

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560051

研究課題名(和文) 3波共鳴型差動複合共振器制御による高効率CW光パラメトリック発振器の開発

研究課題名(英文) Development of an efficient cw optical parametric oscillator with a triple-cavity differential-control configuration

研究代表者

笠井 克幸 (Kasai, Katsuyuki)

独立行政法人情報通信研究機構・未来ICT研究所ナノICT研究室・主任研究員

研究者番号：90359084

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：光パラメトリック発振器は、波長可変のコヒーレント光源として様々な分野で有用なデバイスである。CW(連続波)の光パラメトリック発振器においては、安定でチューナブルな発振を低しきい値で得ることは非常に困難である。本研究においては、ポンプ光・シグナル光・アイドラ光が同時に共振する3波共鳴型の差動複合共振器構造と高効率の疑似位相整合結晶(PPKTP)を組み合わせて、波長可変で低発振しきい値のCW光パラメトリック発振器の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：Optical parametric oscillators are useful devices in various fields as the tunable coherent light sources. It is, however, difficult to obtain the stable tunable oscillation which has a low threshold in continuous-wave (cw) optical parametric oscillators. In this study, an efficient cw optical parametric oscillator with a periodically poled KTP (PPKTP) has been developed by using a triple-cavity differential-control configuration. Accordingly, the continuous tuning of the cw OPO has been achieved with a low threshold.

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：光パラメトリック発振器 量子エレクトロニクス レーザー 量子相関

1. 研究開始当初の背景

光パラメトリック発振器 (OPO: Optical Parametric Oscillator) は1960年代に発明されて以来、多くのグループによって研究が進められてきた。その波長可変性とチューナビリティは分光学を始めとして物理学・化学の様々な分野で強力なツールとなり得る。パルス OPO はすでに実用化され幅広い応用分野で利用されてきたが、CW (連続波) OPO では安定なチューナブル発振を得ることが非常に困難であった。CW においては非線形結晶内のパラメトリック相互作用が弱いため、パラメトリック発振を行うには光共振器を用いる必要がある。光共振器にはシグナル光だけが共振する SRO (Singly Resonant Oscillator)、シグナル光とアイドラ光が共振する DRO (Doubly Resonant Oscillator)、さらにポンプ光も共振させる TRO (Triply Resonant Oscillator) がある。それぞれの構成の CW OPO に対して、表 1 に示すような発振しきい値が得られている。発振しきい値という観点からは、CW の発振を得るには DRO が有利であり TRO が極めて有利なことが分かる。しかしながら複数のモードを同時に同じ光共振器で共振させることは、発振周波数のチューニング (連続周波数可変) という観点から不利である。光パラメトリック発振には、ポンプ光 (p)、シグナル光 (s)、アイドラ光 (i) の周波数間で $\omega_p = \omega_s + \omega_i$ の条件が必要である。従来の単一共振器型 DRO ではシグナル光とアイドラ光モードに共通の光共振器を用いており、共振器長を変化させると共振モード ω_s と ω_i の両方が同時に増加 (または減少) するため、ポンプ光周波数が一定では上記の条件が満足されず同時に共振することができない。そのためパラメトリック発振は停止し、チューナブル特性が得られない。また、発振しても共振器長の揺らぎに敏感であり不安定な発振となる。そこでシグナル光とアイドラ光の共振器を独立に構成し、共振モード ω_s が増加 (減少) する時に共振モード ω_i が減少 (増加) するように共振器長を制御すれば、安定したチューナブル特性が得られる。このようなデュアル共振器型 OPO に関して、Type-II の非線形結晶を用いた例が米国 MIT のグループ等によって報告されている。これらの例では、偏光が直交するシグナル光とアイドラ光を共振器内に設置した偏光ビームスプリッタで分離してデュアル共振器を構成している。本研究代表者はこのデュアル共振器型 OPO をさらに改良し、ポンプ光も共振させる 3 波共鳴 (TRO) の差動デュアル共振器型 OPO について特許出願し、非線形結晶としてバルク型の Type-II KTP を用いた実験結果を国内学会及び国際会議にて報告を行った。これらの学会・会議における議論の際に、擬似位相整合結晶の利用によるさらなる研究展開の可能性を指摘された。擬似位相整合の結晶を用いれば高い実効的非線形光学定数が得られ、バルク型 KTP 結晶で生じるウォー

クオフの問題もなく、さらなる高効率化が期待できる。また、擬似位相整合結晶では分極反転周期を変えることにより、使用する波長の選択性も増える。これにより、半導体レーザーで直接励起する CW OPO など容易に実現できると考えられ、本研究により CW OPO の技術開発が加速されることになる。さらに、本研究は量子情報通信における量子プロトコルを実現するための重要なリソースである量子相関の生成にも応用できる。連続的にチューナブルな量子相関を生成するために、チューナブルなポンプ光源を用いた CW OPO の例が中国山西大学のグループ等により報告されているが、複雑な制御システムを必要とするという問題点がある。したがって、シンプルで高効率な CW OPO の構成が可能な本研究課題はチューナブルな量子相関生成の研究開発の発展にも繋がるものである。

表 1 発振しきい値の比較

共振器構成	発振しきい値
SRO	Watts
DRO	10' smW~100' smW
TRO	milliWatts~10' smW

2. 研究の目的

光パラメトリック発振器 (OPO) はチューナブルなコヒーレント光源としてパルス発振の領域では実用化されているが、連続波 (CW) 発振の領域では未だに研究段階にある。本研究課題では、これまでの CW OPO が抱えていた問題点を克服する新たな共振器構造と高効率の擬似位相整合を組み合わせ、これまで困難であった連続周波数可変を可能とする同調可能 (チューナブル) な高効率で低発振しきい値の CW OPO を実現することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究では、まず擬似位相整合結晶の PPKTP 結晶を用いて単一共振器型で 3 波共鳴の OPO を構成して、発振の動作特性を測定した。ポンプ光光源には、半導体レーザー励起 Nd:YAG レーザーの第 2 高調波 (532nm) を使い、発振出力波長の測定には光スペクトラムアナライザを用いた。これにより、結晶温度 34℃ にて波長 1064nm 近傍のシグナル光とアイドラ光が得られることを確認し、温度特性等を調べた。得られたデータを基に複合共振器の設計と試作を行った。当初は試作した複合共振器構造での光パラメトリック発振が得られなかったため、ポンプ光光源のパワーが不十分であると考えた。そのため、外部共振器と PPKTP 結晶を用いた第 2 高調波発生 (SHG) による高出力のポンプ光光源を並行して開

発した。次に、CWで光パラメトリック発振を得るための共振器の安定化回路（電子回路）の設計試作を行った。ポンプ光共振器の安定化への Pound-Drever-Hall 法の使用を検討したが、発振時にポンプ光が大きく減衰して適用が困難であった。そのため、圧電素子 (PZT) にマウントしたミラーに変調を掛けて出力光から変調成分を取り出して誤差信号を得るディザリング法を用いた。複合共振器型 OPO と安定化システムを統合し、作製した光パラメトリック発振器の評価を行った。その他、デュアルポート共振器と PPKTP 結晶を組み合わせた量子相関の生成についても検討を行った。

4. 研究成果

本研究課題で開発した差動複合共振器型 CW OPO の構成を図 1 に示す。PPKTP 結晶は、オーブンを用いて温度制御されている。共振器内に、シグナル光 (M1 と M2 で共振) とアイドラ光 (M1 と M3 で共振) を波長の違いにより分離するためのダイクロイックミラーとポンプ光を共振させるためのミラー (M4) を設置している。これにより、ポンプ光・シグナル光・アイドラ光が同時に共振する。ポンプ光源としては、半導体レーザー励起 Nd:YAG レーザーの第 2 高調波 (532nm) を用いている。発振しきい値におけるポンプ光パワーは、最小で 20mW であった。図 2 (a) は M1 の圧電素子 (PZT) のみに電圧を印加して共振器長を変化させた際の OPO 出力変化を示している。ポンプ光共振器 (M1-M4) が共振してパラメトリック発振が生じた際に、シグナル光の共振器長 (M1-M2) とアイドラ光の共振器長 (M1-M3) が同時に $+\delta L$ 変化しているため、両モードの共振モードが同時に保持されずにモードホッピングが起こり不安定な発振と

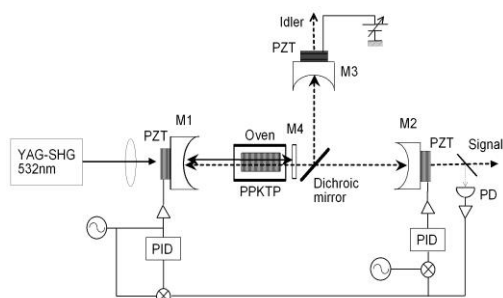


図 1 3 波共鳴型差動複合共振器で構成された光パラメトリック発振器の概略図 (M1, M2, M3, M4: 共振器ミラー、M1-M4: ポンプ光共振器、M1-M2: シグナル光共振器、M1-M3: アイドラ光共振器、PD: フォトダイオード)

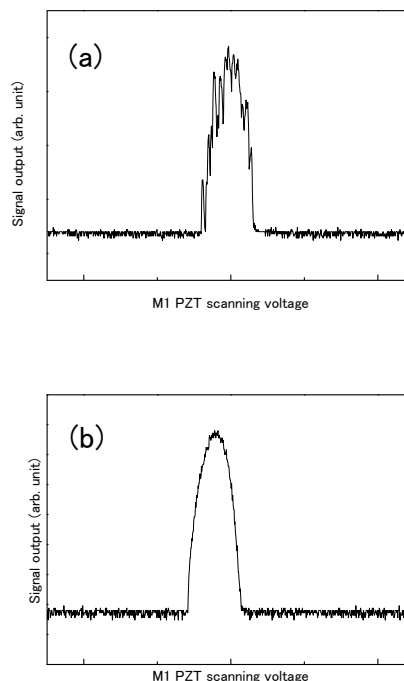


図 2 共振器長掃引時の発振特性

- (a) (M1-M2): $+\delta L$, (M1-M3): $+\delta L$
- (b) (M1-M2): $+\delta L$, (M1-M3): $-\delta L$

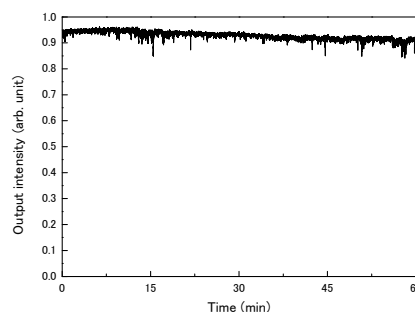


図 3 安定化後の発振出力の変動 (1 時間)

なっている。一方、図 2 (b) では、シグナル光共振器長 (M1-M2) が $+\delta L$ 変化する際にアイドラ光共振器長 (M1-M3) が $-\delta L$ 変化して差動で動作するように制御して得られた発振出力である。この結果は、光パラメトリック発振器における差動複合型共振器の有効性を示すものである。

2 周波ディザリング法を用いたフィードバック制御による共振器の安定化を行い CW 発振が得られ、ポンプ光パワー 326mW (532nm)、結晶温度 45°C において、13mW のシグナル光 (1022nm) 出力と 26mW のアイドラ光 (1107nm) 出力が得られた。この出力のアンバランスは、主として共振器内のダイクロイックミラーの短波長側での透過特性によるものである。

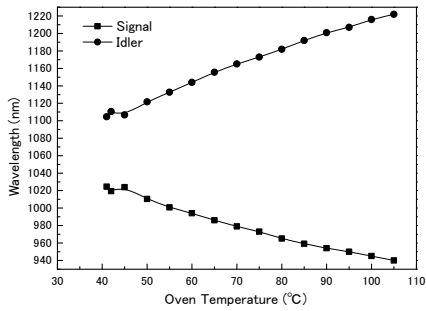


図4 PPKTP 結晶温度とシグナルおよびア
イドラ波長との関係

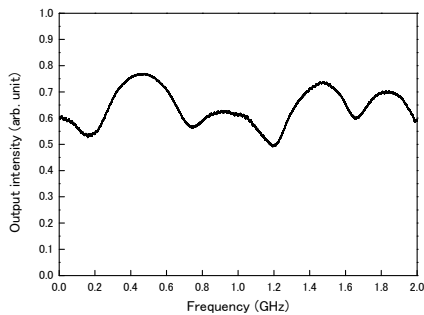


図5 連続チューナブル動作時(2GHz)の
発振出力変動(シグナル光)

ダイクロミックミラーの短波長側の透過特性をさらに改善することにより、バランスした出力が得られるものと考えられる。図3は安定化時の1時間の出力変化を示したものである。出力の変動は10パーセント程度であった。PPKTP結晶の温度を41°Cから105°Cまで変化させた時に、シグナル光の波長は1024nmから940nmまで変化し、アイドラ光の波長は1105nmから1222nmまで変化した(図4参照)。結晶温度41°C以下では複合共振器型で発振せずに、(M1-M3)で構成される単一共振器でシグナル光とアイドラ光が発振した。これは共振器内のダイクロミックミラーが波長1030nmから長い波長で反射の特性を持っているためである。この単一共振器でのパラメトリック発振については結晶温度33°Cでほぼ縮退発振(1064nm)となり、それ以下の温度では発振しなかった。結晶温度45°Cにて、ポンプ光共振器(M1-M4)とシグナル光共振器(M1-M2)を安定化ロックした状態でM3を圧電素子(PZT)で駆動することにより、連続的にチューナブルな発振特性が得られた。図5は、M3の圧電素子に掃引電圧を印加した際のシグナル光出力の変動を示している。同時にスキャンニングファブリ
ーペロー共振器を用いてスペクトルを観測

し、出力強度は変動しているがモードホップなしに2GHzの連続周波数可変特性が得られていることを確認した。

シグナル光とアイドラ光の出力がアンバランスであるために、本装置での量子相関の生成には至らなかった。しかしながら、デュアルポート型共振器とPPKTP結晶を組み合わせた第2高調波発生(SHG)について検討と実験を行い、光子数スクイズド状態にある光子対ビームの生成に成功した。デュアルポートから発生した各々のビームに0.2dBの光子数スクイーミングが観測され、両ビーム間に0.3dBの量子相関が観測された。この結果については、国内学会での発表を行った。並行して、外部共振器とPPKTP結晶を用いたSHGによる高出力のポンプ光光源を開発し、1.2Wのポンプ光が得られた。基本波(1064nm)1.7Wの入力に対する変換効率率は、72%に達した。この結果については、Optics Communicationsに投稿し掲載された。

光パラメトリック発振器(OPO)は原理的に最も広帯域な波長可変のコヒーレント光源であるが、CW領域で連続的にチューナブルで安定な高効率発振はこれまで実現できていない。本研究では、独創的な共振器構成と擬似位相整合結晶(PPKTP)により画期的なCW OPOを実現したものであり、様々な波長領域での実用的CW OPOの開発に資する技術革新をもたらすものである。最近においては、遠赤外、テラヘルツ領域発生のために擬似位相整合結晶を用いた研究も活発に進められており、そのような波長領域での狭線幅CW光源の開発にも繋がるために応用的側面からも価値は高い。さらに、様々な医療分野において使用される各種波長レーザーに代わって、OPOはひとつの光源システムで様々な波長のレーザー医療に対応可能となるために、その利用価値は高く社会的インパクトは極めて大きい。

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. Hayashi, H. Matsumori, R. Mitazaki, Y. Xue, Y. Okada-Shudo, M. Watanabe, K. Kasai, Generation of 1.2W green light using a resonant cavity-enhanced second-harmonic process with a periodically poled KTiOP04, Optics Communications, 査読有, Vol. 294, 2013, pp. 271-275. DOI: 10.1016/j.optcom.2012.11.097
- ② 笠井 克幸, 量子ゆらぎを抑圧したブライトスクイズド光、光アライアンス、査読無、Vol. 22, 2011, pp. 20-24.

[学会発表] (計 8件)

- ① 笠井 克幸、張 贇、PPKTP を用いた複合共振器型 CW 光パラメトリック発振器の開発、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、2014 年 9 月 17 日～20 日 (発表予定)、北海道大学 (北海道)。
- ② 三反崎 涼平、松盛 裕志、河本 康太、笠井 克幸、張 贇、渡辺 昌良、デュアルポート共振器による基本波と第二高調波間の量子相関の測定、レーザー学会学術講演会第 34 回年次大会、2014 年 1 月 20 日～2014 年 1 月 22 日、北九州国際会議場 (福岡県)。
- ③ 松盛 裕志、三反崎 涼平、笠井 克幸、薛 迎紅、張 贇、渡辺 昌良、連続変数を用いた量子干渉のためのスクイーズド光安定発生、第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、2013 年 9 月 16 日～2013 年 9 月 20 日、同志社大学 (京都府)。
- ④ 三反崎 涼平、松盛 裕志、清水 光、金 東賢、笠井 克幸、薛 迎紅、張 贇、岡田 佳子、渡辺 昌良、デュアルポート SHG 共振器による量子相関をもつ光子数スクイーズド光子対ビームの生成、第 60 回応用物理学会春季学術講演会、2013 年 3 月 27 日～2013 年 3 月 30 日、神奈川工科大学 (神奈川県)。
- ⑤ 玉城 竜、笠井 克幸、張 贇、岡田 佳子、渡辺 昌良、高周波数安定度を得るための低雑音半導体レーザーの開発、レーザー学会学術講演会第 33 回年次大会、2013 年 1 月 28 日～2013 年 1 月 30 日、姫路商工会議所 (兵庫県)。
- ⑥ 松盛 裕志、林 宣之、三反崎 涼平、笠井 克幸、薛 迎紅、張 贇、岡田 佳子、渡辺 昌良、PPKTP 結晶を用いた外部共振器による第二高調波発生の高出力化と高安定化、第 59 回応用物理学関係連合講演会、2012 年 3 月 17 日、早稲田大学 (東京都)。
- ⑦ 林 宣之、笠井 克幸、張 贇、岡田 佳子、渡辺 昌良、外部共振器と PPKTP 結晶を用いた 532nm 光の高出力高効率発生、レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会、2012 年 2 月 1 日、TKP 仙台カンファレンスセンター (宮城県)。
- ⑧ 張 贇、笠井 克幸、岡田 佳子、渡辺 昌良、デュアルポート型共振器 SHG を用いた量子相関ビームの生成、第 72 回応用物理学会学術講演会、2011 年 8 月 30 日、山形大学 (山形県)。

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称：光パラメトリック発振器
発明者：笠井 克幸、齋藤 伸吾
権利者：独立行政法人情報通信研究機構
種類：特許
番号：第 5146938 号
取得年月日：2012 年 12 月 7 日
国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笠井 克幸 (KASAI KATSUYUKI)
独立行政法人情報通信研究機構・未来 ICT
研究所ナノ ICT 研究室・主任研究員
研究者番号：90359084

(2) 研究分担者

張 贇 (ZHANG YUN)
電気通信大学・情報理工学 (系) 研究科・
准教授
研究者番号：00508830