

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 4 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～ 2012

課題番号：23656392

研究課題名（和文）半導体中の浅い準位間遷移を利用した室温・連続波テラヘルツ波光源

研究課題名（英文）Room temperature operating continuous wave terahertz light source via shallow electronic states transitions in semiconductors

研究代表者

小山 裕 (OYAMA YUTAKA)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80169367

研究成果の概要（和文）：

Ge や GaAs 中の浅い準位を用いた小型連続波 THz 光源の実現とその高性能化に成功した。励起光は波長 1μ の CW LD を用い、浅い準位に起因する THz 波発生特性を明らかにした。GaAs 結晶では、EL2 準位を介した励起過程で、THz 波発生に成功した。その発生温度依存性は、EL2 準位の PQ 現象と回復現象により明確に説明出来る。THz 帯バンドパスフィルターを用いて、周波数範囲を特定した。結晶端面励起特性も得る事が出来、光共振器形成による選択的 THz デバイス化に道を開いた。

研究成果の概要（英文）：

Compact THz light source based on the optical transitions via shallow levels in semiconductors was successfully developed and those performances have been improved. Ge and other various semiconductor crystals have been used. CW semiconductor laser with 1 micron wavelength was used as an excitation light source. The generation of THz light via optical transitions by shallow levels can be confirmed. Crystal temperature dependences of output intensity have been shown. In case of GaAs, below gap excitation by 1 micron wavelength light can be successfully used for the indirect two photon excitation process via EL2 level. This kind of below gap excitation has a superior feature in that the homogeneous excitation can be possible. In particular, the specific temperature dependences of THz output can be well understood in view of the photoquenching and photo recovery effect of EL2 levels in GaAs. Generation THz wavelength was well estimated by using THz band pass filters. THz surface emission characteristics by edge light excitation was also realized. This result can be successfully applied for the THz wavelength selective resonant cavity constructions for future THz lasers.

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	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・無機材料・物性

キーワード：テラヘルツ、浅い準位

1. 研究開始当初の背景

これまでに、テラヘルツ電磁波発生は多くの方法が提案されている。その発生原理には、パラメトリック効果等非線形光学効果、あるいは電子デバイスの高周波化、量子カスケードレーザーの長波長化、

帯間遷移による p-Ge レーザーや CO₂ レーザー励起による極低温 Si レーザーなどである。それらは、大型レーザーによる強励起、複雑な超薄膜半導体微細構造、あるいは強磁場印加や極低温の必要性などの困難があった。

我々の研究グループでは、未踏の電磁波周波数領域であった、「テラヘルツ電磁波」光源について、電子デバイスの高周波化と差周波混合法による光デバイスの両面から光源開発を行い、その広範な応用分野を探索してきた。光デバイスの面からは、1983年の先駆的な差周波混合による12THz固定周波数発生を始め(Nishizawa, Suto)、これまで、GaP結晶を用いた0.1-7THz連続周波数可変のテラヘルツ光源を実現し、実用的なテラヘルツ分光計を完成するに至っている(株式会社テラヘルツ研究所)。また、光学系の改良により0.5GHzの狭線幅化を実現し、更に最近、半導体レーザー励起による連続波(CW)で約4MHzの超狭線幅化を達成した(Rev.Sci.Instr., 2009)。これは実に、Q値で100万に達する超狭線幅である。一方、装置の小型化についても、励起近赤外レーザーの短共振器化を達成し、30cm×30cm程度の小型テラヘルツ光源を実現するに至った(NEDO)。電子デバイスとしては、0.7THz基本波発振を達成している。

世界的に狭範囲の安全秘話高密度通信やセキュリティそして製品製造工程管理や安全に非破壊検査等の広範な有力応用分野が開拓されつつあるが、その実現のために、超小型の室温動作テラヘルツ光源が待たれている。

2. 研究の目的

本研究課題では、フォトルミネッセンス原理に基づく最高強度のテラヘルツ放射強度を得るため、浅い準位と深い準位導入によるフェルミ準位制御及びその放射メカニズムを明らかにする。加えて、複数の浅い不純物添加を行なった半導体試料の多準位導入による放射スペクトルの広帯域化と、外部共振器構成などによる波長選択テラヘルツレーザーの可能性を追求する。

本研究課題の学術的特色は、深い準位の導入による半導体中のフェルミ準位制御による浅い準位のキャリア占有確率最適化という半導体の基本物性を高度に利用して、最新の研究課題の一つである超小型室温テラヘルツ電磁波連続発生とその展開を推進する点にある。本研究課題が達成されれば、極最近我々が得た約1THzで3nW程度の予備的な連続波テラヘルツ波発生を少なくとも数百倍の強度に増大させることが期待できる。そして従来のテラヘルツ波を発生する方法に比べ、極めて小型で室温で動作する単純な構造の革新的テラヘルツ波放射素子の実現でき、テラヘルツレーザーの可能性も追求出来る。その結果、テラヘルツ電磁波の広範な応用分野拡大を大いに促進するものと確信している。

3. 研究の方法

【概要】

本研究課題は次の主要な3研究項目を統合して目的を達成する。即ち ①深い準位導入に

よるフェルミ準位最適化制御 ②キャリア補償による高効率テラヘルツ波発生 ③波長選択テラヘルツレーザーの可能性追求である。半導体材料としては、本課題の原理に基づくテラヘルツ放射の実績を確認しているGe結晶等を用いる。

H23年度では、半導体中の浅い準位を補償して、高不純物濃度でありながらフェルミ準位を禁制帯中央付近に固定し、電子占有確率をゼロにしてテラヘルツ発生効率を高めるため、深い準位の導入と特性評価を行う。H24年度ではその結果を基に、外部共振器構造を適用するテラヘルツレーザーの可能性を検討する。

【H23年度】

① 浅い準位と深い準位導入の最適条件とフェルミ準位制御

初年度では、波長数100ミクロン帯の遠赤外分光器(既存)の整備を行ない、本課題の原理に基づくテラヘルツ放射が確認されている各種GeとSi結晶に対して、深い準位の導入とそのテラヘルツ放射特性計測を開始する。深い準位の導入法は、種々の浅い準位密度を有する半導体結晶に対して、熱処理による点欠陥の導入や遷移金属元素の拡散による導入を行なう。導入された深い準位は、我々独自のフォトキャパシタンス法を用いて測定し、その準位密度と準位エネルギーを定量的に計測する。

② キャリア補償によるテラヘルツ波高効率発生

Ge等に対するキャリア補償を行うために、ドナーとアクセプター不純物の同時添加を固相拡散によって行う。初年度は、拡散熱処理装置の整備を行ない、代表的なドナー不純物であるSbのGeへの試験的拡散実験を開始する。キャリア補償は、p型基板結晶中にドナー不純物を拡散することによって行なう。半導体結晶中への不純物拡散については、研究代表者のグループは長年の経験と実績を有している。不純物拡散層の特性については、拡散プロファイルは共通設備のSIMSにより定量評価を行う。拡散層の電気的特性は、既存設備のホール係数測定装置を用いる。初年度はそのための不純物拡散装置の整備と試験的な不純物拡散実験、そして独自の既存コヒーレントTHz分光装置による浅い準位計測を行なう。

【H24年度】

③ 波長選択テラヘルツレーザーへの展開超小型テラヘルツレーザーの可能性を追求するため、波長選択用グレーティングと反射ミラー系による共振器構造の設計を行なう。共振器構造として2種類を考えている。第一は、外部共振器構造である。これに用いるグ

レーティングはテラヘルツ波長に対して高反射率を有する数本/mm程度の長ブレード波長を有する必要があるため、現在は市販品が無く、必然的に自作となる。他の有望な共振器構造として、フェルミ準位制御された半導体結晶の一面には、メッシュミラーを形成し他方の面には全反射ミラーを形成して共振器構造を形成する。メッシュミラーは励起光である近赤外～可視光に対しては殆ど全透過膜として作用するメッシュ間隔を持ち、半導体結晶内部で発生するテラヘルツ光に対しては反射率50乃至70%程度の半透過膜として作用するメッシュを設計する。全反射ミラーは発生テラヘルツ光に対して全反射特性を示し、半導体結晶厚さ方向にテラヘルツ光の共振器を形成することが出来る。いずれのミラー構造も従来半導体プロセスである金属蒸着とフォトリソグラフィ工程で形成することが出来る。

以上の光学的共振器特性を、本課題の動作原理による高効率半導体テラヘルツ波発光層を用いて、反転分布を生じやすい条件での波長選択特性と共振特性を得る。更に励起源の高強度化や、テラヘルツ発光層の高効率化を達成して、室温動作の超小型テラヘルツレーザーの実現性を検討する。

4. 研究成果

本研究で得られた研究成果を列記すると以下のとおりである。

- Ge 半導体結晶に対して熱処理による点欠陥ディープレベル導入を行なう事でフェルミ準位制御し、未処理結晶より発生 THz 波強度を高めた。
- Ge 半導体結晶に対して反対導電型不純物拡散を行なう事で補償を行なって高抵抗化し、THz 波発生強度を高めた。
- Ge、GaSb 等、各種半導体結晶からの THz 発生出力温度依存性を明らかにした。その上で、THz 波発生出力温度依存性の間接遷移・直接遷移の観点から整理する事が可能であることを示した。
- GaAs 結晶を禁制帯幅より小さなエネルギーで励起し、EL2 準位を介した 2 フォトプロセスで浅い準位を介した THz 波発生が実現出来る事を示した。(投稿論文準備中)
- GaAs からの THz 波発生出力の温度依存性を、EL2 準位のフォトクエンチング効果と熱的回復効果そして光回復効果により、完全に説明出来る事を示した。(投稿論文準備中)
- これまで未知であった本光過程による THz 波発生波長を、数種類のバンドパスフィルターの透過特性を測定する事で推定する事が出来た。(投稿論文準備中)
- テラヘルツ共振器構造を適用した波長

選択性キャビティ構造の設計を行なうため、端面励起の表面発光特性を得る事が出来、将来の本方式による THz レーザーの可能性を示した。

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 1 件)

1.出崎光・Key Engineering Materials Vol.500, pp66-69 2012 年発行, “Room Temperature Terahertz Emission Via Intracenter Transition in Semiconductors”, 査読有 Jing Menglong, Sundararajan Balasekaran, Tadao Tanabe, Yutaka Oyama,doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.500,66

[学会発表] (計 6 件)

【国際会議 2 件】

1.Joint Symposium on Materials Science and Engineering 2011 Nanyang Technological University Singapore 2011.6.18

“Material science and technology as a basis for device realization for THz” Oral, Hikari Dezaki, Tadao Tanabe and Yutaka Oyama

2.AMMO2011, クアラルンプール, 2011.9.25 ~9/27, “Room temperature terahertz emission via intracenter transition in semiconductors”

Oral, Jin Menglong, B.Sundararajan, Tadao Tanabe, Yutaka Oyama

【国内会議 4 件】

3.出崎 光、スندگانラジャン B、田邊匡生、高坂、小山裕、第 72 回応用物理学会学術講演会 山形大学小白川キャンパス 2011.8.31 「半導体の浅い準位間遷移を用いた室温テラヘルツ波発生」 O r a l

4.出崎 光、スندگانラジャン B、田邊匡生、高坂、小山裕、第 149 回日本金属学会、沖縄コンベンションセンター2011.11.7 「間接遷移型半導体のバンド内遷移を用いた室温テラヘルツ波発生」 O r a l

5.清水祐作、出崎光、小山裕、応用物理学会東北支部 東北大学金研 2012.12.6 ~ 12.7 S.1.-GaAs 中の EL2 準位を介した光励起によるテラヘルツ波発生 O r a l

6.出崎 光 Excellent Graduate Schools 2012 Annual Meeting 秋保ホテル華の湯 2013.3.7

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

<http://www.material.tohoku.ac.jp/~denko/lab.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小山 裕 (OYAMA YUTAKA)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：80169367

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：