

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390083

研究課題名(和文)周波数可変コヒーレントテラヘルツ波発生用2波長集積半導体レーザの研究

研究課題名(英文)Research on integrated two-wavelength semiconductor laser for frequency tunable coherent terahertz wave generation

研究代表者

上向井 正裕 (Uemukai, Masahiro)

大阪大学・工学研究科 ・助教

研究者番号：80362672

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)：周波数可変テラヘルツ波発生用2波長集積レーザを構成する800nm帯波長可変単一モードレーザの試作・評価を行った。高い利得が得られるGaAsP歪量子井戸導波路を採用し、表面DBRグレーティング直上にITO薄膜ヒータを装荷した波長可変レーザと簡便に作製可能な周期的スロット構造波長可変単一モードレーザにおいて、安定した単一モード発振と良好な波長可変特性が得られた。受動導波路吸収損失低減のための量子井戸選択的無秩序化技術を確立するとともに、種々の構成の2波長集積レーザを検討した結果、上記波長可変レーザとY型結合増幅器からなる2種の波長可変2波長集積レーザの作製を進めている。

研究成果の概要(英文)：For the implementation of integrated two-wavelength semiconductor lasers for frequency tunable THz wave generation, 800-nm-band tunable single-mode lasers were fabricated and evaluated. To improve laser performance, a high-gain GaAsP strained quantum well was employed as an active layer. From tunable DBR lasers with an ITO thin-film heater and periodically slotted single-mode lasers, stable single-mode lasing and wide wavelength tuning were achieved. Quantum well disordering technique to reduce the absorption loss in the passive waveguide was also established, and several types of the integrated two-wavelength lasers were investigated. As a result of optimization, tunable integrated two-wavelength lasers consisting of tunable single-mode lasers mentioned above and a Y-branch waveguide amplifier are under fabrication.

研究分野：光集積デバイス

キーワード：半導体レーザ 光集積デバイス DBRレーザ 波長可変レーザ 2波長レーザ 量子井戸無秩序化

1. 研究開始当初の背景

近年、周波数 0.1~10THz の電磁波 (THz 波) へ注目が集まっており、発生源開発と応用開拓が進んでいる。THz 波は様々な物質を容易に透過し、また指紋スペクトルと呼ばれる物質固有の吸収スペクトルが存在するため、医療・バイオ・工業・農業・セキュリティなど様々な分野での応用が期待されている。

THz 波の発生には、フェムト秒レーザを用いたフォトミキシング、2 波長半導体レーザを用いたフォトミキシングおよび量子カスケードレーザなどが用いられる。このうちフェムト秒レーザ方式は高出力な THz 波パルスを発生できるが高価であり、量子カスケードレーザは単独で THz 波を発生しうるが低温を要する。一方、2 波長半導体レーザとフォトミキサを用いた方式はコンパクトなコヒーレント THz 波発生源を実現でき、レーザ発振波長差を変化させることで THz 波の周波数も任意に調整できる。これは原理的に DC 付近から数 THz 付近まで連続的に周波数を変化できる THz 波発生源として唯一のものである。

これまで半導体レーザとフォトミキサを用いたコヒーレント THz 波発生の研究が国内外で活発になされており、この方式による IC カードの THz 波透過イメージ取得などが報告されている。また応用研究のための周波数可変 THz 波発生システムが米国 Emcore 社、独国 TOPTICA 社などから市販されている。さらに THz 波発生に応用可能な 2 波長集積 DBR レーザ (THz 波発生は未実証) や 2 モードで発振する集積 DFB レーザと光ファイバー増幅器を用いた周波数可変 THz 波発生が報告されているが、いずれもコンパクトで実用的な THz 波発生システムとはいえない。

2. 研究の目的

波長のわずかに異なる 2 つの DBR レーザと Y 型結合器からなる 2 波長集積半導体レーザは、光軸調整不要・2 波長出力レベル調整可能・優れた波長差安定性などの利点を有し、フォトミキサと突き合わせ接続することによりコンパクトで実用的な THz 波発生モジュールを実現できる。すでに 780nm 帯 2 波長集積レーザの設計・試作を行い、このレーザをフォトミキサと組み合わせることで、この種の 2 波長集積レーザとして初めてフォトミキシングによるコヒーレント THz 波発生に成功した。さらに DBR グレーティング横に pn 接合ヒータを集積した波長可変 2 波長集積レーザ (図 2) を設計・試作し、フォトミキシングによる周波数可変 THz 波の発生においても光ファイ

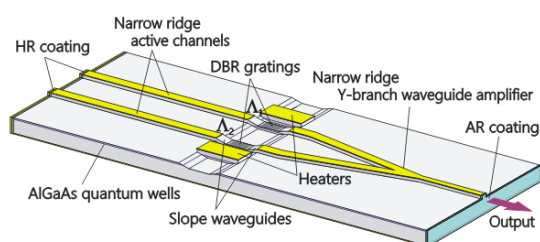


図1 波長可変2波長集積DBRレーザ

バー増幅器などを用いずに世界で初めて成功した。

しかし THz 波の周波数可変範囲は限られており、これをより実用的なデバイスとするためには THz 波のさらなる周波数可変範囲の拡大と出力の向上が必要である。より高い利得が得られる GaAsP 歪量子井戸導波路構造を用いて複数の異なる構成の波長可変 2 波長集積半導体レーザを設計・作製し、2 波長発振特性および波長可変特性を評価する。波長可変機構には透明導電膜ヒータを採用し、2 光波重畳のための結合器においては Y 型結合器およびマルチモード干渉結合器を比較し、高性能集積レーザとして最適な構成を見出す。さらに 2 波長集積レーザとフォトミキサを突き合わせ接続することでコンパクトな THz 波発生モジュールを実現し、周波数可変コヒーレント THz 波発生を実証することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 波長可変範囲拡大を目指した 800nm 帯 GaAsP 歪量子井戸波長可変 DBR レーザ

AlGaAs 量子井戸 2 波長集積半導体レーザに採用した表面グレーティング型波長可変 DBR レーザをベースとし、高い利得が得られる 800nm 帯 GaAsP 歪量子井戸導波路構造を採用した波長可変 DBR レーザを作製する。pn 接合ヒータに代わり、少ない電力で局所的に加熱できる ITO 透明導電膜ヒータを DBR 直上に装荷することで、DBR レーザの波長可変範囲の拡大 (目標 3~6nm) と高出力化 (目標 50mW) を図る。

(2) 低損失受動導波路形成のための量子井戸選択的無秩序化技術の確立とデバイス構成最適化

GaAsP 歪量子井戸導波路において、F イオン注入と熱処理により量子井戸を無秩序化できることが知られている。この構造における最適な量子井戸無秩序化条件を見出すとともに、受動導波路損失の大幅な低減を確認する。この技術によりデバイス構成自由度が広がるため、電流注入が不要なマルチモード干渉結合器や Y 型結合器を集積した 2 波長集積レーザも実現可能となる。温度上昇による出力低下が問題となった電流注入 Y 型結合増幅器とも比較して、最適なデバイス構成を見出す。

(3) 周波数可変範囲拡大を目指した THz 波発生用波長可変 2 波長集積レーザの試作

GaAsP 歪量子井戸構造を採用することで波長可変範囲を拡大した高性能 DBR レーザを 2 本集積した 2 波長集積半導体レーザを作製する。また高い印加電圧、強いレーザ光入射が可能なフォトミキサを使用することで、発生 THz 波の周波数可変範囲を大幅に拡大 (目標 0.5~3THz) する。さらに波長可変 2 波長集積レーザとフォトミキサを突き合わせ接続したコンパクトで実用的な THz 波発生モジュールを試作し、発生 THz 波の周波数可変範囲を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 波長可変範囲拡大を目指した 800nm 帯 GaAsP 歪量子井戸波長可変単一モードレーザ

高い利得が得られる 800nm 帯 GaAsP 歪量子井戸導波路を用い、DBR グレーティングを効率よく加熱できる ITO 透明薄膜ヒータを DBR 直上に装荷した波長可変 DBR レーザ (図 2) の作製と評価を行った。この DBR レーザを CW 駆動することで、出力光パワー 50mW まで良好な単一モード発振が得られた。またヒータで DBR を加熱するとともに発振波長は 798.8nm から 804.0nm まで変化していき、160mW の少ないヒータ消費電力で 5.2nm にわたる広い波長可変範囲が達成できた (図 3)。波長可変範囲全体にわたって良好な単一モード発振が維持され、ヒータ加熱による出力パワーの低下も 2 割程度であった。

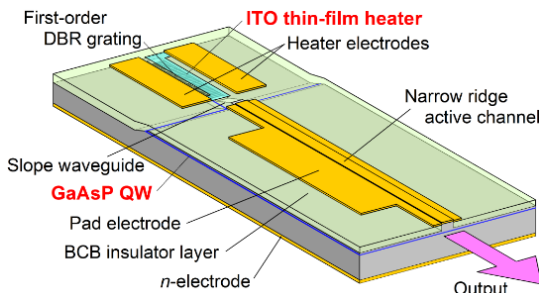


図 2 ITO 薄膜ヒータ装荷波長可変 DBR レーザ

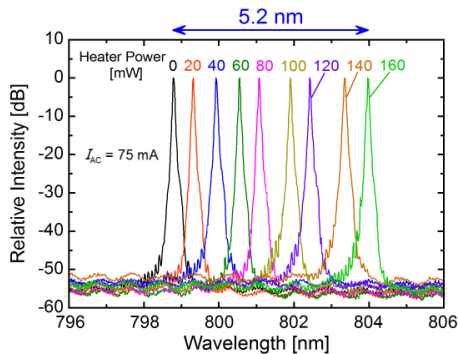


図 3 波長可変特性

上記 DBR レーザにおいて良好な波長可変特性が得られたものの、作製プロセスが非常に複雑・困難なため、より簡便な方法で作製可能な波長可変レーザとして、高次結合ディープエッチ DBR レーザと周期的スロット構造単一モードレーザの設計・試作を行った。両レーザとも活性領域と周期構造領域に独立した電極を形成することで波長可変特性を実現することができる上、後段のリッジ構造導波路への接続がよく光集積デバイスの光源として適している。特に周期的スロット構造レーザ (図 4) から良好な単一モード発振が得られ、また 25dB 以上のサイドモード抑圧比を維持したまま 2.6nm の波長可変範囲を達成した (図 5)。

一方、高次結合ディープエッチ DBR レーザでは、駆動条件によってはサイドモード抑圧比 30dB の良好な単一モード発振が得られたものの、出射端面の無反射コーティングが不十分だったため安定した単一モード発振特性

および良好な波長可変特性は得られなかった。

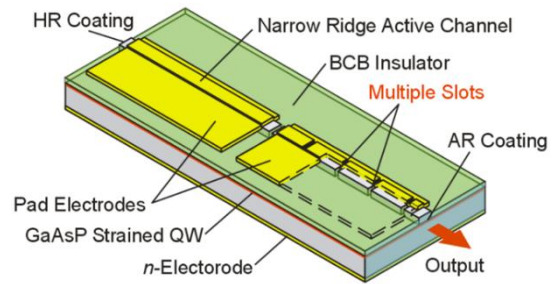


図 4 周期的スロット構造単一モードレーザ

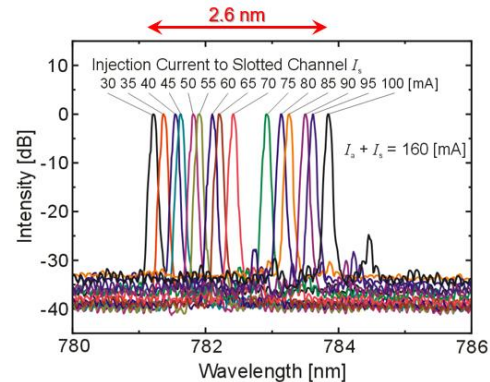


図 5 波長可変特性

(2) 低損失受動導波路形成のための量子井戸選択的無秩序化技術の確立とデバイス構成最適化

F イオン注入と熱処理による GaAsP 歪量子井戸の無秩序化を試みた。F イオン注入した試料としていない試料を熱処理した後、量子井戸の無秩序化の程度をフォトルミネッセンス測定により評価することで、選択的無秩序化に適した熱処理条件を見出した。また量子井戸を無秩序化した導波路と無秩序化していない導波路を形成し、カットバック法により両導波路の導波光伝搬損失を測定した。量子井戸無秩序化により、レーザ発振波長における導波光伝搬損失を約 15/cm 低減出来ることがわかった。

この技術を応用することによりマルチモード干渉結合器を集積した 2 波長集積レーザが実現可能となるため、この結合器の設計・試作と評価を行い、2×1 結合器としての動作を確認した。

(3) 周波数可変範囲拡大を目指した THz 波発生用波長可変 2 波長集積レーザの試作

良好な発振特性が得られた ITO 薄膜ヒータ装荷 GaAsP 波長可変 DBR レーザと Y 型結合増幅器および多モード干渉結合器を集積した波長可変 2 波長レーザの設計・作製を行った。これまで生じていた活性領域への電流注入に関する問題は、複雑な作製プロセスを一から見直すことにより解決できた。特に多モード干渉結合器については、確実に単一横モード 2 波長出力が得られるよう設計を見直し、試作した結合器から妥当な結合効率を得られた。しかし、リッジ構造導波路側面に表面荒れが生じるとともに、微細周期 DBR グレーティング形状が最適ではなく、作製した集積レーザ

から2波長出力は得られたもののTHz波発生/検出実験を行える特性ではなかった。

再度、微細周期DBRを有する波長可変レーザを用いた2波長集積レーザを作製するとともに、簡便な作製プロセスで良好な波長可変特性が得られた周期的スロット構造単一モードレーザを用いた波長可変2波長集積レーザについても、設計・作製を進めている。

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 2件)

- ① M. Uemukai and T. Suhara, "GaAsP tunable distributed Bragg reflector laser with indium tin oxide thin-film heater," Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, vol. 55, 08RH01, 2016.
DOI:10.7567/JJAP.55.08RH01
- ② M. Uemukai, S. Terai and T. Suhara, "InGaAs ridge-waveguide distributed Bragg reflector laser with first-order grating fabricated by nanoimprint lithography," Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, vol. 54, 058002, 2016.
DOI:10.7567/JJAP.54.058002

[学会発表] (計 7件)

- ① M. Uemukai, A. Yamashita, S. Kusumoto and R. Katayama, "GaAsP quantum well tunable single-mode lasers with deeply etched periodic structures," Int'l Conf. on LED and their Industrial Application (LEDIA), 2017年4月21日, パシフィコ横浜(神奈川県).
- ② M. Uemukai and T. Furusawa, "GaAsP quantum well tunable single-mode laser with periodically slotted structure," Int'l Semiconductor Laser Conf. (ISLC), 2016年9月14日, 神戸メリケンパークオリエンタルホテル(兵庫県).
- ③ M. Uemukai and T. Suhara, "GaAsP tunable distributed Bragg reflector laser with ITO thin-film heater," Microoptics Conf. (MOC), 2015年10月27日, 福岡国際会議場(福岡県).

[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.qoe.eei.eng.osaka-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上向井 正裕 (UEMUKAI, Masahiro)
大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：80362672

(2) 研究分担者

栖原 敏明 (SUHARA, Toshiaki)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：90116054

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()