

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 24 年 6 月 15 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22740129

研究課題名（和文）天文衛星搭載に向けた SIS フォトン検出器の超高感度化

研究課題名（英文）Development of a high-sensitive SIS photon detector on board future space astronomical satellites.

研究代表者

鈴木 仁研 (SUZUKI TOYOAKI)

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：30534599

研究成果の概要（和文）：

近年では、観測周波数 5-10 THz (30-60 μm) 帯での天体観測の実現が特に重要視されている。本研究の目的は、超高感度テラヘルツ波検出器の開発である。MBE(Molecular Beam Epitaxy)技術を導入し、BIB型 Ge 検出器の 1.5-10 THz 帯の光検出の超高感度化を目指した。

BIB型 Ge 検出器の超高感度化への2大課題点である(1) 超高純度かつ極薄な Ge 膜の形成および、(2) 高性能な透明電極の形成に対して、MBE 技術を導入したことで、初めて要求を満たすことができた。

研究成果の概要（英文）：

The wavelength region from mid- to far-Infrared (30-200 μm) gets a lot of attention in the field of astronomy. The goal of this research is to develop a high-sensitive THz detector. By using the MBE (Molecular Beam Epitaxy) technology, I addressed the development of BIB-type Ge detectors that have high sensitivity in mid-to-far-infrared (1.5-10 THz). There are two big issues to develop the detectors; fabrication of (1) an ultra-pure Ge thin layer on an active layer and of (2) a high performance transparent electrode. For the first time, their bottlenecks are overcome with the MBE technology.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
H22 年度	500,000	150,000	650,000
H23 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,800,000	540,000	2,340,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：天文、テラヘルツ、量子型検出器、MBE

1. 研究開始当初の背景

近年のテラヘルツ波帯での観測において、極めて重要かつ切望視されているのが、周波数 5-10 THz (30-60 μm)帯における観測である。同周波数帯には、近傍銀河からの暖かいダスト成分(~60 K)からの熱放射のウイ

ーン領域からピークをカバーする。同成分の光度は星形成率と非常に良い相関がある (Suzuki et al. 2010)。暖かいダスト成分の光度はダスト温度の5乗に比例するために、暖かいダスト温度の決定精度が星形成率の決定精度に大きく影響する。5-10 THz での

観測の実現によって、ダスト温度の決定精度が劇的に向上すると期待される。また、同周波数帯には、星間空間における物理状態を知り得る重要な輝線が存在する。例えば、[SiII]35 μm や [OI]63 μm は、しばしば、衝撃波が立つ領域で強く観測される。衝撃波領域では、星間物質の生成や破壊、星形成の誘発が起き得る。こうした連続光や輝線の観測が宇宙の物質輪廻の解明に欠かせない重要な情報源となる。この周波数帯は大気吸収により地上観測は困難であり、飛行体を用いた観測が必須となる。

しかしながら、周波数 5–10 THz (30–60 μm) 帯における観測は、同周波数帯に高感度な検出器がないために、皆無である。近年の検出器開発研究の進展において、BIB(Blocked Impurity Band) 型ゲルマニウム(Ge) 検出器が SIS 検出器よりも、同周波数帯において、感度を大きく凌駕する性能を示すことが明らかになりつつある(Kaneda et al. 2011)。

2. 研究の目的

本研究は、超高感度テラヘルツ波検出器の開発という同一研究目的のもとで、観測天文学の重要性および、BIB 型 Ge 検出器の開発の急展開を考慮し、BIB 型 Ge 検出器の超高感度化を目指す。

3. 研究の方法

BIB 型 Ge 検出器は、遠中間赤外線を吸収する active layer と暗電流を低減する blocking layer の 2 層構造で構成される。Active layer は、Ge に不純物(例えばガリウム Ga)を impurity band が形成する程度まで高濃度($\sim 10^{16}/\text{cc}$)に添加した Ge 外因性半導体である。結果、5–10 THz と広い周波数帯で高光感度な層ができる。さらに、Ge 真性半導体を blocking layer として設けることで、active layer の impurity band を介した暗電流を劇的に低減することができる。結果、高い S/N を有する光検出が可能となる。

超高感度な BIB 型 Ge 検出器への現段階における開発ポイントは大きく 2 つ存在する：(1) blocking layer として、極薄($\leq 1 \mu\text{m}$)で超高純度な Ge 膜形成の実現(キャリア濃度 $\leq 10^{14}/\text{cc}$)、(2) 光感受層に遠中間赤外線を高開口率かつ高透過率で導入するための透明電極の実現。

(1) に関しては、従来法である LPE(Liquid Phase Epitaxy)、CVD(Chemical Vapor Deposition)、や、ion implantation 法を用いて試みてきたが、いずれも実現困難であった。また、(2) に関しては、透明電極として、Ge に高濃度($10^{14-19}/\text{cc}$)にドーピングした層を ion implantation 法で形成してきた。しかし、透明電極への要求として、検出器動作温度である 4 K 以下で(2)–①高い遠中間赤外線透過

率、(2)–②低い比抵抗、および(2)–③良好なオーミック接触の全てを満たし得ないという問題がある。

本研究では、低温プロセスで超高純度かつ極薄な結晶成長を得意とする(Molecular Beam Epitaxy) 法を導入することで、(1)および(2)の問題点を解決する。

4. 研究成果

(1) Ge 表面洗浄

Ge 膜形成用ソースや、Ge 基板の有機・無機物洗浄による清浄な表面出しとその維持を確立させた。例えば、洗浄後のカーボン残留量は 0.08 monolayers であり、最高水準の清浄度を達成している。洗浄後から結晶成長までの清浄面維持のための保護膜形成として、UV 照射法を導入した。結果、従来のウエット処理による保護膜形成よりも、Ge 表面が荒れることなく(P-V で数 nm) 均一な保護膜ができた。表面洗浄とその維持は本研究の達成のための重要な工程である。

(2) 超高純度 Ge 膜の実現

超高純度 Ge 膜の形成には、蒸発源の Ge ソースが超高純度であること、Ge ソース表面汚染の除去ができていないこと、超高真空下での結晶成長であること、加熱装置の高温部分を極力少なくして out gas を低減することが要求される。本研究では、超高純度(キャリア濃度 $\sim 10^{13}/\text{cc}$ @300 K)な Ge ソースを用意し、(1)で述べた表面洗浄および保護膜形成した後、真空チャンバーへ投入した。また、MBE 真空装置に加え、真空チャンバー壁を冷却することで、さらに真空度を向上させた(クライオポンプ効果)。Ge ソースの加熱には、電子銃を用いた。

超高純度 Ge 基板(キャリア濃度 $\sim 10^{13}/\text{cc}$ @300 K)の上に、0.2 μm 厚の Ge 膜をエピタキシャル成長させた。Ge 膜の常温下でのキャリア濃度を SRA 法(Spread Resistance Analysis)にて調べたところ、 $5 \times 10^{14}/\text{cc}$ であることが分かった。Blocking layer の性能として要求される、極薄($\leq 1 \mu\text{m}$)かつ超高純度(キャリア濃度 $\leq 10^{14}/\text{cc}$)な Ge 膜のエピタキシャル結晶成長をほぼ満たす結果が得られた。

(3) 高性能透明電極の実現

高性能な透明電極を実現するためには、3 つの要求を満たさなければならない。つまり、検出器動作温度である 4 K 以下において、①高い遠中間赤外線透過率、②低い比抵抗、および、③良好なオーミック接触の実現である。①を優先する場合、Ge へのドーピング濃度を低く、ドーピング層を薄くする必要がある。しかし、一方で、②と③を実現するためには、ドーピング濃度を高くして厚くする必要があ

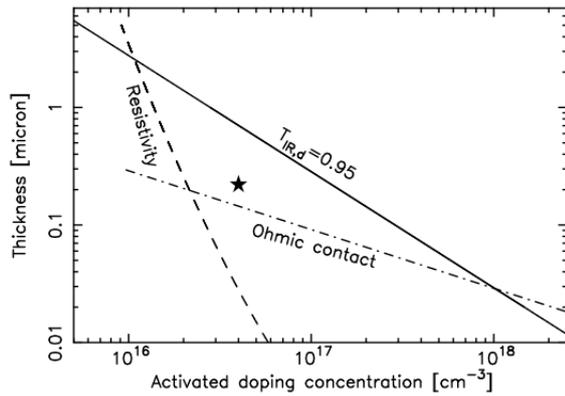


図 1. 遠中間赤外透過率(95%), 比抵抗, およびオーミック接触を満たす最適解。3本の線を囲む領域が最適解を示す。

るといふトレードオフが生じる。

これら3つの要求を満たし得る理論解をドーピング濃度とドーブ層厚さの2パラメータ空間において求めた。図1中において、遠中間赤外線透過率(実線)、比抵抗(破線)、およびオーミック接触(一点鎖線)の3本の線が囲む領域が、3つの要求を満たし得るドーブ層のドーピング濃度と厚さの最適解と予想される。この領域に位置するように MBEにてドーピング濃度と厚さを高精度に制御した。実際に得られたドーブ層のドーピング濃度と厚さを測定したところ、ほぼ期待通り、図1の星印にあることが分かった。

MBEにてエピタキシャル成長させたドーブ層に対して、温度 4 Kでの遠中間赤外線透過率、比抵抗、及びオーミック接触の測定を行った。結果、透過率に関しては、図2の通り、波長 40-200 μm 帯において、ほぼ 100% の透過率を達成した。また、比抵抗は 5 Ωcm と要求値 < 38 Ωcm を満たす結果を得た。さらに、良好なオーミック接触が得られていることも確認できた。MBEによるドーピング濃度および厚さの高い制御性によって、世界トップレベルの透明電極の実現に成功した。

(4) 本研究成果の意義と将来展望

本研究成果は、超高感度な BIB 型 Ge 検出器の実現へ向けた鍵となる技術的課題点をクリアできたことに意義がある。

①超高純度 Ge 膜の実現

極薄かつ超高純度 Ge 膜の実現は、BIB 型 Ge 検出器の超高感度化に必要不可欠である。つまり、active layer に生じる impurity band を介して流れる暗電流を低減するためには、blocking 層の超高純度化が要求される(ノイズ低減)。また、active layer に電圧を効果的に印加する(感度上昇)ためには、高

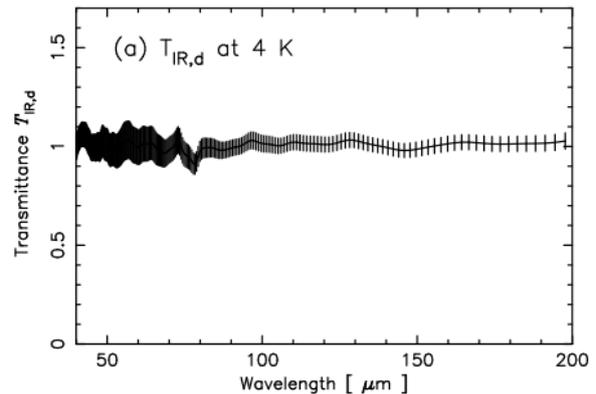


図 2. MBE で形成したドーブ層(透明電極)における赤外線透過率。

抵抗である blocking layer を極力薄くする必要がある。

多くの先行研究において、実現への技術的困難を抱えていた。本研究は新たな MBE 技術を用いて、この技術的困難をクリアし、最も重要なマイルストーンを達成できた。

②高性能透明電極の実現

BIB 型検出器の光感受層は、blocking layer-active layer 界面から僅か 10-20 μm 程度の厚さしかない。したがって、光照射を素子の側面から行う方式(側面照射型)の場合、光感受層への光の導入面積が小さく、光感度を稼げない。加えて、観測効率や精度向上の観点で、素子をアレイ状に並べた検出器カメラを考えた場合、原理的に側面照射型は採用できない。それゆえ、光照射を電極面から入射する方式(正面照射型)を導入することが必要不可欠となる。

正面照射型により、光感受層への導入面積は側面照射型よりも約 1 桁増加する(光感度増加)。また、原理的に素子をアレイ状に並べ、光検出が可能となる。本研究で高性能な透明電極が実現できたことにより、世界で初めて透明電極での光吸収なく大開口で光感受層へ光を導入可能となった。

本研究成果により、超高感度 BIB 型 Ge 検出器素子ならびに、検出器カメラの実現が望まれる。

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)

- ① Toyoaki Suzuki, Takehiko Wada, Kazuyuki Hirose, Hironobu Makitsubo, and Hidehiro Kaneda, "Molecular-beam epitaxial growth of a far-infrared

transparent electrode for extrinsic Germanium photoconductors”, PASP, 査読有, 掲載決定, 2012.

[学会発表] (計 3 件)

- ① 鈴木 仁研、他、次世代遠赤外線ゲルマニウム検出器の開発 VII～分子線エピタキシー技術による透明電極の形成とその性能評価～日本天文学会2011年秋季年会予稿集、2011年9月20日鹿児島大学
- ② 鈴木 仁研、他、次世代遠赤外線ゲルマニウム検出器の開発 VI～分子線エピタキシー技術による透明電極の形成～日本天文学会2011年春季年会予稿集、2011年3月17日筑波大学
- ③ 長勢晃一、他、MBE技術を用いた中間-遠赤外線検出器における透明電極形成の検証、第11回宇宙科学シンポジウム、05 Jan 2011-07 Jan 2011, JAXA 宇宙科学研究所 相模原キャンパス(相模原市)

[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

鈴木 仁研 (TOYOAKI SUZUKI)

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：30534599

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：