

体積回折格子によるフェムト秒パルス波形の記録と再生

電子工学科 西岡研究室 富田仁

1. 序論

フェムト秒パルスは帯域幅が広いので、群遅延分散により容易にパルスが広がってしまう。パルス広がりには群遅延分散を補償することにより再圧縮することができるが、複雑な群遅延分散の補償は一般に困難である。

そこで、光プログラマブルなフーリエ位相制御を行うために非線形効果を利用してフーリエ位相を記録した回折格子を作成し、それを利用して時間反転パルス、すなわちフーリエ位相共役波を生成することにより群遅延分散の制御を目指した。

2. スペクトル多重ホログラム

スペクトル多重記録ホログラムの原理は図1に示すように基準波と信号波の干渉により2光子吸収媒質に信号波の時間情報を回折格子として書き込み、図2(a)に示すようにその回折格子に基準波を照射することにより信号波の時間波形を再現するというものである。

図2(b)に示すように回折格子もしくは基準波の方向を空間的に反転することにより、フーリエ位相構造が時間的に反転した再生パルス、すなわちフーリエ位相共役波を発生させることもできる。これは、参照波が信号波となる遅延分散を補償していることと同義で、逆に図2(c)に示すようにチャープパルスの圧縮も可能である。

透過型体積回折格子はブラッグ条件によりひとつの方向のみに回折光が集中するので、屈折率変化及び回折格子の厚さを適切に設計すれば100%の回折効率を得ることができる。

透過型体積回折格子を利用したスペクトル多重ホログラムでは、空間に記録されたフーリエ位相情報はひとつの方向に回折されるため、パルス波形は遠視野で再現される。

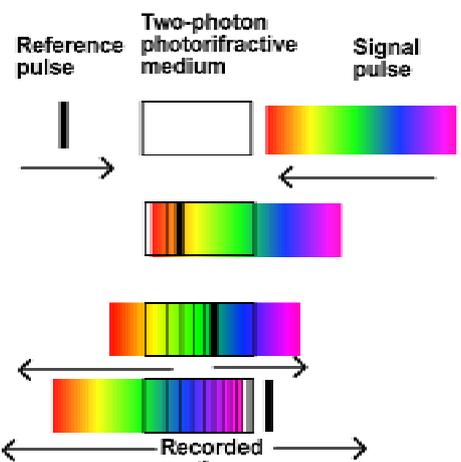


図1 スペクトル多重ホログラムによるパルス波形記録の様子。参照パルスと重なった際に信号波の瞬時周波数に見合った回折格子が刻まれる。

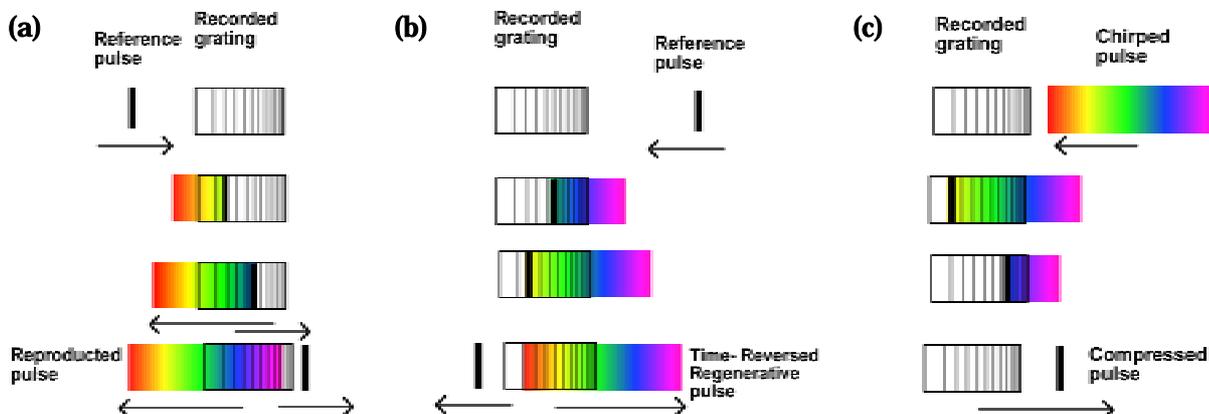


図2 周波数多重ホログラムによる(a)パルスの時間波形の再生、(b)パルスの時間波形反転再生、(c)チャープパルス圧縮の様子。

3. 透過型体積回折格子の書き込み

回折格子の書き込みにあたってはモードロックチタンサファイアレーザーシステム（尖頭出力 240 GW/cm²、パルス幅 120 fs、中心波長 798 nm）を光源として用いた。

まず、透過型体積回折格子を構成するための基本的なパラメータとして感光による屈折率変化及び吸収スペクトル変化を測定した。図 3 (a)に示すようなマッハツェンダー干渉計の位相シフトにより屈折率変化を求めた結果、屈折率変化は図 3 (b)に示すように最大 5×10^{-5} 程度となり、計算上得られる回折効率は 9 % となった。ただし、回折格子間隔 8.6 μm、入射角 5.33° の透過型回折格子とした。

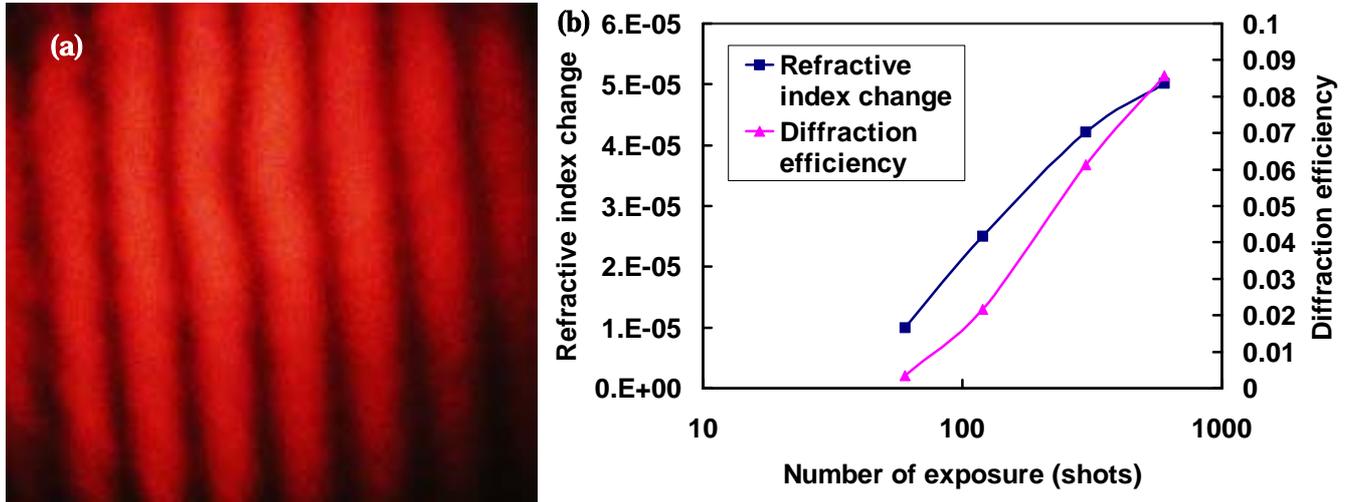


図 3 (a)観測された位相シフト例。(b)露光回数による屈折率変化と得られる回折効率。

図 4 に示すように光源をハーフミラーで分け、その片方を基準波、もう片方の GTI (Gires – Tournois interferometers) 反射波を信号波として二光子吸収によるフォトリフラクティブ媒質に透過型体積回折格子を書きこんだ。GTI は 100%鏡とビームスプリッターを平行に設置したもので、干渉効果により強い位相変調と強度変調を与える素子で、パルス幅が鏡の間隔を光が進む時間と同程度のときはパルスを分割する素子である。今回は鏡とハーフミラーを 25 μm 程度の間隔で平行に設置し、43° で入射させた。

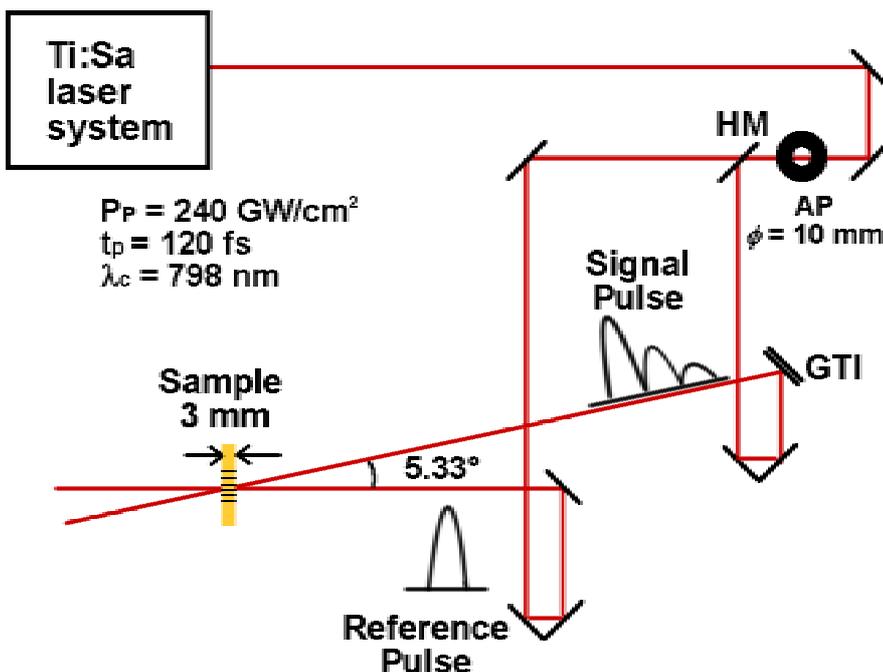


図 4 GTI 反射波形書き込みの概略図。

4. 回折波の測定

回折格子の様子を時間的に解析するために回折波の時間波形を測定した。基本波及び2光子吸収媒質を透過してきたパルスをフリンジ分解自己相関法で測定したところ、2光子吸収媒質によりパルス幅は3.5 fs広がった。再生波及びGTI反射波の時間波形はそれぞれ図5(a)、(b)のようになった。これらの比較すると、パルス列間隔は310 fsで一致していることがわかった。

また、図6に示す再生パルスのSHG-FROG(Second Harmonic Generation Frequency Resolved Optical Gating)ではパルス列の4つ目まで確認することができた。ただし、今回利用した分光器では十分な波長分解能がなかったために詳しい解析を行うことはできなかった。

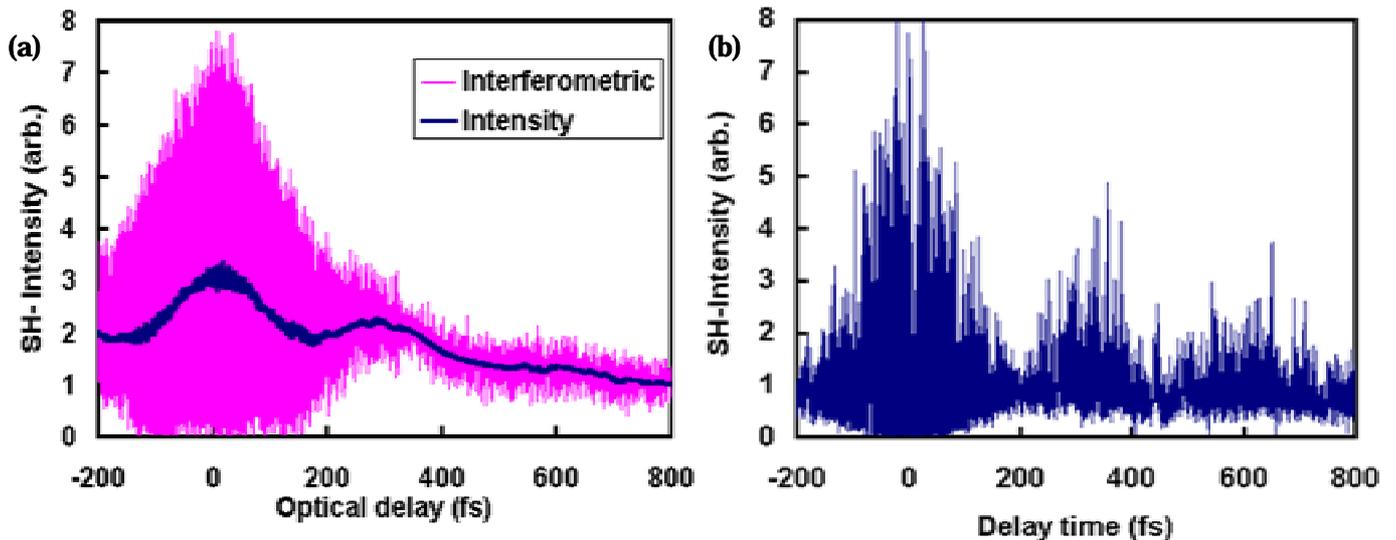


図5 (a)再生波及び(b)GTI反射波のフリンジ分解自己相関関数。パルス列の時間間隔は共に310 fs。

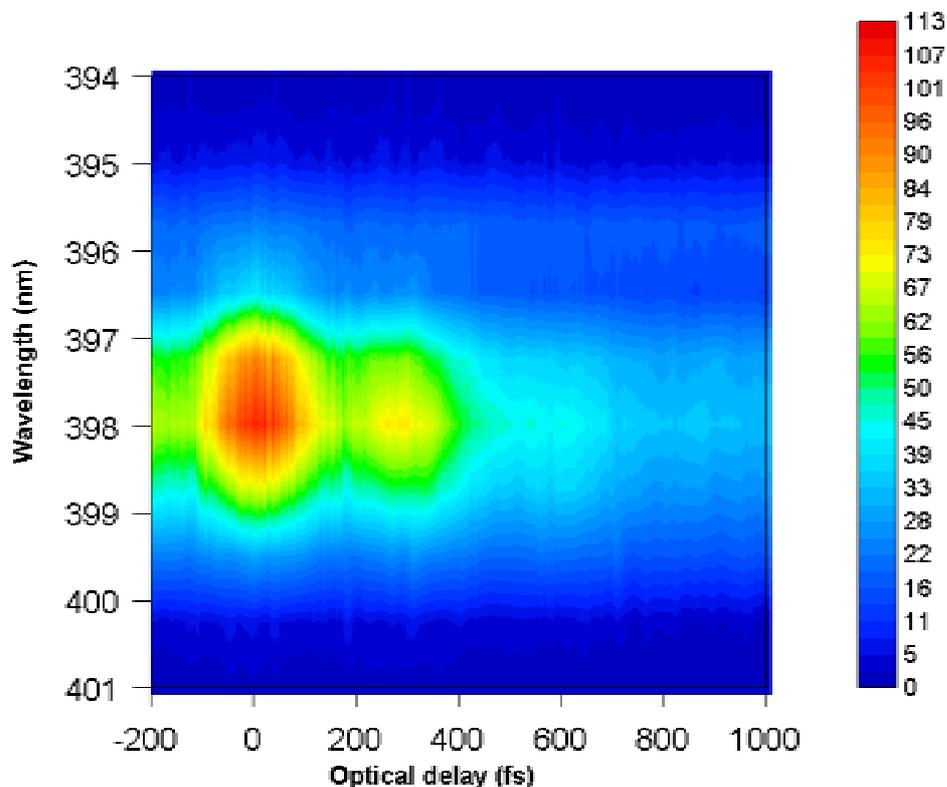


図6 再生波のSHG-FROG像。パルス列の時間間隔は310 fsである。

体積回折格子の回折波はブラッグ条件の束縛を受ける。回折格子の様子を空間的に解析するために回折光の角度・波長分布を測定し、それにより回折格子の回折格子間隔を求めた。その結果、回折格子は回折格子間隔が $8.60 \mu\text{m}$ 及び $8.54 \mu\text{m}$ の二つのピークがあることがわかった。これにより、二つの空間周波数の重畳記録として回折格子が書き込まれていることがわかった。

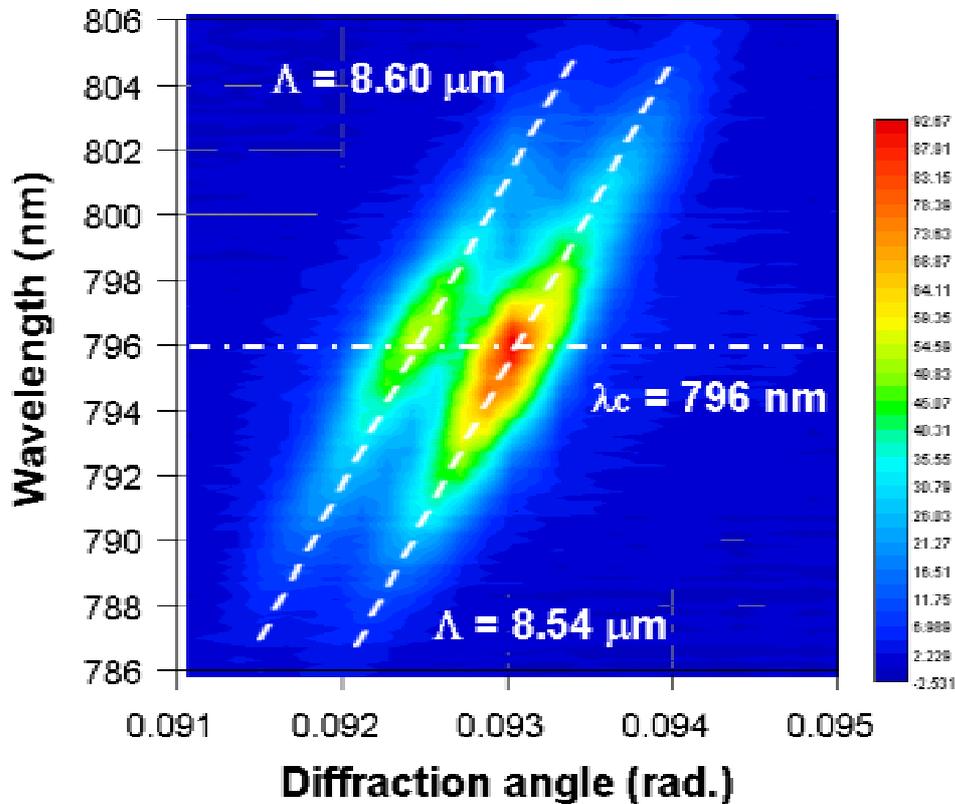


図7 回折波の角度・波長分布。

5. まとめ

フェムト秒パルス波形を2光子ゲート法により回折格子の空間周波数として記録した。また、再生されたパルスの時間間隔は書き込みパルスと一致した。さらに、空間領域のパルス列は主に二つの周期の異なる回折格子の重畳記録となっていることがわかった。これは回折波が減衰しながら等間隔で並ぶパルス列であることを示唆する。今回利用した2光子吸収媒質の屈折率変化は 5×10^{-5} 程度で、これは厚さ 3 mm 、回折格子間隔 $8 \mu\text{m}$ の透過型体積回折格子で計算上回折効率 9% を得ることができることになる。

6. 今後の展望

一般的に言われる角度多重ホログラムと同様に、フォトリフラクティブ媒質による十分な屈折率変化が得られていないのが現状である。しかし、よい材料さえ発見することができれば透過型体積回折格子は原理上 100% の回折効率を得られ、帯域分割をすることで1オクターブを超える群遅延分散の制御も可能である。ただし、超高光強度には向かないので増幅器を含むシステムでは群遅延分散の前置補償が有効であろう。

体積回折格子を利用した周波数多重ホログラムはグレーティング対、プリズム対、チャープ鏡等に代わる光プログラマブルで損失が少なく、大きな分散を与えることができる群遅延分散素子として期待できる。