

令和元年6月24日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06326

研究課題名(和文) 高品質InAs薄膜を利用した高強度テラヘルツパルス光源の開発

研究課題名(英文) Development of an intense terahertz pulse source using high-quality InAs thin films

研究代表者

佐々 誠彦 (Sasa, Shigehiko)

大阪工業大学・工学部・教授

研究者番号：50278561

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツパルス電磁波を利用したテラヘルツ時間領域分光法と呼ばれる測定技術は、ガン診断などの医療応用や美術品の非破壊測定などへの応用が期待されています。そのための光源として一般に利用される光伝導アンテナという素子に比べ、安価で取り扱いが容易なテラヘルツパルス光源を開発すると、システムが安価になり、この技術をより広い範囲に応用する可能性が拓けます。

このため、本研究では、インジウムヒ素(InAs)の薄膜を用いて、高強度なテラヘルツパルス光源の開発を行い、GaSb/InAsヘテロ構造を利用することにより、従来の1.4倍の強度を得ることに成功しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツパルス電磁波を利用したテラヘルツ時間領域分光法と呼ばれる測定技術は、ガン診断などの医療応用や美術品の非破壊測定などへの応用が期待されています。そのための光源として一般に利用される光伝導アンテナという素子に比べ、安価で取り扱いが容易なテラヘルツパルス光源を開発すると、システムが安価になり、この技術をより広い範囲に応用する可能性が拓けます。

この研究では、光源に半導体薄膜を利用することで従来より放射強度の高い素子が得られることが示され、さらに複数の半導体を組み合わせることで、その強度が増大できることを示しました。

研究成果の概要(英文)：Terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) has useful applications particularly in the field of medical diagnosis and non-destructive inspections. However, the pulse light source used for the THz-TDS is a photo-conductive switch which requires precise alignment. We developed a cost-effective and easy-to-use pulse light source using InAs thin films. We previously found that the use of a semiconductor thin film reduces the cost and improve the emission efficiency. In this project, we studied the use of a heterostructure for further improving the emission efficiency and found that the InAs/GaSb/InAs structure does improve the efficiency by 40%.

研究分野：化合物半導体デバイス

キーワード：テラヘルツパルス光源 インジウムヒ素 ヘテロ構造

### 1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ領域の電磁波は、多くの応用が期待される中で、短パルス光を用いた時間領域分光法は、さまざまな多層構造を非破壊で評価することができる。既に、文化財の非破壊測定装置などに利用され、橋梁、道路、電力設備などの社会インフラの検査や鋼板などの塗装膜検査用システムの開発が進んでいるが、光源をはじめとしてシステム全体が大型であるため、利用分野が制限されている。

テラヘルツ波のパルス光源としては、一般的に光伝導スイッチが利用されている。光伝導スイッチは、低温成長 GaAs 薄膜表面に、ミクロン程度のギャップをもつ電極構造を形成し、そのギャップに電圧を印加した上で、キャリア励起レーザーを照射し、流れる過渡電流によってテラヘルツパルスが発生するものである。励起レーザーを集光し、微小な電極ギャップに照射するために精密な位置合わせが必要となる光伝導スイッチは、簡便なシステムの構成を困難にしている。

他方、同じくパルス光を半導体表面に照射すると、半導体表面の空乏層電界によるキャリアの移動、あるいは、光励起されたキャリアが表面から半導体の内部へと拡散すること(フォトデンバー効果)によって流れる過渡電流によってテラヘルツ波が発生することができる。この方法では、光伝導スイッチに必要な電極形成が不要で、光源としての取り扱いは格段に容易になるため、時間領域分光の研究用光源としては現在もよく使われている。特に、半導体の中でも InAs を用いたものは比較的強度が高く、利用頻度は高い。しかしながら、光伝導スイッチに比べ、光強度が弱いことや高価なことが欠点であり、実用的なシステムの光源として使用するためには、さらなる高強度化が必要であった。

### 2. 研究の目的

本研究では、半導体薄膜を利用して電極形成が不要で高強度なテラヘルツパルス光源を開発することを目的とする。現在、その光源には、短パルスレーザーで光伝導スイッチを励起するものが用いられている。このシステムはレーザー光源が比較的大型であること、光伝導スイッチに精密な位置合わせなどの調整が必要なことなどから、小型で扱いの簡便なシステムの構築を困難にしている。本研究の目的は、小型レーザーで励起が可能な、半導体薄膜を利用したコンパクトな高強度テラヘルツパルス光源の開発である。

### 3. 研究の方法

分子線結晶成長法を用いて、高品質な InAs ベースのヘテロ構造薄膜を GaAs 基板上に形成し、放射機構の解明と放射強度増大を目指した。そのため、GaSb/InAs ヘテロ構造に注目した。このヘテロ構造は 0.8 eV 程度の大きな伝導帯不連続を持ち、GaSb から InAs へ電子が移動する際に大きな過剰エネルギーを得ることができると期待される。フォトデンバー効果が主要な放射機構となる InAs では、拡散の速度がこの過剰エネルギーによって決まると考えられ、ヘテロ接合によるキャリア注入は、放射強度の増強に有効であると考えられる。このように、ヘテロ接合を利用することで、テラヘルツ放射の過程を、キャリアの励起過程とその後の注入・放射過程に分解することにより、それぞれの過程を最適化することで放射強度の増強が可能になると考えた。そこで、本研究では、ヘテロ接合構造の GaSb 層の厚さに着目し、放射強度との関連を調べた。

### 4. 研究成果

#### (1) GaSb/InAs ヘテロ構造のテラヘルツ放射特性

キャリア励起層となる GaSb 層を最表面層にもつヘテロ構造を分子線結晶成長法により作製した。GaSb 層の厚さを 5-300 nm と変化させて、テラヘルツ放射強度の測定をテラヘルツ時間領域分光法により評価した。

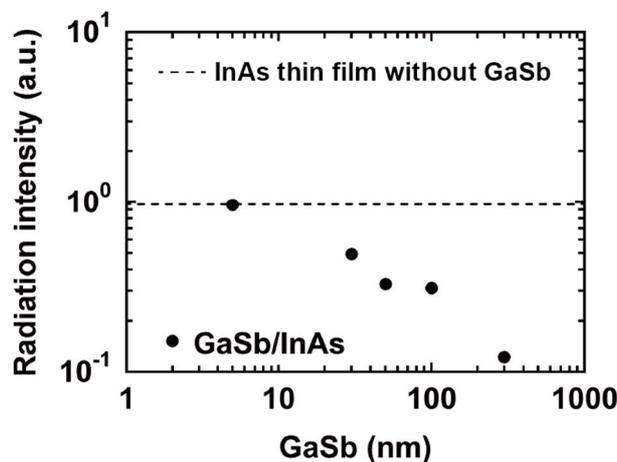


図1 放射強度の GaSb 膜厚依存性 ( 図中破線は、InAs 薄膜のみの放射強度 )

図 1 にその結果を示す。放射強度は GaSb 膜厚の減少とともに増加する傾向は継続し、GaSb 層厚 5 nm で最大となったが、そこでの強度は InAs 層のみの試料と同程度であり、ヘテロ構造による増強効果を観測するには至らなかった。ヘテロ構造での強度低下の原因として、GaSb 表面でのピンニング効果および InAs 中での谷間散乱の影響を考えた。そこで、まず前者の影響を緩和するために、GaSb/InAs ヘテロ構造の表面に、さらに 1 nm の InAs キャップ層を設けることでピンニング位置を変化させ、ピンニング効果がキャリア輸送に与える影響を検討することにした。このために、GaSb 層を 50 nm で InAs キャップ層の有る試料と無い試料を作製し、放射強度を測定した。

## (2) InAs/GaSb/InAs ヘテロ構造のテラヘルツ放射特性

GaSb/InAs ヘテロ構造の表面に、さらに 1 nm の InAs キャップ層を設けた試料とキャップ層の無い試料で、放射強度を比較した。その結果、InAs キャップ層を設けることで、テラヘルツ放射強度が約 2 倍に高まることが分かった。そこで GaSb 層の厚さが 5 nm の試料も作製して放射強度の測定を行い、InAs キャップ層の有無で放射強度がどのように変化するかを調べた。

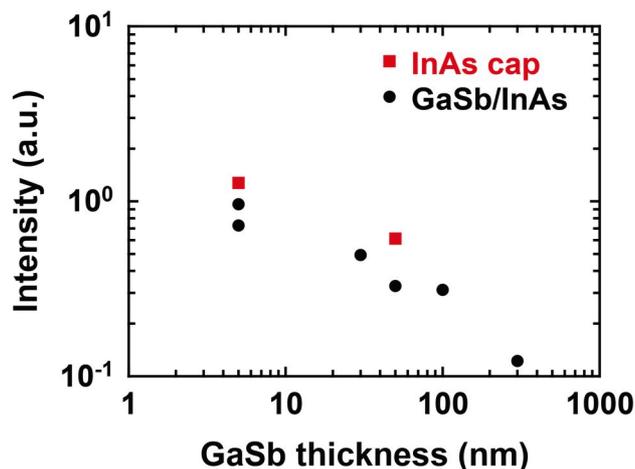


図 2 InAs キャップ層の有無による放射強度の比較。

図 2 に示すように、InAs キャップ層を設けることによって、いずれの GaSb 層の厚さにおいても放射強度が約 2 倍になることが確認され、InAs キャップ層による増強効果が明らかになった。また、GaSb 層の厚さが 5 nm の試料では、InAs 薄膜のみの放射強度に比べても 1.4 倍の放射が得られ、放射強度の増強という当初の目的を達成することができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

S. Sasa, M. Tatsumi, Y. Kinoshita, M. Koyama, T. Maemoto, I. Kawayama, M. Tonouchi, Enhanced Terahertz Radiation from GaSb/InAs Heterostructures, 査読有り, 2018 43<sup>rd</sup> Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz) 2018. (DOI 10.1109/IRMMW-THz.2018.8510477)

S. Sasa, Y. Kinoshita, M. Tatsumi, M. Koyama, T. Maemoto, S. Hamauchi, I. Kawayama, and M. Tonouchi, Study for Enhancement of Terahertz Radiation Using GaSb/InAs Heterostructures, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, 査読有り, 巻 906, 012015, 2017. (DOI 10.1088/1742-6596/906/1/012015)

M. A. Kozub, M. Motyka, M. Dyksik, G. Sek, J. Misiewicz<sup>1</sup>, K. Nishisaka, T. Maemoto, and S. Sasa, Non-destructive carrier concentration determination in InAs thin films for THz radiation generating devices using fast differential reflectance spectroscopy, Opt Quant Electron, 査読有り, 巻 48, 384, 2016. (DOI 10.1007/s11082-016-0653-4)

〔学会発表〕(計 5 件)

S. Sasa, M. Tatsumi, Y. Kinoshita, M. Koyama, T. Maemoto, I. Kawayama, and M. Tonouchi, Enhanced Terahertz Radiation from GaSb/InAs Heterostructures, 43<sup>rd</sup> Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz) (国際会議) 2018.

巽, 木下, 小山, 前元, 佐々, 寶田, 川山, 斗内, 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 II, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会. 2018.

木下, 巽, 小山, 前元, 佐々, 濱内, 川山, 斗内, GaSb/InAs ヘテロ接合を用いたテラヘルツ放射素子の検討, 材料学会平成 29 年度第 3 回半導体エレクトロニクス部門委員会第 2 回研究会

2017.

M. Koyama et al., Study for Enhancement of Terahertz Radiation Using GaSb/InAs Heterostructures, The 20<sup>th</sup> Int. Conf. on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (国際学会) 2017.

木下, 巽, 小山, 前元, 佐々, 濱内, 川山, 斗内, 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, 第64回応用物理学会春季学術講演会. 2017.

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名: 小山 政俊

ローマ字氏名: (KOYAMA, Masatoshi)

所属研究機関名: 大阪工業大学

部局名: 工学部

職名: 講師

研究者番号(8桁): 30758636

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。