

表面活性化常温ウエハ接合技術を用いた遠赤外線 BIB 型 Ge 検出器の開発

花岡 美咲 (名古屋大学大学院 理学研究科)

Abstract

赤外線天文衛星「あかり」に代表される圧縮型 Ge:Ga 遠赤外線検出器は、Ge に少量の Ga をドープした Ge:Ga を加圧することで検出限界波長を伸ばしている。そのため、大型の加圧機構を必要とし、大規模アレイ化 (多素子化) が困難であることや、素子ごとに感度のばらつきが生じることなどの問題を抱えている。これらの問題を解決し、 $200\ \mu\text{m}$ 以上の検出限界波長を持つ大規模アレイ検出器を実現させるために、Blocked Impurity Band (BIB) 型 Ge 検出器の開発を行っている。BIB 型 Ge 検出器は、Ga を高濃度ドープさせることで生じる不純物バンドにより、価電子帯と不純物準位のエネルギー差である不純物深さが小さくなることを利用して検出限界波長を伸ばしている。また、バンドの形成に伴い発生する暗電流をブロックするために、高濃度 Ge:Ga (p^+ 層) に高純度 Ge (i 層) を接合させた構造を持つ。この構造により、加圧機構を必要としない大規模アレイ検出器が実現可能である。三菱重工株式会社を持つ表面活性化常温ウエハ接合技術を用いて、 p^+ 層と i 層の急峻な濃度勾配を持つ接合面を実現させた BIB 型素子を作製することができる。我々は、この技術を用いて BIB 型素子と同等の構造を持つ p^+i 素子を試作し、これらの素子に対し、フーリエ分光器を用いた波長感度測定と、Hall 効果測定を行うことで、検出限界波長を評価した。波長感度測定の結果より、Ga 濃度が「あかり」に使用された Ge:Ga よりも 2 桁高い $1 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ の p^+ 層を用いた p^+i 素子は $160\ \mu\text{m}$ の検出限界波長を持ち、非圧縮型 Ge:Ga 検出器よりも長い波長まで感度を有することが判明した。また、Hall 効果測定の結果より、 $200\ \mu\text{m}$ 以上に感度をもたせるためには、 $8 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ 以上の Ga 濃度が必要となることが明らかとなった。今後は、 p^+i アレイ素子を作製し、その評価を進めていく。

1 遠赤外線検出器

1.1 従来型の遠赤外線検出器

遠赤外線検出器として半導体の Ge に 3 価の不純物として Ga をドープした Ge:Ga が、一般的に用いられてきた。この検出器では、Ga をドープすることにより形成される不純物準位への励起を利用して、遠赤外線のエネルギーを持つ光子を検出できる。

Ga 濃度を赤外線天文衛星「あかり」に搭載された検出器と同等の $2 \times 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$ とした Ge:Ga では、 $115\ \mu\text{m}$ の光を検出することができる。これより長波長側の光を検出するために、「あかり」に搭載されていた遠赤外線検出器では、Ge:Ga を加圧し、価電子帯上端のエネルギー準位の縮退を解くことにより、検出限界波長を長波長側に伸ばしていた。しかし、この方法では、圧力差によりピクセルごとに波長感度のばらつきが生じることや、大型の加圧機構により大規模アレイ化が困難であることなどの問題を抱えている。

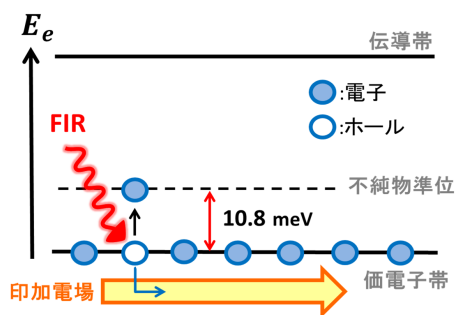


図 1: Ge:Ga 半導体のバンドダイアグラム。

1.2 BIB 型遠赤外線検出器

従来型の遠赤外線検出器の抱える問題を解決し、 $200\ \mu\text{m}$ 以上の検出限界波長を持つ大規模アレイ検出器を実現するために、Blocked Impurity Band (BIB) 型 Ge 検出器の開発を進めている。BIB 型 Ge 検出器は、図 2 に示すように、Ga を高濃度ドープした高濃

度 Ge:Ga 層 (p^+ 層) と高純度 Ge 層 (i 層) を接合させた構造を持つ。Ga 濃度を上げることで不純物準位をバンド化させ、不純物深さを小さくすることで検出限界波長を伸ばすことができる。一方で、不純物バンド内をホッピング電流という暗電流が流れるため、高純度 Ge を接合することで暗電流をブロックしている。接合には、三菱重工業株式会社の持つ、表面活性化常温ウエハ接合技術を用いており、従来の接合方法で生じた Ga の熱による拡散を防ぐことで、ブロック性能の良い BIB 型 Ge 検出器の作製が可能である。

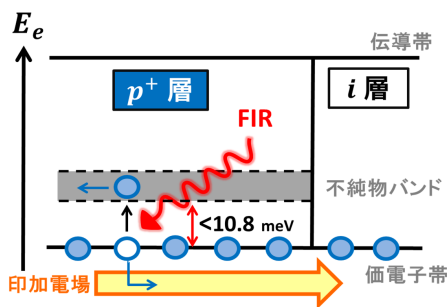


図 2: BIB 型 Ge 検出器の光検出原理。

2 測定方法

BIB 型 Ge 検出器の開発の一環として、BIB 型素子と同等の構造を持つ p^+i 素子を試作し、検出限界波長を調べるために、波長感度測定と、ホール効果測定を行った。

2.1 波長感度測定

目標とする 50~200 μm の遠赤外線を測定する上で、常温の熱源からの放射はノイズとなるため、測定は極低温下で行う必要がある。本測定では、図 3 に示すクライオスタットを用いて、測定素子を冷却し、クライオスタット外部のフーリエ分光器からの光を入射することで、波長感度特性を取得した。測定素子は、表 1 に示す 4 つの種類がある。

本測定では、「あかり」に搭載されていた Ge:Ga と同等の Ga 濃度のバルク素子と、 p^+i 素子の波長感度特性を比較することで、 p^+i 素子の波長感度帯の

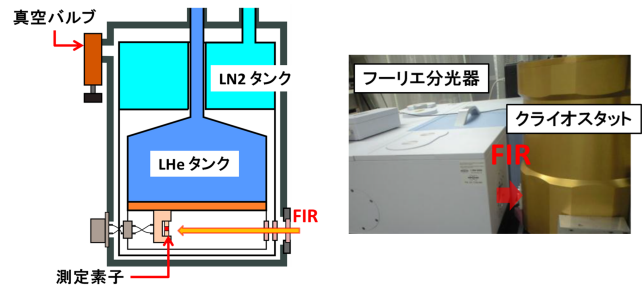


図 3: 波長感度測定に用いるクライオスタットの構造とフーリエ分光器を用いた測定の様子。

表 1: 波長感度測定の測定素子を示す。サイズは全て 1 mm 角である。

測定素子	Ga 濃度 (各層の厚み)	備考
バルク	$2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ (1 mm)	
p^+i	$1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ + non-doped (0.5 mm) + (0.5 mm)	
薄層化 p^+i	$1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ + non-doped (0.5 mm) + (0.05 mm)	
透明電極 p^+i	$4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ + non-doped (0.5 mm) + (0.5 mm)	i 層側に透明電極

拡張を確認する。また、 p^+i 素子の i 層を 1/10 の厚みにした薄層化 p^+i 素子を用いて、薄層化による性能の違いを評価する。さらに、アレイ化の際には、光を i 層側の透明電極正面から入射させるため、赤外線に対して十分な透過性をもつ透明電極を用いた、透明電極 p^+i 素子の性能を評価する。

2.2 Hall 効果測定

Ga 濃度の違う Ge:Ga について Hall 効果測定を行うことで、不純物深さを調べた。Hall 効果測定は、磁場をかけた半導体に電流を流すことで発生するローレンツ力と静電力のつり合いの関係から、物理特性を測定する手法である。測定に用いたクライオスタットは、磁場印加用の磁石を取り付けられる構造を持ち、冷媒である液体ヘリウムの流量の調整と、クラ

イオスタット内部に取り付けているヒーターによる温度の調整を行う (図 4)。

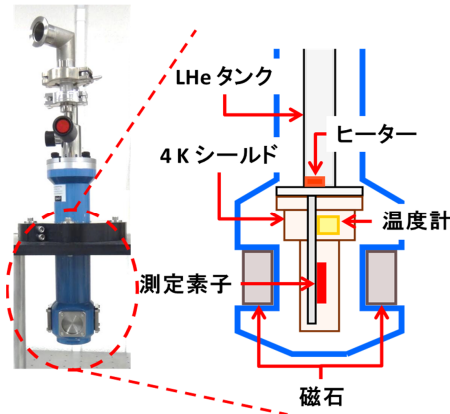


図 4: Hall 効果測定に用いたクライオスタットの構造。

測定素子は Ga 濃度の異なる 3 つの種類があり、図 5 に示すような形状の半導体であるため、薄膜の測定に適した van der Pauw 法を用いて測定した。

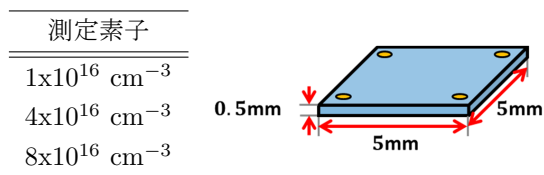


図 5: Hall 効果測定の測定素子の Ga 濃度と形状。

不純物深さを求めるために、キャリア密度の温度依存性を測定する。キャリア密度 p は、Hall 効果測定の結果より以下の式で導出することができる。

$$p = \frac{BI}{qtV_H} \quad (1)$$

ここで、 B 、 I はそれぞれ測定素子に印加した磁場と流した電流、 q は素電荷量、 t は測定素子の厚さ、 V_H は Hall 効果により発生した電圧を示す。

3 結果・考察

3.1 波長感度測定

4 つの測定素子についての波長感度測定の結果を図 6 と表 2 に示す。

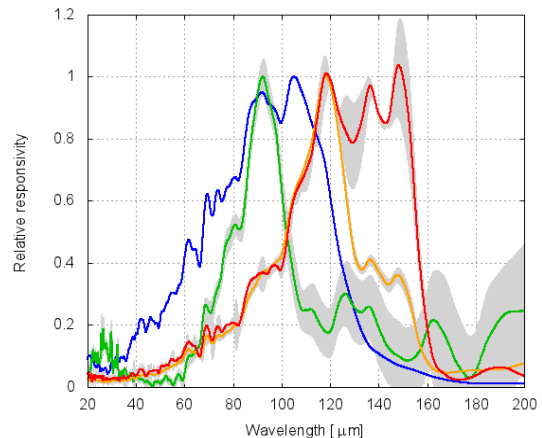


図 6: 各測定素子の波長感度特性。縦軸は感度をピークで規格化しており、横軸は波長 [μm] を示す。青がバルク、黄色が p^+-i 、赤が薄層化 p^+-i 、緑が透明電極 p^+-i の結果、灰色は各素子の 1σ の誤差を示す。

表 2: 各測定素子の印加電圧と検出限界波長。

測定素子	測定温度	印加電圧	検出限界波長
バルク	2.8 K	25 mV	120 μm
p^+-i	2.8 K	1.5 V	160 μm
薄層化 p^+-i	3.4 K	600 mV	160 μm
透明電極 p^+-i	4.5 K	1 V	100 μm

結果より、従来型のバルクに比べて、 p^+-i は長波長側に感度が伸びていることが確認でき、かつ、 i 層を薄層化することにより、長波長側の感度が上昇することが分かった。透明電極 p^+-i では、長波長側への伸びは見られなかったが、波長感度特性を得ることができたことから、透明電極は遠赤外線に感度を持たず、正しく動作していることが確認できた。

3.2 Hall 効果測定

4 K ~ 300 K のキャリア密度の温度依存性を測定した。キャリア密度の温度依存性は、不純物深さ E_A を用いて (2) のように表せる。

$$p \propto \exp\left(-\frac{E_A}{2k_B T}\right) \quad (2)$$

ここで、 k_B はボルツマン定数、 T は温度を示す。図 7 に示す測定結果を (2) で fitting することにより、不純物深さを導出した。なお、低温の領域では、ホッピング電流が支配的となるため、fitting 範囲からは除外している。導出した不純物深さとそこから予測される検出限界波長を表 3 に示す。

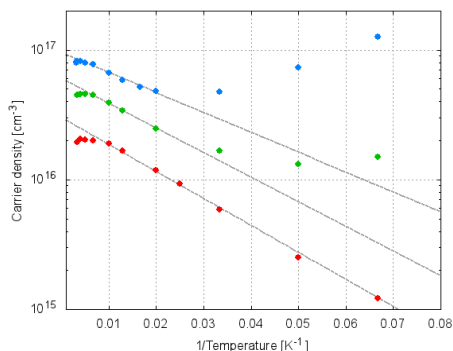


図 7: Hall 効果測定により得られたキャリア密度の温度依存性。縦軸がキャリア密度 [cm^{-3}]、横軸が温度の逆数 [K^{-1}] を示す。赤が $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、緑が $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、青が $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、灰色の点線は fitting 結果を示す。

表 3: 各測定素子の不純物深さと検出限界波長。

Ga 濃度	不純物深さ	検出限界波長
$1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	$7.3 \pm 0.1 \text{ meV}$	$150 \mu\text{m}$
$4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	$6.8 \pm 0.1 \text{ meV}$	$160 \mu\text{m}$
$8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	$5.9 \pm 0.1 \text{ meV}$	$200 \mu\text{m}$

結果より、Ga 濃度が $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ のとき、検出限界波長は $150 \mu\text{m}$ となり、波長感度測定で得られた結果と整合性が確認できた。したがって、本測定により導出された結果は、信頼性の高いものであるといえる。また、 p^+ 層の Ga 濃度を $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ とすると、検出限界波長を $200 \mu\text{m}$ まで伸ばせることが予測され、BIB 型 Ge 検出器開発において、 p^+ 層の Ga 濃度を $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以上とする必要があることが分かった。

4 今後の展望

本測定によって得られた結果をもとに、 p^+ - i 素子の構造を変更する。図 8 に示すように、 p^+ 層の Ga 濃度を $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ とし、 i 層を薄層化する。さらに、透明電極を使用した上で、 i 層側からの光を照射する構造とする。

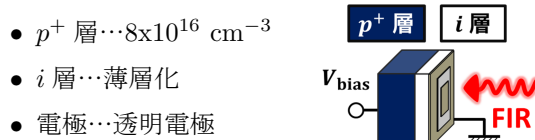


図 8: 今後、作製予定の p^+ - i 素子の構成。

新たに作製した p^+ - i 素子の必要性能の確認後、 5×5 のアレイ検出器の作製と、その評価を行い、BIB 型 Ge 検出器の開発を進める。

5 まとめ

我々は、 $200 \mu\text{m}$ 以上の検出限界波長を持つ大規模アレイ検出器の実現をめざし、BIB 型 Ge 遠赤外線検出器の開発を進めている。BIB 型 Ge 検出器は、高濃度 Ge:Ga 層 (p^+ 層) と、高純度 Ge 層 (i 層) を接合させた構造であり、表面活性化常温ウエハ接合を用いて、 p^+ - i 素子を作製している。

本研究では、試作素子の検出限界波長を評価するために、波長感度測定と Hall 効果測定を行った。測定結果から、 i 層を薄層化し、 p^+ 層の Ga 濃度を $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以上とする必要があることが分かった。今後は、以上の結果を受けて構造を変更した素子の作製と評価を行い、 5×5 のアレイ検出器の実現を目指す。

Reference

Kaneda, H., et al. *Japanese Journal of Applied Physics*, 50, 066503 (2011)

Suzuki, T., et al. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 124, 823 (2012)

Watanabe, K., et al. *Japanese Journal of Applied Physics*, 50, 015701 (2011)