

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K04710

研究課題名(和文)半導体量子ドット2波長レーザによるテラヘルツ波発生

研究課題名(英文)Two-mode quantum dot laser for terahertz generation

研究代表者

赤羽 浩一 (Akahane, Kouichi)

国立研究開発法人情報通信研究機構・ネットワークシステム研究所ネットワーク基盤研究室・主任研究員

研究者番号：50359072

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では半導体量子ドットを利得媒質として外部共振器レーザを構成し、発振モードを制御することによりテラヘルツ発生が可能な2波長レーザを実現した。量子ドットを用いることで通常起きるモードホップは抑制され、安定的な2波長発振が得られた。2波長発振のモード間隔は2波長レーザを構成するエタロンフィルタの特性を変更することにより、90GHzから1THzまで可変にできることを実証した。これらの2波長発振はマイケルソン干渉計により干渉信号を取ることで、0.09THzから1THzの周波数で振動していることが明らかになった。これらのことから本研究で作製した2波長レーザはテラヘルツ波発生に有用であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we fabricated two-mode laser using semiconductor InAs quantum dots as the gain medium in the external cavity configuration. When the QDs were used for gain media, the mode hopping could be suppressed and stable two-mode lasing was obtained. Two-mode laser emission with a separation of 0.09, 0.1, 0.3, and 1 THz has been achieved by controlling the etalon and narrow-band filter setting and corresponding beat signal was observed in interference measurement. From these results, the fabricated two-mode laser can be used for generation of terahertz wave.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：量子ドット 2波長レーザ テラヘルツ波

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ (THz) 周波数領域の電磁波は電波と光の中間にあたる未開拓周波数領域として注目を集めている。特にその高い周波数を利用した超高速無線通信への応用や、THz 周波数領域に特有の材料、分子の吸収、透過特性を活用した分析、センシング分野への応用が期待されている。THz 波の発生方法は図 1 に示すように様々な方法が提案され、実現されている。しかしながら現状で可能となっている THz 波の発生方法はいくつかの課題を抱えている。例えば近年活発に研究が行われている THz 周波数領域における量子カスケードレーザは電流注入のデバイスであり、半導体をベースとした素子であることから小型の THz 光源として期待されているが、半導体中で扱うエネルギーが室温のエネルギー ($kT \sim 25\text{meV}$) 以下であるため、使用の際には大掛かりな冷却機構が必要となり、これがシステム全体の小型化を制限している。また、大掛かりな冷却機構が必要な点は p ドープの Ge を利用したレーザも同様である。UTC-PD や共鳴トンネルダイオードなど高速な電子デバイスを用い、電波の観点から THz 波を発生させる手法も提案され、サブ THz の周波数の電磁波発生が室温で実証されているが、電子デバイスを用いた手法では発生できる THz 波のパワーが弱いという課題がある。この中で、非線形結晶を用いた差周波発生で THz 波を発生させる手法は室温で動作可能で比較的出力の大きな THz 波を発生させることができる手法として期待されている。しかしながら差周波発生では波長の異なるレーザを 2 台用意し、そのレーザ間で厳密な同期をとる必要がある。さらに非線形結晶で差周波を発生する際にはパワーの大きな 2 つの波長のレーザ光を準備する必要がある。これらのことから差周波発生によって THz 波を得る際にもシステムが大型化する傾向にある。本研究ではこの差周波発生の際に利用できる 2 波長を同時に発振し得る 2 波長レーザを、半導体量子ドットを光利得材料に用いることにより実現し、THz 波発生に応用することを目的とする。

2. 研究の目的

本研究課題ではテラヘルツ (THz) 周波数領域の電磁波発生のための高安定 2 波長レーザを、半導体量子ドットを利得材料として用いることにより実現するとともに、これを用いた THz 波発生に関する研究開発を行う。具体的な内容としては半導体量子ドットレーザからの 2 波長選択機構の構築と 2 波長同時発振メカニズムの解明、およびその安定化手法確立に関する研究と、2 波長レーザおよび非線形結晶、OE 変換素子を用いた室温における THz 波発生手法の研究開発を行う。

3. 研究の方法

本研究では THz 周波数領域の電磁波発生

のための高安定 2 波長レーザを実現することを主な目的とする。一般的にいくつかの波長をレーザ発振させる手法としては共振器の縦モードを利用した多モード発振が挙げられる。しかしながら多モード発振の場合はモード間隔や利得の波長特性によりモード競合により各波長の強度が安定しないなどの問題が多い。本研究では複数の波長を選択的に発振させる場合の利得媒質として半導体量子ドット構造を用いる。半導体量子ドットは離散的な状態密度関数を有するため、2 つの波長の発振が起きた場合にも個々の量子ドットはどちらかの波長としか相互作用しない状況が作り出せるものと考えられる。従って量子ドットを利得媒質として 2 波長のレーザ発振が起きた場合、各波長の強度は安定化するものと考えられる。この量子ドットを利得媒質として利用することに加えて 2 波長を選択的に発振させる機構としては、レーザ共振器内に配置した特定周波数間隔のエタロンフィルタと狭帯域フィルタの組み合わせによる特定モード引き抜き手法を用いることを想定している。この際にエタロンフィルタおよび狭帯域フィルタの組み合わせとレーザ共振器長との関係をスペクトル測定及び解析などにより明らかにし、2 波長および複数波長のレーザ発振をどのように安定化させることができるかを明らかにする。また、量子井戸のゲインチップなども利用し、量子ドットの離散的状態密度がどのように利得として複数レーザ発振に寄与するかを明らかにする。さらには得られた 2 波長レーザ発振と OE 変換素子、非線形結晶などを用いることにより、THz 波発生を検討を行い、2 波長発振レーザの安定性が THz 波発生にどのように影響するかを明らかにする。

4. 研究成果

本研究 1 年目では、半導体量子ドットを光利得材料に用いることにより安定な 2 波長発振を実現することを目標とした。波長 1550nm 帯で動作する量子ドットレーザを用いた外部キャビティ構造の採用により 2 波長レーザを構築した。外部キャビティ構造の構成は、量子ドットゲインチップ、エタロンフィルタ、狭帯域フィルタを共振器内に有するものである (図 1)。量子ドットゲインチップとしては InP(311)B 基板上に形成された InAs 自己形成量子ドットレーザ構造を用いた。量子ドットは歪補償法を適用し、多重積層構造にすることにより大きな利得が得られるように設計した。これにより光通信波長帯である 1550nm 付近において 2 つの波長のみが発振し、他の波長は抑制されるレーザ発振が観測された (図 2)。2 つの波長間隔はエタロンフィルタにより 0.1THz に設計したが、観測された 2 波長発振の波長間隔もほぼ 0.1THz となり、良い一致を示した。2 波長と他のノイズ成分との信号-ノイズ比は 40dB 以上あり、ノイズの少ない良好な光源が実現できた。ま

た、2 波長が真に同時に発振しているかどうかを確認するためのマイケルソン干渉計による干渉信号測定の実験も行い、2 波長間隔に相当する 0.1THz の周期でビート信号の測定に成功した。これらの結果より半導体量子ドットを光利得材料とした外部キャビティ構造の構築により 2 波長同時発振レーザが実現できた。また、モード間隔が 0.09THz のエタロンフィルタにおいても同様の 2 波長発振を得た。

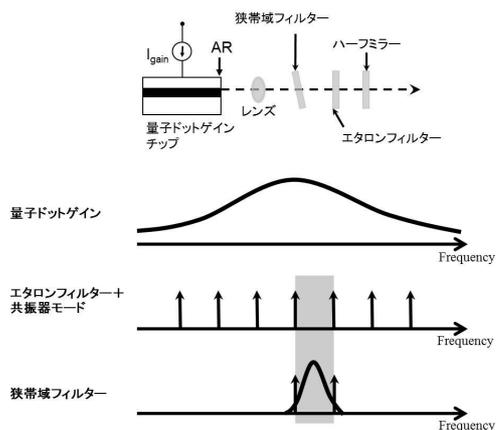


図 1 2 波長レーザの構成と動作原理

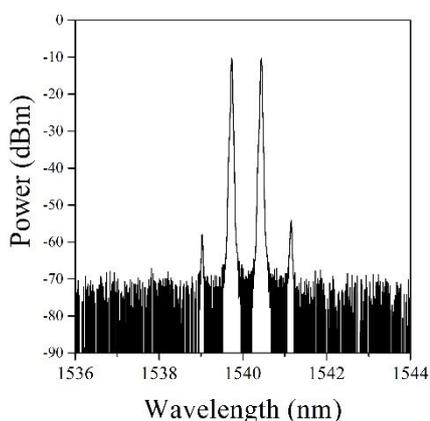


図 2 2 波長発振時の発振スペクトル

研究 2 年目では 1 年目を実現した波長 1550nm 帯で動作する 2 波長量子ドットレーザの高周波数化に関する研究をおこなった。外部キャビティ構造の構成は、1 年目と同様、量子ドットゲインチップ、エタロンフィルタ、狭帯域フィルタを共振器内に有するものである。2 つの波長間隔を決定するエタロンフィルタには 0.3THz と 1THz のものを設計した。また、これに合わせて他の波長成分の発振を抑制する狭帯域フィルタの設計を変更した。これらの新しいコンポーネントを用い、2 波長発振の周波数変化を行う実験では、設計された周波数間隔とほぼ一致する 0.299THz と 0.99THz の波長間隔を持つ 2 波長発振が観測された。2 波長と他のノイズ成分との信号-ノ

イズ比は 35dB 以上あり、ノイズの少ない良好な 2 波長光源が実現できた。また、マイケルソン干渉計による干渉信号測定の実験も行い、2 波長間隔に相当する周期でビート信号の測定に成功した。これらの結果より半導体量子ドットを光利得材料とした外部キャビティ構造の構築により、テラヘルツ周波数領域における 2 波長同時発振レーザが実現できた。

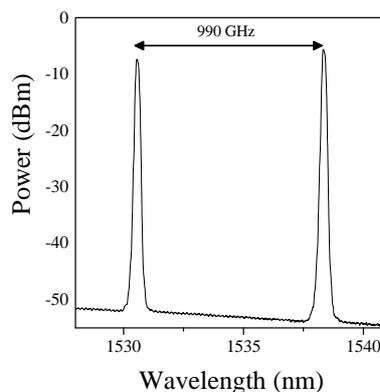


図 3 1THz の周波数間隔を持つ 2 波長レーザ

研究 3 年目では 2 年目までに実現した波長間隔が 0.09THz、0.1THz、0.3GHz、1THz の 2 波長発振レーザのうち、0.09THz 間隔の 2 波長レーザを使用し、実際に 0.09THz の電気信号を観測する実験を行った。0.09THz の波長間隔で発振した 2 波長レーザは EDFA 光増幅器で増幅後、高速応答が可能な UTC-PD に導入した。UTC-PD で電気信号に変更された信号はスペクトルアナライザによりスペクトル測定を行った。測定の結果、得られた電気信号の周波数は、ほぼ 0.09THz であり、2 波長レーザの波長間隔とほぼ等しいという結果が得られた。

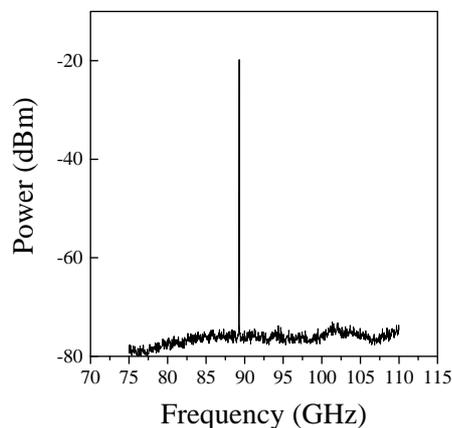


図 4 2 波長レーザと UTC-PD により生成したミリ波信号のスペクトル

これにより 2 波長レーザを用いたテラヘルツ波発生の実証が達成できたと考えられる。本研究室では研究費の関係上 0.09THz 以上の高速 PD が調達できなかったため、これ以上の実証は行っていないが、原理的には UTC-PD は出力の大きさを問わなければ 0.3THz から 1THz 程度の応答は可能であるため、テラヘルツ波発生が可能であると考えられる。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

Mikhail Patrashin, Kouichi Akahane, Norihiko Sekine, Iwao Hosako, “Molecular beam epitaxy of strained-layer InAs/GaInSb superlattices for long wavelength photodetectors”, Journal of Crystal Growth, 査読有, Vol. 477, 2017, pp. 86-90.

Yasuyoshi Mitsumori, Tetsuya Watanuki Yuki Sato, Keiichi Edamatsu, Kouichi Akahane, Naokatsu Yamamoto, “Anomalous optical diffraction by a phase grating induced by a local field effect in semiconductor quantum dot”, Physical Review B, 査読有, Vol. 95, 2017, p 155301.

Kouichi Akahane, Atsushi Matsumoto, Toshimasa Umezawa, Naokatsu Yamamoto, Keita Hashimoto, Hiroshi Takai, “Increase in the emission wavelength (over 1800 nm) of InAs quantum dots grown on InP substrate using a dot-in-well structure”, Physica Status Solidi B, 査読有, Vol. 254, 2016, p 1600490.

Kouichi Akahane, Toshimasa Umezawa, Atsushi Matsumoto, Naokatsu Yamamoto, Tetsuya Kawanishi, “Characteristics of highly stacked InAs quantum-dot laser grown on vicinal (001)InP substrate”, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 55, 2016, p 04EJ16.

Kouichi Akahane, Naokatsu Yamamoto, Toshimasa Umezawa, Tetsuya Kawanishi, Takehiro Tanaka, Shin-ichi Nakamura, Hideyuki Sotobayashi, “Control of wavelength and decay time of photoluminescence for InAs quantum dots grown on InP(311)B using the digital embedding method”, Physica Status Solidi B, 査読有, Vol. 253, 2016, pp. 640-643.

Kouichi Akahane, Naokatsu Yamamoto, Tetsuya Kawanishi, “Fabrication of InAs quantum dot stacked structure on InP(311)B substrate by digital embedding method”, Journal of Crystal Growth, 査読有, Vol. 432, 2015, pp. 15-18.

〔学会発表〕(計 15 件)

Kouichi Akahane, “Carrier dynamics of InAs quantum dot with digital embedding method

grown on InP(311)B substrate”, 6th International Workshop Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructure

(SemiconNano 2017), 2017 (招待講演).

Kouichi Akahane, Masaki Inui, Ryuji Sakamoto, Shingo Nakane, Masaru Iwao, Toshimasa Umezawa, Atsushi Matsumoto, Atsushi Kanno, Naokatsu Yamamoto, Tetsuya Kawanishi, Hideyuki Sotobayashi, “Mode separation control of few-mode quantum dot lasers by using multistep etalon filter”, 42nd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Wave 2017 (IRMMW-THz 2017), 2017.

Atsushi Matsumoto, Kouichi Akahane, Toshimasa Umezawa, Naokatsu Yamamoto, “Extreme thermal stability of 1550 nm band highly stacked QD-LDs with p-doped structure”, Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim 2017, 2017.

Kouichi Akahane, Naoya Yoshida, Yu Fukae, Atsushi Matsumoto, Toshimasa Umezawa, Atsushi Kanno, Hideyuki Sotobayashi, “Evaluation of multi-channel amplification for highly stacked quantum dot semiconductor optical amplifiers”, Progress in electromagnetics research symposium 2017 (PIERS 2017), 2017.

Atsushi Matsumoto, Toshimasa Umezawa, Kouichi Akahane, Naokatsu Yamamoto, Hirohito Yamada, Tomohiro Kita, “Differential frequency tunable dual-mode heterogeneous QD laser with Si PIC”, Conference on Lasers and Electro-Optics 2017 (CLEO 2017), 2017.

Kouichi Akahane, “Fabrication of highly stacked Self-assembled InAs quantum dot with strain- compensation technique”, 3rd Annual World Congress of Smart Materials 2017, 2017 (招待講演)

Kouichi Akahane, Atsushi Matsumoto, Toshimasa Umezawa, Naokatsu Yamamoto, Tetsuya Kawanishi, “High characteristic temperature for ridge-waveguide laser with highly stacked InAs quantum dot structure”, The 25th International Semiconductor Laser Conference (ISLC2016), 2016.

Kouichi Akahane, Atsushi Matsumoto, Toshimasa Umezawa, Naokatsu Yamamoto, Keita Hashimoto, Hiroshi Takai, “Increasing the emission wavelength of InAs quantum dot grown on InP substrate using a dot in well structure”, Compound Semiconductor Week 2016 (CSW2016), 2016.

乾 勝貴、赤羽 浩二、菅野 敦史、山本直克、川西 哲也、外林 秀之、”複屈折エタロンフィルタによる 2 波長レーザの周波数変化”, 電子情報通信学会 OPE 研究会, 2016.

Kouichi Akahane, Toshimasa Umezawa, Atsushi Matsumoto, Naokatsu Yamamoto, “Temperature dependence of photoluminescence from InAs quantum dot grown by digital embedding on InP(311)B substrates”, 7th International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Application (ICOOPMA2016), 2016.

乾 勝貴、赤羽 浩一、山本 直克、菅野 敦史、川西 哲也、外林 秀之、”方解石エタロンフィルタによる2波長レーザの周波数間隔変化”、第63回応用物理学会春季学術講演会, 2016.

Kouichi Akahane, Toshimasa Umezawa, Atsushi Kanno, Atsushi Matsumoto, Naokatsu Yamamoto, Tetsuya Kawanishi, “Wavelength tunability of a two-mode semiconductor quantum dot laser in the telecom band”, Photonics West 2016, 2016.

Kouichi Akahane, Naokatsu Yamamoto, Toshimasa Umezawa, Atsushi Matsumoto, Tetsuya Kawanishi, “Characteristics of highly stacked InAs quantum-dot laser grown on vicinal (001)InP substrate”, International Conference on Solid State Devices and Materials 2015, 2015.

Kouichi Akahane, “Control of energy state of InAs quantum dot by digital embedding method on InP(311)B substrate”, SemiconNano 2015, 2015 (招待講演).

Kouichi Akahane, Naokatsu Yamamoto, Atsushi Kanno, Toshimasa Umezawa, Tetsuya Kawanishi, “Change of mode separation for two-mode laser with semiconductor quantum dots”, Progress in Electromagnetics Research Symposium, 2015.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕(計 0 件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

赤羽 浩一 (AKAHANE Kouichi)

(国研)情報通信研究機構・ネットワークシステム研究所ネットワーク基盤研究室・主任研究員

研究者番号：50359072

(2)研究分担者

川西 哲也 (KAWANISHI Tetsuya)

早稲田大学・理工学術院・教授