

分割パルスファイバー増幅およびチャープパルス増幅による 高エネルギー超短パルスの発生

白川研究室 杉本洸太

1 序論

近年の超短パルスレーザー技術の発展に伴い、その応用分野は工業や医療など幅広くなっている。中でもレーザーを用いた粒子加速器 [1] などではピークパワーがテラワットを超えるような高エネルギー超短パルスレーザーが求められる。しかし、レーザーの高エネルギー化の実現は容易ではない。レーザーを増幅する際に、非常に大きな熱が生じてしまう。そのため、高エネルギーレーザーには冷却性に優れた増幅媒質が必要である。その点で言えば、表面積/体積比が無制限大となるような構造をとるファイバーレーザーは放熱性が良いため、高平均出力動作に適している。また、シリカガラスで作られたファイバーは光を低損失で伝搬させることができる。さらにファイバーは利得媒質であると同時に導波路でもあるので、レーザーの横モードを制御できることや、長い距離に渡って相互作用が働くことによる、高ビーム品質、高利得といった利点もある。しかしながら、前述のような高いピークパワーを持つパルスを増幅する際には、誘導ラマン散乱や誘導ブリルアン散乱などといった非線形効果によるパルスの品質劣化やファイバーの損傷などが引き起こされ、問題となる。

これらの問題を抑制する手法として、チャープパルス増幅 (CPA) がある [2]。これはパルスを延伸させてピークパワーを抑えた上で増幅し、その後自由空間上で再びパルスを圧縮することで高いピークパワーを持ったパルスを得るという手法である。さらに、分割パルス増幅 (DPA) という手法もある [3]。これは増幅前にパルスを複数に分割することでピークパワーを抑え、増幅時の非線形効果を抑制する。増幅後に再びパルスを重ね合わせることで高いピークパワーを持ったパルスを得る。

本研究では、チャープパルス増幅および分割パルス増幅を用いた高エネルギー超短パルスの発生を目指している。

2 原理

2.1 チャープパルス増幅 (CPA)

CPA では、安定したモード同期レーザー発振器より出射されたパルスを増幅する前に延伸させてピークパワーを抑え、それを光学的破壊閾値や非線形効果が問題とならない程度まで増幅した後、再びパルスを圧縮することにより高出力超短パルスを得る。

チャープを生じさせるものとしては、伝搬媒質による媒質分散、回折格子対などによる角度分散、光ファイバーにおける SPM などの非線形効果により生じる分散などがあり、分散量は GVD で定義される [4]。パルスを再度圧縮するパルスコンプレッサーでは、パルスストレッチャーと逆符号の分散を与え、パルスの圧縮が行われる。

パルス圧縮には回折格子対 (グレーティングペア) がよく用いられる。正にチャープしたパルスにおいては、短波長成分はパルスの後端側、長波長成分はパルスの先端側にある。このパルスの異なった波長成分は、回折格子によってそれぞれ異なった角度で回折される。平行に置かれた回折格子対では、長波長成分が短波長成分より長い距離を通るので、パルスの圧縮が可能である。また、回折格子対の間隔を広げると群速度分散 (GVD) は小さくなる。

2.2 分割パルス増幅 (DPA)

DPA の概念図を図 1 に示した。DPA では、発振器より出射されたパルスをパルス分割器によって 1 つのパルスを複数に分割することでパルスのピークパワーを抑え、それを光学的破壊閾値や非線形効果が問題とならない程度まで増幅した後、再びパルスを再結合することにより高出力超短パルスを得る。パルスの分割器および再結合器では、入射パルスの p 偏光、s 偏光でそれぞれ異なる光路長を持つようになっている。

パルスの結合は電界波形の重ね合わせである。そこで、図 2 に示したように、結合効率を高くするには分割器と結合器で遅延路長を高精度で一致させる必要がある。図の左 2 つの加算では、分割パルスの位相が不一致なために結合効率が低下している。一番右の加算では

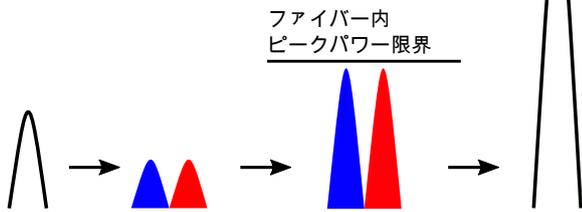


図1 DPA の概念図

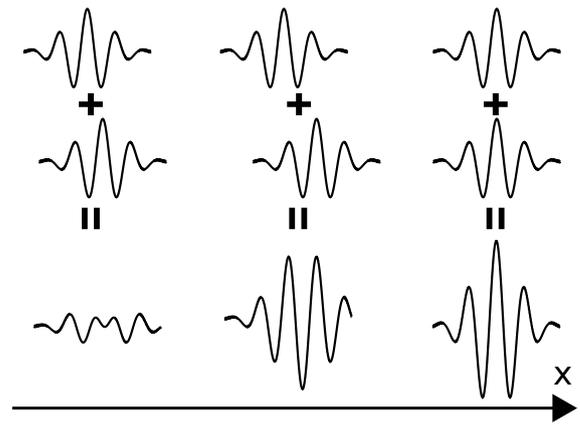


図2 パルスの結合

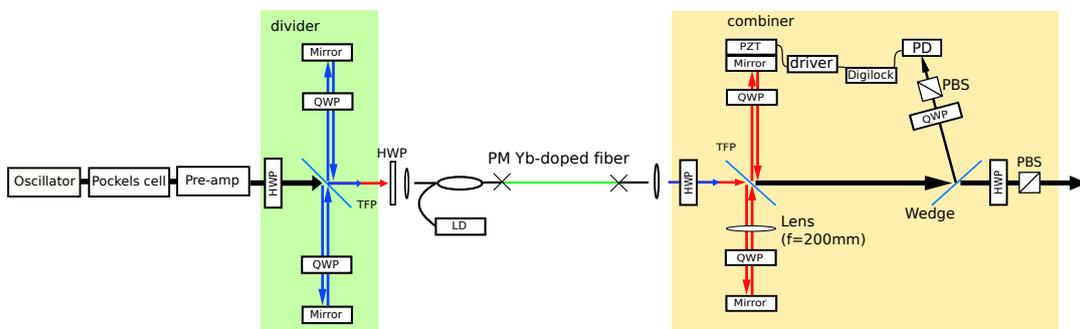


図3 実験系

各々のパルスが正確に一致しているため、完全に結合されている。

3 実験

3.1 実験系

まず、実験系の全体図を図3に示した。共振器から出射されたパルス)を分割器で2つのパルスに分割し、Yb添加ファイバーで増幅した。最後に結合器にて2つのパルスを再結合し、出力パルスを得た。共振器には全正常分散型モード同期共振器を用いており、繰り返し周波数20MHz、パルス幅40ps、中心波長1030nm、スペクトル幅9.6nmのパルスが安定に出力されている。また、分割/結合器には薄膜偏光子を用いた。メインアンプにはイッテルビウム添加PMファイバー(長さ:1m、コア径:10 μ m、クラッド径:125 μ m、NA:0.075)を用いた。また、シグナル光が通るファイバーには全てPMファイバーが用いられている。このPMファイバーに適切な偏光角度で入射するように、メインアンプの前の1/2波長板で調整した。励起光源には、中心波長975nmの

LDを用いた。

分割したパルスを正確に結合させるには分割器と結合器で遅延路の長さを一致させる必要がある。そこで結合パルスの一部をウェッジによって取り出し、Digilockによりフィードバックをかけた。また、結合器のミラーの1つに piezo素子を用いた。これにより結合器の遅延路長を制御することができる。

3.2 パルスの増幅

まず、プリアンプを300mWで励起した。その時の平均パワーを測定した。また、プリアンプで増幅後のスペクトルをスペクトルアナライザーにて観測した。

次に、分割器でパルスを2つに分割し、メインアンプで1.2Wから6.0Wの間で励起した。励起された2つのパルスの平均パワーおよびスペクトルを測定した。また、再結合器で結合されたパルスに関しても同様に平均パワーを測定した。さらに、分割器および再結合器の波長板の調整により分割しない状態での増幅も測定した。出力パルスについて、FROGを用いて再構築を行った。

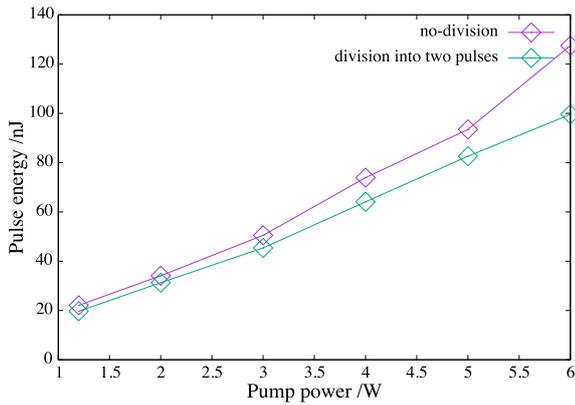


図4 出力パルスエネルギー

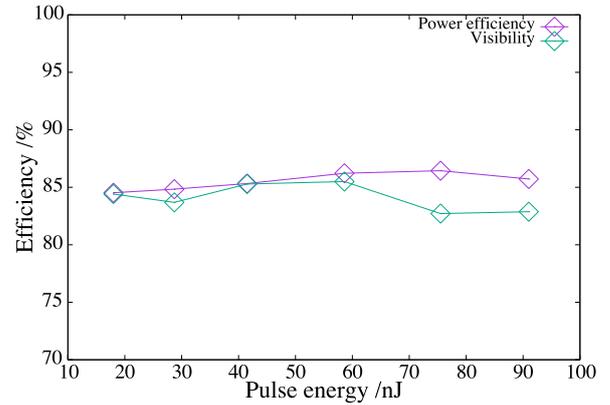


図5 結合効率

3.3 ポツケルスセルによる低繰り返し周波数化

実験系にポツケルスセルを追加した。

全正常分散型共振器より繰り返し周波数 20MHz で出力されたパルスを、ポツケルスセルでその 1/50 をピックアップすることで繰り返し周波数を 400kHz にまで下げた。パルスのピックアップは、フォトダイオードにより検出された共振器出力パルス 50 個に対し 1 個のパルスがポツケルスセルを通過する際に電圧を印加し、偏光を回転させ、偏光ビームスプリッタ (PBS) を透過させることで行われる。

繰り返し周波数 400kHz における動作についても、分割パルス増幅による出力パワー、結合効率、スペクトルの測定を行った。また、波長板の調整により非分割増幅における測定も行った。

4 結果と考察

4.1 パルスの増幅と結合効率

プリアンプより出力されたパルス (パルスエネルギー 7.22nJ, 繰り返し周波数 20MHz) のパルスを励起強度を 1.2W から 6.0W まで変えて分割増幅した。また、同じ励起強度で非分割増幅した場合の出力も測定した。出力パルスエネルギーを図 4 に示した。分割増幅した場合、6.0W 励起で 99.6nJ の結合パルスが出力された。非分割増幅した場合の方が高い出力が得られたが、これは分割/結合器のアライメントが不正確であったことや、ファイバーへの分割パルスのカップリングの精度が高くなかったためだと考えられる。

パワー効率および可視度はどちらも 85% 程度で一定となった。

4.2 ポツケルスセルによる低繰り返し周波数化

ポツケルスセルを用いて繰り返し周波数を 20MHz から 400kHz に下げ、オシロスコープにてこれを確認した。繰り返し周波数低下に伴い、同じ励起強度のプリアンプ

後の出力は 7.22nJ から 83.5 となった。繰り返し周波数 400kHz 動作においても、同様に励起強度を 1.2W から 6.0W まで変えて分割増幅および非分割増幅を行った。

繰り返し周波数 400kHz における分割パルス増幅で、出力パルスエネルギーは最大で 3.0μJ であった。結合効率については、出力パルスエネルギーが低い場合 (図 5) に比べて効率の低下が顕著であった。励起強度が 4.0W を超えるとパルス強度が不安定となり、可視度の測定は不可能であった。これに伴い、フィードバックによる遅延路長のロックも困難となり、パワー加算効率も低下したと考えられる。パワー加算効率は出力パルスエネルギーが 0.7μJ の時 82.8% であったが、3.0μJ の時には 62.0% まで低下した。6.0W 励起時の出力パルスをオシロスコープにて観測したが、動作が不安定で遅延路長にロックをかけられなかったことから出力パルスは時間的に大きく変化していた。

次に非分割増幅では 6.0W の励起での出力はパルスエネルギー 2.4μJ であった。

図 6 に 6.0W 励起における分割増幅および非分割増幅時の出力スペクトルを示した。

分割増幅において自己位相変調によるスペクトル広がりが見られたが、非分割増幅においてはこれがさらに顕著になった。また、長波長側のラマン散乱によって大きくスペクトルが広がった。分割増幅によって増幅前のピークパワーを抑えることで非線形効果を軽減できることがわかった。

4.3 飽和エネルギーの検討

ファイバー増幅における飽和エネルギーは

$$E_{sat} = \frac{h\nu}{\sigma_a + \sigma_e} A_{eff} = 28.63 \mu\text{J} \quad (1)$$

である。ここで h はプランク定数、 ν は周波数、 A_{eff} は有効コア断面積である。 σ_a, σ_e はそれぞれ誘導吸収断面積、誘導放出断面積である。

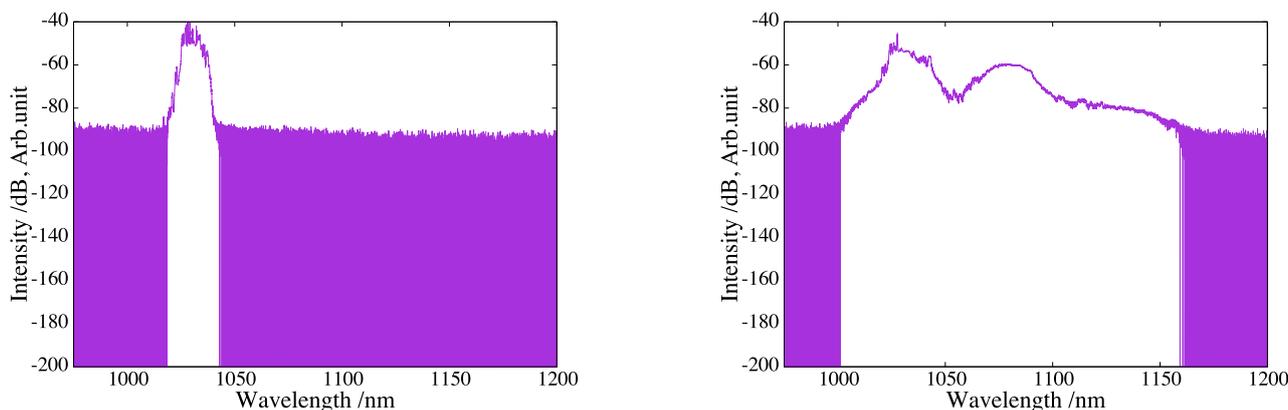


図6 6.0W 励起時出力スペクトル. (左) 分割増幅, パルスエネルギー 3.0 μ J(右) 非分割増幅, パルスエネルギー 2.4 μ J

繰り返し周波数 20MHz の動作においては, 図4から2分割し増幅した結果得られた結合パルスは6.0W 励起で99.6nJであった. 分割せず増幅した場合でも6.0W 励起で127.5nJであった. このことから, 本実験で得られたパルスエネルギーは飽和エネルギーよりも十分に小さく, 非飽和状態で増幅が行われた. 非飽和増幅であったため, 図5に示したように結合効率はほぼ一定の値をとったと考えられる.

一方, 繰り返し周波数 400kHz の動作においては分割増幅で3.0 μ J, 非分割増幅で2.4 μ Jの出力を得た. どちらも飽和エネルギーに達していないが高いピークパワー故に非線形効果の影響が増大し, 結合効率には大きな低下が見られた.

5 まとめ

本研究では, ファイバーレーザー増幅における高エネルギー超短パルス化を目的としてチャープパルス増幅(CPA)および分割パルス増幅(DPA)を用いた. 全正常分散型モード同期共振器によって40ps程度まで延伸されたパルスを偏光によって分割, 再結合を行った.

繰り返し周波数 20MHz の動作では, 結合効率は85%程度を保ったまま増幅することができ, 最大で99.6nJの結合パルスが出力された. しかし, 繰り返し周波数を400kHzにまで低下させると, ピークパワーの増加に伴い非線形効果が顕著に現れた. プリアンプ後の時点で自己位相変調によるスペクトル広がりが見られ, メインアンプの増幅でこれがさらに増大した. 分割増幅での結合効率は大きく低下した. また, 自己位相変調が見られたが, 非分割増幅ではさらに顕著な自己位相変調とラマン散乱が確認された. したがって, 分割増幅によって非線形効果を軽減できることがわかった.

6 今後の課題

6.1 今後の課題

繰り返し周波数 20MHz 動作においては, 非飽和増幅であり, 非線形効果もあまり目立たなかったが, 分割パルス増幅時の結合効率はパワー加算効率および可視度共に85%程度であった. 結合効率を向上させるため, 分割器および結合器のアライメントの精度を上げる必要がある.

また, 繰り返し周波数を20MHzから400kHzに低下させるとパルスのピークパワーが高くなり, 非線形効果による影響が顕著に現れ, 結合効率は一層低下してしまった. 非線形効果を抑制し, より高い結合効率および圧縮可能なパルスを得るためにはよりピークパワーを抑える必要がある. 1つの手段としては, 分割数を増やすことで達成できる. もう1つの手段としては, さらにパルスを延伸することが課題である. 本研究では, 全正常分散型共振器より出力された40psのパルスを増幅していた. 1ns秒程度までパルスを延伸すれば, 原理上25倍のピークパワーが見込める. 出力パルスを圧縮することによってさらなる高エネルギー超短パルス化を図る.

参考文献

- [1] Toshiki Tajima and John M Dawson. Laser electron accelerator. *Physical Review Letters*, Vol. 43, No. 4, p. 267, 1979.
- [2] Donna Strickland and Gerard Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses. *Optics Communications*, Vol. 56, No. 3, pp. 219–221, 1985.
- [3] Shian Zhou, Frank W Wise, and Dimitre G Ouzounov. Divided-pulse amplification of ultrashort pulses. *Optics Letters*, Vol. 32, No. 7, pp. 871–873, 2007.
- [4] 住村和彦, 西浦匡則. 解説ファイバーレーザー: 基礎編. オプトロニクス社, 2011.