリシックな Ge 基板上に素子を形成することでアレイ化している。一方、加圧型 Ge:Ga 検出器は、波長 110 μm よりも長波長側に光感度を有するために、ディスクリットな素子毎に圧力を加える必要がある。それゆえ、素子毎の加圧ムラによる素子間の感度ばらつきが起きる。したがって、加圧型 Ge:Ga 検出器の素子間感度ばらつきは、非加圧のそれに比べて高くなってしまふ。本研究の 2D 接合型 Ge 検出器は、モノリシックであるため、遠赤外線波長帯で問題になっていた素子間の感度ばらつきを副次的に解決していることが明らかになった。以上から、5x5 アレイ検出器は、光応答の観点で、実用上問題ないことが分かった。

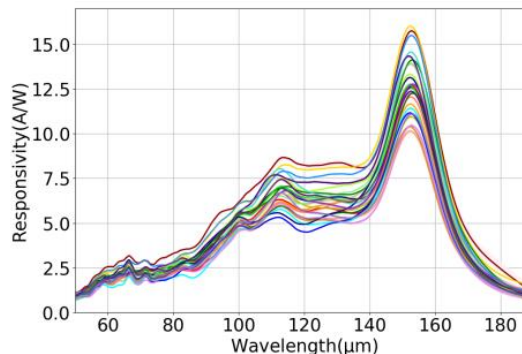


図 11: 5x5 アレイ検出器の全素子の絶対感度の波長依存性。波長 158 μm での絶対感度と感度ばらつきは、それぞれ、11 A/W, 13%(1 σ)である。

5. 引用文献

1. Bandaru et al., Appl. Phys. Lett. 80, 3536, 2002.
2. Fray et al., Proc.Phys. 85, 153, 1965.
3. Frenkel, Phys. Rev. 54, 647, 1938.
4. Rogalski, Ope-electronics review, 21, 406, 2013.
5. Rogalski et al., SPIE press book, chap 1, p17, 2018.
6. Suzuki et al., JJP, 57, 116701, 2018.
7. Verdugo et al., 'AKARI FIS Data User Manual Version 1.3', 2007.
8. Watson et al., J.Appl. Phys. 74, 15, 1993.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Suzuki Toyoaki, Kaneda Hidehiro, Wada Takehiko, Ukai Souta, Hanaoka Misaki, Shichi Kazuyuki, Maeda Hiroki, Oyabu Shinki, Watanabe Kentaroh	4. 巻 57
2. 論文標題 Evaluation of the compensation ratio of heavily-Ga doped Ge for far-infrared detectors in astronomy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 116701 ~ 116701
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/JJAP.57.116701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 齋藤太志, 鈴木仁研, 金田英宏 (名古屋大学), 大藪進喜 (徳島大学), 藤原侑, 金山健也, 下村太誉 (名古屋大学), 和田武彦, 石丸貴博, 長勢晃一 (ISAS/JAXA)
2. 発表標題 気球望遠鏡を用いた高解像度・高波長分解[CII]マッピング観測のためのBlocked-Impurity-Band型遠赤外線アレイ検出器の開発
3. 学会等名 天文学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----