

# サブ 20 fs パルス用超広帯域増幅システムの開発

電子工学専攻 西岡研究室 椋谷晃平

## 1. 序論

パルス幅がサブ 20 fs の超短パルス光とは全幅で 50 THz 以上の帯域を持つ超広帯域光である。その超短パルス光には様々な利点があり、多くの分野で応用が期待されている。例を挙げると、レーザー加工に超短パルス光を用いると低エネルギーかつ高ピーク強度であることから熱による損傷や変質が低減され精密に加工できる。また時間分解能が高いことも特徴であり、フェムト秒パルスを用いることでフェムト秒の時間分解能を持ち、物質での高速な応答を測定することができる。

現在ではモード同期チタンサファイヤレーザーの発展によって超短パルス光を発生できる発振器が市場に出回っており、パルス幅サブ 10 fs の超短パルス光を得ることも容易になってきた。しかし、発振器から出た光のパルス毎のエネルギーは数 nJ と低い。その超短パルス光を  $10^{6-7}$  倍増幅するとパルス幅がとても短いことから、数 TW を超える高ピーク強度を得ることができ、その高ピーク強度パルスを使用することで自己位相変調や自己収束などの非線形光学効果の実験が可能になる。そこで超短パルス光をそのまま増幅媒質に入射し増幅すると高ピーク強度による結晶破壊や、非線形効果による波長、位相の変調などの問題が生じてしまう。この問題を解決するためにチャープパルス増幅(CPA: Chirped Pulse Amplification)が一般的に用いられるが、20 fs パルスでは全幅で 50 THz を超える帯域を持つため、増幅媒質での利得狭窄により圧縮後のパルス幅が広がることや、高次の群遅延分散によるパルス波形の変形、装置の複雑化など問題点も多い。そこで本研究ではそれらの問題を解決し、サブ 20 fs パルス用超広帯域増幅システムの開発を行った。

パルス幅 20 fs、帯域 50 THz のパルスを  $10^6$  倍増幅するために、広帯域、高利得増幅が可能である非同軸光パラメトリック増幅器(NOPA: Noncollinear Optical Parametric Amplifier)を使用した。NOPA では 1 cm の結晶長で  $10^3$  倍の高利得が得られる。一方、ノイズは小さく抑えることができる。また励起パルスと重なった信号パルスだけに増幅が起きることから、NOPA での増幅を利得スイッチとして扱えるなど様々な利点がある。しかし、欠点として原理上大きなエネルギーを得難いことが挙げられる。そのため後段で Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 結晶を用いた増幅を行い、パルス毎のエネルギーを容易に mJ にまで増幅できる設計にした。

パルス伸張器、圧縮器には高次の群遅延分散が打ち消し合う関係にあるガラスブロックとプリズム対を使用した。回折格子対を使用した場合と比較すると損失が少なく、光軸調整が簡単になる。

## 2. サブ 20 fs パルス用増幅システム的设计

まず NOPA の利得とその利得帯域を計算で求めた。NOPA は非線形結晶の 2 次の非線形分極による増幅であり、その非線形結晶中で励起光と信号光とアイドラー光がエネルギー保存則  $\omega_s + \omega_i = \omega_p$  と運動量保存則  $k_s + k_i = k_p$  を満たす条件で増幅が起きる。また運動量保存則は励起光と信号光の位相整合条件と同等である。非線形結晶中では波長が異なると

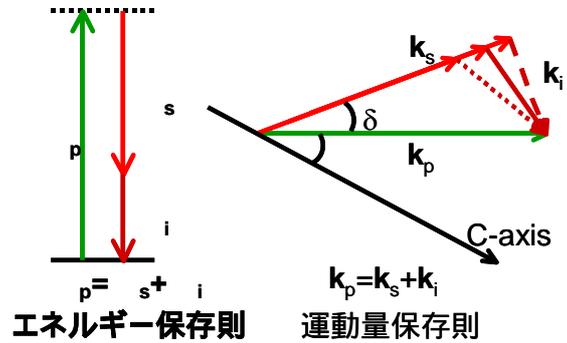


図 1 励起光と信号光の位相整合条件。

屈折率が違うことから、位相整合条件を満たすために非線形結晶の複屈折を利用する。今回は励起光を異常光線、信号光とアイドラー光を常光線とする type- の位相整合で NOPA を行った。また非線形結晶の光軸の角度を調節し位相整合条件を満たすことのできる信号光の波長を広帯域にするために、励起光と信号光を非同軸に入射する NOPA で増幅を行った。NOPA には BBO type- 結晶を用い、励起光には Q スイッチ Nd:YAG レーザーの第 2 高調波(532 nm)を使用することから、この条件で利得を計算すると図 2 になった。

励起光と信号光のなす角  $\delta$  を変化させると、位相整合角  $\theta$  を決定したときの利得帯域が変化することが分かる。図 2 では  $\delta=2.3^\circ$ 、 $\theta=23.73^\circ$  のとき波長 730 nm~980 nm で利得が有ることが分かる。このときの利得を計算したのが図 3 である。帯域は 117 THz になり、20 fs パルスの帯域の全幅が 50 THz であることから NOPA の利得帯域は十分に広いことがわかった。

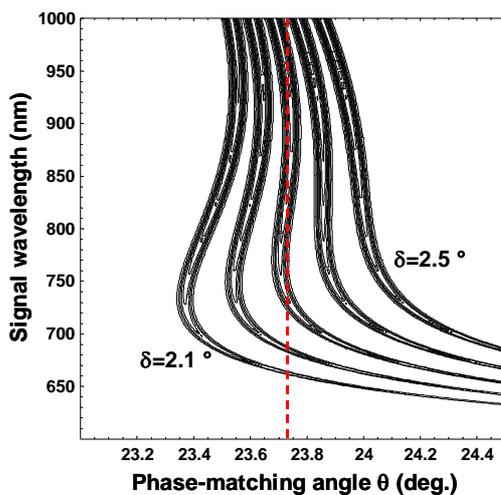


図 2 位相整合角  $\theta$  と、励起光と信号光のなす角  $\delta$  が変化したときの利得の変化。

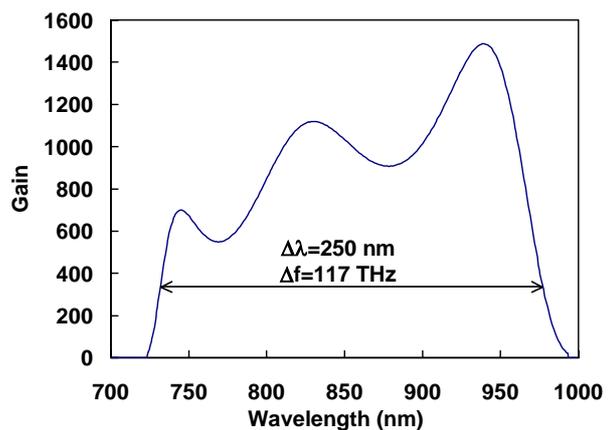


図 3 BBO 結晶による広帯域利得。

本研究では1nJの信号光を1mJまでの $10^6$ 倍増幅を目的としているが、それをNOPAだけで実現することは難しい。その理由を述べると、NOPAでの増幅は励起パルスと信号パルスが重なった部分だけで起きるといった特徴がある(図4)。この特徴は1つのパルスだけが選択されて増幅されるという利点もあるが、大きなエネルギーを得るのは難しいという欠点でもある。単純に考えると励起パルスのパルス幅が5 nsであるのに対し、信号光のパルス幅が10 psだと最大で励起光のエネルギーの500分の1しか増幅が起きない。励起パルスのエネルギーは最大で100 mJを予定していることから信号光は200  $\mu$ Jまでしか増幅できないことになる。そこでNOPAで $10^5$ 倍の増幅を行った後に、Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>結晶で10倍の増幅を行うことで1 mJまでの $10^6$ 倍増幅が可能になる。

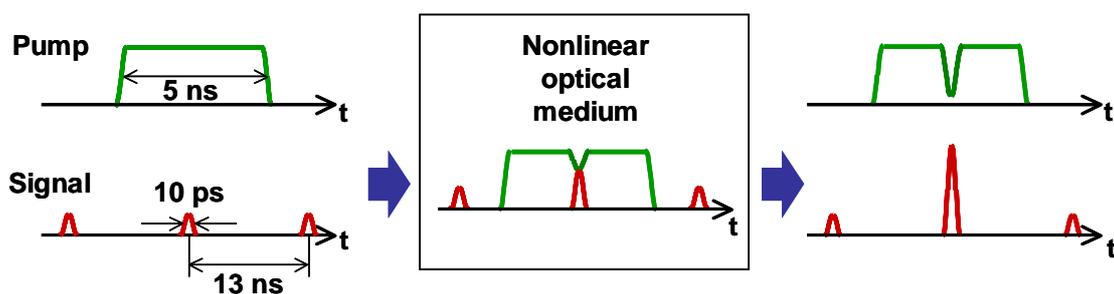


図4 NOPAにおける信号パルスの増幅過程。

NOPAの利得を計算すると図5になる。励起光強度を上げると利得はべき乗で増えていき、その最大利得はBBO結晶での損傷閾値で決定される。その損傷閾値が1 GW/cm<sup>2</sup>であることからBBO結晶1 cm、1パスでは目標である $10^5$ 倍を達成できない。そこでBBO結晶1 cm、2パスで増幅することで励起光強度が損傷閾値の半分以下である450 MW/cm<sup>2</sup>で $10^5$ 倍増幅が実現できることがわかった。

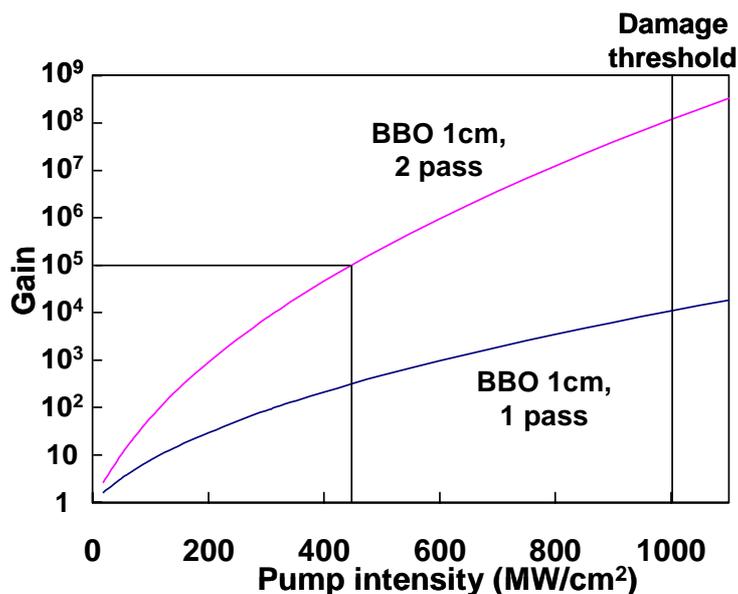


図5 NOPAの利得の励起強度依存性。

CPA における群遅延分散補償部分であるパルス伸張器、圧縮器にはガラスブロック、プリズム対を使用することにした。一般的にパルス圧縮器には回折格子対を用いることが多い、しかし欠点もあることから今回は使用しないことにした。回折格子対を使うと損失が大きく、特にブレイズ波長以外ではさらに損失が大きくなるという欠点があり、さらに 3 次分散を打ち消すためには回折格子と曲面鏡を使用した複雑で巨大な構成になる。今回パルス伸張器にガラスブロックを使用したことで、光軸調整がとても容易になり安価でかつ、省スペースになった。信号光を増幅した後のパルス圧縮器にはプリズム対を使うことで損失が小さくなる。またサブ 20 fs パルスのような超広帯域光の群遅延分散補償には 3 次以上の分散も考慮する必要がある。そこでガラスブロック、プリズム対、回折格子対それぞれの群遅延分散の周波数依存性をグラフにし、比較したのが図 6 である。それぞれ周波数が変わると群遅延分散も変化しているが、その変化量が高次の群遅延分散を意味している。媒質であるガラスブロックの群遅延分散と比較して、プリズム対が高次の分散を打ち消すことができることがわかる。

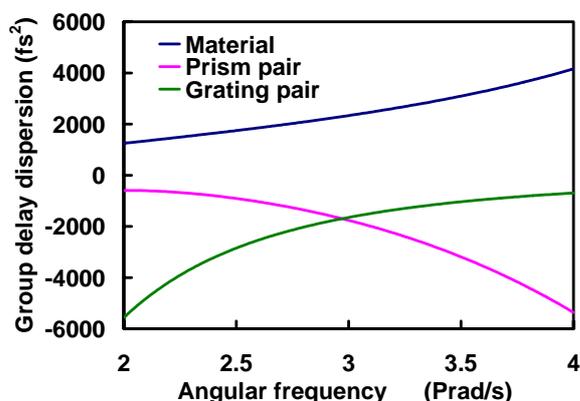


図 6 群遅延分散の周波数依存性。

本研究では増幅後のパルスエネルギーが 1 mJ、ビーム径 2 mm を想定していることから、増幅媒質中のピーク強度が非線形効果のおきる基準である 10 GW/cm<sup>2</sup> 以下になるためにはパルス伸張器でパルス幅を 10 ps 程度まで広げる必要がある。パルス幅を 10 fs から 10 ps まで 10<sup>3</sup> 倍広げるための 2 次の群遅延分散量は 4 × 10<sup>4</sup> fs<sup>2</sup> になり、そのためにガラスブロック(SF10)5 cm、5 回透過で 39862 fs<sup>2</sup> の群遅延分散を信号パルスに与えた。さらに増幅媒質である BBO 結晶 1 cm 2 回透過、Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 結晶 1 cm 2 回透過で 2400 fs<sup>2</sup> の群遅延分散があるので合計で 42262 fs<sup>2</sup> になる。この群遅延分散をプリズム対で打ち消すためにプリズム 4 つ使用したパルス圧縮器を使用した(図 7)。プリズム 2 つの構成に比べるとプリズム間距離が同じで、4 倍の群遅延分散を与えることができる。プリズム間隔が 557 cm のとき群遅延分散は - 42262 fs<sup>2</sup> になり、2 次の群遅延分散を打ち消すことができる。3 次の群遅延分散はガラスブロックが 25325 fs<sup>3</sup>、プリズム対が - 49633 fs<sup>3</sup> になり打ち消しあうが、プリズム対での負の 3 次分散が大きいため 3 次の群遅延分散は残ってしまう。

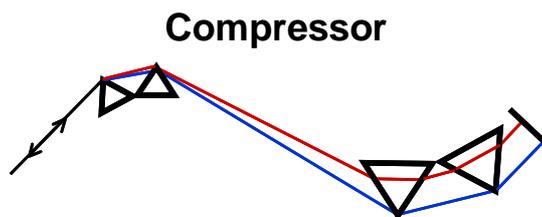


図 7 パルス圧縮器の構成。

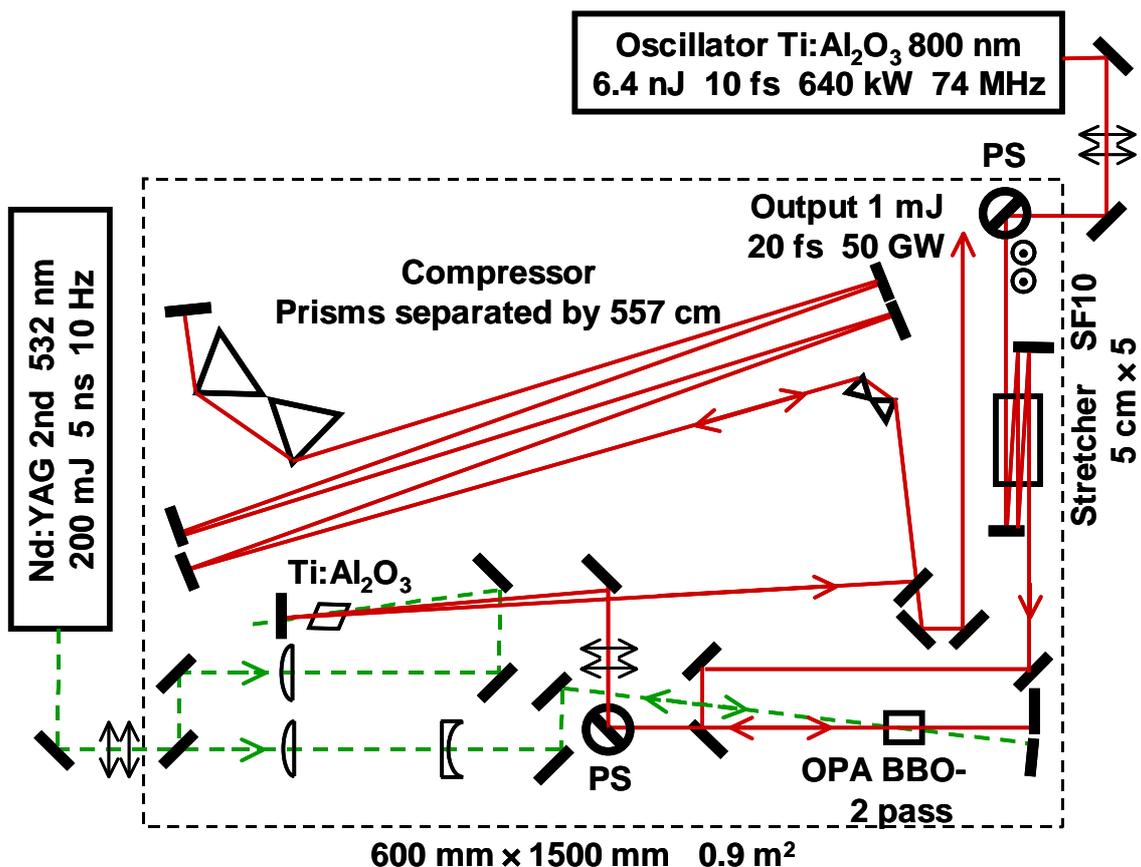


図 8 増幅システムの構成図。

増幅システムの構成図を図 8 に示す。繰り返し周波数 74 MHz の信号光に対し、励起光は 10 Hz なので分周器を使って同期を行った。NOPA で Type- 位相整合を行うので励起光と信号光の偏光が直交している必要があるが、その信号光の偏光を回転させるためにペリスコープを使用することで媒質を透過せず、波長依存性の無い偏光回転が行える。またビームの高さを変えることも同時に行えることから効率的な構成になっている。本システムの特徴はパルス伸張器、圧縮器以外で信号光が透過する媒質が BBO 結晶 2 cm、Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 結晶 2 cm と短いことである。増幅媒質長が短いことはそこでの群遅延分散が小さくなり、非線形効果が起きにくくなる。また共振器による増幅や、ポッケルスセルによる偏光制御も無いことから高繰り返しの増幅システムとしても使用することができる。光源を除いたシステム全体が 0.9 m<sup>2</sup> の光学台上に収まり、テーブルサイズの省スペースになった。

### 3. 実験結果

NOPA には BBO type- 結晶を用い、励起光には Q スイッチ Nd:YAG レーザーの第 2 高調波(532 nm)を使用した。まず光パラメトリック発振器を組み、BBO 結晶の位相整合角 $\theta$ を調整することで発振スペクトルの帯域幅が最大になる条件を決定した(図 9)。70 THz の帯域幅が得られ、フーリエ限界 10 fs パルスを増幅できることがわかった。

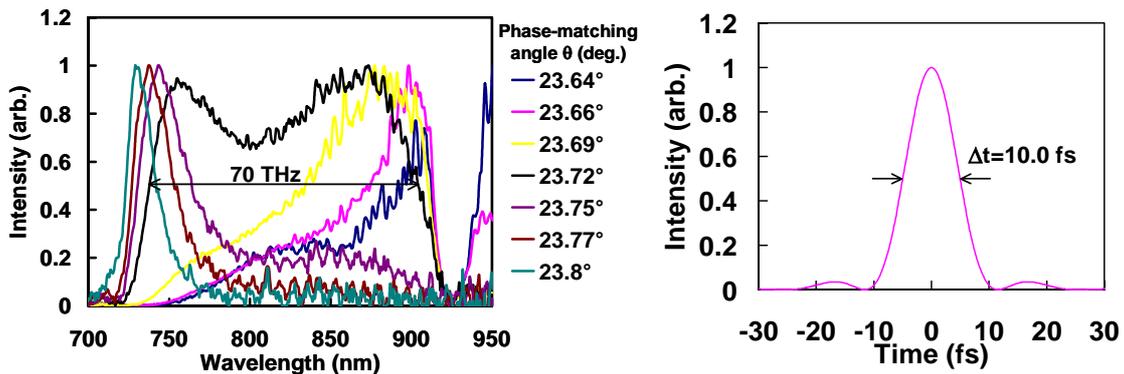


図9 (左)光パラメトリック発振器の発振スペクトル、(右)フーリエ変換後。

モード同期 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザーで発生したパルスを用いて NOPA で増幅すると BBO 結晶 1 cm, 2 パスで  $1.1 \times 10^5$  倍の利得が得られた。この NOPA での利得が増幅されたパルスとその前後のパルスのコントラスト比になる。Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 結晶 1 cm, 2 パスにおける増幅では 8.2 倍の利得が得られ、NOPA と合計で  $9.0 \times 10^5$  倍の利得が得られた。

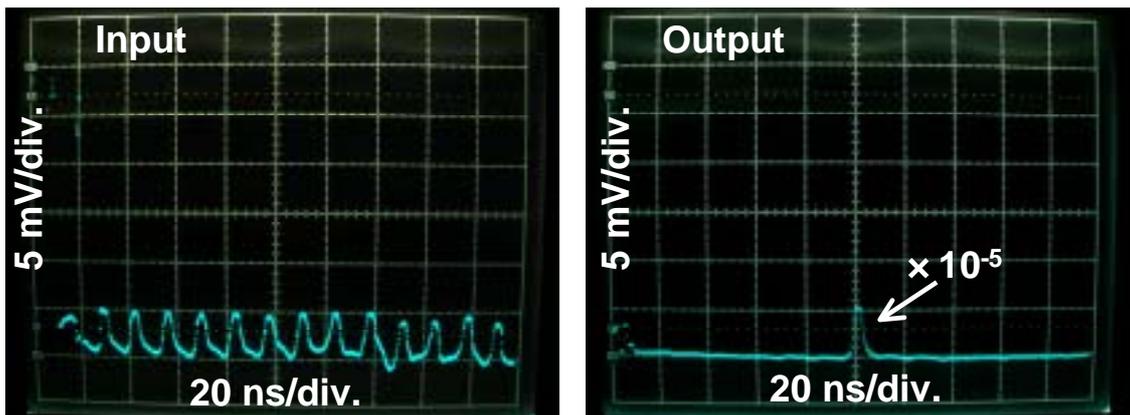


図10 NOPA による  $1.1 \times 10^5$  倍の増幅、(左)NOPA 前、(右)NOPA 後。

#### 4. まとめ

サブ 20 fs パルス用増幅システムを設計した。

増幅器に NOPA を用いることで 10 fs に相当する 70 THz の利得帯域を得られた。サブ 20 fs パルス用増幅器として十分な利得帯域を持つ事がわかった。

また NOPA では最大で  $1.1 \times 10^5$  倍、Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 結晶で 8.2 倍の利得を得られた。合計で  $9.0 \times 10^5$  倍の利得が得られた。NOPA は利得スイッチとなり、増幅されたパルスとその前後のパルスのコントラスト比は  $1.1 \times 10^5$  倍になった。

問題点としては NOPA での増幅が安定していないことが挙げられる。原因は励起光源が安定していないことだと考えられる。

今後の予定はパルス圧縮後のパルス波形の測定を行うことと、励起光の共振器に単一モード光を注入して励起光の安定化を行うことである。