

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18979

研究課題名（和文）新たな角度標準への挑戦：スペクトルドリルレーザーとその絶対周波数評価法の開発

研究課題名（英文）Development of spectral drill laser and its oscillation frequency measurement

研究代表者

大野 誠吾（Seigo, Ohno）

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：70435634

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：スペクトルドリル共振器を応用したスペクトルドリルレーザーを開発し、構成する位相板の回転角と発振周波数との関係から、回転角度の測定原理、ひいては角度標準を創出することに挑戦している。回転角の精度向上のためには共振器のQ値を高くする必要がある。本研究では、共振器内に新たに半導体レーザーチップを導入することで、スペクトルドリルレーザーのマルチモード発振に成功した。その線幅は従来のスペクトルドリルのQ値に比べるとはるかに高い。位相板の回転により2.7GHzの波長掃引にも成功している。ただし、シームレスな波長掃引は実現しておらず、回転角の360度読み取りには発振波長の短波長化が課題である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スペクトルドリルレーザーの構成について当初、位相板の回転により偏光方向が変わらない型の構成を検討していたが、レーザー光の取り出し方によってはII型においても偏光方向が変化しないことがわかった。これにより、構成要素を少なくしてスペクトルドリルレーザーを構成でき、将来的なコンパクト化に対して意義のある知見である。

また、スペクトルドリル共振器は、位相板と共振器長の設定により、自由かつ安定に共振周波数、線幅の調整ができることからレーザー安定化のための周波数基準として非常に優れていることがわかった。このことは、次世代高精度レーザーシステムへの展開が期待される。

研究成果の概要（英文）：We have developed a "spectral drill laser" in which a spectral drill cavity is applied to a laser system. It is challenging to investigate a new angle measurement principle, based on the relationship between the rotation angle of the constituent phase plate and the resonance frequency of the spectral cavity. To improve the accuracy of the rotation angle, it is necessary to increase the Q-value of the cavity. In this study, by introducing a laser diode chip, as a gain medium, within the cavity, we have succeeded in multimode oscillation of the spectral drill laser. The Q-value estimated from the linewidth is much higher than that of conventional spectral drills. It has also successfully achieved a wavelength sweep of 2.7 GHz by rotating the phase plate. However, seamless wavelength sweep has not been achieved. Oscillation at shorter wavelength is required for seamless wavelength sweep.

研究分野：フォトンクス、計測

キーワード：幾何学的位相 角度計測 スペクトルドリル 外部共振器半導体レーザー

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

現在まで、回転機構に対する角度の読み取りはロータリーエンコーダーの利用が主流である。この場合、角度の読み取り精度や分解能とロータリーエンコーダーのサイズはトレードオフの関係にあり、高分解能に角度を読み取るには必然的に大きな装置が必要となり、重量も重くなる傾向にあった。

研究代表者はこれまで、共振器内に閉じ込められた光に対する幾何学的位相により共鳴周波数を制御可能なスペクトルドリル共振器を提案してきた。スペクトルドリル共振器では、幾何学的位相シフトを構成する波長板を回転させることでその共鳴周波数を連続かつシームレスに変化させることができ、波長板の回転に伴う共振周波数のスペクトル上の振る舞いが、あたかも回転に伴うドリルの溝の見かけの運動に似ていることからその名前を呼んでいる。この系では、共鳴周波数と位相板の回転角が 1 対 1 に対応することを示している。逆に共鳴周波数を精度

良く測定することができれば位相板の回転角が求まることを意味し、回転角度測定の新たな測定原理になり得る。共鳴周波数の読み取りには、昨今小型化、高性能化が著しい RF 信号処理技術を用いることを想定している。この手法では読み取り精度と装置の大きさとのトレードオフがないと考えられることから軽量かつ小型な回転角読取機構となる可能性を持つ。

しかしながらこれまでのスペクトルドリル共振器では、共振器の Q 値がミラーの反射率や位相板による散乱で制限されており、共鳴周波数の決定精度が限定的であった(図 1 上)。

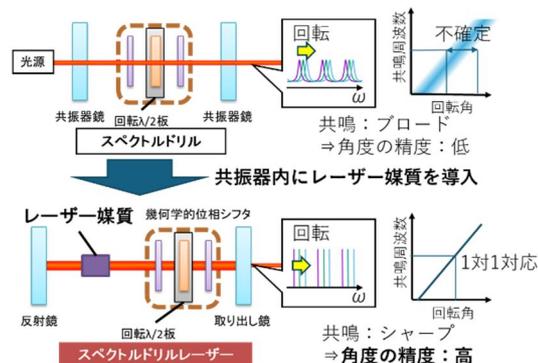


図1 スペクトルドリルレーザーにおける角度と周波数の対応

### 2. 研究の目的

スペクトルドリル共振器における Q 値を向上させ、位相板の回転角と発振周波数の関係から新たな角度の読み取り原理を開拓することを目的とし、周波数を単位とした新たな角度の標準を構築することに挑戦する(図 1 下)。

そのために、本研究はスペクトルドリル共振器内に利得媒質を導入したレーザーシステムを開発し、共振器の Q 値の飛躍的な向上を図る。レーザー発振に成功した場合、その発振特性についても明らかにする。

また、最終的な発振周波数の読み取り技術について、周波数安定化された参照光との光ビート周波数の測定を検討している。その場合、システム構築に必要な参照光についてその特性を検討する。

### 3. 研究の方法

#### スペクトルドリルレーザーの開発

半導体レーザーのチップ端面に反射防止コートを施し、電流注入時でも単体でのレーザー発振を抑制したチップが外部共振器型半導体レーザーを構成するための用途で市販されている。本研究では、このようは反射防止コート付き半導体レーザーチップをスペクトルドリル共振器における Q 値を飛躍的に向上させるための利得媒質として導入し、スペクトルドリルレーザーともいふべきシステムのレーザー発振を試みる。レーザー発振が確認された場合はその発振特性をスペクトル分解することで明らかにする。

発振波長は、申請者がこれまで利用してきた検出器や光学部品が比較的充実している 780nm 帯での発振を目指す。

#### 発振周波数の読み取り

発振周波数の読み取り手法は最終的には、スペクトルドリルレーザーと参照レーザーの干渉により光ビート信号を発生させ、そのビート信号周波数を、RF スペクトルアナライザを用いて読み取ることを想定している。本研究では、絶対周波数が求まる参照光源の構成について検討する。また、デモンストレーションとして、スペクトルドリルレーザーがマルチモード発振した場合のモード間隔を実際にビート周波数の測定に

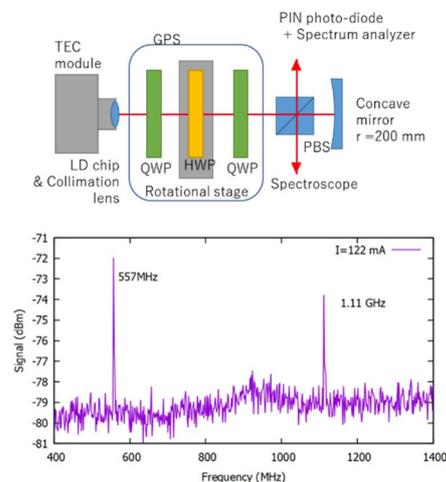


図2 スペクトルドリルレーザーの構成 (上) とモード間ビート信号(下)

より求めることで将来、周波数読み取りに必要な条件についても明らかにする。

#### 4. 研究成果

##### (1) 発振状態の確認

まずスペクトルドリルレーザーを図1のような構成で構築した。発光スペクトルの半導体レーザーチップに対する注入電流依存性を調べたところ、63 mA 以上においてスペクトルの先鋭化が起こり、レーザー発振の可能性を示唆した。次に、出力光を高速フォトレーバで受光し、その信号をRF スペクトルアナライザーで解析したスペクトルを図2下に示す。非常に鋭いピークが等間隔に見られ、その周波数間隔は共振器長から見積もられる自由スペクトル領域の値とおおよそ一致することから、これは発振縦モード間のビート信号を表しており、スペクトルドリルレーザーのマルチモード発振に成功したことを示す結果である。この時の発振波長を分光器で測ったところ795 nmであった。

##### (2) 参照レーザーの検討

発振波長の測定手法として当初、安定化した参照レーザーを用意しそのレーザーとのビート信号を測ることを計画していた。参照レーザーの波長に関して、当初は国家標準波長にトレーサビリティをもつ波長1.54  $\mu\text{m}$  の安定化レーザーの2倍波を用い、スペクトルドリルレーザーとのビート周波数を測定することを想定していたが、同調帯域が限られることからより広い周波数領域で同調可能な分子の吸収線で安定化させたレーザーの2倍波を取る方式を検討した。ただし、4-1の結果や以下で述べるように構成を変えたとき、スペクトルドリルレーザーの発振波長が787 nm 以上であったことからこの場合でも同調範囲には入らない結果となり、今後スペクトルドリルレーザーの発振波長の短波長化が課題となった。

##### (3) レーザー共振器の小型化

本研究の目的の一つとして角度読み取り装置の小型化がある。そのためには部品点数を少なくできた方が有利である。スペクトルドリル共振器には、その幾何学的位相シフトの構成として2枚の固定した $1/4$ 板とその間に回転 $1/2$ 板を配置したI型と、1枚の固定した $1/4$ 板と回転 $1/4$ 板を並べたII型が提案されているが、II型は、部品点数が減らせる一方で $1/4$ 板の回転に伴って出力される偏光方向も回転することからレーザーシステムの開発には不向きと考えてきた。しかし図3のように出力結合器のPBSをLDチップと1枚目の $1/4$ 板の間に配置することで $1/4$ 板の回転による偏光の回転の影響を受けない光を取り出せることを見出し、実際にレーザー発振も確認できた。

I型、II型それぞれの場合の出力強度の波長板回転角依存性を図4に示す。これはI型についても出力結合器のPBSをLDチップと1枚目の $1/4$ 板の間に配置したときの結果である。これを見ると、I型では1回転あたり8つのピークが、II型では4つのピークが得られた。本来、出力は波長板の回転角に依存しないはずである。波長板の設計周波数とレーザーの発振周波数がずれていた場合について、出力の波長板回転角依存性を数値的にシミュレーションしたところ定性的に同様の振る舞いが得られた。実際に今回の波長板の設計波長が780nm だったのに対し、この構成の場合の発振波長が787nm であったことからもうかがえる。このことから発振波長の短波長化が必要といえる。

##### (4) スペクトルの確認

スペクトルドリルレーザーの発振波長の振る舞いを調べるために、参照レーザーとの光ビート測定による発振波長の測定による方法は、4-2にて述べたとおり、発振波長が想定よりも長かったため今回は実現できなかった。しかし、別の方法として、Virtually Imaged Phase Array (VIPA)エタロンを用いた分光システムを構築しスペクトル測定を実施した。絶対周波数の確定はできないものの波長変化に対して、VIPA エタロンは、多光束干渉

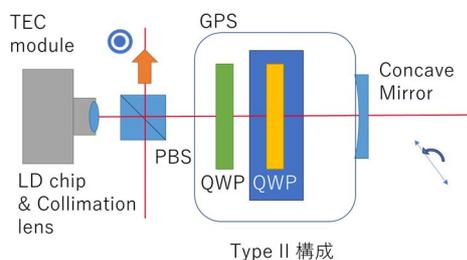


図3 II型スペクトルドリルレーザーの構成

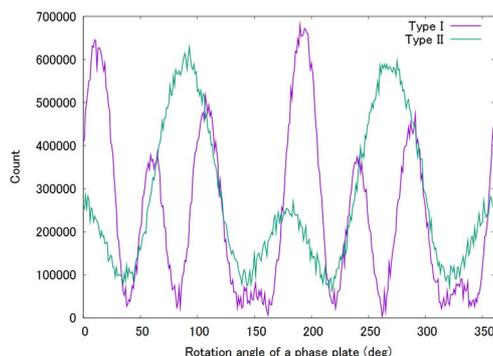


図4 I型、II型構成における出力の波長板回転角依存性。I型についてもPBSをチップの直後に配置した

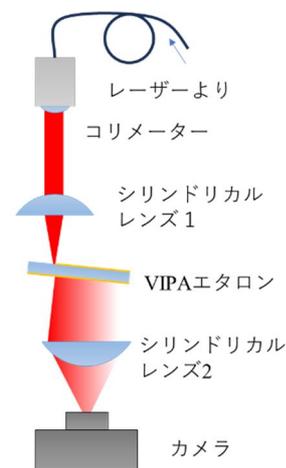


図5 構築したVIPAエタロン分光システムの模式図

による比較的高い波長分解能が得られると同時に、カメラのようなマルチチャンネル検出器でスペクトルを測ることで可動部なしに安定したリアルタイム分光測定が可能である。VIPA エタロンは厚さ 3.4mm の熔融石英できており、約 30 GHz の自由スペクトル領域を持つことが期待される。カメラは市販の CMOS カメラを用いた。カメラで得られる 2 次元画像のうち、x 方向にスペクトル情報があり、y 軸方向はシリンドリカルレンズを用いていることから光学的には等価である。そこで、y 軸方向に画素データを積分することでスペクトルを得た。得られた

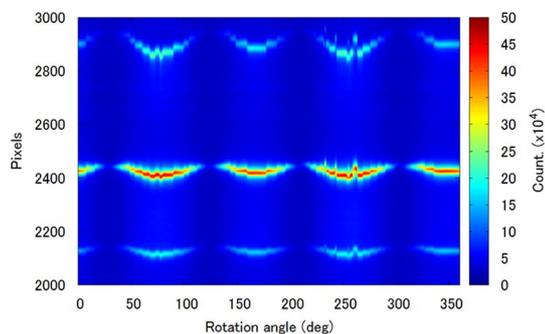


図6 VIPA分光器により測定した発振スペクトルの波長板回転角依存性

スペクトルの波長板回転角依存性を図 6 に示す。横軸は、波長板の回転角を表す。縦軸は CMOS カメラ画像の x 方向のピクセル値を表し、積分値をカラーで表している。横方向の周期的な強度の変化は、強い角度が 4 回現れておりこれは、図 4 の振る舞いと一致する。縦方向の繰り返しが自由スペクトル領域に対応している。これを見ると強度の変化と波長の変化が対応していることがわかる。一部の角度でモードホップが見られるもののおおむね安定して発信している。ただし、当初予定していたような連続、シームレスなふるまいは見られておらずこれも発振波長が長いことが要因と考えられる。解析の結果周波数のチューニング範囲は 2.58 GHz であることがわかった。

#### (5) スペクトルドリル共振器の応用

レーザー媒質を含まないスペクトルドリル共振器の応用展開についても検討を行った。スペクトルドリル共振器は、波長板を回転させることで、自由スペクトル領域内の任意の周波数に共振条件を合わせることができ、そのスペクトル幅は共振器長により設計可能である。今回、 $1.5\ \mu\text{m}$  帯で動作するスペクトルドリル共振器を新たに設計・構築し、本帯域で共振周波数を自由スペクトル領域 1GHz の中で安定かつ自由に設定できる光学共振器の実現に成功した。特に、これまでの知見からミラーの反射率を設計することで、十分な検出感度で共振状態のスペクトルを得ることができた。今後、レーザーの周波数観測やレーザー周波数安定化への応用が期待される。特に周波数安定化は、原子や分子ガスの吸収線に同調させる方法がこれまでの主流であり、その場合、吸収線がガスの状態遷移によることからとびとびであり、精度を決定するスペクトル線幅はガスの蒸気圧により決まっていた。本手法ではこれらを自由に設定・設計できることから、任意の周波数に対する高精度な安定化が期待される。さらにそれを用いた精密波長可変光源の開発に展開できる可能性がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 林 伸一郎、大野 誠吾、宮本 克彦、浦田 佳治、関根 徳彦
2. 発表標題 高精度テラヘルツ光発生のための光周波数制御
3. 学会等名 2023年第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 辻 将太, 牧原 颯馬, 代市 拓海, 三成 剛生, 大野 誠吾, 尾松 孝茂, 宮本 克彦
2. 発表標題 テラヘルツ偏光イメージング装置の開発
3. 学会等名 シンポジウム「テラヘルツ科学の最先端IX」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 花井健太, 辻将太, 豊田耕平, 大野誠吾, 尾松 孝茂, 宮本 克彦
2. 発表標題 ベクトルビーム発生用テラヘルツ光学素子の開発
3. 学会等名 シンポジウム「テラヘルツ科学の最先端IX」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻 将太, 牧原 颯馬, 代市 拓海, 三成 剛生, 大野 誠吾, 尾松 孝茂, 宮本 克彦
2. 発表標題 テラヘルツ円偏光二色性イメージング
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tatsuhisa Koiwa, Tomoya Uchijima, Shin' ichiro Hayashi, Yoshiharu Urata, Seigo Ohno, Katsuhiko Miyamoto, Norihiko Sekine
2. 発表標題 Frequency control of terahertz wave using a spectral drill cavity
3. 学会等名 NICT-East Asia Receiver Joint Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shin' ichiro Hayashi, Seigo Ohno, Katsuhiko Miyamoto, Yoshiharu Urata, Norihiko Sekine
2. 発表標題 Terahertz wave parametric wavelength conversion monitored by spectral drill cavity
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	林 伸一郎  (Hayashi Shin'ichiro)  (70360188)	国立研究開発法人情報通信研究機構・テラヘルツ研究センター・主任研究員   (82636)	
研究 分担者	宮本 克彦  (Miyamoto Katsuhiko)  (20375158)	千葉大学・大学院工学研究院・准教授   (12501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------