

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(c)

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21560044

研究課題名（和文） カバーガラスの部分挿入による 2 波長レーザー発振とそのテラヘルツ波発生への応用

研究課題名（英文） Two-wavelength oscillation from laser a cavity partially-inserted a cover glass etalon and its application to THz-wave generation

研究代表者

和田 健司 (WADA KENJI)

大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40240543

研究成果の概要（和文）：

小型固体レーザーや外部共振器半導体レーザーを構成し、カバーガラスエタロンを共振器内に部分的に挿入することにより、エタロンのフリースペクトラルレンジの 6 倍の周波数間隔をもつ 2 波長発振が安定に発生することを観測した。この 2 波長発振の横モード特性、出力の時間安定性、周波数間隔の変調特性について調べた結果、構成した 2 波長発振レーザーが小型・安価なテラヘルツ時間領域分光光源として有用であることを確認した。

研究成果の概要（英文）：

We observed distinct two-wavelength oscillations from a compact solid-state laser and an external cavity semiconductor laser by partially-inserting a commercially available cover glass etalon into those laser cavities. The frequency interval of the two-wavelength oscillation corresponded to six times the free spectral range (FSR) of the cover glass etalon. It was confirmed that the constructed compact two-wavelength oscillation lasers were useful for a pump laser of a terahertz time-domain spectroscopy system by experimentally examining two-wavelength oscillations in terms of the characteristics of the transverse mode, the time stability of the oscillation, and the variable characteristics of the frequency interval.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎，応用光学・量子光工学

キーワード：テラヘルツ，半導体レーザー，2 波長発振，光伝導アンテナ，時間領域分光法

1. 研究開始当初の背景

近年、テラヘルツ (THz) 帯と呼ばれる $0.1 \sim 10 \times 10^{12}$ Hz の周波数帯は、電波法で定める電波の周波数上限 (3 THz) 付近に相当し、以前はサブミリ波帯として、その利用が天文学や軍事関係などの特殊な用途に限定されているイメージが強かった。これは、THz 波の発生や検出に大型で高価な装置が必要であったことによる。しかし近年になって、レ

ーザー関連技術（特にフェムト秒モード同期レーザー）の進展に伴い、比較的小型で安価な THz 波発生・検出装置が利用可能となり、防犯、通信、イメージングなど幅広い分野で THz 波の応用が提案されるようになってきた¹⁻⁶⁾。特に THz 帯は分子の構造や運動状態を調べる分光の窓として適しており、THz 分光から多くの重要な情報が得られると期待されている。

THz 分光では、室温で高感度な測定が行えることから、THz 時間領域分光法 (THz-TDS) がよく適用される^{2,3)}。典型的な THz-TDS では、まず、一对の光伝導アンテナにフェムト秒光パルスをポンプ光、プローブ光として入力し、ポンプ光側から発生した THz 波をプローブ光側で発生した光キャリアと相互相関測定することにより、THz 波の時間波形に依存した電流波形を取得する。次に、測定対象の試料を実験系に挿入して同じ測定を行う。得られた 2 つの THz 波の波形をフーリエ変換した複素スペクトルの情報より、試料の複素透過係数が求まり、複素屈折率に換算することができる。

実際には、低温成長した GaAs 基板 (LT-GaAs) 上にギャップ電極を配した広帯域特性をもつ光伝導アンテナと、800 nm 帯の広帯域パルス光源であるモード同期チタンサファイアレーザーを組み合わせて THz-TDS 実験がよく実施される。モード同期パルスは周波数軸上に等間隔 (~80 MHz) に並ぶ多くの縦モードを含むため、ビート電流の周波数成分は 80 MHz から 100 THz にも達し、光伝導アンテナのキャリア寿命にもとづく帯域制限を受けるものの、発生する電磁波はテラヘルツ分光に適したテラヘルツ帯での白色光となる。しかし、モード同期レーザーは一般的に大型で高価であるため、応用の点からは小型、安価な励起レーザーの利用が望まれる。これについては既に、多モード半導体レーザーや 2 波長発振半導体レーザーを光源とする THz-TDS システムが提案され、実証実験も行われている^{4,6)}。

しかし、2 波長発振の機構の簡易化や、安定性、波長差の高速掃引など、詳細についてはあまり詳細に検討されていない。また、フェムト秒レーザーと 2 波長を含む多モード発振レーザーを、THz-TDS システムの光源として THz 波発生効率等の点から定量的に比較することも行われていない。そこで、以上の課題を明らかにすべく、2 波長発振レーザーを構築することを中心として研究を進めた。

2. 研究の目的

本研究では、次の 3 項目を目的に臨んだ。

- (1) カバーガラスを光学エタロンとみなし、小型固体レーザー共振器内に部分的に挿入することにより、波長差がテラヘルツ域となる 2 波長発振を実現すること。また、部分挿入に対する理論的説明を加え、2 波長発振特性を詳細に調べること。
- (2) 外部共振器型半導体レーザーを構築し、時間安定な 2 波長発振出力を実現すること。また、この光源出力を一对の光伝導アンテナに照射するテラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) システムを構築し、THz 波の発生を確認すること。

- (3) THz-TDS システムの光源として、フェムト秒レーザーと 2 波長発振レーザーを比較すること。

3. 研究の方法

上の(1)~(3)の目的別に次の手順で研究を進めた。

- (1) 850 nm 付近で広帯域利得をもつ LiSrAlF₆ レーザーを構成し、カバーガラスエタロンを共振器内に部分挿入することにより 2 波長発振の観測を行った。カバーガラスの厚さ、挿入位置、挿入角をパラメータとして、2 波長発振の依存性を調べるとともに、出力強度、横モード特性、時間安定性についても詳細に調べた。
- (2) 外部共振器半導体レーザーを用いて、(1)と同様に 2 波長発振実験を行った。利得帯域の狭い半導体レーザーにおいて 2 波長発振の時間的安定性を維持する方策を講じた。その後、2 波長発振半導体レーザーを光源とし、一对の光伝導アンテナを含む THz-TDS システムを構築した。
- (3) 簡易な数値計算モデルを用いて、テラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) に対する数値シミュレーションを行い、フェムト秒パルスおよび 2 波長定常光を入力時のテラヘルツ波の発生効率や検出波形について調べた。

3. 研究成果

- (1) カバーガラスエタロンを含む小型固体レーザーからの 2 波長発振出力とその特性

(1)-1. 実験系

図 1 に実験系を示す。レーザー媒質には 860 nm を中心に 100 nm 程度の広帯域な発光スペクトルを有する LiSrAlF₆ 結晶 (5×5×5 mm³) を用いた⁷⁾。励起光源には波長 660 nm の赤色半導体レーザーを用い、その出力光は 20 倍の対物レンズでコリメートしたのち、焦点距離 10 cm の単レンズを介してリアミラーに集光した。結晶端面から約 5 cm の位置に曲率半径 10 cm の高反射凹面ミラー (860 nm 帯) を配置し、その凹面ミラーから約 25 cm の位置に反射率 99 % (860 nm 帯) の平面ミラーを置き、フロントミラーとした。赤色半導体レーザーの定格出力 120 mW で励起したとき、約 4 mW の出力光が得られることを確認した。光学エタロンと見なしたカバーガラスは、凹面ミラーとフロントミラー間で形成された平行ビーム中に挿入し、2 波長発振の達成をめざした。

(1)-2. カバーガラスエタロンの部分挿入

共振器内に光学エタロンを挿入しない場合、LiSrAlF₆ 結晶の広帯域特性を反映して多モード発振が観測された。次に、高さ、幅ともに 18 mm、厚さ 110 μm の市販のカバーガラスを共振器内に挿入すると、2 波長発振が

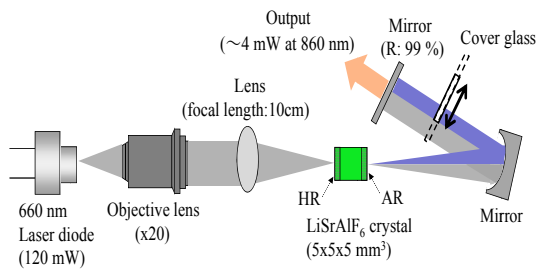


図 1. 2 波長発振小型固体レーザーの実験系

観測された。厚さ d の光学エタロンに光が垂直入射したときの多重反射を考慮すると、その透過率スペクトルは、

$$\Delta f = \frac{c}{2nd} \quad (1)$$

の周波数間隔で変調される⁸⁾。ここで、 c は光速、 n は光学エタロンの屈折率であり、 Δf はフリースペクトラルレンジ (FSR) と呼ばれる。得られた 2 波長出力の波長間隔は 2.1 nm であり、周波数間隔に換算すると 0.88 THz となり、式(1)に $n = 1.5$, $d = 110 \mu\text{m}$ を代入した値 $\Delta f = 0.91 \text{ THz}$ にほぼ一致した。ただし、共振器内へカバーガラスを挿入したことにより光学損失が増大し、出力強度が低下することも確認した (3.87 mW \rightarrow 2.25 mW)。

上のことから、カバーガラスエタロンの挿入にあたり、レーザー発振を維持しながら、カバーガラスを共振器内に徐々に挿入する光学調節を採用した。その過程において、共振器内ビームにカバーガラスエタロンが部分的に交差する条件の下で、特徴的な 2 波長発振が偶然に観測された。この 2 波長発振の波長間隔は 13.0 nm であり、周波数換算すると 5.3 THz に達した。これは、用いた 110 μm 厚カバーガラスエタロンの FSR の約 6 倍に相当し、19 μm 厚カバーガラスエタロンの FSR に一致する。以降では、この実験条件を「カバーガラスエタロンの部分挿入」と表現する。

次に、部分挿入による FSR の拡大について理論的に検討した。共振器内ビームに厚さ d 、屈折率 n のカバーガラスエタロンが部分挿入された場合、エタロンを通過した光成分と空气中を通過した光成分の位相が揃うためには、両者の光路差が波長の整数倍になる必要がある。その条件は次式で表される。

$$nd - d = m\lambda = \frac{mc}{f} \quad (2)$$

ここで、 m は自然数、 λ は波長、 f は周波数である。式(2)が成立する周波数で光は強めあう。この強めあいが生じる周波数間隔は、式(2)の m に $m+1$ を代入し、 m のときとの差分より次式で表される。

$$\Delta f' = \frac{c}{d(n-1)} \quad (3)$$

これが部分挿入時の FSR を与える。式(3)に $n = 1.5$, $d = 110 \mu\text{m}$ を代入すると、 $\Delta f' = 5.45 \text{ THz}$ となり、実験結果にほぼ一致した。また、ガラスの屈折率 $n = 1.5$ を式(1)と式(3)に代入すると、カバーガラスエタロンの全挿入と部分挿入において、後者の FSR は前者のその 6 倍に拡大されることがわかった。厚さ 100 μm 以下の光学エタロンは、一般的に面精度の維持や取り扱いが困難であるため、部分挿入法は有用であると思われる。

(1)-3. カバーガラスエタロン挿入位置の影響
上の実験と同じ条件で、共振器内ビーム (ビーム径: 約 0.8 mm) に対するカバーガラスエタロンの挿入位置を走査パラメータとし、出力光の強度スペクトルの変化を調べた。得られた結果を図 2 に示す。縦軸は共振器内ビームの中心位置 (基準位置) からカバーガラスエタロンの片端までの距離を表す。出力光スペクトルの強度情報がグレースケールで表示されている。片端が基準位置に一致するまでカバーガラスエタロンを共振器内ビームに垂直に挿入したところ、レーザー発振は観測されなかった。次に、カバーガラスエタロンをビーム断面に沿って共振器から取り除く方向に 5 μm ステップで微動すると、エタロンの位置が 0.32 mm に達したとき発振が回復し、0.34 mm ~ 0.44 mm の位置範囲において、特徴的な 2 波長発振出力が観測された。

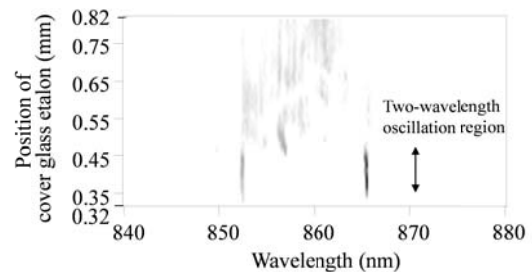


図 2. 110 μm 厚カバーガラスエタロンの位置が共振器内レーザービームを横切って変化したときの強度スペクトルの変化

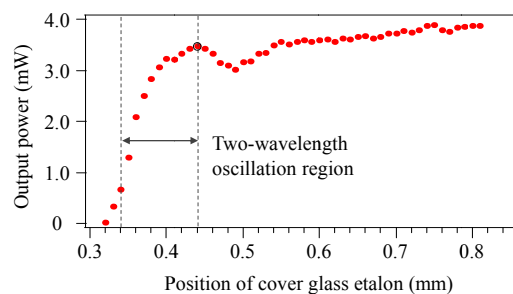


図 3. 110 μm 厚カバーガラスエタロンの位置が共振器内レーザービームを横切って変化したときの出力平均強度の変化

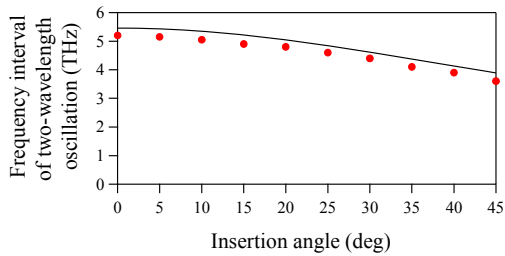


図 4. 110 μm 厚カバーガラスエタロンの挿入角を変えたときの 2 波長発振の周波数間隔の変化

(1)-4. 横モード特性

2 波長発振時における出力ビームの横モード特性をナイフエッジ法により調べた。カバーガラスは、ビームの水平 (x) 方向に向かって、最適位置 (0.44 mm) まで部分挿入した。ナイフエッジ法による計測はフロントミラー直後の位置で行い、水平 (x) 方向と垂直 (y) 方向に金属刃を掃引した。いずれの観測結果もガウス型形状を維持することが示され、それぞれのプロファイルの半値幅は 0.877 mm, 0.792 mm と見積もられた。以上の測定より、カバーガラスエタロンの部分挿入時においても横モードは低次モードを維持しており、縦モードの 2 波長化に伴う高次横モードの発生はないことがわかった。

(1)-5. 時間安定性

次に、2 波長発振出力の時間安定性について検討した。カバーガラスエタロンの挿入により、共振器内の損失が増大すると 2 波長発振は不安定になりやすく、数十秒の時間経過で、モード競合的なスペクトルの変動を経て、単一モード発振状態に移行する傾向が見られた。そこで、平均出力強度の時間変化について調べた。励起半導体レーザーの出力強度を一定に制御し、エタロン位置 0.32 mm の高い出力強度が得られる条件で 2 波長発振レーザーを光学定盤上で動作させた場合、30 分の測定時間内で平均出力強度は安定に推移した。実験データから、測定時間内での平均値を求め、「(最大値-最小値) / 平均値」を変動係数として計算したところ、その値は 1.2 % と見積もられ、時間安定性が高いことがわかった。

(1)-6. 挿入角依存性

カバーガラスエタロンの共振器内ビームに対する挿入角を掃引することにより、2 波長発振の周波数間隔を変化させる実験を行った。挿入角に対する 2 波長発振の周波数間隔を計測した結果を図 4 に示す。図中の実線は理論曲線である。挿入角が大きい場合、カバーガラスエタロンのエッジ部分による光学損失が顕著となるため、実験では挿入角の最大を 45 度に制限した。0 から 45 度まで 5

度ずつ挿入角を掃引して周波数間隔を測定した結果、実験値は理論値とよい一致を示した。ただし、現状では、時間安定性の高い発振状態を維持するために、挿入角を変化させるたびに若干の光学調整を必要とした。

(1)-7. 異なる厚さのカバーガラスエタロンを用いた場合

厚さの異なるカバーガラスを 6 枚用意し (80, 150, 210, 295, 400, 560 μm)、2 波長発振実験を行った。その結果、部分挿入で生じる 6 倍の FSR にもとづく 2 波長発振特性、横モードの低次モード特性、出力の高い時間安定性、挿入角の掃引による周波数間隔の可変特性、いずれも 110 μm 厚のカバーガラスエタロンと同様の結果が得られた。カバーガラスエタロンでカバーできる周波数帯域を見積もったところ、今回用いた 110 μm 厚を含む 7 枚のカバーガラスエタロンで 0.76 ~ 7.5 THz の周波数帯域を隙間なく覆うことができることがわかった。また、カバーガラス全挿入時の挿入角掃引 ($|\theta| < 60 \text{ deg}$) も利用すると、離散的ながら 0.15 ~ 0.76 THz の周波数帯域を埋めることもでき、7 枚のカバーガラスエタロンにより、テラヘルツ帯 (0.1 ~ 10 THz) の大部分をカバーできることがわかった。

(2) 2 波長発振半導体レーザーの構築と出力安定化および THz 波の発生

(2)-1. 2 波長発振半導体レーザーの構築

実験系を図 5 に示す。端面が無反射コーティングされたガリウムヒ素半導体レーザー (中心波長 820 nm) に対し、非球面レンズと反射ミラー (反射率 30%) を用いて直線状共振器 (共振器長 20 cm) を構成した。波長選択素子としてのカバーガラスエタロンを非球面レンズと反射ミラーの間に、ビーム断面内に部分挿入した。出力光は 3dB カプラーによって 2 分割し、それぞれ光スペクトルアナライザとフォトダイオードに入力した。この実験配置で出力光のスペクトルおよび光強度の時間変化を測定した。共振器内に厚さ 400 μm のカバーガラスエタロン (FSR = 0.25 THz) を部分挿入したところ、FSR の約 5 倍に相当する 1.28 THz の周波数差をもつ 2 波長発振が得られることを確認した。(1) の小型固体レーザーの場合は FSR の 6 倍の周波数差が得られたが、半導体レーザーは高利得ながら利得帯域が比較的狭いため、狭線幅化により 2 波長発振の周波数差が FSR の 5 倍に制限された。また、これを反映して、2 波長発振にはモード競合的な不安定性が生じた。2 波長発振の周波数差を変化させるべく、部分挿入した光学エタロンの挿入角を掃引した結果、2 波長発振状態を保持することが困難になり、挿入角の変更のたびに 2 波長発振を回復するための精密な光学調整が必要となった。

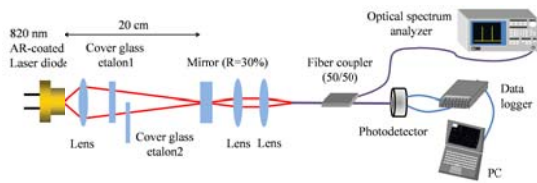


図 5. 2 波長発振半導体レーザーの実験系

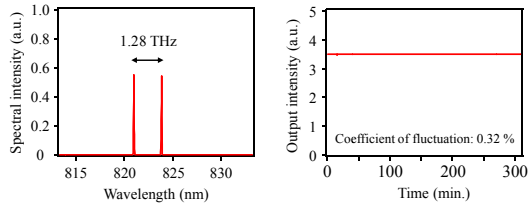


図 6. 半導体レーザーの外部共振器内に 400 μm 厚のカバーガラスを部分挿入し、500 μm 厚のカバーガラスを完全挿入したときの(左)2 波長発振スペクトルと(右)出力強度の時間変化

(2)-2. 2 波長半導体レーザーの出力安定化

2 波長発振出力の時間安定性を向上させるために、共振器内に厚さ 520 μm のカバーガラスエタロン (FSR = 0.19 THz) を追加挿入した。これを共振器内に完全挿入することにより、レーザー利得に FSR にもとづく微細スペクトル構造が転写され、利得の先鋭化が生じにくい状態を実現した。図 6 に観測結果の一例を示す。左図は 2 波長発振時の強度スペクトルであり、右図はその出力平均強度の時間変化である。1.28 THz の周波数差をもつ 2 波長発振は、数時間に渡り時間的に安定することを確認した。上で定義した時間安定性を評価する変動係数を右図の結果に適用したところ、その値は 0.32% となり、完全挿入エタロンを追加することにより、変動率の点から時間安定性が 5 倍程度向上されることを確認した。また、部分挿入エタロンの挿入角を掃引することにより、若干の光学調整を必要とするものの、2 波長発振の周波数差を変化できることも確認した。

(2)-3. THz 波の発生

2 波長発振の安定化を確認したのち、スパイラル型の電極形状をもつ低温成長ガリウムヒ素 (LT-GaAs) 光伝導アンテナ (Hamamatsu, G10620-13) と THz 波検出器 (Spectrum Detector Inc., SPH-49 THz) を用いて、THz 波の観測を行った。図 7 に測定結果を示す。2 波長発振出力の周波数差は 1.28 THz とした。(a)の実験では、光伝導アンテナへの入力光の平均強度を 25 mW 一定とし、光伝導アンテナのギャップに対する印加電圧を 0 から 10 V まで変化させた。その結果、光伝導アンテナから発生する THz 波の強度は印加電圧に比例して増大した。また(b)では、ギャップへの

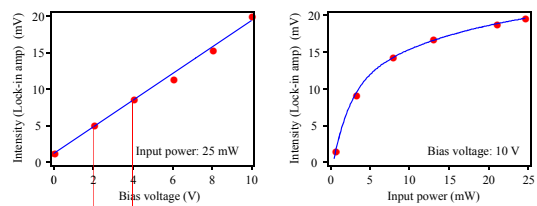


図 7. THz 波の測定 : (a) バイアス電圧依存性, (b) 光伝導アンテナへの入力光強度依存性

印加電圧を 10 V 一定とし、入力光強度を 0 から 25 mW まで変化させたところ、飽和傾向を示しながら、入力光強度の増加に伴い、発生する THz 波の強度も増大することがわかった。用いた THz 波検出器の電圧変換効率から、入力光強度 25 mW、バイアス電圧 10 V において発生した THz 波の平均強度は 60 nW 程度と見積もられた。この THz 波検出器では発生した THz 波の周波数を特定することができないため、一対の光伝導アンテナを含む THz-TDS システムを構成し、取得した THz 波波形のフーリエ変換から周波数情報を得ることをめざした。ただし、現状では、戻り光や機械的振動の影響から、THz 波の信号波形に雑音が多く含まれるため、適切な光学調整を必要とする段階である。

(3) THz-TDS に関する数値シミュレーション

(3)-1. THz-TDS の数値計算モデル

典型的な THz-TDS の実験系を数値計算モデルとして THz-TDS に対する妥当性を調べるシミュレーションを行った。数値計算に用いる入力光として、比較のために 2 波長定常光とモード同期パルスの二種類を想定した。

(3)-2. THz-TDS の妥当性と入力光依存性

モード同期パルス入力時の相互相関測定によって得られる波形は、一般的に理解されている THz 波の時間波形とは異なることが示された。しかし、試料あり、なしのときに取得した波形データを割り算処理することにより試料の複素屈折率は正確に読み出すことができるため、THz-TDS の妥当性は確認された。線形な THz-TDS システムでは、THz 波の発生効率は入力光の平均強度と発振帯域にのみ依存することを確認した。また、測定データに周波数の重み関数を乗じたデコンボリューションを行うことにより、THz 波の時間波形が再生できることも示した。

【参考文献】

- 1) B.B. Hu, X.-C. Zhang, and D.H. Auston, Phys. Rev. Lett., **67** (1991) 2709.
- 2) 阪井, 応用物理, **77**(8), (2008) 0946.
- 3) C.A.Schmuttenmaer, Chem. Rev., **104** (2004) 1759.
- 4) M. Tani, et al., Optical and Quantum Electron., **32**

- (2000) 503.
- 5) 澁谷 他, 日本赤外線学会研究発表会資料 **2006-IR-09**, p17.
 - 6) N.A.Naderi, et al., Optics Express, **18** (2010) 27028.
 - 7) S.A.Payne, et al., J. Appl. Phys., **66** (1989) 1051.
 - 8) 小山次郎, 西原浩: 光波電子工学 (コロナ社) 1978.

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 和田健司, 酒井真梨子, 木本琢也, 松山哲也, 堀中博道, 共振器内に部分挿入したカバーガラスエタロンをもつ2波長発振レーザー, 日本赤外線学会, 査読有り, 22巻1号, 2012, 掲載決定.
- ② K. Wada, H. Yoshioka, J-X Zhu, T. Matsuyama, and H. Horinaka, Simple form of multimode laser diode rate equations incorporating the band filling effect, Optics Express, 査読有り, Vol.19, 2011, pp.3019-3036.

[学会発表] (計12件)

- ① 和田健司, 木本琢也, 竹本直史, 橋井匠, 松山哲也, 堀中博道, THz時間領域分光法の妥当性確認とTHz波の時間波形の再構築, 放射科学研究会, 2012.3.26, 大阪府立大学.
- ② 木本琢也, 竹本直史, 和田健司, 松山哲也, 堀中博道, 複合型光学エタロンを用いた2波長半導体レーザーの発振制御, 第59回応用物理学関係連合講演会, 2012.3.15, 早稲田大学.
- ③ 松山哲也, 和田健司, 堀中博道, 相関測定フリーな簡易型光パルス再構築法, レーザー学会第423回研究会(レーザー計測その他), 2011.12.26, 大阪府立大学中之島サテライト.
- ④ 木本琢也, 竹本直史, 和田健司, 松山哲也, 堀中博道, 2波長発振外部共振器半導体レーザーを用いたテラヘルツ波発生, 日本光学会年次学術講演会 OPJ2011, 2011.11.29, 大阪大学.
- ⑤ T. Kimoto, H. Fukui, K. Wada, T. Matsuyama, and H. Horinaka, Stable Two-Wavelength Oscillation from External-Cavity Laser Diode Incorporating Cover Glass Etalons and Its Application to THz-Wave Generation, IQEC/CLEO Pacific Rim 2011 Conference, 2011.8.29, オーストラリア・シドニー国際会議場.
- ⑥ T. Matsuyama, K. Wada, and H. Horinaka,

Simple Method for Reconstructing Amplitude and Phase of Optical Pulse Free From Autocorrelation Measurement, IQEC/CLEO Pacific Rim 2011 Conference. 2011.8.31, オーストラリア・シドニー国際会議場.

- ⑦ 福居秀敏, 木本琢也, 和田健司, 松山哲也, 堀中博道, 複合型光学エタロンを用いた2波長発振半導体レーザーによるテラヘルツ波発生, 電気学会研究会(光応用・視覚研究会), 2010.12.27, 大阪産業大学梅田サテライト.
- ⑧ 福居秀敏, 木本琢也, 和田健司, 松山哲也, 堀中博道, 複合型光エタロンを挿入した外部共振器半導体レーザーからの2波長発振, 日本光学会年次学術講演会 OPJ2010, 2010.11.9, 中央大学駿河台記念館.
- ⑨ 福居秀敏, 木本琢也, 和田健司, 松山哲也, 堀中博道, 2波長発振外部共振器半導体レーザーの出力安定化, 日本赤外線学会, 2010.11.4, 立命館大学.
- ⑩ K. Wada, M. Sakai, T. Matsuyama, H. Horinaka, Two-wavelength oscillation from laser resonator partially-inserted an optical etalon, 8th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/PR2009), 2009.9.2, 中国・上海国際会議場.
- ⑪ 酒井真梨子, 和田健司, 松山哲也, 堀中博道, 光学エタロンを部分挿入した外部共振器半導体レーザーからの2波長発振の観測, 第70回応用物理学学会学術講演会, 2009.9.9, 富山大学.
- ⑫ 酒井真梨子, 和田健司, 松山哲也, 堀中博道, 外部共振器半導体レーザーからの2波長発振出力の安定化, 第19回日本赤外線学会研究発表会, 2009.11.5, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部.

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 多波長レーザー発振装置およびそれを備えてなるテラヘルツ波発生装置

発明者: 和田健司

権利者: 大阪府立大学

種類: 特許願

番号: 2008F157

出願年月日: 平成20年10月29日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

和田 健司 (WADA KENJI)

大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 40240543