

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月7日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656220

研究課題名（和文）

希土類添加半導体を用いたテラヘルツ波発生／検出素子の開発

研究課題名（英文）

Development of terahertz emitters and detectors using rare-earth-doped semiconductors

研究代表者

藤原 康文 (FUJIWARA YASUFUMI)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10181421

研究成果の概要（和文）：本研究では、我々により超高速（サブピコ秒）のキャリア緩和を示すことが見いだされたEr,O共添加GaAs (GaAs:Er,O)を新しいテラヘルツ波発生／検出用材料として位置づけ、そのデバイス応用可能性を明らかにすることを目的とした。GaAs:Er,Oを用いたテラヘルツ波発生素子を作製し、フェムト秒レーザーの照射を行ったところ、テラヘルツ波の発生が観測された。そのテラヘルツ波強度は照射パワーとともに増大するものの、飽和傾向を示した。また、多層構造素子において、テラヘルツ発生性能を評価した結果、テラヘルツ波放射強度の増大を観測した。一方、試作されたGaAs:Er,Oテラヘルツ波検出素子の性能を評価し、テラヘルツ波の検出に世界で初めて成功した。

研究成果の概要（英文）： We have investigated the properties of terahertz emitters and detectors using Er,O-codoped GaAs (GaAs:Er,O) which exhibits ultrafast carrier relaxation at room temperature. Under the irradiation of the light from a femto-second laser, we succeeded in the observation of terahertz emission. The amplitude of the emission increased with the excitation power, followed by the successive saturation. The amplitude was enhanced in an emitter with a multi-layer structure. Terahertz emission was also detected successfully using GaAs:Er,O.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：希土類添加半導体、テラヘルツ波

1. 研究開始当初の背景

(1) 伝統的なマイクロ波技術と光学技術の間に挟まれた領域に位置する「テラヘルツ技術」は次世代の機能センシング（工業・医療・バイオ・農薬・セキュリティ等）・情報通信・エレクトロニクスの基盤となるべき科学技術分野を切り開くとともに、基礎科学の分野においても不可欠なものになりつつある。

(2) コヒーレントなテラヘルツ波の発生法の一つとして、フェムト秒レーザーを用いた光伝導アンテナがある。この光伝導アンテナ用材

料として最も広く普及しているものとして、低温成長 GaAs (LT-GaAs)がある。このLT-GaAsは基板温度 200～300℃で分子線エピタキシャル(MBE)法により成長された後、熱処理されたもので、キャリア寿命として300fsを得ており、比較的高い移動度(100-200 cm²/Vs)と高い抵抗率(10⁷Ω cm程度)を併せ持つという特徴を有している。

(3) 我々は過去数年間に渡り、『原子レベルでの結晶成長・不純物添加技術』と『マイクロ構造の直接的評価技術』を連携して、III-V族半

導体中で希土類元素を原子のレベルで操ることにより、新しい物性・機能を効果的に発現させるとともに、それらを有効に活用した新規デバイスを創出することを目指している。この一貫した研究の過程で、この希土類添加半導体が LT-GaAs に匹敵する超高速（サブピコ秒）なキャリア緩和を示すことを世界で初めて見いだした。

(4) 希土類添加半導体のテラヘルツ波応用を目指す研究は世界的に見ても他に見出せず、本研究は「発光機能」、「磁気機能」に加えて、第3の機能（テラヘルツ機能）を新たに開拓する高いポテンシャルを有している。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、我々により超高速のキャリア緩和を示すことが見いだされた希土類添加半導体を新しいテラヘルツ波発生/検出用材料として位置づけ、そのデバイス応用可能性を明らかにする。また、希土類添加半導体の成長条件や素子構造の最適化を通じて、希土類添加半導体を用いたテラヘルツ波発生/検出素子を試作し、その究極性能を明らかにすることを当面の目標に設定する。

(2) 具体的には、Er₂O₃ 共添加 GaAs (GaAs:Er₂O₃) を取り上げ、

- ① Er 添加条件の最適化
- ② テラヘルツ波発生素子の試作・特性評価
- ③ テラヘルツ波検出素子の試作・特性評価
- ④ 多層構造素子の検討

に取り組む。

3. 研究の方法

(1) GaAs:Er₂O₃ は現有の有機金属気相エピタキシャル(OMVPE)成長装置により作製した。試料中の Er 濃度は有機 Er 原料シリンダーを通過する水素供給量により制御した。

(2) テラヘルツ波発生特性の精密評価とデバイス応用を目的にダイポール型光伝導アンテナを作製した。電極ギャップ 5 μm を有する Au/Ti 電極の形成には現有のフォトリソグラフィシステムとリフトオフ法を用いた。

(3) 得られた光伝導アンテナのテラヘルツ波発生/検出特性は大阪大学レーザーエネルギー学研究所に設置された評価システムにより評価した。テラヘルツ波発生においては、市販で入手可能な LT-GaAs 光伝導アンテナを検出器として用いた。一方、テラヘルツ波検出においては、LT-GaAs 光伝導アンテナをテラヘルツ波発生源として用いた。

4. 研究成果

(1) Er 添加条件の最適化：

LT-GaAs を凌ぐ超高速なキャリア緩和を実現するために、添加する Er 濃度をパラメータとした。得られた試料のキャリア緩和時間は現有のフェムト秒レーザを用いたポンプ・プローブ光反射率測定により評価した。Er 濃度の増加とともにキャリア緩和時間が短くなり、高 Er 添加試料では LT-GaAs を凌ぐキャリア緩和が得られることを明らかにした。不純物添加によるキャリア緩和時間制御については世界で初めての結果である。

(2) テラヘルツ波発生素子の試作・特性評価：

電極ギャップ 5 μm を有する Au/Ti 電極からなるダイポール型光伝導アンテナを作製した。フェムト秒レーザの照射によりテラヘルツ波の発生が観測され、そのテラヘルツ波強度は照射パワーとともに増大するものの、飽和傾向を示した。この現象は光励起キャリア密度の増大によって発生するスクリーニング効果に起因している。無添加 GaAs におけるテラヘルツ波発生の場合と比較して、GaAs:Er₂O₃ では照射パワーに対する飽和傾向が小さく、Er 濃度の増加とともに、飽和傾向の抑制が顕著に生じることを明らかにした。

(図 1)

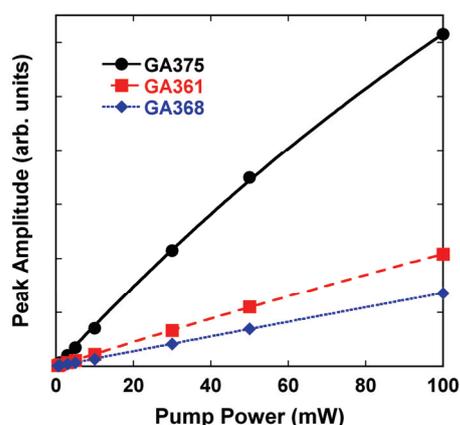


図 1 テラヘルツ波放射強度のフェムト秒レーザ照射強度依存性。無添加 GaAs (GA375)、GaAs:Er₂O₃ (GA361, GA368)。

(3) テラヘルツ波検出器の試作・特性評価：

テラヘルツ波発生素子として用いられたものと同様の構造を有する光伝導アンテナのテラヘルツ性能を室温で評価した。照射するフェムト秒レーザの照射パワーと印加電圧をパラメータとして、試作された

GaAs:Er,O 素子の性能を評価した結果、テラヘルツ波の検出に、世界で初めて成功した。しかしながら、LT-GaAs と比較すると S/N 比が低く、信号強度自体も 1/100 程度であった (図2)。性能向上に向けて、素子構造やデバイス加工プロセスの最適化が今後の課題である。

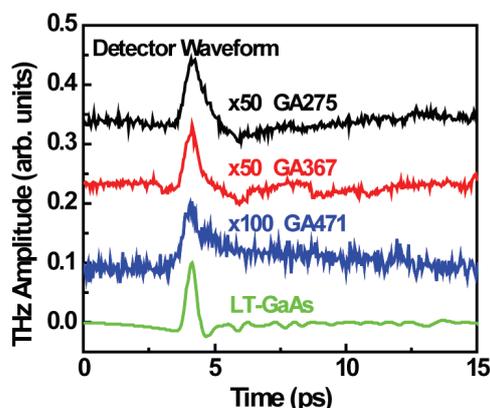


図2 各種 GaAs:Er,O 光伝導アンテナにおけるテラヘルツ波検出結果。LT-GaAs と比較して示す。

(4) 多層構造素子の検討：

これまでの GaAs:Er,O テラヘルツ波発生/検出素子は GaAs 基板上に成長した GaAs:Er,O 単層膜を用いてきた。様々な層構造試料から光伝導アンテナを作製し、そのテラヘルツ波発生性能を評価した。n⁺-GaAs 基板上に無添加 GaAs、GaAs:Er,O を順次、積層した構造において、テラヘルツ波放射強度の増大を観測した (図3)。この結果はテラヘルツ波放射強度の増大に向けて、素子に用いる層構造設計の重要性を示唆している。

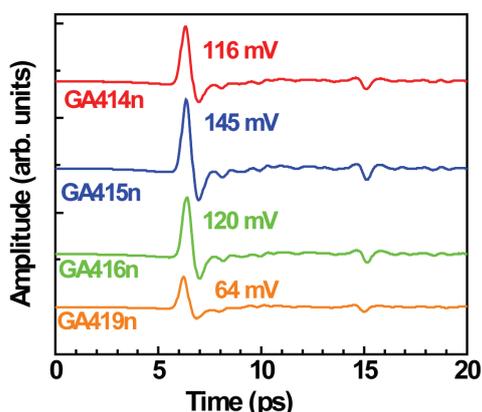


図3 各種層構造試料におけるテラヘルツ波放射。GaAs:Er,O 単層膜試料 (GA419n) と比較して示す。

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3件)

- ① 藤原康文: “1.4.5 希土類添加の発光素子,” 光技術動向調査報告書 **FY2010-002-1** (2011) pp. 70-74.
- ② M. Fujisawa, A. Asakura, F. Elmasry, S. Okubo, H. Ohta, and Y. Fujiwara: “ESR study of photoluminescent material GaAs:Er,O -Er concentration effect-,” *Journal of Applied Physics* **109**(5) (2011) pp. 053910/1-5.
- ③ H. Katsuno, H. Ohta, O. Portugall, N.s Ubrig, M. Fujisawa, F. Elmasry, S. Okubo, and Y. Fujiwara: “Energy structure of Er-2O center in GaAs:Er,O studied by high magnetic field photoluminescence measurement,” *Journal of Luminescence* **131** (2011) pp. 2294-2298.

[学会発表] (計9件)

- ① 【招待講演】 藤原康文、寺井慶和、西川敦：“希土類添加半導体の新展開,” 日本セラミックス協会第24回秋季シンポジウム「複合アニオン化合物の創製と機能」、**2F04**、北海道大学(札幌キャンパス)、札幌市、9月8日(2011).
- ② 【招待講演】 寺井慶和、西川敦、藤原康文：“希土類添加半導体を用いた発光デバイスの新展開,” 日本金属学会分科会シンポジウム「環境・医療・IT調和型デバイス、及び材料の最前線」、科学技術館、東京都千代田区、9月22日(2011)
- ③ H. Ohta, S. Okubo, W.-M. Zhang, M. Fujisawa, Y. Fukuoka, F. Elmasry, and Y. Fujiwara: “Electron spin resonance study of highly Er doped photoluminescent material GaAs:Er,O,” 2011 European Materials Research Society Fall Meeting (E-MRS2011), **I3**, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland, September 18-23 (2011).
- ④ 【招待講演】 藤原康文：“希土類添加半導体への誘い,” 尼崎市産学公ネットワーク協議会 産学交流研究シーズ発表会、尼崎市中小企業センター、尼崎市、3月5日(2012).
- ⑤ 【招待講演】 藤原康文：“希土類添加半導体に発現する協働的な発光機能制御”, 第59回応用物理学関係連合講演会 シンポジウム「不純物機能活性型材料の機能制御とデバイス応用：機能核モデル」、**15p-E1-6**、早稲田大学早稲田キャンパス、東京都新宿区、3月15日(2012).
- ⑥ 【招待講演】 藤原康文：“希土類元素を極める ～「希土類添加半導体」を題材として～”, 大阪大学ナノ理工学人材育成産学コンソーシアム 平成24年度 第1回ナノ理工学情報交流

会（一般公開）「ナノ理工学に関する長期展望テーマの提案」、大阪大学豊中キャンパス、豊中市、6月20日（2012）。

- ⑦【招待講演】藤原康文：“希土類添加半導体発光デバイス”、第126回微小光学研究会「微小光学の周期表－元素を見直す－」、早稲田大学グリーン・コンピューティング・システム(GCS)研究開発センター、東京都新宿区、12月7日（2012）。
- ⑧【招待講演】藤原康文：“希土類元素がもたらす桃源郷！～希土類添加半導体と発光ダイオードへの応用～”、大阪大学光科学センター・りそな中小企業振興財団 技術懇親会「先進光源と産業応用」、大阪大学銀杏会館、吹田市、2月8日（2013）。
- ⑨【招待講演】藤原康文：“希土類元素を極める ～「希土類添加半導体」を題材として～”、平成24年度大阪大学「物質・材料科学研究推進機構」講演会「物質科学における分野融合」、大阪大学理学研究科、吹田市、3月4日（2013）。

〔図書〕（計2件）

- ①V. Dierolf, Y. Fujiwara, T. Gregorkiewicz, and W. M. Jadwisieniczak: *Materials Research Society Symposium Proceedings Vol. 1342, Rare-Earth Doping of Advanced Materials for Photonic Applications* (Cambridge University Press, New York, 2012).
- ②Y. Fujiwara, Y. Terai, and A. Nishikawa: "Advanced materials design of rare-earth-doped semiconductors by organometallic vapor phase epitaxy (Chapter 21)," *Progress in Advanced Structural and Functional Materials Design*, edited by T. Kakeshita (Springer, Tokyo, 2013) pp. 261-272.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/mse6/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

藤原 康文 (FUJIWARA YASUFUMI)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10181421

(2)研究分担者

寺井 慶和 (TERAI YOSHIKAZU)

鹿児島大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：90360049

西川 敦 (NISHIKAWA ATSUSHI)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：60417095