

1.Introduction

現在、波長 100-200 μm に渡る遠赤外線での天体観測を行う際は、主に圧縮型 Ge:Ga 検出器という量子型検出器が用いられている。この検出器は、Ge に Ga をドーピングした P 型不純物半導体を用いており、内部光電効果により励起されたホールを読み出すことで、遠赤外線を検出する。感度を持つ波長帯は 50~110 μm で、素子に圧力を加えることで、220 μm ほどまで感度を持つようになる。このような、圧力を加えた Ge:Ga 検出器を、圧縮型 Ge:Ga 検出器と呼んでいる。

しかし、この検出器はいくつかの問題点を抱えている。一つ目は、圧力をかけるために、大きな加圧機構が必要となり、多素子化が困難であることである。また、素子一つ一つに別々に圧力を加えるため、素子の性能にばらつきが生じてしまうことも挙げられる。二つ目に、宇宙放射線の影響が挙げられる。図 1 に、その影響が載せられている。放射線を照射している間、スパイク状のノイズが乗ってしまうことや、照射を止めた後でも、最初と比べて感度が大きく変化してしまっていることが分かる。また、元の感度まで自然に回復するためかなりの時間がかかっており、観測に大きな影響を与えてしまう。三つ目に、過渡応答特性が悪いことが挙げられる。図 2 にその影響が載せてある。これは、「あかり」衛星に搭載されている Ge:Ga 検出器の光応答を表している。図を見ると、光の入射に対して瞬時に応答できず、かなり長い時間をかけなければ出力が安定しないことが分かる。また、この振る舞いは、補正を行うことが困難であるため、観測データの信頼性が損なわれてしまう。

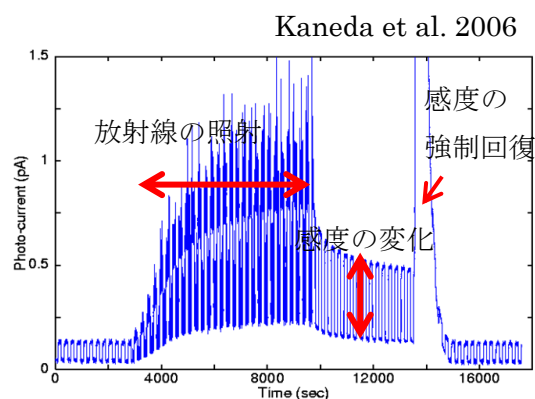


図 1 宇宙放射線の影響

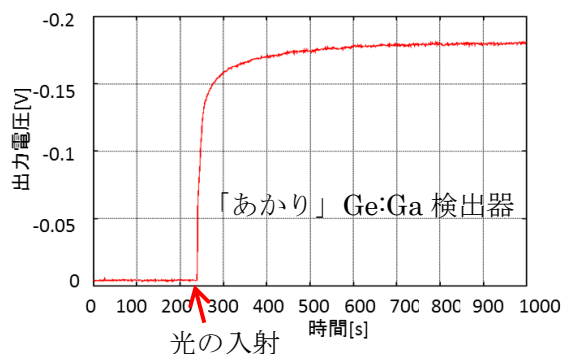


図 2 Ge:Ga 素子の光に対する応答

我々は、これらの問題点を解決するための新しい検出器として、BIB(Blocked Impurity Band)型 Ge:Ga 検出器を考案している。この検出器は、Ga を高濃度ドーピングした Ge:Ga 層(Ga 濃度 10^{16} cm^{-3})と、ホッピング電流と呼ばれる暗電流を防ぐための、高純度 Ge 層を張り合わせた構造をしている。

この検出器の特徴として、以下のようなことが挙げられる。高濃度ドーピングした受光層は、薄くした場合でも十分な感度が得られるため、小型化が可能であり、放射線の衝突確率を減少させることができる。また、ドーピングを増やすことにより Ga 間の距離が縮まるため、不純物準位がつながり、幅を持ったバンドを形成する。これによって、価電子帯とのエネルギーギャップが縮まるため、圧力かけることなく長波長側へ感度を持つようになる。また、つながった不純物バンド上を電子が移動できるようになるため、電子もキャリアとして取り出せるようになり、過渡応答が小さくなる。

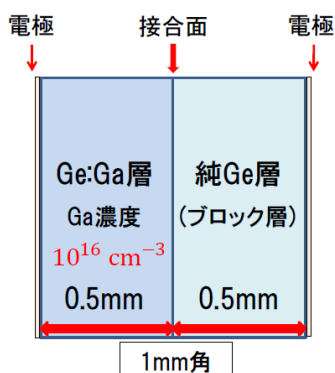


図3 BIB型 Ge:Ga 素子の概略図

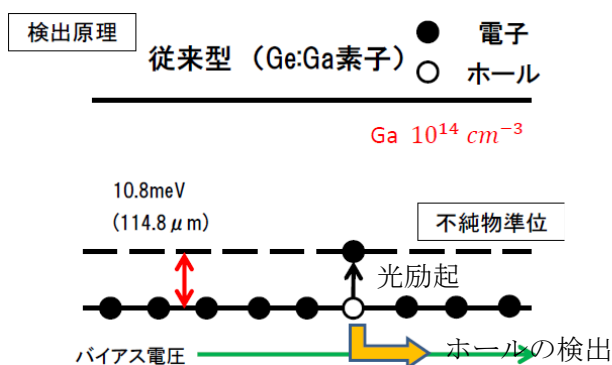


図4 Ge:Ga 素子のバンド構造
遠赤外線によって励起されたホールを読み出す。

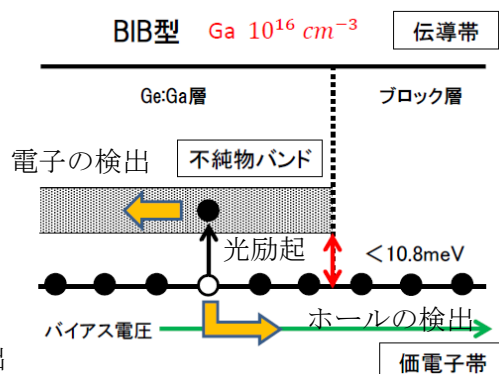


図5 BIB型 Ge:Ga 素子のバンド構造
ドーピング量の増加により、不純物準位がつながりバンドになる。

このように、BIB 型素子は、従来の Ge:Ga 素子の問題点を解消する検出器として期待されている。

BIB 型素子は、過去の研究において、その性能を評価された。しかしその素子は、2つの層を高温下で接合することで作製していたため、Ge:Ga 層から純 Ge 層への Ga の熱拡散が起きてしまい、性能の低下が見られた。我々は、その問題を解決するために、三菱重工業による、表面活性化常温ウェハ接合を用いて、素子の作製を行った。この接合法は、素子表面の酸化膜などをイオンビームや中性原子ビームを照射することで除去し、むき出しになった結合手同士を接触させることで、接合を行う。そのため、常温で接合することができ、Ga の熱拡散をふせぐことができる。

我々は、MHI、ISAS/JAXA と共同で、常温ウェハ接合を用いた BIB 型 Ge:Ga 素子の作製を行った。本講演では、その性能評価試験の結果について、報告を行う。

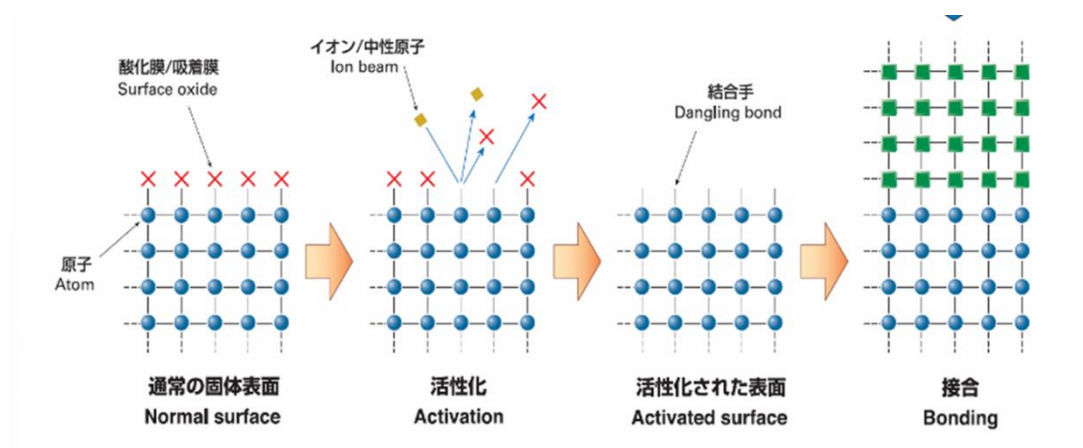


図6 常温ウェハ接合の接合方法
三菱重工業株式会社ホームページ

http://www.mhi.co.jp/products/pdf/wafer_bonding_machine_01.pdf

2. 研究目的

常温ウェハ接合を用いて作製した BIB 型 Ge:Ga 素子の性能評価試験を行う。いくつかの性能については、先行研究 (Kaneda et al.(2011)) において示されている。本研究では、フーリエ分光器を用いた波長感度特性の評価を行った。波長感度特性は、素子がどの程度のエネルギーの光子まで検出できるかを示す特性であり、本研究では、BIB 型素子の特徴である、120 μm より長波長側の感度の伸びが実現されているかを調べた。

3.実験

以下の3つの素子に対し、フーリエ分光器を用いた波長感度特性取得実験を行った。

- ・従来型 Ge: Ga(非圧縮) Ga 濃度 : 10^{14} cm^{-3}
- ・接合型 Ge: Ga Ga 濃度 : $10^{14} \text{ cm}^{-3} + 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
- ・BIB 型 Ge: Ga Ga 濃度 : 10^{16} cm^{-3} + ブロック層

なお、接合型は、従来型の素子と同じドープ量の2つの層を、単純に張り合わせた構造をしている。そのため、従来型と比較を行うことで、接合面がどのような影響を与えるかを議論することができる。

素子は、クライオスタットという容器に入れ、極低温に冷却して実験を行う。これは、常温では素子に流れる熱電流や、周りの物体から放射される遠赤外線で、シグナルが見えなくなってしまうからである。容器を真空引きし、最終的には液体ヘリウムで 2 K まで冷却して実験を行う。

光源には、フーリエ分光器の干渉光を用いた。マイケルソン干渉計の原理に基づき、光路差を時間変動させることで、各波長の光が特定の周期で強弱するため、その重ね合わせの光はインターフェログラムという干渉光になる。この干渉光を素子に入射させ、応答をフーリエ変換することで素子の波長感度特性を得ることができる。

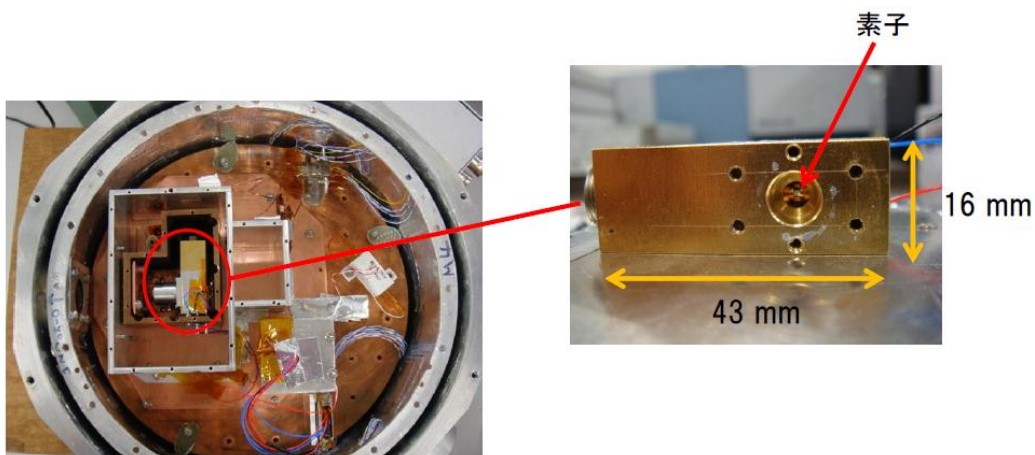


図7 実験の様子

左の写真の円い容器がクライオスタット。内部を真空引きし、液体ヘリウムを用いて 2 K まで冷却する。右の写真は、赤円の部分の拡大図。矢印の先の部分に素子を入れる。光は容器外から入射させ、遠赤外線だけが素子に入射するように、光学フィルターを取り付けてある。

4.試験結果

フーリエ分光器の干渉光を3つの素子に入射させ、応答を測定した。測定結果に対して、光源やフィルターなどの波長特性を補正することで、素子の波長感度特性を求めた。図8がその結果である。横軸は波長(μm)、縦軸は面積が1になるように規格化してある。

まず、従来型素子の特性を見る。従来型の素子は、価電子帯と不純物準位のバンドギャップが 10.8 meV 程度なので、 $115 \mu\text{m}$ までの光を検出できると考えられる。また、格子振動により、 $50 \mu\text{m}$ より短い波長の光子は吸収されてしまうため、 $50 \mu\text{m}$ 以下は感度を持たなくなると予想される。得られた波長感度は、 $115 \mu\text{m}$ 付近にピークを持ち、長波長側は急に感度が低下し、短波長側は $50 \mu\text{m}$ 辺りまで感度を持つことが見られるため、素子の特性をよく表した結果が得られたと言える。

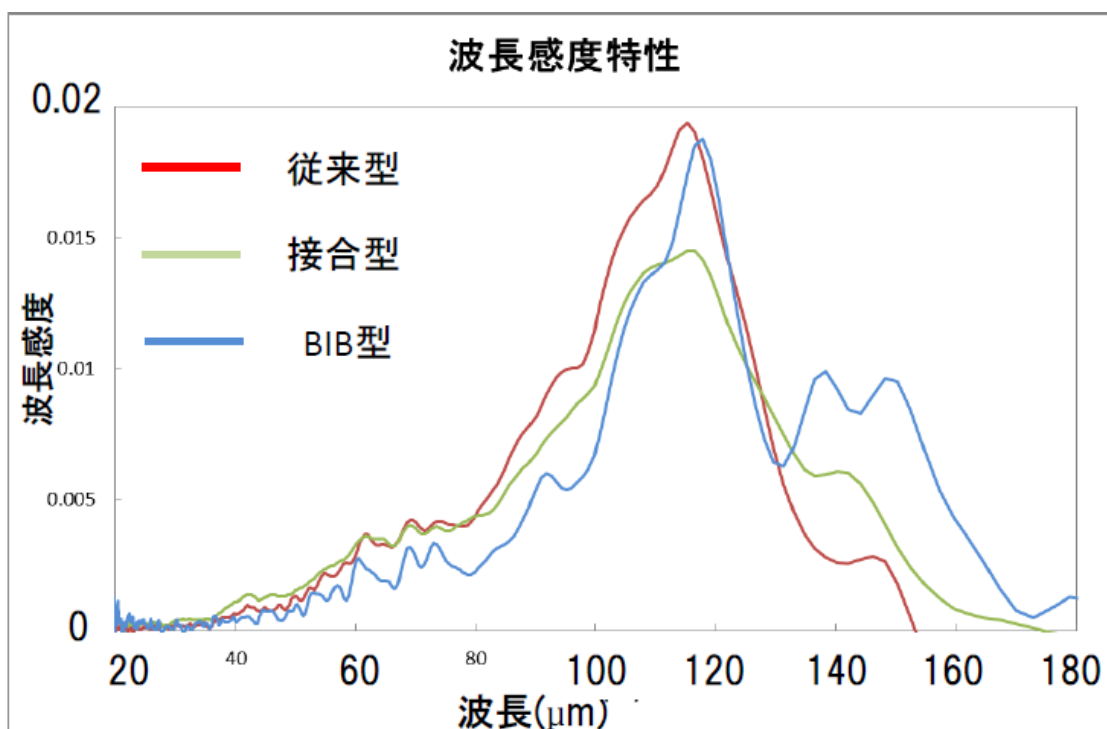


図8 各素子に対する波長感度特性

次に、接合型素子の特性を見る。接合型の素子は、従来型の素子を張り合わせた構造をしているので、波長感度特性は従来型の特性に準ずると予想される。図9より、130 μm より長波長側の感度が、従来型よりよくなっていることが見られる。しかし、その感度の増加はあまり大きくないため、基本的には従来型と変わらない波長感度特性を持つと言え、接合面の影響はないと考えられる。長波長側へのわずかな感度の伸びは、接合面における内部応力や、接合の際の格子欠陥などといった原因が考えられる。

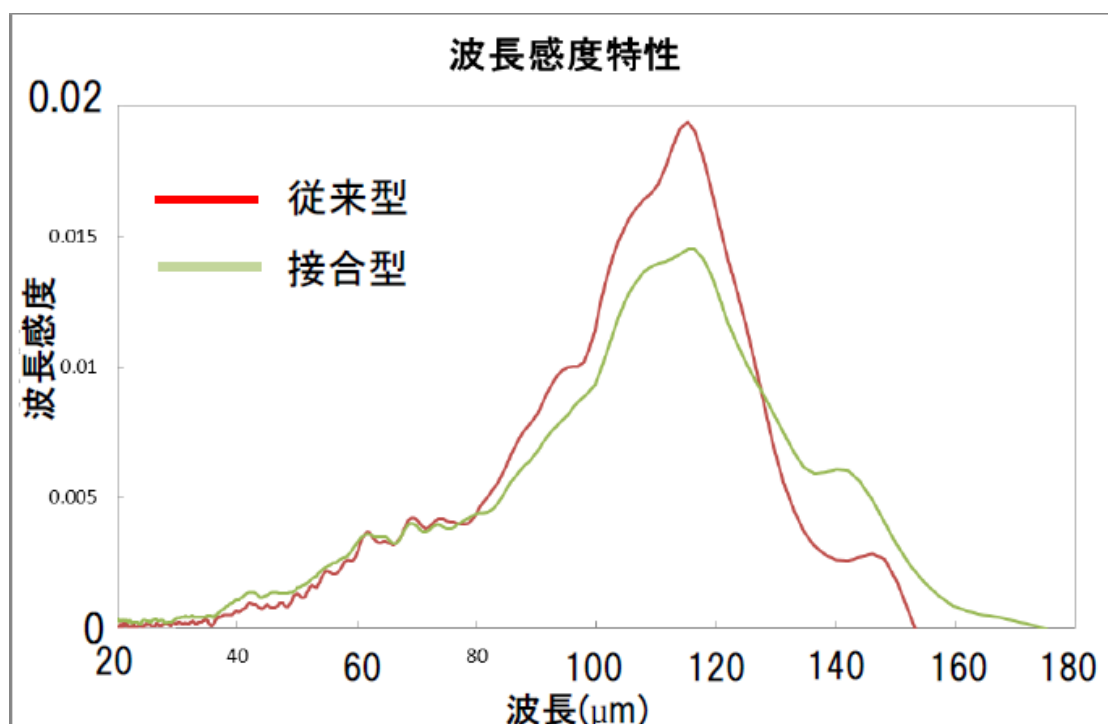


図9 従来型と接合型の比較

次に、BIB型素子の特性を見る。従来型素子と比較すると、130~170 μm 辺りの感度の増加が顕著に見られることや、感度のピークの波長が、わずかに長波長側にずれていることが見られる。これは、先に述べた、BIB型素子の高いGa濃度に起因するものであると考えられるため、BIB型素子として期待される特性を示していると言える。120 μm より短い波長で感度が低下しているのは、キャリア生成における130~170 μm 帯の寄与が大きくなり、相対的に低下したためである。

さらに細かく波長感度特性を見ると、130 μm 辺りに谷、140,150 μm 辺りに山ができていくことがうかがえる。BIB型素子の特徴を踏まえると、ピークの波長より長波長側は、なだらかに感度が低下していくと考えられるので、これらの谷や山ができる原因を調べる必要がある。そのため、今後の計画として、BIB型素子の2つの層の、それぞれの特性を調べる予定である。

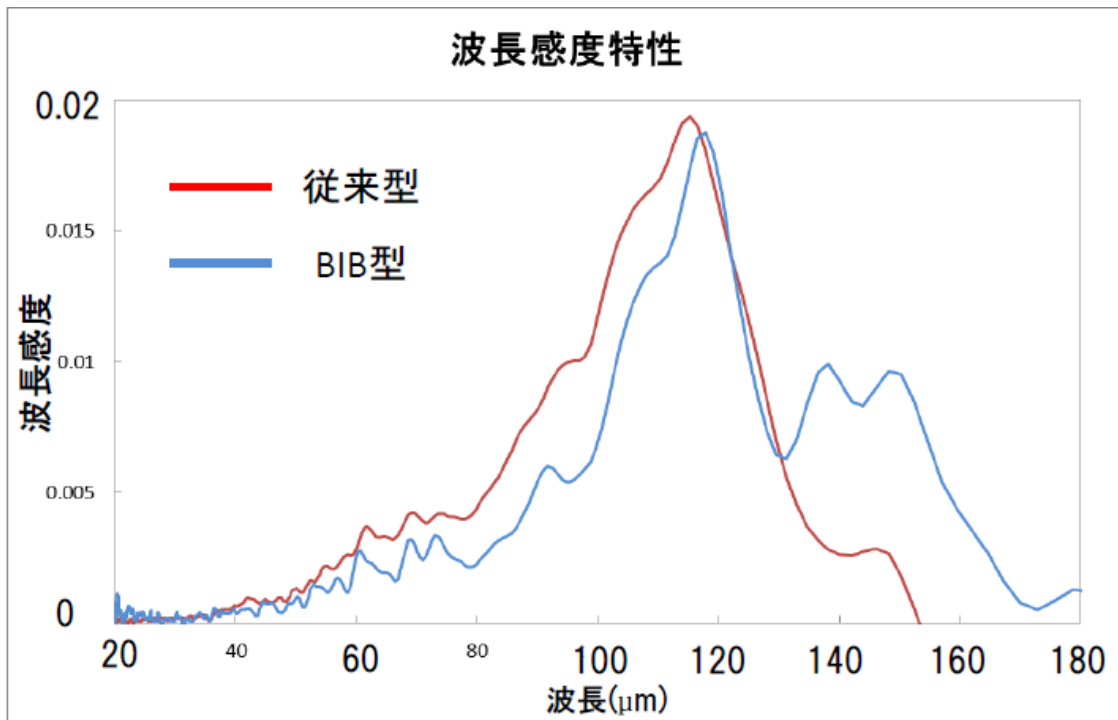


図 1 0 従来型と BIB 型の比較

5.まとめ

常温ウェハ接合技術を用いて作製した BIB 型 Ge:Ga 検出器の波長感度特性の測定を行い、従来型素子との比較などをして、その性能の評価を行った。結果、130 μm より長波長側の感度の伸びが見られたため、BIB 型素子として期待される性能を持つことが分かった。また、素子を接合する際にできる接合面の影響は、ほとんどないことが示された。今後は、高ドーパ Ge:Ga 層(10^{16} cm^{-3})や純 Ge 層の特性を測定し、BIB 型素子の波長感度特性の細かい特性の評価を行いたい。