

フェムト秒 Ti: sapphire レーザ励起 SOPO の構築

Construction of a Ti: Sapphire Femtosecond Pulse Laser Pumped Synchronized Optical Parametric Oscillator

廣澤賢一(D2)

K. Hiroswa

Abstract

Since normal EDFA lasers generate substantial amount of excess noise based on ASE, these lasers are not useful for generation of squeezed light. Therefore, we constructed a Ti:Sapphire femtosecond pulse laser pumped synchronized optical parametric oscillator (SOPO). The feature and performance of our OPO are shown in this paper.

1 はじめに

近年、量子情報通信や量子コンピューティングの研究が注目を集めている。これは超並列計算や絶対破られない暗号通信のような、古典的なコンピュータや情報通信では実現不可能な応用が広く知られるようになったためである。こうした量子情報通信や量子コンピュータの性質は、量子もつれあい状態の性質に由来するところが大きく、この量子もつれ合い状態を効率よく発生させることは、この分野における1つの研究課題となっている。

量子もつれ合い状態は様々な対象で実現されているが、光の量子状態はデコヒーレンスが小さいため、量子状態を誤差無く保つことが可能であり、通信や小規模の量子コンピューティングの実証に主に使用されている。光の量子もつれ合い状態は2つのスクイズド光をビームスプリッタで干渉させることで得られるため、我々は光ファイバを用いたスクイズド光発生の実験を行っている。光ファイバのような通信用光学素子で効率よくスクイズド光、および量子もつれ合い状態を生成することができれば、この分野の発展に大きく寄与できると考えられる。

ところで多くの光ファイバは1.5 μm 帯用に設計されており、またCW (Continuous Wave) 光では Brillouin 散乱の影響が非常に大きくなることが知られているため、1.5 μm 帯のパルス光源が必要になる。こうした光源として我々はファイバレーザを所有しているが、こちらは ASE (Amplified Spontaneous Emission) に由来する大きなノイ

ズのため、スクイズド光の研究には向いていない¹。ファイバレーザのような簡便な光源によるスクイズド光、およびもつれあい状態の発生は実用上重要なテーマであるが、まずスクイズド光を発生させるために、我々は1.5 μm 帯のOPO (Optical Parametric Oscillator) を構築した。



Fig.1: Our concept of a Ti: Sapphire pumped SOPO. We adopted four-element ring cavity and R=90% output coupler.

2 OPO の構成

構築したOPOはFig.1のような構成の棒タイ型リング共振器で、ポンプ光源はSpectral Physics社のTi:Sapphireモードロックレーザ、Maitaiを使用した。このMaitaiの繰り返し周波数は80 MHz、平均出力700-900 mW、パルス幅100 fs前後、スペクトル幅15 nm前後である。OPOの非線形結晶にはオキサイド社製のMgOをドープしたPPLN (Periodically Poled LiNbO₃)を使用した。このPPLNには、800 nm付近と1550 nm付近にARコーティングがなされている。PPLNの特徴としては、 $d_{\text{eff}} \sim 17 \text{ pm/V}$ という非常に高い非線形係数と、結晶を複屈折軸に沿って使用するために、空間的なウォークオフ効果が無いことがあげられる。我々の使用するポンプ光はそれほどパワーが高くないため、高い非線形係数は発振閾値を下げるために重要である。結晶のサイズは縦横が0.5~10.0 mmであり、光軸方向が1.0 mmである。PPLNの分極反転周期は0.1 μm きざみで21.2 μm ~20.4 μm の9種類がひとつの結晶に作成してあるが、これは通常非線形結晶のように位相整合を角

度によって微調整しないためである。また、LiNbO₃ 結晶は光損傷を受けやすいことで知られ、通常高温で使用するが、MgO をドープすることで損傷閾値を向上させる必要がある。我々の PPLN は MgO がドープしてあるため、常温での使用が可能である²³。共振器は Fig. 1 に示すとおり、2 枚の R=100 mm の凹面鏡と 1 枚の平面ミラー、1 枚の出力ミラーから成り、出力ミラーの反射率は 90% である。ミラーは全て誘電体多層膜であり、2 枚の凹面鏡はポンプ光に対して容透過にしてある。共振器長は 80 MHz に対応する約 3.75 m で、ポンプ光は f=75 mm のレンズを用いて集光している。また、非点収差の影響を考慮し、凹面鏡の反射角は 3 度程度に抑えてある。共振器中には複屈折フィルタが設置してあり、この角度で発振波長の選択が可能である。複屈折フィルタは厚さの異なる石英板枚数から成り、いずれもブリュスター角に配置する。石英板の枚数は欲しいスペクトル幅に応じて 1~5 枚の間で調節を行う。複屈折フィルタは無くても使用可能であるが、共振器長によって発振波長が変わることと、シグナルとアイドラの両方が共振しないように注意する必要がある。シグナルとアイドラの両方が共振する OPO を DRO (Doubly Resonant OPO) といい、厳密に共振器長をロックしないと発振が不安定になるため通常は使用しない。我々の OPO ではポンプ光を 820 nm にし、発振する波長を 1530nm 以下にしなければ、複屈折フィルタなしでの使用は困難である。ポンプ光の波長 830 nm にすると位相整合が外れ、急激にゲインが低下し、810 nm では 1500 nm 以下でないと DRO 発振となる。複屈折フィルタを使用している場合は、810 nm 付近がもっとも位相整合が良く、高い光出力が得られるため 810 nm 前後の波長を使用している。位相整合は 800 nm 付近に比べ、1.5 μm 帯の分散が非常に小さいため、主にポンプ光の波長に依存し、微調整はどの分極反転周期を使用するかで行った。

3 発振した光パルスの特徴

我々は以上のような構成で OPO を発振させることに成功した。以降は発振した光パルスの特徴について述べる。最初に気がつくことは、結晶に 800 nm 帯のポンプ光を集光するだけで紫色の光が見え、1.5 μm 帯のパルスが発振すると、緑色の光が見えることである。前者はポンプ光の 2 倍波、後者は 1.5 μm 帯のシグナル光とポンプ光の和周波混合と考えられる。これらの過程で位相整合の取れる分極反転

周期は、使用している PPLN の分極反転周期と大きく異なるため、PPLN の高い非線形係数が災いして発生してしまうものと考えられる。特に 1.5 μm 帯のシグナル光における 2 倍波発生や和周波混合は共振器損となってしまうため、Z 型共振器のように 1 周につき結晶を 2 回通る構成にしなかったのは結果的に正しい選択であったといえる。このような共振器損の影響もあつたか、OPO の効率は期待したほど高いものではなかった。我々の OPO の効率がおよそ 10% 程度であったのに対し、文献⁴ ではスロープ効率が 25%、文献⁵ では 36% という数値が報告されている。

3.1 複屈折フィルタなしでの発振

まずは、複屈折フィルタなしの状態での出力パルスの特徴を記す。現在は基本的に複屈折フィルタありで実験を行っているため、複屈折フィルタなしのときのデータは比較的古いものも多く、アライメント技術の向上により現在はいくらか特性が向上している可能性がある。出力光の中心波長は 1450 nm~1560 nm で、これより長波長側では DRO 発振となり、短波長側ではミラーの反射率が減少していくに従い、発振が不安定になっていく。中心波長は共振器長をシフトすることで可変となる。逆に温度変化などで共振器長が変わってしまうと、時間とともに発振波長がシフトして行ってしまう。代表的なスペクトルを Fig. 2 に示す。スペクトル幅は 23 nm (FWHM) であり、これはフーリエ限界パルスでおよそ 160 fs に相当する。出力光強度は最大で 40 mW 程度であった。これはスロープ効率でも 10% に到達しておらず、改良の余地を残す結果となった。効率を低下させている原因は、中心波長が位相整合の良い波長からずれていること、和周波や 2 倍波発生によるシグナル光の吸収といったことが挙げられる。

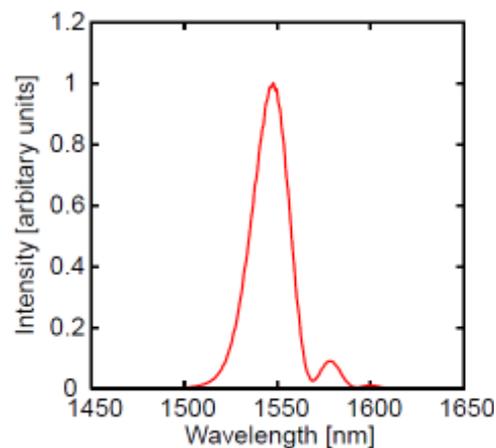


Fig.2: Example of output spectrum from our OPO without birefringence filter. Spectrum width corresponds to ~23 nm (FWHM).

3.2 複屈折フィルタありでの発振

次に、我々は共振器内に複屈折フィルタを入れることにした。我々の OPO はポンプ、シグナル、アイドラのいずれも縦偏光であるため、あおり方向がブリュースター角になるように配置する必要がある。この複屈折フィルタにより、中心波長が固定され、共振器長にはほとんど依存しなくなった。これにより DRO 発振も防止することができ、位相整合の良い 810 nm で使用することが可能となった。複屈折フィルタの損失はゼロにすることは不可能であるため、シグナルのパワーは減少したが、上記のように位相整合の良い波長が使用できるようになった。また、共振器の細かいアライメントを向上させていった結果、現在の効率は複屈折フィルタなしでの発振に比べ、遜色の無い値が達成できている。このときの入力パワーと出力パワーの関係を Fig. 3 に示す。発振閾値は 314 mW で、スロープ効率は 11.7% であった。また最大で 40 mW 程度の出力パワーが得られた。また、複屈折フィルタは枚数によってスペクトル幅を変化させることができ、その様子を Fig. 4 に示す。1 枚のときは ~20 nm、3 枚のときは ~10 nm、5 枚のときは ~3 nm が目安である。ただし、この数値は中心波長やポンプ光の強度など諸条件によって異なる。これらのスペクトル幅はフーリエ限界パルスにおける時間幅に直すと、それぞれ ~170 fs、~340 fs、~1.1 ps に相当する。

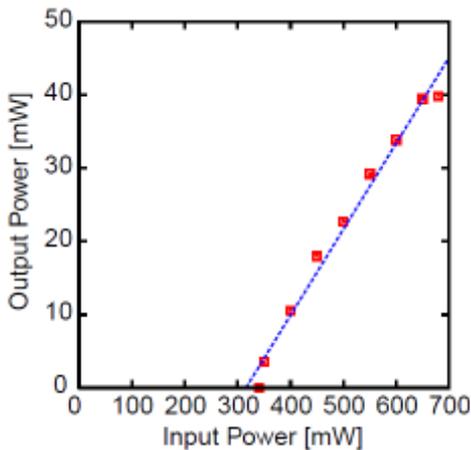


Fig.3: Output power (1.5 μm) dependence on input power (800 nm). The slope efficiency corresponded to 11.7%.

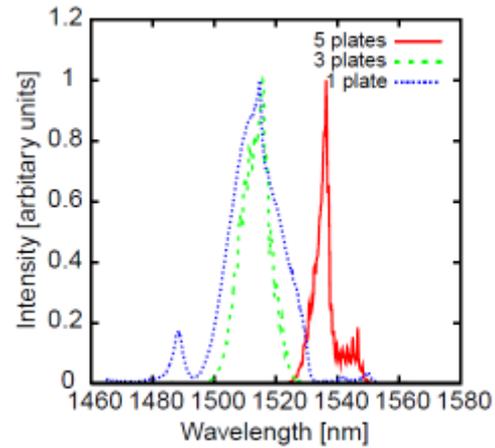


Fig.4: Examples of output spectra from our OPO with birefringence filter (BF). Spectrum width depends on number of plates in the BF. Solid line corresponds to the output spectrum with 5 plates BF, dashed line corresponds to the output spectrum with 3 plates BF, and dotted line corresponds to the output spectrum with 1 plate BF.

4 まとめ

以上のように我々は光ファイバを用いたスクイズド光発生のための 1.5 μm 帯パルス光源の開発に成功した。この OPO は複屈折フィルタを持ち、中心波長を 1450 nm~1580 nm で可変とすることができる。また複屈折フィルタの枚数によってパルス幅も可変とすることができ、170 fs~1.1 ps の範囲で、ある程度自由変えることが可能である。光パワーは最大で 40 mW 前後であった。スロープ効率は 11.7% と文献値^{4,5}と比較して低くなっているが、これは副次的に発生する緑色の光の影響が考えられる。対策としては、出力ミラーの透過率を上げることで、共振器内の光強度を下げる事が挙げられる。スロープ効率は低いですが、中心波長やパルス幅の自由度の高さは、今後のスクイズド光発生実験において有利に働くと考えられる。

References

1. 田口修平, 神成研究室 Annual Report 2005-2006, 57.
2. D. E. Zelmon, D. L. Small, and D. Jundt, J. Opt. Soc. Am. B **14**, 3319 (1997).
3. stoichiometric PPLN に関してはオキサイド社の HP, <http://www.opt-oxide.com/> も参考になる。
4. S. D. Butterworth, P. G. R. Smith, and D. C. Hanna, Opt. Lett. **22**, 618 (1997).

5. K. C. Burr, C. L. Tang, M. A. Arbore, and M. M. Fejer, *Opt. Lett.* **22**, 1458 (1997).