

# 分割パルスファイバー増幅を用いて高エネルギー超短パルスの発生

基盤理工専攻 白川 晃 研究室 徐睿(XU RUI)

## 1. 序論

レーザー光が登場したのは1960年のことである。当時のレーザー光は波長範囲が限られ、出力エネルギーも小さく、その上装置も大型で、実用的な技術ではなかった。しかし半世紀後の今日では、レーザー光が多種多様になり、高出力化も進み、大変身近なものとなった。

レーザーは媒体によっていくつかの種類に分けられる。固体レーザー、液体レーザー、気体レーザー、半導体レーザー、自由電子レーザーなどである。それらの技術に伴い、レーザーの応用分野も、情報・通信(DVD、光ファイバー)、医療(レーザーメス)、加工(レーザー加工機)、科学(計測、核融合)などへ広がっている。応用の上で、われわれはレーザーの高エネルギー化研究に注目した。

ただし、レーザーの高エネルギー化を実現するのは簡単ではない。レーザーを増幅する際、非常に大きい熱を生じるため、冷却性が優れた増幅媒質を要求される。ファイバーの表面積と体積の比が非常に大きいので、放熱性が優れている。また、ファイバーがシリカガラスで作られるので、光を伝搬する際損失が低い。それに、ファイバーはレーザーの通り道である導波路であるので、横モードを制御でき、相互作用長が長く、高ビーム品質、高利得の特徴を持っている。ファイバー自体軽くて、曲げることができるため、装置の軽量化が可能であり、全体をコンパクトにすることができる。以上より、ファイバーが低損失、高利得、高ビーム品質、コンパクトの特徴を持っている。しかしコア径が小さいために、光増幅器の

出力を大きくしすぎると、誘導ラマン散乱や誘導ブリュアン散乱などの非線形効果により信号波形劣化が発生する。また、高いピークパワーを持つパルスを増幅するとき、利得媒質内の伝搬により非線形位相シフトを生じ、スペクトルの広帯域化やパルスの歪み、増幅器内の光損傷も引き起こす。これらの非線形光学効果の抑制については、これまで多くの研究がなされている。例えば、CPA(チャープパルス増幅)という技術がよく使われてきた。その他、ごく最近 DPA(divided pulse amplification)という、「分割パルス増幅」の技術が提案された。DPAがパルスを分割することで、パルスのピークパワーを低下させ、非線形光学効果を抑制する。分割されたパルスが増幅器で増幅され、その後結合器で結合する。最終的に、一つの高エネルギーのパルスが得られる。本研究では、「分割パルスファイバー増幅による超短パルスの高エネルギー化」を目指している。

## 2. 原理

### 2.1 分割パルスファイバー増幅器(DPA)

パルスのピークパワーが高くなると、非線形位相シフトが大きくなるため、パルスはスペクトル的に、時間的に崩れてしまいパルスの伝搬はとて不安定になる。この現象を避けるため、いろいろな技術が開発された。一番使われているのは、チャープパルス増幅(CPA)である。CPAは波長分散を利用し、パルスをチャープさせてパルス幅を拡げる。チャープパルスがそのまま増幅され、元のパルスに戻るよう圧縮される。これらの操作により、パルスが増幅媒質を通る際、ピークパ

パワーを抑えられる。それで、増幅媒質の非線形効果の抑制ができ、よりパルス増幅の高エネルギー化を実現できる。

超短パルス増幅における非線形効果を避ける新しい手法として、分割パルス増幅(DPA)という技術が提案された。分割パルス増幅の概念図を図1で示す。まず、一つのパルスが分割器へ入射され、N個のコピーパルスになる。この分割操作によって、パルスのピークパワーを低くして増幅媒質へ入射する。分割パルスは増幅媒質で増幅されて、結合器に入射する。結合器は分割器の逆の仕組みを持ち、分割パルスが結合され、一つの高エネルギーを持つパルスになる。

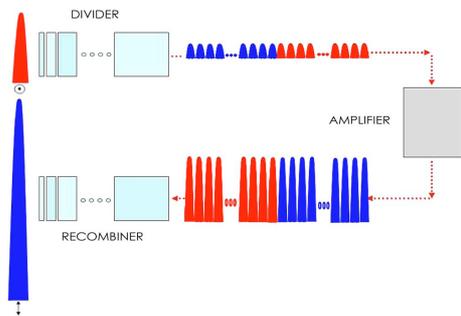


図1、分割パルス増幅の概念図

Zhou, Shian, et al, "Divided-pulse amplification of ultrashort pulses,"

Optics Letters 32,7 (2007): 871-873.

分割器(結合器)がパルスを分割(再結合)する最も簡単な方法は、複屈折をもつ結晶を使うことである。複屈折結晶によるパルス分割の概念図を、図2に示す。複屈折率を持つ結晶は、直交した正常軸と異常軸を持つ。正常軸と異常軸の方向で屈折率が異なるので、二つの軸方向で光を伝搬する速度が異なる、このため、パルスを分割することができる。例として、光が結晶軸との間に45°角があるとき、図2で示すように、一つのパルスが同じ強度の正常波oと異常波eに分割される。結晶の長さL、群速度が $v_o$ 、 $v_e$ すると、o波とe波が結晶を通過後に、時間軸上で時間差を生じ、分けられることになる。その時間差は、

式1で示す。

$$\Delta t = \left| \frac{L}{v_o} - \frac{L}{v_e} \right| \quad \text{式1}$$

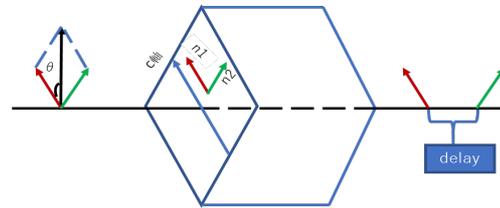


図2、複屈折結晶によるパルス分割概念図

## 2.2 光ファイバーにおける非線形光学効果

高強度の電磁場の中における媒質は、光との相互作用が非線形性を示す。石英である光ファイバーは本質的に非線形性が小さい媒質である。しかし、光ファイバーは極めて狭い空間にレーザー光を閉じ込めるため、単位面積当たりのパワー密度が高くなり、さらに、媒質と光の相互作用長さが長いので、非線形性がどんどん貯めて、様々な非線形性光学効果が顕著に現れる。電界強度が高いときには誘電分極Pは電場の関係が線形じゃなくなる(式2)。

$$\mathbf{P} = \epsilon_0(\chi^1 \mathbf{E} + \chi^2 \mathbf{E}^2 + \chi^3 \mathbf{E}^3 + \dots) \quad \text{式2}$$

式2の様に高次の分極が無視できなくなる。 $\epsilon_0$ は真空の誘電率、 $\chi^{(j)}$ は第j次感受率、Eは電場である。2次感受率の値が非対称の分子構造を持つ媒質だけに対して0ではない。光ファイバー(SiO<sub>2</sub>)は対称的な分子構造ゆえ、2次感受率による第2高調波と和周波などの2次の非線形光学効果を示さない。光ファイバーにおける非線形光学効果が主に3次感受率により引き起こされる。3次の感受率は第3高調波発生、四光波混合、非線形屈折率変化、非線形散乱などの現象の原因となる。ただし、位相整合が前提となる第3次高調波と四光波混合の発生が難しいので、光ファイバーで起こる非線形光学効果の大部分は非線形屈折率変化及び非線形散乱である。

非線形屈折率変化は、媒質の屈折率が光強度に依存することである。一番シンプルな形で、屈折率が式3に示せる。

$$n(\omega, I) = n(\omega) + n_2 I + n_{23} |E|^2 \quad \text{式3}$$

$n(\omega)$ は線形屈折率、 $I$ が光強度、 $n_{23}$ は3次感受率に係わる非線形屈折率係数。屈折率が光強度依存性を持つことが、多種多様な非線形光学効果が表れた。この中に、たくさん研究されているのが、自分自身の光強度により位相がシフトする自己位相変調(SPM: Self Phase Modulation)、別の光強度により位相がシフトする相互位相変調(XPM: Cross Phase Modulation)などがある。光パルスがファイバー中を伝搬される際、自己位相変調により新しい周波数成分を生成し、パルスのスペクトルが広がる効果がある。その広がる程度が光強度に依存する。相互位相変調は、媒質中のビームとの相互作用に起因する光の位相変調のことである。

非線形散乱は、ファイバー中の光強度が閾値を超えると発生する散乱である。電磁場と媒質の間にエネルギー交換が発生し、誘導非弾力性散乱である。光ファイバー中が主に二つの重要な非線形効果が誘導非弾力性散乱であり、二つとも石英の振動モードに係わり、誘導ラマン散乱(SRS: Stimulated Raman Scattering)と誘導ブリルアン散乱(SBS: Stimulated Brillouin Scattering)となる。誘導ラマン散乱は、入射光のエネルギーの大部分がストークス光と呼ばれる低い周波数をもつ成分に移転する現象である。この入射光とストークス周波数差はラマンシフトまたはストークスシフトと呼ばれる。ラマン利得はポンプ光の偏波状態と信号光の偏波状態の相互関係に強く依存する。ストークス波の生成は簡単に式4で示せる。

$$\frac{dI_s}{dz} = g_R I_p I_s \quad \text{式4}$$

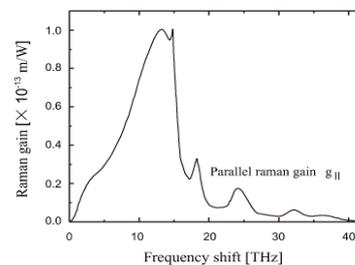
$I_s$ はストークス光強度、 $I_p$ はポンプ光強度、 $g_R$

ラマンゲインである。式4は誘導ブリルアン散乱にも成り立つ。ファイバーに対して、ラマンゲインが実験で測定することができる。光ファイバー中のラマンゲインが非常に広くて、13THz にあたりに広いピークを持ち、40THz と広い周波数領域まで連続的に分布している(図3)。

図3、光ファイバーのラマン利得スペクトル

## 2.3 ポッケルスセル

ポッケルス効果によって作られたポッケルス



セル(Pockels cell)は、電気光学変調のために一般的に使用されている装置である。ポッケルス効果は、誘電体の等方性結晶において印加電圧をかけると複屈折性を示す現象である。その時、印加電圧に比例して屈折率が変化するのがポッケルス効果である。ポッケルスセルの仕組みが、印加された電場によって非中心対称結晶材料の屈折率の線形変化が生じることで、入射する光ビームの偏光状態を変えられる。印加電圧の方向により、ポッケルスセルが縦配置と横配置の二つの基本形がある(図4)。縦配置では結晶に印加する電場の方向に光が伝搬する。光を通すために、材料の両端面に使用波長に対し透明な電極をつけるか、光の通過部分だけピンホールをあけた電極を用いる。一方、横配置では電場の方向と直角に光を通す。

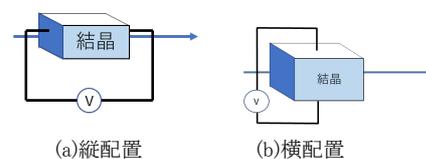


図4、ポッケルスセル基本形

印加電圧方向の結晶の厚さを $d$ とすると、電圧 $V$ とすると、電場 $E=V/d$ となる。光の伝搬方向の結晶の長さを $L$ とする。縦配置の場合は、 $L=d$ となる。屈折率の変化量 $\Delta n$ が式5で示す。

$$\Delta n = \pm \frac{1}{2} n^3 r_{\text{eff}} E \quad \text{式5}$$

ここで $n$ が屈折率、 $r_{\text{eff}}$ は有効ポッケルス係数で、結晶のポッケルス係数、電場の方向、光の伝搬方向と偏光に依存する。この結晶に線偏光を入射するときの位相変化 $\Delta \phi$ は式6で示す。

$$\Delta \phi = \frac{\pi n^3 r_{\text{eff}} V L}{\lambda d} \quad \text{式6}$$

特に配置には  $L=d$ なので、位相変化は結晶の大きさに依存せず電圧だけで決まる。

ポッケルスセルを波長板として用いるときは、直行する二つの直線偏光の屈折率差を利用する。この差による二つの偏光の間に位相遅れが発生する。この位相遅れが $\tau$ は、

$$\tau = \tau_0 + \frac{\pi(n_1^3 r_{\text{eff}} - n_2^3 r_{\text{eff}}) V L}{\lambda d} \quad \text{式7}$$

で与えられる。 $\tau_0$ は電圧かけないときの自然屈折率による位相遅れである。 $\pi$ の位相遅れを得るのに必要な電圧 $V_\pi$ を半波長電圧(half-wave voltage)といい、ポッケルス効果の大きさを評価する指標となっている。縦配置は  $L=d$ なので、波長と材料の特性だけで決められる。横配置の場合は、材料の形状に影響を与えられる。厚さ $d$ が小さくなるまた長さ $L$ が大きくなると、結晶に作用する電場が大きくなり、ポッケルス効果が大きくなり、半波長電圧を下げる。

### 3. 実験

研究で用いたパルス分割器(また結合器)は、

図5で示す。パルスはまず半波長板(HWP)を通過し、45度の入射角を持ち、薄膜ポラライザ(TFP)へ入射して分離されて、P偏光とS偏光になる。P偏光はそのまま通り抜けていくが、S偏光は反射される。反射されたS偏光は1/4波長板(QWP)を一回通過し、ミラーより反射されてもう一回QWPを通過する。ところで、S偏光がQWPを二回通過するので、S偏光からP偏光になり、TFPを通り抜ける。ミラーの間の距離を $L$ としたとき、この二つのパルスは光路差分の時間差、

$$\Delta t = 2L/c \quad \text{式8}$$

である。ここで、早いパルスが1stパルスとして、遅いパルスが2ndパルスとする。

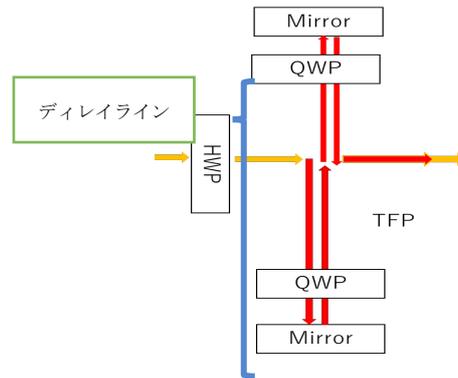


図5、パルス分割器(また結合器)

黄色矢印と、赤色の矢印はそれぞれ分割したパルスのそれぞれを表している。TFPを透過したパルスを黄色で1stパルス、反射したパルスを赤色で2ndパルスである。

分割されたパルスをそのまま利得光ファイバーで増幅する。その後、増幅された分割パルスを結合器で結合させる。

分割されたパルスの結合において、分割する際と結合する際に二つのパルスに同じ時間遅れがあるのが重要である。出力パルスの結合効率を測定また最大化するため、デジタルロックによるサーボシステムとデジタルロックを用いた(図6)。

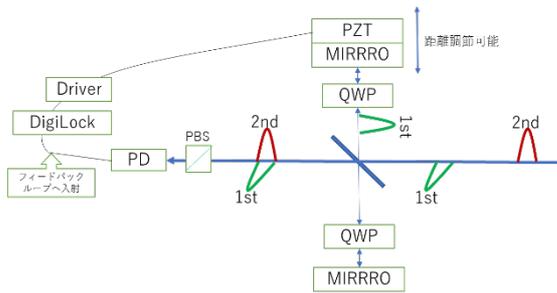


図6、結合効率の測定

大きな圧電特性を持つ PZT(チタン酸ジルコン酸鉛)をミラーにつけ、PZTにサイン波の電圧を印加することでミラーの位置を振動させる。これらの動作によって、フォトダイオードよりビジビリティを読み出せる。結合効率を評価するため、空間的波面情報を含めない FROG とパワーより計算した加算効率の測定も行った。

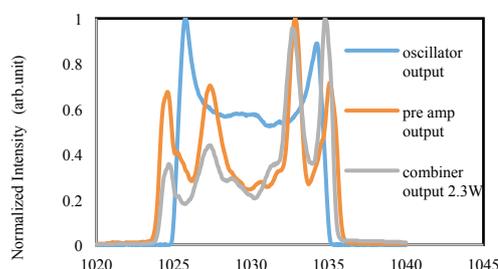
## 4. 実験結果

### 4.1 低繰り返し周波数

卒業研究時、20MHz の動作では非飽和増幅であることを確認した。パルスエネルギーを向上するため、ポッケルスセルを用いて繰り返し周波数を低下した。発振器からの 100 個のパルス中、1個のパルスをピックアップして偏光回転することで、ピックアップパルスとオリジナルパルスの比が 1:99 となる。原理上繰り返し周波数を 1/100 に低下できる。これにより繰り返し周波数を 20 MHzから 200 kHz まで低下させた。

### 4.2 低繰り返し周波数における実験結果

各段階の出力スペクトルを測定した。図7に示す。プリアンプの出力スペクトルに発生した新たなピークは、自己位相変調によると考えられる。メインアンプの出力スペクトルにも自己位相変調を



観察した。

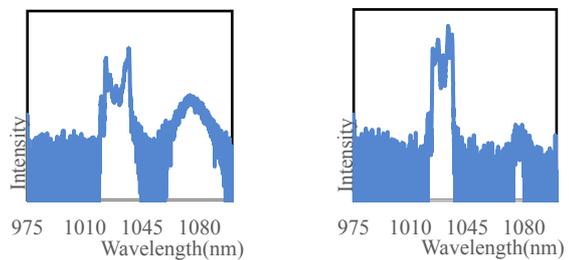
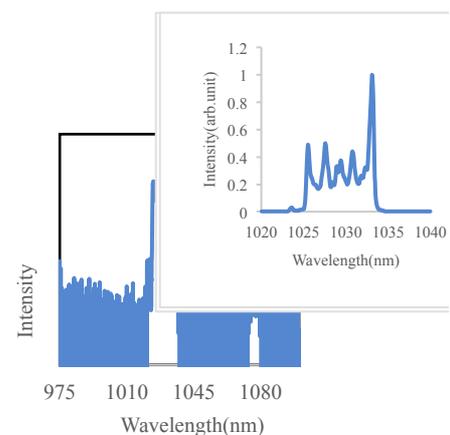


図7、各段階の出力スペクトル



DPA 無しの場合と有りの場合のメインアンプ出力のスペクトルを図8に示す。DPA 無しでは長波長側に顕著な誘導ラマン散乱が現れるが、DPA により非線が抑制されていることが確認できた。ただ DPA 有りの場合でも、パルスエネルギーの増加に伴い誘導ラマン散乱を回避することが難しくなるので、メインアンプの前にバンドパスフィルタを用いた。

(a)DPA 無し (b)DPA 有り

図8、パルス分割実験結果

本 DPA システムの結合効率を評価するため、結合したパルスのビジビリティ、パワー、及び分割パルスの周波数分解光ゲート法(FROG)の 3 つの方法で率の測定を行った。図9に示す。ポンプパワーの増加に伴い、ビジビリティとパワー加算効率が低下することが確認できた。

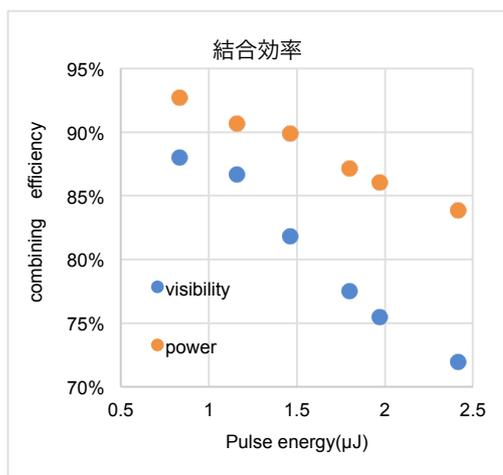


図 9、結合効率

スペクトルアナライザより測定した結合パルスのスペクトルと FROG より再構築したパルスのスペクトルが図 10 で示す。また、分割パルスの位相情報より結合効率を計算した、約 83% だった。FROG で計算した効率がビジビリティとパワー結合効率よりだいぶ低いのをわかりました。また、OSA で測定したスペクトルとの相違が無視できない程度です。パルス間の位相差を計算したところで、約  $5\pi$  なので、自己位相変調が顕著に表し、FROG の再構築が困難になった理由の一つと考えられます。

図 10、FROG より再構築結合パルス

## 5. まとめと展望

繰り返し周波数を 20 MHz から 200 kHz まで低下させることで、増幅後(励起パワー 2.3 W)パルスのエネルギーを 57.5 nJ から 0.83 μJ まで向上した。プリアンプに自己位相変調効果が観察され、メインアンプの励起パワーの増加に伴い、顕著になることが確認できた。励起パワー 2.82 W を超えると、ラマン散乱が観測された。

DPA システムの結合を評価するため、ビジビリティとパワー加算効率及び FROG より結合効率の測定を行った。結果として、出力エネルギーの増加に伴い、ビジビリティとパワー加算効率の低下が確認できた。また、低繰り返し周波数の場合、非線形光学効果の影響で、FROG による結合パルスの再構築と結合効率の計算が困難になる。非線形効果による位相の不一致が発現しうる高エネルギー状態の結合効率を FROG で評価したいので、FROG の改良がこれからの展望となる。