

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04540

研究課題名(和文)ヘテロ接合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 semiconductor heterostructures

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) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：InAs薄膜をベースとしてフォトデンバー効果によるテラヘルツパルス光源の高強度化に向け、ヘテロ接合を利用し、電子の拡散速度増強を目指して研究を行った。GaSb/InAsヘテロ構造でGaSb層の厚さを検討し、厚さが薄くなる程、テラヘルツ波の放射強度が増加し、厚さ5nmの資料ではInAs薄膜試料に対する増強効果を確認した。さらにInGaSb/InAs構造で、InGaSb層での光吸収の効果と注入電子の過剰エネルギーの効果影響を調べ、過剰エネルギーが減少しても、光吸収が増加することで、InGaSb5nmの試料では、GaSb/InAsを超える高強度化が達成できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ領域で動作する受発光素子の開発は、当該周波数領域の技術の開発、応用を見据え、非常に重要である。中でも、テラヘルツ時間領域分光法による文化財評価への応用は重要で、そのためには簡便に使用できるパルス光源の開発が重要である。本研究は、このテラヘルツパルス光源の開発に関わり、従来使用されている光伝導スイッチが、発光場所が微細な位置に限られ、精密な位置調整や電圧の印加が必要であったことに対し、電圧の印加が必要なく、試料表面全体が発光可能な素子となるため、扱いが容易であり、これからの本分光法の発展に重要である。

研究成果の概要(英文)：We conducted a study for the development of an intense terahertz pulse source utilizing InAs-based heterostructure. The optical source relies on photo-Dember effect since InAs possesses both high electron mobility and optical absorption coefficient. First, we systematically studied how the terahertz radiation intensity depends on the thicknesses of the GaSb in the GaSb/InAs heterostructures. We found that the radiation intensity increases as the GaSb thickness decreases. We observed an enhanced radiation for GaSb thickness of 5 nm. In the GaSb/InAs heterostructures, the GaSb layer serves as the absorption layer and injects electrons into the InAs radiation layer. However, GaSb has a lower absorption coefficient than that of InAs. We therefore introduced the InGaSb absorption layer in order to increase the optical absorption. We confirmed that the InGaSb/InAs heterostructures for InSb content of 0.2 show stronger terahertz radiation than those for GaSb/InAs heterostructure.

研究分野：化合物半導体デバイス

キーワード：テラヘルツ放射 GaSb/InAsヘテロ接合 フォトデンバー効果 パルス光源 terahertz radiation GaSb/InAs photo-Dember effect pulse laser source

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ領域の電磁波応用に関する研究が盛んに行われている。特に、プラスチックや紙などに高い透過性を有するため、テラヘルツ時間領域分光技術を利用した非破壊測定システムが開発され、応用の可能性が広がりつつある。現在、その光源には、短パルスレーザーにより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。

研究代表者は、光伝導スイッチに比べて扱いの容易な光源の開発を目的に、InAs 薄膜を利用したテラヘルツ光源の高強度化を目指し、薄膜構造に特徴的な多重反射を利用し、放射層の膜厚の最適化や n-InAs 層のプラズマ反射を利用した高強度化を進めてきており、光スイッチに代わる光源の可能性が高まっている。

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の放射機構であるフォトデンバー効果の素過程をもう一度問い直し、放射機構に重要なキャリアダイナミクスを明確にすることで、放射強度の増大を目指す。従来が、高品質薄膜の形成技術と多重反射の利用による高強度化というならば、本研究は、放射過程そのものを再構築することで、放射強度の増強を図ることが目的である。

放射に関わる素過程として、光励起過程とその後の拡散過程がある。それぞれの素過程がヘテロ構造を構成する物質とどのような関わりをもち、それがどのように放射強度に寄与するかを明らかにすることで、光源の高強度化を可能にする。

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、放射強度を評価することで、放射機構の解明と高強度化を図る。

GaSb/InAs ヘテロ構造における GaSb 層厚への放射強度依存性から、GaSb 層での光吸収の過程が放射強度に及ぼす影響を検討し、光吸収層の物質を検討し、各素過程の放射への寄与を明らかにするとともに放射強度の増大を図る。

4. 研究成果

GaSb/InAs ヘテロ構造を利用して、InAs 薄膜より高強度な放射が得られたという事実に基づいて、その物性を明らかにするため、光吸収層となる GaSb 層の厚さを系統的に変化させる実験を行った。

従来、GaSb 光吸収層の厚さが 5 nm と 30 nm、50 nm であったものに 10 nm、20 nm を加えて膜厚依存性の評価を行い、(図 1) この範囲で膜厚の増加に対して単調に強度が低下するという結果を得た。調べた膜厚範囲では、ヘテロ構造が InAs 薄膜の強度を上回ったのは、GaSb 層の厚さが 5 nm の場合のみであることも分かった。

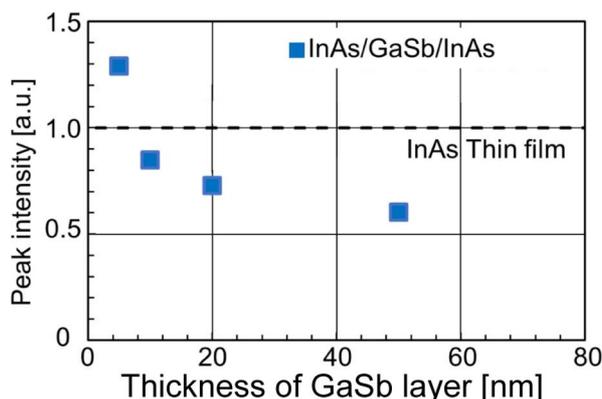


図 1. 放射強度の GaSb 光吸収層厚さ依存性

また、励起光源としてより安価でコンパクトな光源が使用できる波長 1.56 μm での実験も行った。この場合当初は、InAs 薄膜を超える放射強度を得ることができず、増強効果が確認できなかったが、本波長では、GaSb 層の吸収係数が大きく低下し、光吸収層として有効に機能しないためと、その原因を特定することができた。

そこで、光吸収層のバンドギャップを低下させ、光吸収を増大させるため GaSb に InSb を加えて InGaSb (In 組成 0.1 および 0.2) を光吸収層とした構造を作製し、同様の実験を行い、光吸収が与える影響について調べた。その結果、 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{Sb}$ 10 nm の構造で、InAs 薄膜の放射強度

を超える放射強度を確認し、ヘテロ接合を利用したフォトデンバー放射素子が $1.56 \mu\text{m}$ 励起でも有効であることが示された。

放射強度の増大には、光吸収層の級数係数を大きくし、そこで生成されるキャリアを多くすることが放射強度の増大に重要であることが明らかになった。この結果を踏まえ、 800 nm 励起の場合についても InGaSb 光吸収層を用いた効果を InGaSb 層の厚さ変えて検討した。その結果を図 2 に示す。

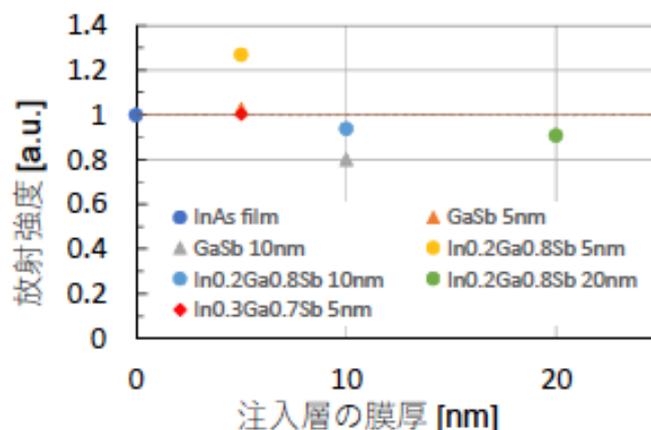


図 2. 放射強度の光吸収層の厚さ・組成依存性

InGaSb (In 組成 0.2) 光吸収層を用いた試料では、同じ厚さの GaSb 光吸収層を用いた試料に比べ、常に高い放射強度を有することが確認され、光吸収層での励起キャリア濃度を高めることが放射強度の増強には重要であることが本励起波長でも明らかになった。InGaSb 層の厚さが 5 nm の場合には、InAs 薄膜構造にくらべて 3 割程度高い放射強度が得られることが明らかになり、本研究の当初の目的も達成することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

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	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 無
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	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 無
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4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 R. Ohashi; D. Shimada; M. Koyama; T. Maemoto; S. Sasa; F. Murakami; H. Murakami; M. Tonouchi
2. 発表標題 Impact of optical absorption for THz radiation in GaSb/InAs heterostructures
3. 学会等名 2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz) (国際学会)
4. 発表年 2020年

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

1. 発表者名 Ryota Ohashi, Daichi Shimada, Masatoshi Koyama, Toshihiko Maemoto, and Shigehiko 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 238th Meeting of The Electrochemical Society (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Sasa, R. Ohashi, D. Shimada, M. Koyama, T. Maemoto, I. Kawayama, and M. Tonouchi
2. 発表標題 Terahertz Radiation Characteristics of GaSb/InAs Heterostructures
3. 学会等名 Int. Conf. on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (国際学会)
4. 発表年 2019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
研究 分担 者	小山 政俊 (Koyama Masatoshi) (30758636)	大阪工業大学・工学部・准教授 (34406)	

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
---------	---------