

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：34406

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14673

研究課題名（和文）InAs系複合構造を用いた室温動作テラヘルツ波検出器の開発

研究課題名（英文）Development of room temperature operation InAs-based THz wave detectors

研究代表者

小山 政俊（Masatoshi, Koyama）

大阪工業大学・工学部・講師

研究者番号：30758636

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、高感度、広い動作周波数、速い応答速度のゼロバイアス・室温動作のテラヘルツ波検出デバイスの開発を目指して実施されたものである。一般的な電子デバイスとは異なる原理を基にした非線形な電流電圧特性を有する非対称なボウタイ形状アンテナを持つ極微メサ構造に注目し、InAs薄膜にこれを作製し、2乗検波に必要な非線形電流電圧特性の評価を行った。その結果、電界強度がより強まる形状で電界集中による電子温度上昇に起因すると考えられる非線形電流電圧特性を得た。実際にテラヘルツ波を照射した検出実験までは実施できなかったが、試作したデバイスにおいて得られた非線形な電流電圧特性から検出が期待できると考えている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ波は、空港のセキュリティーゲートでの金属探知、美術品の修復作業での非破壊検査、癌細胞の検知など多方面で応用が期待されている。しかしながら、テラヘルツ波の検出方法の選択肢はそれほど多くないことから、新たな検出デバイスを探索することは、学術的・社会的な意義が大きい。本研究では、これまで報告例が少ない非対称なボウタイ形状アンテナを持つ極微メサ構造に注目し、これまで検討されてこなかったInAs薄膜にこの特異な構造を作製し、検出に必要な非線形な電流電圧特性が得られることを示した。

研究成果の概要（英文）：This research was carried out with the aim of developing a terahertz wave detection device with high sensitivity, wide operating frequency, fast response speed, zero bias, and room temperature operation. Focusing on a micro-mesa structure with an asymmetric bowtie-shaped antenna that has non-linear current-voltage characteristics, we made this on an InAs thin film and evaluated a non-linear current-voltage characteristic that are required for square-law detection. As a result, we obtained nonlinear current-voltage characteristics that were caused by the rise of electron temperature due to electric field concentration in a neck structure in which the electric field strength is strong. Although we could not carry out a detection experiment under terahertz wave irradiation, we believe that detection can be expected from the non-linear current-voltage characteristics obtained with the prototype device.

研究分野：化合物半導体デバイス

キーワード：非線形電流電圧特性 InAs 極微構造 2乗検波

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ電磁波（以下、THz 波）は、人体に対して安全であり、様々な物質を透過する性質や、物質の構造の違いを敏感に検知できる特徴を有する。そのため、金属の探知や封書内の薬物検出を非破壊で判定できるといった防犯応用や、癌細胞の特定といった安心安全社会を実現するための重要な電磁波として急速にその応用研究が進められている。

しかしながら、THz 波は電波と光の中間周波数帯に位置することから、その発生と検出が容易ではなかった。近年、それらの手法の研究が進展し、空港のセキュリティゲートへの実用化も為されたが、未だに発生・検出法の選択肢が多いとは言えない状況である。検出について、室温で直接 THz 波を検出する方法は主に、熱で検出する方法と電界で検出する方法の 2 つがある。前者は、サーミスタやボロメーターなど、THz 波のエネルギーによる温度の上昇で検出する手法である。一方、後者は、ショットキーダイオードなどの電流を整流することによって検出する手法であり、電流電圧特性の 2 次の項を利用して検出する 2 乗検波を使用する。これら検出器は、高感度のもは動作温度が極低温に限られること、また、室温動作可能なものは感度や動作周波数の点で一長一短の特徴を有しており、新たな検出デバイスの探索が期待されている。

2. 研究の目的

本研究は、高検出感度、広い動作周波数、速い応答速度のゼロバイアス・室温動作の新たな THz 波検出デバイスの開発を目指して実施されたものである。本研究の目的は、高い電子移動度を有する化合物半導体である InAs の薄膜に非対称なボウタイ形状アンテナを持つ極微メサ構造（ボウタイダイオード）を作製し、その非線形な電流電圧特性を利用した新たな THz 波検出のためのデバイスを開発することである。

これまで、ボウタイダイオードを用いたテラヘルツ検出は、欧州の研究グループを中心に GaAs 系ヘテロ構造や InGaAs 系ヘテロ構造に試作・評価された結果が報告されてきたが、本研究では III-V 族半導体の中でも最も電子移動度の高い材料の一つである InAs に注目し、その高い電子移動度を利用した高速で応答可能なボウタイダイオードを開発することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、ボウタイダイオードを作製するために、分子線エピタキシー法を用いて、半絶縁 GaAs (100) 基板上に高品質の InAs 薄膜を結晶成長した。この InAs 薄膜に、フォトリソグラフィ法とウェットエッチング法、電子線蒸着法を用いてボウタイダイオードを作製した。ボウタイダイオードの非線形な電流電圧特性は、メサ構造において最もチャンネルの幅が狭いネック部において、電界の非対称性が生じることによって発生する。アンテナと兼用のオーミック電極に対し、InAs チャンネルのメサ構造が狭窄されたネック部をもつ非対称な構造をもつため、電圧を印加する方向によってネック近傍での電界プロファイルが異なり、不均一なキャリア加熱がネック近傍で発生するため、電流電圧特性が非線形になる。そのため、オーミック電極間の距離に相当する非対称なメサ形状の InAs チャンネルの長さ（電極間距離 x ）と、最もチャンネル幅の狭いネック部の幅 d を変化させた複数のボウタイダイオードを作製し、形状が電流電圧特性における非線形性に及ぼす影響を調べた。ボウタイダイオードの模式図と、作製したボウタイダイオードの電子顕微鏡像を図 1 に示す。

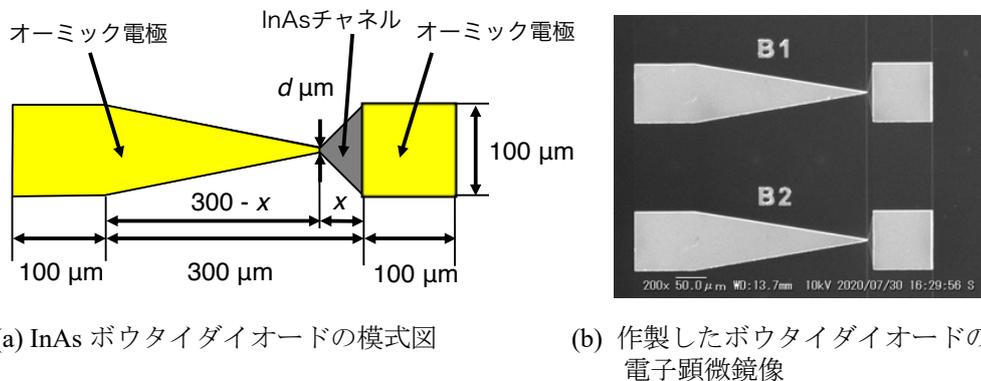


図 1. InAs ボウタイダイオードの模式図と電子顕微鏡像

4. 研究成果

GaAs (100) 基板上に分子線エピタキシー法で成膜した InAs 薄膜(厚さ 1 μm)を使用して、非対称メサ構造を作製し、ボウタイダイオードの電流電圧特性を評価した。ホール効果測定から求めた InAs

薄膜の電子移動度と電子濃度は、それぞれ $7,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 、 $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ であった。非対称なメサ形状の InAs チャネル部 (図1 a 灰色部) は、薄膜にかかる電界強度を強めるため、電子移動度が低下しない厚さまでリセスエッチング (エッチング深さ 約 430 nm) を行った。測定した電流電圧特性から、ゼロバイアス近傍における非線形性を評価するために曲率係数 (Curvature, γ) を以下の式から求めた。

$$\gamma = \left(\frac{d^2 I}{dV^2} / \frac{dI}{dV} \right)_{V=0}$$

ネック幅 d を $2 \mu\text{m}$ に固定し、電極間距離 x を変化させた試料の電流電圧特性と曲率係数を図2に示す。電流電圧特性から、 0 V を中心として明瞭な非線形な電流電圧特性が得られていることがわかる。この 0 V 近傍での非線形性を表す曲率係数では、電極間距離が短くなるに従って曲率係数が増加した。次に、電極間距離を最も大きな曲率係数が得られた $5 \mu\text{m}$ に固定し、ネック幅 d を変化させた試料の電流電圧特性から求めた曲率係数を図3に示す。ネック幅 d が狭窄されるにつれて曲率係数が大きくなることが分かった。これらの結果から、ボウタイ構造のネック近傍での電界変化がより大きくなる形状の試料で、非線形性の強い結果が得られることが分かり、電界強度の制御が重要であることを示唆する結果が得られた。

本研究においては、研究課題期間中に作製した試料に THz 波を照射して検出特性を評価する実験まで実施できなかったが、InAs ボウタイダイオードで得られた曲率係数は、Palenskis らの InGaAs/InP ヘテロ構造に作製された非対称メサ構造のボウタイダイオードで得られた曲率係数 ($0.29\text{-}0.93 \text{ V}^{-1}$) [1] と比較すると、同じオーダーの結果が得られた。そのため、本研究で試作したデバイスでも THz 波を検出できる可能性は高いと考えており、これまで報告のない InAs 薄膜に作製した新たな非線形電流電圧特性を有するデバイスの提案を行うことができた。

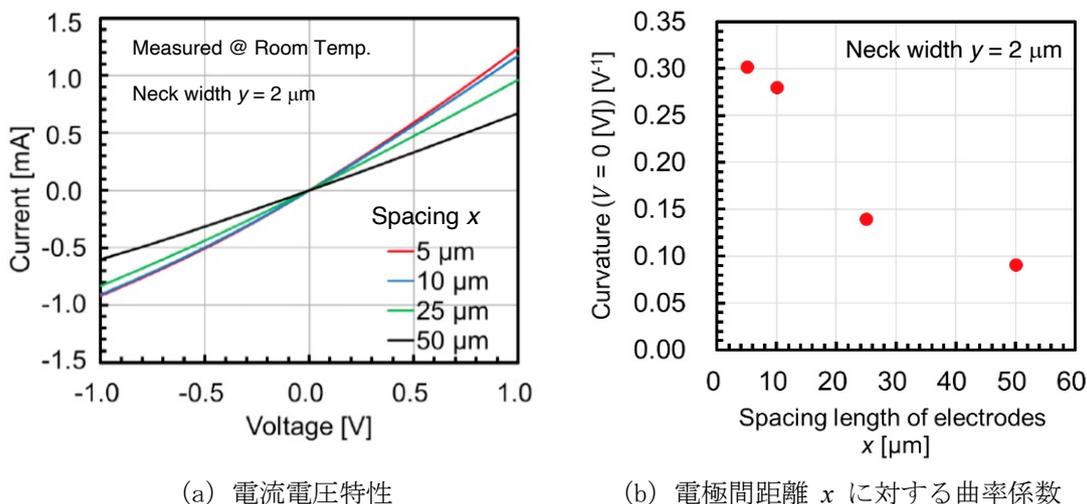


図 2. 非線形電流電圧特性の電極間距離依存性

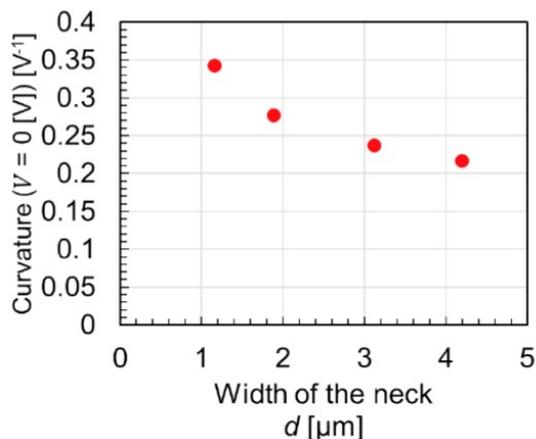


図 3. ネック幅 d に対する曲率係数

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 S Sasa, Y Kinoshita, M Tatsumi, M Koyama, T Maemoto, S Hamauchi, I Kawayama, M Tonouchi	4. 巻 906
2. 論文標題 Study for Enhancement of Terahertz Radiation Using GaSb/InAs Heterostructures	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012015-012018
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 R. Ohashi, D. Shimada, M. Koyama, T. Maemoto, S. Sasa, F. Murakami, H. Murakami, M. Tonouchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Impact of optical absorption for THz radiation in GaSb/InAs heterostructures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Xplore, 2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/IRMMW-THz46771.2020.9371009	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 -
1. 著者名 Daichi Shimada, Ryota Ohashi, Masatoshi Koyama, Toshihiko Maemoto, Shigehiko Sasa, Kosuke Okada, Hironaru Murakami, Masayoshi Tonouchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of terahertz optical sources for an excitation wavelength of 1.56 μm	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Xplore, 2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/IRMMW-THz46771.2020.9370373	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 -
1. 著者名 S. Sasa, M. Tatsumi, Y. Kinoshita, M. Koyama, T. Maemoto, I. Kawayama, and M. Tonouchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Enhanced Terahertz Radiation from GaSb/InAs Heterostructures	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Xplore, 2018 43rd International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/IRMMW-THz.2018.8510477	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20件(うち招待講演 0件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Shigehiko Sasa, Daichi Shimada, Ryota Ohashi, Masatoshi Koyama, Toshihiko Maemoto, Iwao Kawayama and Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Terahertz Radiation Using GaSb/InAs Heterostructures excited by 1.55 μm Laser
3. 学会等名 The 21th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON 21) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 島田乃地, 大橋亮太, 小山政俊, 前元利彦, 佐々誠彦, 村上史和, 村上博成, 斗内政吉
2. 発表標題 InGaSb/InAsヘテロ接合を用いた1.55 μm 励起高強度THz放射素子の開発
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大橋亮太, 島田乃地, 小山政俊, 前元利彦, 佐々誠彦, 村上史和, 村上博成, 斗内政吉
2. 発表標題 (In)GaSb/InAsヘテロ接合を用いた高強度テラヘルツ放射素子の研究
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Sasa, M. Tatsumi, M. Koyama, T. Maemoto, I. Kawayama, and M. Tonouchi
2. 発表標題 Enhanced Terahertz Radiation From GaSb/InAs Heterostructures
3. 学会等名 43rd International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大橋亮太, 島田乃地, 巽雅史, 小山政俊, 前元利彦, 佐々誠彦
2. 発表標題 GaSb/InAsヘテロ接合を用いたテラヘルツ波の放射強度増強の検討
3. 学会等名 電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 島田乃地, 大橋亮太, 巽雅史, 小山政俊, 前元利彦, 佐々誠彦
2. 発表標題 GaSb/InAsヘテロ接合に1.55umを用いたテラヘルツ波の放射素子の開発
3. 学会等名 電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Koyama, Y. Kinoshita, M. Tatsumi, T. Maemoto, S. Sasa, S. Hamauchi, I. Kawayama and M. Tonouchi
2. 発表標題 Study for Enhancement of Terahertz Radiation Using GaSb/InAs Heterostructures
3. 学会等名 The 20th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 木下耀平, 巽 雅史, 小山政俊, 前元利彦, 佐々誠彦, 寶田智哉, 川山 巖, 斗内政吉
2. 発表標題 GaSb/InAsヘテロ接合を用いたテラヘルツ波の放射強度増強の検討
3. 学会等名 日本材料学会半導体エレクトロニクス部門委員会・ナノ材料部門委員会 合同研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Daichi Shimada, Ryota Ohashi, Masatoshi Koyama, Toshihiko Maemoto, Shigehiko Sasa, Kosuke Okada, Hironaru Murakami, and Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Development of terahertz optical sources for excitation wavelength of 1.56 μm
3. 学会等名 45th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryota Ohashi, Daichi Shimada, Masatoshi Koyama, Toshihiko Maemoto, Shigehiko Sasa, Kosuke Okada, Hironaru Murakami, and Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Impact of optical absorption for THz radiation in GaSb/InAs heterostructures
3. 学会等名 45th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Ohashi, D. Shimada, M. Koyama, T. Maemoto, and S. Sasa
2. 発表標題 Nonuniform Carrier Heating Induced Nonlinear Electron Transport Properties in Asymmetrically Necked InAs Mesa Structures
3. 学会等名 PACIFIC RIM MEETING ON ELECTROCHEMICAL AND SOLID STATE SCIENCE 2020 (PRIME 2020) (国際学会)
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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------