

金属／絶縁体／半導体ヘテロ接合を用いたテラヘルツ発振・増幅素子の研究 (0213008)

Electron Devices for Terahertz Oscillation and Amplification Using
Metal/Insulator/Semiconductor Heterostructures

研究代表者

浅田雅洋 東京工業大学 大学院総合理工学研究科
Masahiro Asada, Tokyo Institute of Technology

研究期間 平成 14 年度～平成 18 年度

本研究開発の概要

テラヘルツ(THz)帯は光と電波の中間の未開拓領域であり、コンパクトな固体の増幅・発振素子の開発により広範囲の応用が期待される。本研究は、超高周波デバイス材料として有利な金属／絶縁体／半導体ヘテロ接合を中心に、共鳴トンネル構造による二端子 THz 発振素子および量子的光遷移と電子走行を融合した新しい原理の三端子 THz 素子の実現を目指して行った。成果として、金属／絶縁体／半導体ナノ構造の結晶成長技術の確立と共に動作およびサブバンド間遷移発光の達成、また、デバイス動作の第一段階として、半導体ナノ構造とアンテナ共振器集積により、電子デバイスでは初めての室温 THz 発振を達成した。さらに、二次元電子ガスの速度変調と集群による三端子素子のミリ波帯での動作を達成し、この素子が THz 帯で動作する可能性を明らかにした。

Abstract

The terahertz (THz) frequency range is expected to have very wide applications if compact solid-state light sources are developed. In this project, we aimed at realizing two-terminal THz oscillation devices with resonant tunneling structures and a novel three-terminal THz device with quantum-mechanical optical transition and electron transport, mainly for a heterostructure with metal/insulator/semiconductor system. Results obtained are; epitaxial growth of nanostructures, resonant tunneling and optical transition between subbands in this material system, room-temperature THz oscillation of semiconductor nanostructures, as a first step of the device realization, which is the first time for single electronic oscillators, and preliminary operation of a novel three-terminal device with electron velocity modulation at millimeter wave range.

1. まえがき

周波数 1 ～ 数十 THz (波長 数十～数百 μm) のテラヘルツ(THz)帯は光と電波の中間に位置する未開拓領域であるが、近年、イメージング、化学分析、バイオテクノロジーへの応用や、大容量通信など、非常に幅広い可能性が明らかになってきている。これらの広い応用のためには、固体の発振・増幅素子が重要なキーデバイスとなる。

本研究は、半導体だけでなく金属／絶縁体／半導体ヘテロ構造を用いた THz デバイスとして、共鳴トンネル構造による二端子発振素子、および量子的光遷移と電子走行を融合した新しい原理の三端子増幅素子の実現を目指して行った。成果として、金属／絶縁体／半導体ナノ構造の結晶成長技術の確立と共に動作およびサブバンド間遷移発光の達成、また、デバイス動作の第一段階として、半導体ナノ構造とアンテナ共振器集積により、電子デバイスでは初めての室温 THz 発振を達成した。さらに、二次元電子ガスの速度変調と集群による三端子素子のミリ波帯での動作を達成し、この素子が THz 帯で動作する可能性を明らかにした。

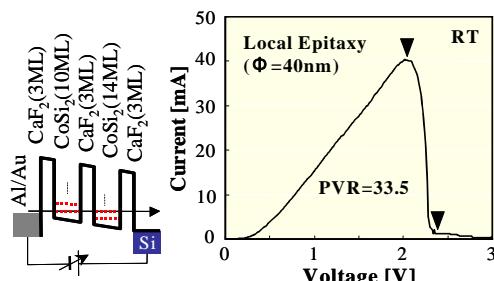


図 1 金属／絶縁体／半導体共鳴トンネルダイオード

2. 研究内容及び成果

2.1 金属／絶縁体／半導体ヘテロ結晶の成長

THz デバイスの材料として、金属 (CoSi₂) / 絶縁体 (CaF₂, CdF₂) / 半導体 (Si) ヘテロ接合を導入し、イオン化ビームと新たに考案したナノエリア結晶成長法の併用により、デバイスの基本構造となる共鳴トンネル構造を、Si(111) (図 1) および Si(100) 面上に形成し、室温での均一で良好な電気的特性を達成した。

2.2 三端子 THz デバイスの提案と理論解析

THz デバイスとして、共鳴トンネル構造の負性抵抗特性を基にした二端子の発振素子の他、電子のフォトンアシストトンネルとビート集群を用いた三端子増幅素子を新たに提案し、理論解析により THz 帯の増幅動作が可能であることを示した。

2.3 フォトンアシストトンネルの観測

提案した三端子デバイスの基本動作原理の一つである THz フォトンアシストトンネルの測定を、半導体および絶縁体／半導体共鳴トンネル構造に対して行った。測定結果は、密度行列による理論解析と非常によく一致した。

また、絶縁体／半導体共鳴トンネル構造において、サブバンド間遷移による発光を室温で観測した。発光波長のピークは約 2.5 μm で計算値 2.2 μm とほぼ一致した。層構造を変化させることにより THz 帯発光も可能と考えられる。

2.4 二端子 THz 発振素子の形成と特性

金属／絶縁体／半導体ナノ構造の共鳴トンネルに基づく二端子 THz 発振素子の前段階として、半導体共鳴トンネル構造と微細アンテナを集積した二端子発振素子を作製し (図 2(a))、高調波発振ではあるが、単体の電子デバイスでは初めての室温 THz 発振を達成した (図 2(b))。

寄生素子などの影響を考慮した詳細な理論解析結果は実験結果と非常によく一致し、アンテナと RTD 層構造の最適化により、基本波においても 2.4THz までの発振と 1THz における出力 $70\mu\text{W}$ が可能と見積もられた。

1mW を越える高出力化にはアレイ構成が有効であるが、これに必要な素子間の位相同期について調べ、2 つの素子の同時発振において相互注入により同期が起こることを実験的に確認した。また、共鳴トンネル発振素子がバイアス電圧により発振周波数を変化できることを見出した。

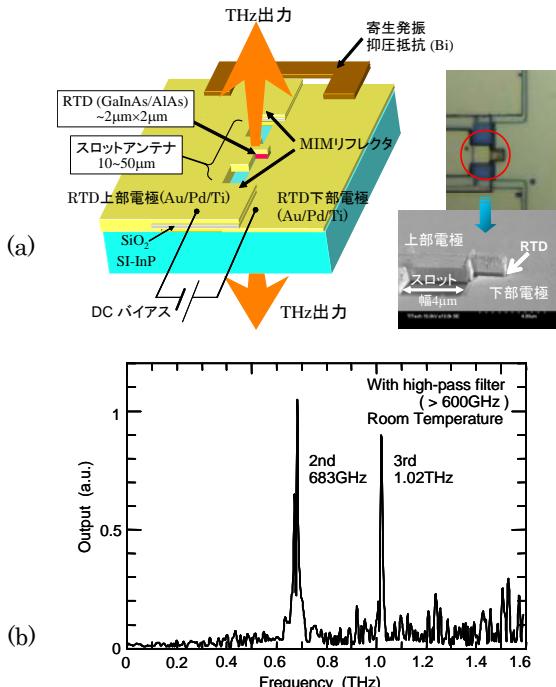


図 2 共鳴トンネルダイオード(RTD)による THz 発振素子
(a) 素子構造 (b) 発振スペクトル

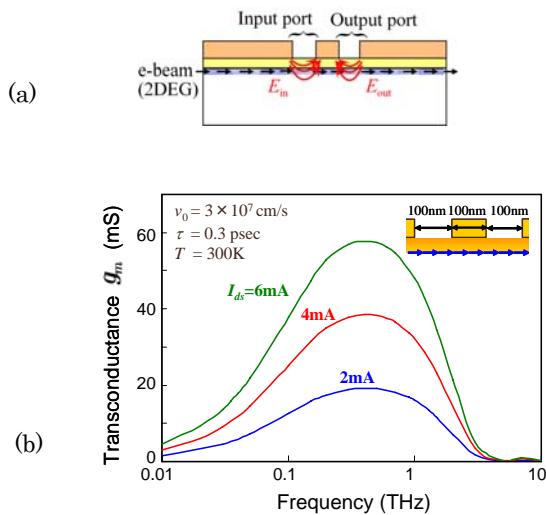


図 3 二次元電子ガスを用いた THz 三端子増幅素子
(a) 断面構造 (b) 理論的な伝達コンダクタンスの周波数特性

2.5 三端子 THz 増幅素子の形成と基本動作測定

提案した三端子デバイスの第一段階として、半導体ヘテロ構造中の二次元電子ガスを用いた三端子デバイス(図 3(a))を形成し、動作特性を測定した。この結果、ミリ波帯で理論特性(図 3(b))と一致する動作が得られ(図 4)、THz 帯において増幅動作が期待できることがわかった。

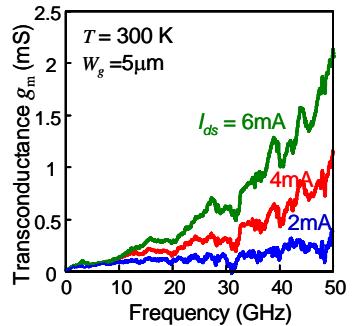


図 4 伝達コンダクタンスのミリ波帯における測定結果

3. むすび

イメージング・分析・大容量通信など幅広い応用の可能性を持つ THz 帯の発振・增幅素子実現を目指した研究の第一歩として、金属／絶縁体／半導体ナノ構造の結晶成長と共に鳴トンネル動作およびサブバンド間遷移発光の達成、デバイス動作の第一段階として、半導体共鳴トンネル構造による室温 THz 発振、二次元電子ガスの速度変調と群集による三端子素子のミリ波帯での動作達成と THz 帯での動作の可能性について述べた。

【誌上発表リスト】

- [1] N. Orihashi, S. Suzuki, and M. Asada, "One THz harmonic oscillation of resonant tunneling diodes", *Appl. Phys. Lett.*, vol.87, no.23, 233501 (Dec.2005).
- [2] N. Orihashi, S. Hattori, S. Suzuki, and M. Asada: "Experimental and Theoretical Characteristics of Sub-Terahertz and Terahertz Oscillations of Resonant Tunneling Diodes Integrated with Slot Antennas", *Japan. J. Appl. Phys.*, vol.44, no.11, pp.7809-7815 (Nov. 2005).
- [3] T. Kanazawa, R. Fujii, T. Wada, Y. Suzuki, M. Watanabe, and M. Asada: "Room temperature negative differential resistance of CdF₂/CaF₂ double-barrier resonant tunneling diode structures grown on Si(100) substrates", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.90, no.9, 092101 (Feb. 2007).

【申請特許リスト】

- [1] 浅田雅洋、折橋直行：テラヘルツ発振素子（特願 2005-313236）、日本、平成 17 年 10 月 27 日。
- [2] 宮本恭幸、古屋一仁、浅田雅洋、町田信也：ホットエレクトロントランジスタ（特願 2005-334326）、日本、平成 17 年 11 月 18 日。
- [3] 宮本恭幸、浅田雅洋：光信号送信装置及び光信号伝送システム（特願 2005-356694）、日本、平成 17 年 12 月 9 日。

【受賞リスト】

- [1] 浅田雅洋、JJAP 論文賞（応用物理学会）、「テラヘルツフォトンアシストトンネルの密度行列モデル」、2003 年 8 月 31 日。
- [2] 浅田雅洋、市村学術賞（新技術開発財団）、「テラヘルツシステムのための超高周波電子デバイスの研究」、2005 年 4 月 28 日。
- [3] 折橋直行、服部真之介、鈴木左文、浅田雅洋、JJAP 論文賞（応用物理学会）、「スロットアンテナを集積した共鳴トンネルダイオードによるテラヘルツ発振器の実験および理論的特性」、2006 年 8 月 30 日。

【報道発表リスト】

- [1] “シリコン表面に超ヘテロ・ナノ構造作製、フッ化物で共鳴トンネル構造”、日経先端技術 No. 35、2003 年 4 月 14 日。
- [2] “常温でテラヘルツ光、小型の光源、用途幅広く”、日経産業新聞、2003 年 6 月 16 日。
- [3] “BREAKTHROUGH, Let there be terahertz light”, Japan Journal, Dec. 2005.