

# 高出力ピコ秒励起パルスを用いた光パラメトリック増幅の研究

## Investigation of optical parametric amplification using high power picosecond pump pulses

板谷 治郎<sup>1)</sup> 栗原 貴之<sup>1)</sup> 石井 順久<sup>2)</sup>

Jiro ITATANI Takayuki KURIHARA Nobuhisa ISHII

<sup>1)</sup>東大物性研、<sup>2)</sup>量研

### (概要)

QUADRA-T レーザーシステム（パルス幅：1 ps、中心波長：1030 nm、パルスエネルギー：10 mJ）を用いて光パラメトリック増幅過程を研究した。レーザーの一部出力をヤグ（YAG）結晶に集光することによって得られる白色光 [1]とその光パルス内の差周波発生を用いて、光パラメトリック増幅用の種光（中心波長 2060 nm）を得た。ニオブ酸リチウム（LiNbO<sub>3</sub>）または周期分極反転ニオブ酸リチウム（PPLN）、ビスマスポーレート（BiBO） [2]を非線形光学結晶として用いた縮退光パラメトリック増幅器を開発し、その特性（スペクトル帯域、熱歪等の影響）を検証した。

**キーワード**：光パラメトリック増幅、白色光パルス、差周波発生、ニオブ酸リチウム、周期分極反転ニオブ酸リチウム、ビスマスポーレート

### 1. 目的

QUADRA-T レーザーシステムを励起光源とした縮退光パラメトリック増幅器について、その特性を調べる。水の吸収帯域が存在することを考慮に入れつつ、光パラメトリック増幅器のための非線形結晶の候補として、ニオブ酸リチウムや周期分極反転ニオブ酸リチウム、ビスマスポーレートを選定した。これらの非線形結晶を用いたときの光パラメトリック増幅器を構築し、増幅度や増幅スペクトル帯域、熱ひずみ等の影響を調べる。

### 2. 方法

QUADRA-T レーザーシステムの一部出力をヤグ結晶に集光し、白色光を発生させた。元のレーザーの中心波長である 1030 nm 近傍のスペクトル強度が高く、光損傷の恐れがあるため、波長 1030 nm 近傍の反射率を落としたバンドストップミラーを用いた。バンドストップミラー自体の負分散の付与ならびにチャープミラーによる更なる負分散によりパルス圧縮した白色光のパルス内差周波を周期分極反転ニオブ酸リチウム内部で発生させた。パルス内差周波は 1500 nm から 2500 nm までのスペクトル帯域をカバーし、本実験の種光として用いた。種光を 10 mm 厚のセレン化亜鉛に通すことにより、励起光源のパルス幅を 1 ps 近くまで時間的に伸ばした。パルス内差周波発生用周期分極反転ニオブ酸リチウム内の集光点から、種光を拡大集光することによって、励起光源のビームと同じ大きさにした。QUADRA-T レーザーシステムの一部出力（パルスエネルギー：約 70 μJ）を緩く集光することによって、光パラメトリック増幅器の励起光とした。光パラメトリック増幅器の励起光と種光のなす角はごくわずかにして非線形結晶に直入射した。本研究では縮退光パラメトリック増幅過程を用いるため、励起光と種光は同軸であることが最適な条件ではあるが、励起光と種光を空間的に分離するために若干の非同軸角をつけている。励起光と種光の相互の調整について、空間的なオーバーラップは精密ミラーマウントで調整し、時間的なオーバーラップは遅延可変光路によって行った。

このような実験条件のもと、3 種類の非線形結晶（厚さ 3 mm のニオブ酸リチウム、厚さ 2 mm の周期分極反転ニオブ酸リチウム、厚さ 3 mm のビスマスポーレート）を用いて、光パラメトリック増幅器の特性を調べた。それぞれの非線形結晶において、パルスエネルギーと増幅後のスペクトルを計測した。励起光の入力パワーが 350 mW であったこともあり、熱ひずみについては顕著な影響は見られなかった。

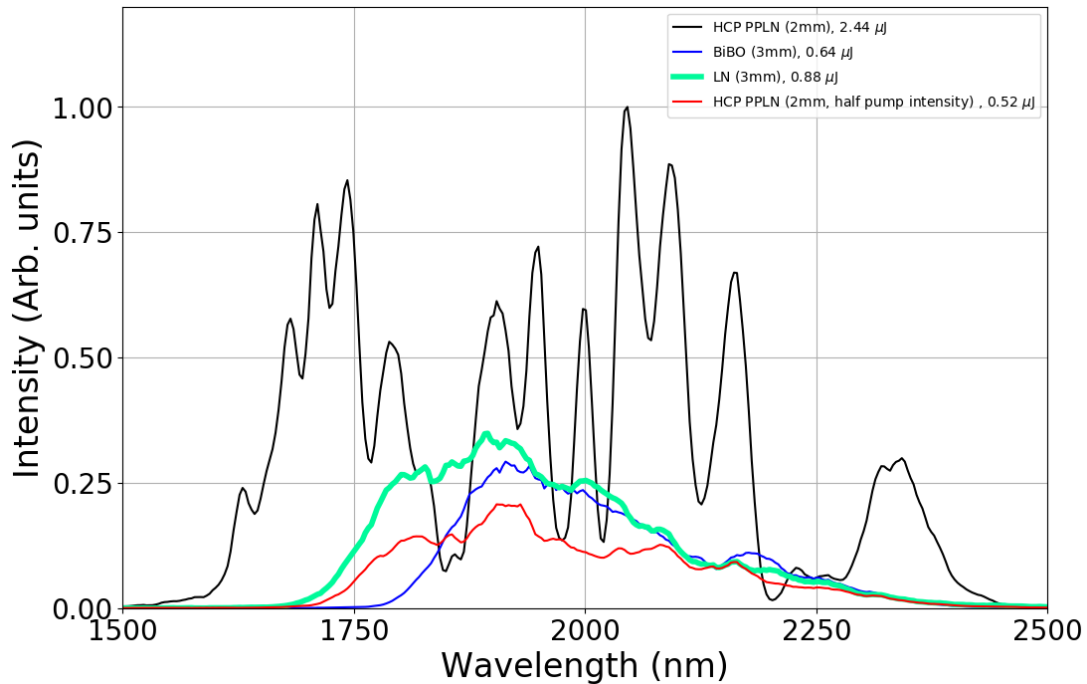


図1：光パラメトリック増幅後の被増幅光のスペクトルとパルスエネルギー。  
 HCP PPLN：周期分極反転ニオブ酸リチウム（HC Photonics 社製 Periodically Poled Lithium Niobate）、BiBO：ビスマスボーレート、LN：ニオブ酸リチウム

### 3. 結果及び考察

前述の各非線形結晶について、出力スペクトルとエネルギーの計測結果を図1にプロットした。非線形係数の高い周期分極反転ニオブ酸リチウム、ニオブ酸リチウム、ビスマスボーレートの順番に出力エネルギーが高くなった。ニオブ酸リチウムでは、ビスマスボーレートよりスペクトル帯域が広がっているため、スペクトル輝度としては同程度である。

本実験ではニオブ酸リチウムに対して最適化した励起レーザー強度において実験を行ったため、非線形係数が極端に高い周期分極反転ニオブ酸リチウムでは増幅の飽和によると思われるスペクトルのモジュレーションが観測された。励起光はガウシアン的な時間プロファイルをしているため、励起光の強度が落ちる被増幅光のスペクトル両端において顕著な増幅が見られた。

周期分極反転ニオブ酸リチウムにおいて、励起レーザー強度を半分にして実験を行った（図1赤線）。励起レーザー強度を落としていくと、ニオブ酸リチウムと同じような増幅結果が得られたが、非線形係数の高い周期分極反転ニオブ酸リチウムでも、ニオブ酸リチウムと同程度のスペクトル幅が得られたのは想定外であった。

ビスマスボーレートについては、2200 nm より長波長において定常吸収が存在するが、3 mm 厚の結晶における光パラメトリック増幅器では影響が顕著でないことが分かった。

本実験ではニオブ酸リチウムに対して最適化した励起レーザー強度において実験を行ったが、強誘電性であるニオブ酸リチウムに比べ、ビスマスボーレートはフォトリフレクティブ効果が少なく光耐力も高いため、より高い励起光強度下においてより広い増幅スペクトル帯域が得られる可能性があることを付記したい[2]。

これらの結果から、現時点では、ピコ秒パルスを用いた励起光源とした光パラメトリック増幅器において、非線形結晶としてニオブ酸リチウムが最適であると結論付けた。

### 4. 引用(参照)文献等

[1] Nobuhisa Ishii, Momoko Maruyama, Keisuke Nagashima, Yoshihiro Ochi, and Ryuji Itakura, "Generation and compression of an intense infrared white light continuum in YAG irradiated by picosecond pulses," *Optics Express* **29**, 17069-17076 (2021).

[2] Takayuki Kurihara, Tianqi Yang, Tomoya Mizuno, Teruto Kanai, and Jiro Itatani, "Highly CEP-stable optical parametric amplifier at 2 μm with a few-cycle duration and 100 kHz repetition rate," *Opt. Express* **31**, 11649-11658 (2023).