

フェムト秒レーザ測定法としての自己参照型周波数干渉法の評価

Assessment of self-referenced spectral interferometry as a diagnostic of femtosecond laser pulses

藤井 令央 (B4)、吉清 健太(M2)

Leo Fujii, and Kenta Yoshikiyo

Abstract

We examine a femtosecond laser pulse characterization method of self-referenced interferometry (SRSI) by constructing a numerical model. This method is useful only when pulse width is sufficiently short with less dispersion.

1. はじめに

フェムト秒レーザパルスの時間波形の測定方法は、今日に至るまで様々な方法が考案されてきた。現在最も広く用いられているものは Frequency-Resolved Optical Gating (FROG) と Spectral Phase Interferometry for Direct Electric-field Reconstruction (SPIDER) であり、これら2つの波形測定方法ではフェムト秒レーザパルスの振幅および位相の両方の測定が可能である[1][2]。

しかし、FROG ではフェムト秒レーザパルスの時間波形を測定する際、繰り返し計算アルゴリズムを用いるため比較的長い時間がかかり、リアルタイムの計測は行えない。また、SPIDER は実験系が複雑であり、波形測定のためパルス間隔に関する予備実験が必要とするように手間が多い。さらに、この2つの測定法では測定可能なスペクトルの範囲に限界がある。

これらの問題を解決するフェムト秒レーザパルス波形測定法に近年報告された Self-Referenced Spectral Interferometry (SRSI) がある[3]。参照パルスが必要とする SI に対してこの方法では参照パルス

なしで計測が可能であり、測定パルスの波長帯域が各光学素子の透過帯域のみで制限されるため近赤外から中赤外領域まで幅広い波長帯域での測定が可能である。ただし、これまでの原理実証的な報告のほとんどが、FTL パルスに近いパルスのみであるため、本研究では、波長 800 nm 帯で非線形偏光回転をもちいた SRSI を構築し、測定パルスの分散特性をどの程度正確に測定できるかを検証した。

2. SRSI 測定法

Fig.1 に SRSI 測定系の概念図を示す。SRSI 測定系に入射した測定パルスは、偏光子によって直線偏光化され、さらに複屈折結晶を通過することで直交する2つの偏光成分に分けられる。このとき、2つのパルスには複屈折結晶の複屈折率に応じた時間遅延が付加する。この2つのパルスは非線形光学結晶に集光され、複屈折結晶の進相軸向きの偏光方向のパルスは結晶内で3次の非線形光学効果である直交偏光波 (Cross Polarized Wave: XPW) 発生を受けて、自身の偏光方向と直交する偏光を持つパルスが発生する[4]。SRSI では、この XPW が広帯域な短パルスとなり得ることから参照パルスとして、時間遅延を持つ測定パルスとの周波数領域における干渉パターンを測定する。

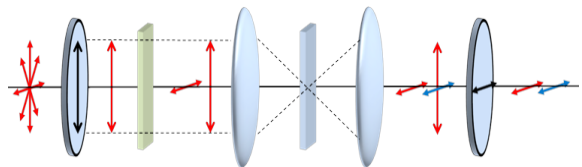


Fig.1 Schematic of a Self-Referenced Spectral interferometry

測定された干渉パターンは測定パルスと参照パルスの電界表現を用いて次のようにあらわされる。

$$S(\omega) = |E_{XPW}(\omega) + E(\omega)e^{i\omega\tau}|^2$$

$$= S_0(\omega) + f(\omega)e^{i\omega\tau} + f^*(\omega)e^{-i\omega\tau} \quad (1)$$

ここで、 τ は測定パルスと参照パルスの時間遅延であり、 $S_0(\omega)$ と $f(\omega)$ はそれぞれ次の式で表される。

$$S_0(\omega) = |E_{XPW}(\omega)|^2 + |E(\omega)|^2 \quad (2)$$

$$f(\omega) = E_{XPW}^*(\omega)E(\omega) \quad (3)$$

得られた干渉パターンは逆フーリエ変化によって次のように時間域表現される。

$$FT^{-1}[S](t) = E_{XPW}^*(-t) \otimes E_{XPW}(t) + E^*(-t) \otimes E(t)$$

$$+ f(t-\tau) + f^*(-t-\tau) \quad (4)$$

このとき、2つのパルスの時間遅延が十分に大きければ $f(t-\tau)$ だけをフィルタリングすることが可能であり、それをフーリエ変換して再度周波数領域に戻すことで $f(\omega)e^{i\omega\tau}$ を得る。ここで

$|E_{XPW}(\omega)| \geq |E(\omega)|$ が任意の周波数で成り立つとき

測定パルスの周波数強度は

$$|E(\omega)| = \frac{1}{2} \left(\sqrt{(S_0(\omega) + 2|f(\omega)|)} + \sqrt{(S_0(\omega) - 2|f(\omega)|)} \right) \quad (5)$$

で与えられる。さらに測定パルスの周波數位相は

$$\varphi(\omega) = \varphi_{XPW}(\omega) + \arg f(\omega) \quad (6)$$

で与えられるが、SRSIでは参照パルスの位相情報

$\varphi_{XPW}(\omega)$ が未知であるため、反復計算を行うことで測定パルスの正確な位相情報を得る。

反復計算では、暫定的に $\varphi_{XPW}(\omega) = 0$ と仮定して測定パルスの時間波形を構築し、得られた時間波形から参照パルスであるXPWの時間波形を次の式で求める。

$$E_{XPW}(t) = |E(t)|^2 E(t) \quad (7)$$

こうして求めた参照パルスの時間波形から周波數位相 $\varphi_{XPW}(\omega)$ を取得し、式(5)を再度計算することで新たに測定パルスの時間波形が計算される。同様の計算を繰り返すことで、測定パルスの時間波形は収束し、正確な測定パルスの情報が得られる。

3. 実験セットアップ

Fig.2 に実験セットアップを示す。

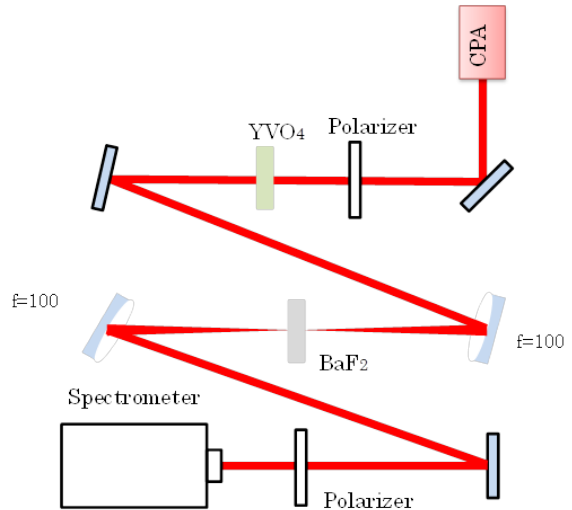


Fig.2 Experimental setup of SRSI

共振器から得られたフェムト秒レーザーパルスはチャープパルス増幅器(chirped pulse amplifier: CPA)

によって増幅される。CPA から出射されるフェムト秒レーザーパルス(中心波長 800 nm、繰り返し周波数 1 kHz、パルス幅 50 fs、平均出力 50 mW)は SRSI 測定系に入射し、厚さ 0.5 mm の YVO₄ 結晶内で 400 fs の遅延時間が付加され、f = 150 mm の凹面鏡で厚さ 0.5 mm の BaF₂ 結晶に集光される。分光器では測定光と BaF₂ 結晶内で発生した XPW の干渉パターンが測定される。

この時、式(1)~(7)で測定パルスの時間波形が再構築できるようにするため、任意の周波数で $|E_{XPW}(\omega)| \geq |E(\omega)|$ が成り立つように調整し、分光器で得られた干渉パターンを LabVIEW で作成した解析プログラムにかけて、測定パルスの時間波形を得た。

4. 実験結果

Fig.3,4 にフェムト秒レーザーパルスの測定結果を示す。本実験では SRSI での測定結果と FROG の測定結果を比較した。

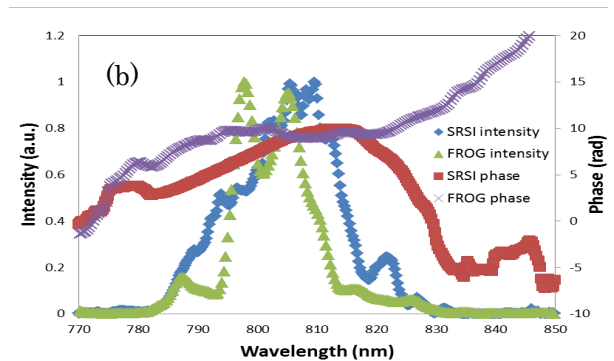
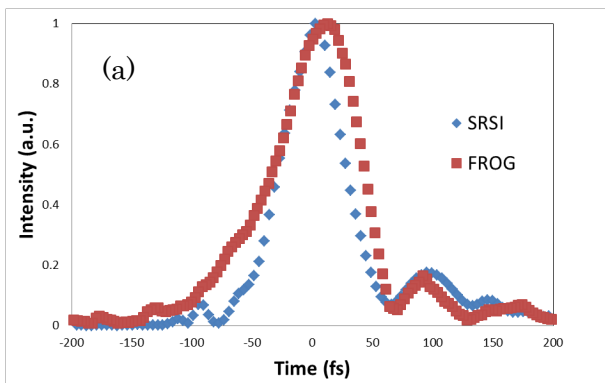


Fig.3 SRSI & FROG measurement of the FTL pulse (a)Time domein(b)Frequency domein

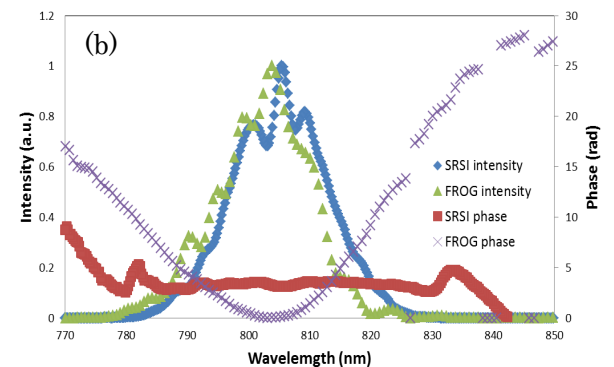
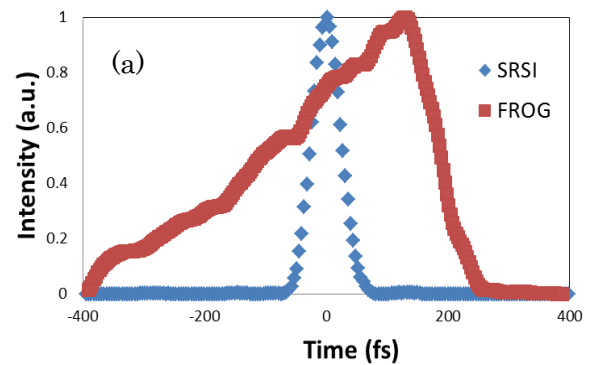


Fig4. SRSI & FROG measurement of the chirped pulse (a)Time domein(b)Frequency domein

Fig.3 をみると、SRSI と FROG の測定結果はほぼ一致し、測定パルスに分散が乗っていない状態であれば SRSI でフェムト秒レーザーパルスの測定が正確に行えたことを示している。

一方、Fig.4 をみると、測定パルスに大きく分散をかけた状態では SRSI と FROG の測定結果は一致しなかった。

5. 数値モデル解析

SRSI 測定系の特性を調査するために数値モデルプログラムを作成し、任意の波形における SRSI の測定結果を計算した。

仮想パルスプログラムでは、任意の周波数強度と周波數位相を与えることで、SRSI 測定系で得られる干渉パターンを計算し、解析プログラムによってもとの入力波形の再構築を行う。異なる分散値を与えた場合のプログラムの計算結果を Fig.5 ~ 7 に示す。この時、それぞれの仮想入力パルスのパルス幅は約 50 fs, 60 fs, 100 fs で、スペクトルは全て実験値と同じにし、そのスペクトル幅は 20 nm とした。また、任意の周波数で $|E_{XPW}(\omega)| \geq |E(\omega)|$ の関係を満たすように参照パルスと測定パルスのスペクトル強度比を設定した。

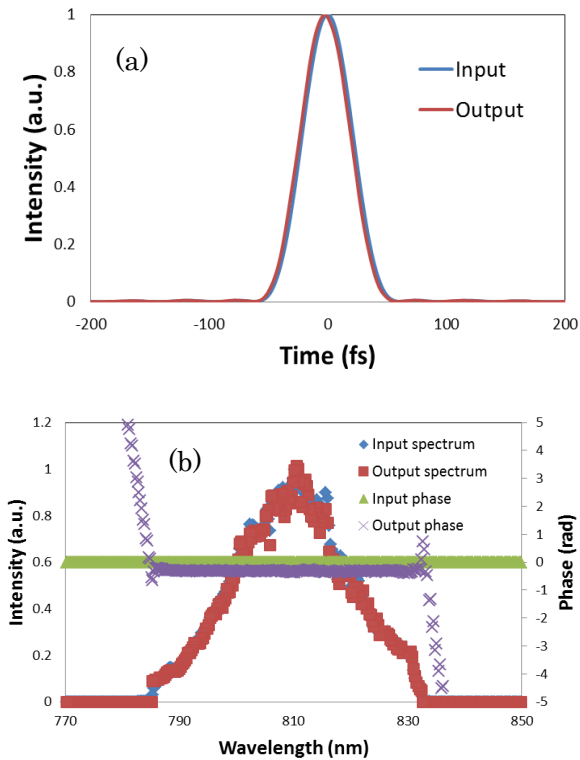


Fig.5 Analysis result of simulated FTL pulse (a) Time domain (b) Frequency domain

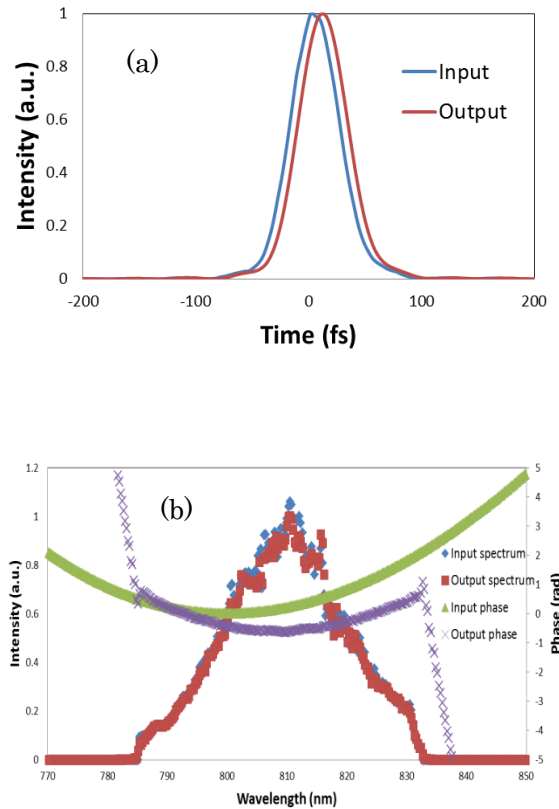
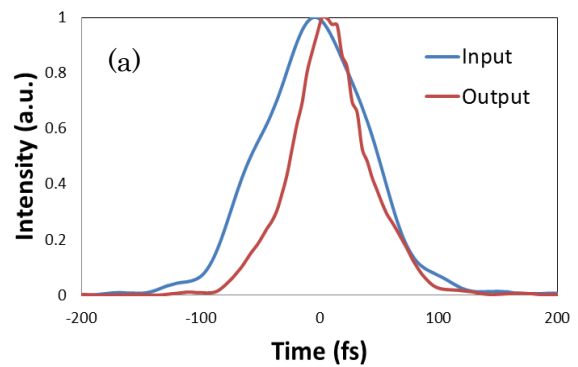


Fig.6. Analysis result of simulated chirped pulse (GDD=500 fs²). (a) Time domain (b) Frequency domain



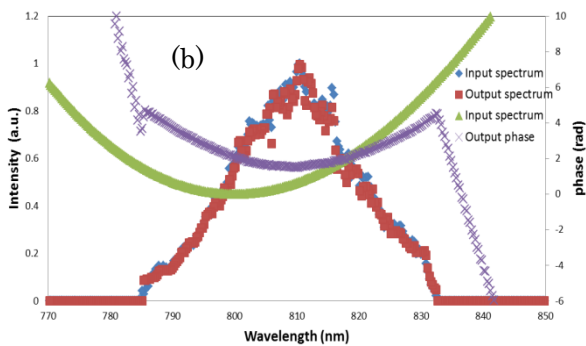


Fig7. Analysis result of simulated chirped pulse (GDD=1500fs²) (a)Time domein(b)Frequency domein

Fig.5~7からわかるように、仮想パルスに与える分散値が大きくなるほど、入力波形の再構築に誤差が生じていくことが分かった。これは、測定パルスの分散値が増えるにしたがって、非線形光学効果によって発生するXPWのスペクトル帯域が狭くなっていき、干渉パターンに測定パルスの情報が含まれなくなってしまうためであると考えられる。Fig.8には、各入力波形の分散値における再構築波形の分散値のプロットを示す。また、同様の数値モデル解析を入力パルスのスペクトル幅を変えて行ったところ、スペクトル幅が広いほど、分散値を与えた時の再構築精度は悪くなった。

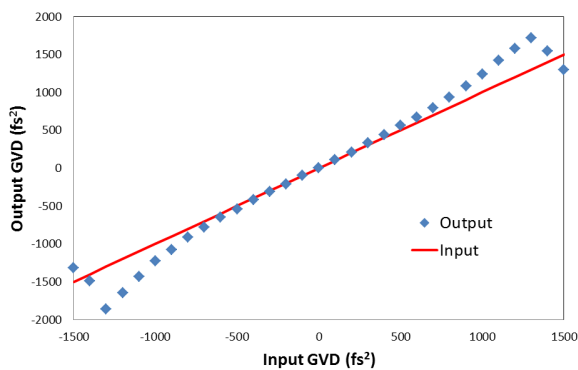


Fig8. GDD characteristic of SRSI

6. まとめ

本研究では、SRSIによるフェムト秒レーザの波形測定を行った。また数値モデルによるSRSI測定系の特性調査を行い、その測定限界を調べた。SRSI測定系は2次分散値の低いFTLパルスの測定は可能であるが、2次分散値の高いパルスは広帯域な参照パルスが得られないため測定に制限があり、分散補償器によって測定可能な分散値まで補償してパルスの分散値を求める逆算的手法が必要であることが分かった。

References

- [1] D. J. Kane and R. Trebino, *IEEE J. Quantum Electron.* **29**, 571 (1993).
- [2] L. Gallmann, D. H. Sutter, N. Matuschek, G. Steinmeyer and U. Keller, *Opt. Lett.* **24**, 1314 (1999).
- [3] T. Oksenhendler, S. Coudreau, N. Forget, V. Crozatier, S. Grabielle, R. Herzog, O. Gobert, and D. Kaplan, *Appl. Phys. B* **99**, 7 (2010).
- [4] N. Minkovski, G. I. Petrov, S. M. Saltiel, O. Albert, and J. Etchepare, *J. Opt. Soc. Am. B* **21**, 1659 (2004).