

機関番号：12612

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21740299

研究課題名 (和文) 半導体レーザー周波数安定化に関する研究

研究課題名 (英文) Investigation on the frequency stabilization of laser diode

研究代表者 張 贇 (ZHANG YUN)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：00508830

研究成果の概要 (和文)：半導体レーザーの光をこのフィルタ共振器を通じて、短期的な周波数安定な光を得ることが出来ました。約 75mW (通過率 70%) 得た光を、もう一度半導体レーザーにフィードバックことで、レーザーの雑音抑圧が達成できました。自作したホモダイン検出器を用いて、半導体レーザーの雑音の評価実験も行いました。半導体レーザーの強度雑音は 2MHz 以上ショットノイズレベルまで抑圧することができる。我々は半導体レーザーの位相雑音も調べました。もうひとつ分析共振器をもちいて、フィルタを通じた半導体レーザーの位相雑音 10MHz 以上ショットノイズレベルまで抑圧することもできました。外部共振器を用いて低雑音光による SHG の実験を行い、入射光パワー 40 mW のとき、最大で 10mW (変換効率 25%) の SH 光を得た。

研究成果の概要 (英文)：We experimentally demonstrated that the excess phase noise of an external cavity diode laser (ECDL) can be efficiently suppressed by phase-to-amplitude noise conversion and filtered optical feedback techniques. We have observed that the phase noise of an ECDL was suppressed more than 40 dB and reached the shot noise limit from 15MHz using the above-mentioned technique. This opens a new way to reduce the phase noise of diode lasers. We generated second harmonic light using a enhancement cavity. This allows an conversion efficiency of 25% and produces an output power of up to 10 mW at 540 nm.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：物理学、原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：半導体レーザー、周波数安定度

## 1. 研究開始当初の背景

ヨウ素安定化安定化レーザーは次世代実用光周波数あるいは波長標準として使えられ、その研究が世界各国で行われている。周波数基準の安定度については、主に

短期的な、長期的な安定度二つの評価がある。国内では京都大学の高橋研究室において、共振器を用いて 1014nm の半導体レーザーの周波数短期的な安定度は 1 kHz 得られました、長期的安定化にはヨウ素分子の共鳴周波数

を基準として行う予定であり、10mW 507nmの光も得られました。ドイツの Heinrich-Heine 大学の Schiller 教授研究グループも成果を挙げており、彼らは共振器を用いてもともと Littrow 構造の feedback 鏡を変えて共振している光を半導体レーザー再注入することで 10kHz の短期安定度が得ることが出来ました。情報通信研究機構の量子情報技術グループにも、高いフィネスのフィルター光共振器と半導体レーザーを組み合わせることで、高いスペクトル純度と周波数安定性を持った半導体レーザーシステムを開発しました、短期的な安定度は数十 kHz ぐらいである。日本のグループを含めて世界各国のグループがヨウ素安定化半導体レーザーの研究を行っている。具体的には、数 mW の強い半導体レーザーを用いることでヨウ素分子の超微細成分（特に赤色域）を検出し、半導体レーザーの安定化が行っている。しかし、今までの結果、より良い安定度の半導体レーザーが得られなかった。理由は、他のレーザーに比べて半導体レーザーの発振幅が広く周波数安定度が劣ること、加えて、レーザーの周波数安定化にも雑音（半導体レーザーの雑音はショットノイズより大きい）から受ける影響があると考えている。

## 2. 研究の目的

光領域における高精度な光周波数標準は度量衡における長さ標準として重要であり、また基準物理定数の精密測定や基礎物理理論の検証などにおいても非常に重要なものである。これを実現するための長さ基準としてヨウ素安定化 633nm He-Ne レーザーが実用上最も重要なものとなっており、近年高性能な小型で低消費電力の波長・光周波数標準を実現するために、ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザー開発されました。高出力かつ低ノイズの LD 励起 Nd:YAG レーザーのおかげで、ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーの周波数安定度が実用標準であるヨウ素安定化 He-Ne レーザーと比べて1桁以上良い結果が得られました。加えて、このレーザーの周波数安定度がセシウム原子時計の周波数安定度より数倍良いことも分かった。これを解決する方法として半導体レーザーの利用が考えられる。半導体レーザー、特に外部共振器型半導体レーザーは、原子・分子の分光やレーザー冷却、半導体量子ドットの分光、および量子情報処理などの分野の研究においてよく用いられる。コスト低減、波長可変や操作簡便等の特性をもっているため、最近半導体レーザーを用いるヨウ素安定化半導体レーザー新しい光周波数あるいは波長標準として注目され、しかし、今までの結果、より良い安定度の半導体レーザーが得られなかった。理由は、他のレーザーに比べて半導体レーザーの発振幅が広く周

波数安定度が劣ること、加えて、レーザーの周波数安定化にも雑音（半導体レーザーの雑音はショットノイズより大きい）から受ける影響があると考えている。本研究では、半導体レーザーの雑音を抑圧することで半導体レーザーの周波数安定度の向上を目的とする。具体的には、① 半導体レーザーの雑音を一般的な固体レーザーの雑音の様にショットノイズまで抑圧する。② 雑音を抑圧した半導体レーザーの長期的な周波数安定度の向上も目指す。このために、ヨウ素の飽和吸収線を用いて半導体レーザーの周波数の安定化試する予定である。

## 3. 研究の方法

### ① 半導体レーザーについて

我々は半導体レーザーの部品を用意して自分で試作したいと考えている。半導体レーザーの発振波長については、1080 nm 付近で発振する外部共振器型半導体レーザーの製作を行う。波長を 1080 nm に選ぶ理由は以下の二つである、一つ目は、1080 nm 波長には a-cut KTP 結晶で type-II non-critical phase matching (NCPM) が実現出来るので、高い変換率が得られる。二つ目は、安定している波長 540nm の固体レーザーがなく、ヨウ素 540 nm(1080nm の第 2 次高調波)付近の周波数安定化レーザーはこれまで報告例がない、また、ヨウ素 540 nm 付近の超微細構造の分光が行なわれていない。

### ② フィルターについて

フィルタ共振器には、3枚のミラーで三角形に光ビームを反射させ、そのうち2枚の平面ミラーと他1枚の凹面ミラーを配置するリング型共振器である。安定性を考えるとこの3枚のミラーを同じアルミの基盤を使って固定し、分解能約 1.4MHz のフィルタ共振器を得られました。

### ③ 位相雑音の測定

ホモダイン検出器には光の直交位相振幅を測定する唯一の装置である。半導体レーザー雑音の測定するために、我々はオペアンプを用いてホモダイン検出器の製作を試した。

### ④ SHG について

本研究には発振波長 1080 nm の半導体レーザーを KTP 結晶に用いて 2 倍の周波数に変換を行う。出力向上を目指すために、外部共振器を用いる SHG を行う。外部共振器とは、基本波を出力するレーザーとは別に共振器を構成し、その内部に非線形光学結晶を設置するものである。

## 4. 研究成果

実験配置を Fig.1 に示す。光源は、波長 1080 nm、最大出力 150 mW のリトロ型半導体レーザーである。フィルターキャビティは非

共焦点型の光共振器で、反射率約 99% の平面ミラー 2 枚と、曲率半径 1000mm、反射率 99.99% の凹面ミラー 1 枚で構成されている。フィネスは約 300、分解能は 1.4 MHz、共振器長は 664 mm である。キャビティの透過光は PBS と半波長板 (HWP2) により分割比を変えられるようになっている。一方はウェッジ基板に反射させて半導体レーザーに戻され、もう一方は雑音測定に使われる。また、フィードバック光の位相を piezo 素子付きのミラーで制御して、安定発振を維持している。

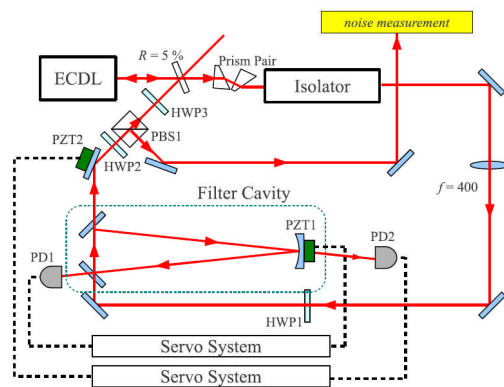


図 1 雑音低減実験配置

光源の出力に対するフィードバック量を、-40 dB (0.01%) から -20 dB (1%) まで変化させた場合 Fig. 1 雑音低減実験配置の雑音スペクトルをそれぞれ測定した。測定した強度雑音を Fig. 2、位相雑音を Fig. 3 にそれぞれ示す。強度雑音の測定には、平衡型ホモダイナ法を採用した。測定対象光を 1 : 1 に分割して、特性が同じフォトディテクターに入射し、2 つのディテクターからの信号を加算することで強度雑音を、減算することでショットノイズをそれぞれ測定することができる。位相雑音の測定には、分析用の光共振器を用いて、位相変化を強度変化に変換する方法を採用した [3]。これは、測定対象光の位相 (周波数) が揺らぐと、光共振器の反射率が上下することを利用して。比較のため、光源の雑音を直接測定した結果を同じグラフ内に示した。

位相雑音はフィードバック量を増やすほど抑制できるが、フィードバック量を増やしすぎると不安定発振に陥るため、-20dB の時が最も雑音を低減できることがわかった。強度雑音は、フィードバックが弱いと逆に増大する結果となった。これは位相雑音の低減が不十分であり、キャビティによって位相雑音が強度雑音に変換されてしまうことが原因であると考えられる。フィードバック量を増やすことで位相雑音が抑制され、フィルターキャビティの強度雑音を低減する効果が現れる。結果、強度雑音は 5 MHz、位相雑音は 15 MHz 以

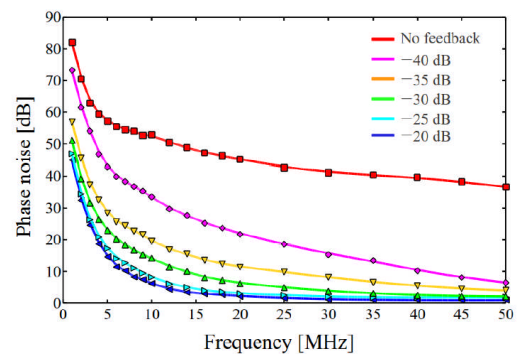
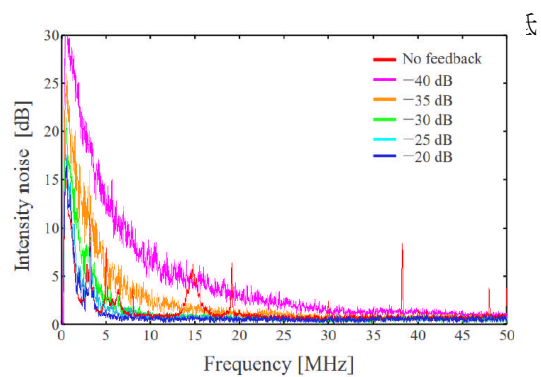


図 3 位相雑音の測定結果

雑音低減の実験系から得られた低雑音光によりヨウ素安定化を行うことで、非常に高い周波数安定度をもつ光源を得ることができる。ヨウ素分子の 540 nm 付近における吸収線を周波数基準とするため、非線形結晶 KTP を用いた外部共振器による SHG を行った。KTP 結

晶は1080 nm の基本光に対してウォークオフがなく、高い変換効率を得ることができる。結晶長10 mm のKTP 結晶と、曲率半径20 mm、反射率98 % (波長1080 nm) の凹面ミラーを組み合わせたリニアキャビティを用いてSHG を行ったところ、40 mWの基本光に対して最大10 mW(変換効率25 %) を得た。

#### 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2件)

1 Y. Zhang, N. Watanabe, Y. Okada-Shudo, M. Watanabe, M. Hyodo, X. Y. Wang, Yong Zhu, C. T. Chen, T. Kanai, and S. Watanabe, "Generation of Quasi-CW Deep Ultraviolet Light below 200 nm by Two Successive Cavity Enhanced Second Harmonic Generators," Jpn. J. Appl. Phys 50, 042703 (2011). 査読あり

2 Yun Zhang, Suguru Miyakawa, Katsuyuki Kasai, Yoshiko Okada-Shudo, and Masayoshi Watanabe, "Efficient phase noise suppression of diode-laser by phase-to-amplitude noise conversion and filtered optical feedback," Optics Express (accepted). 査読あり

[学会発表] (計3件)

1 宮川雄, 笠井克幸, 張贇, 岡田佳子, 渡辺昌良, 光フィルタリングと光フィードバックによる半導体レーザーの雑音低減  
第58回応用物理講演会、2011年3月25日、神奈川工科大学

2 宮川雄, 和田一堯, 笠井克幸, 張贇, 岡田佳子, 渡辺昌良, 光フィルタリングと光フィードバックによる半導体レーザーの雑音低減

第57回応用物理講演会、2010年3月19日、東海大学(湘南キャンパス)

3 和田一堯, 宮川雄, 笠井克幸, 張贇, 岡田佳子, 渡辺昌良, 光フィルタリングと光フィードバックによる外部型半導体レーザーの雑音低減, 日本光学学会年会, 2009年11月25日, 新潟コンベンションセンター

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

張 贇 (ZHANG YUN)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号: 00508830