

Arduino と python を用いたフリンジ分解自己相関計の開発

戸倉川研究室 矢津田匠海

1. はじめに

超短パルスレーザーは材料の微細加工や、光物性分野での超高速現象の時間分解計測など幅広い分野で用いられている。その際用いる超短パルス光の正確な時間幅および形状計測が必要になるが、オシロスコープと高速フォトダイオードを用いた直接的な計測方法では応答速度の制限からサブピコ秒の超短パルスの時間変動に追従できず測定が困難である。そのため超短パルス光の時間幅測定を行う場合、相関測定が用いられる。今回私は相関測定の中でもパルスのチャープについての情報を得ることができるフリンジ分解自己相関計の開発を、ピエゾと比較して安価かつ測定時間範囲を大きくとれるステッピングモータとワンボードマイコンの一種である Arduino、プログラミング言語 python による制御プログラムを用いて行った。

2. 原理

2.1 高次高調波発生

光が物質中を通過する時、光電界の影響で分極が生じる。通常分極の大きさ P は電界の強さ E に比例し、

$$P = \epsilon_0 \chi^{(1)} E \quad (1)$$

となる。しかし電界が強くなっていくと、物質中の電子の動きが電界の変化に追従できなくなっていく、分極の波が歪み、高次の項が無視できなくなる[1]。このような時の分極と光の電界の関係は以下ようになる。

ただし ϵ_0, χ はそれぞれ真空の誘電率と感受率である。

$$P = \epsilon_0 (\chi^{(1)} E + \chi^{(2)} EE + \chi^{(3)} EEE + \dots) \quad (2)$$

第二項以下の非線形分極を P_{NL} とすると、この非線形分極から生じる電界 E_{NL} は

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) E_{NL} - \epsilon \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} E_{NL} \\ = \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} P_{NL} \end{aligned} \quad (3)$$

となる。この式は非線形光学媒質に入射した光の電界が、媒質中に非線形分極を発生させ、それが源となって新しく整数倍の角周波数 $n\omega$ を有する光電界が発生することを意味している。この発生した光を高次高調波と呼び 2ω の光を第二高調波(SHG 光)と呼び、本研究ではこれを利用している。

2.2 SHG 干渉自己相関計

第二高調波を用いた自己相関計の中でも2つに分けた光の軸を共通になるよう設定したものは SHG 干渉自己相関計あるいはフリンジ分解自己相関計と呼ばれる。エラー! 参照元が見つかりません。に本研究で開発したフリンジ分解自己相関計の構成を示す。SHG 干渉自己相関計の

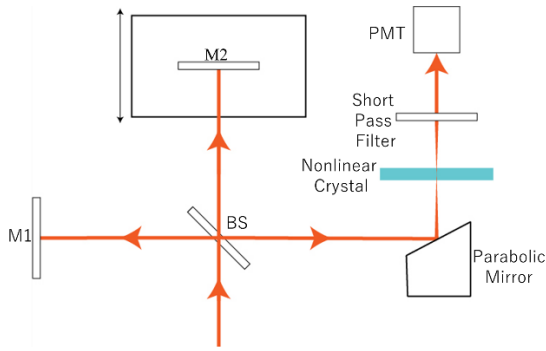


図 1 フリンジ分解自己相関計構成例

構成はビームスプリッタ(BS)を用いて被測定パルス光を 2 つに分け、片方に遅延を与えたのち再び BS で共軸に重ね合わせるマイケルソン干渉計型になっており、そこから出射する光を非線形結晶に入れ、結晶で発生した第二次高調波を光検出器で測定するという構成になっている。このとき結晶中で発生する群速度分散と位相整合条件から、測定できる最短パルス幅は非線形結晶の長さによって制限を受けるため十分に薄い結晶を利用する必要がある。測定する光の複素振幅を $\mathbf{e}(t)$ 、角周波数を ω とすると遅延時間 τ を持たせた干渉計からの出射し、非線形結晶に入る光は

$$\mathbf{e}(t) = \frac{\mathbf{E}(t) \exp(-j\omega t) + \mathbf{E}(t - \tau) \exp(-j\omega(t - \tau))}{\exp[-j\omega(t - \tau)]} \quad (4)$$

となる。非線形結晶で発生する SHG 光を光検出器で測定して得られる信号は

$$i_d(\tau) = 1 + 2G^{(2)}(\tau) + 4\text{Re}[F_1(\tau) \exp(-j\omega\tau)] + \text{Re}[F_2(\tau) \exp(-2j\omega\tau)] \quad (5)$$

となる。ただし光電界は $G^{(2)}(0) = 1$ となるように規格化してある。式(5)の第一項は個々のパルスから発生する第二次高調波強度、 $G^{(2)}(\tau)$ は 2 次の強度自己相関関数、 $F_1(\tau), F_2(\tau)$ は干渉項となっている。測定光が幅 τ_0 の理想的な超短コヒーレント光パル

スの場合、検出器からの出力は

$$i_d(0) = 8, i_d(\tau) = 1, (\tau \gg \tau_0) \quad (6)$$

となり、ピーク信号がバックグラウンドの 8 倍となる。また SHG 干渉自己相関計では、検出される信号に干渉項が含まれているためパルスの位相についての情報を得ることができる。図 2 にカオス光とパルス光で測定を行った場合のシミュレーション結果を

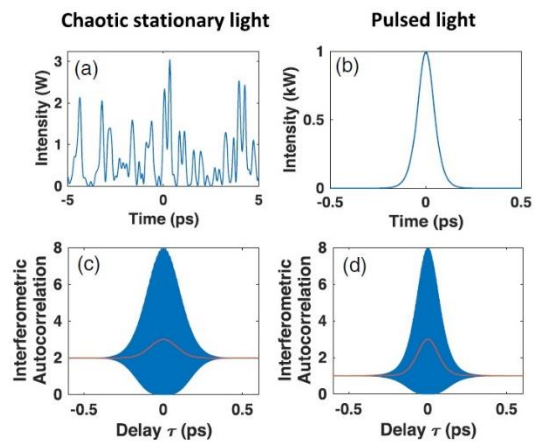


図 2 干渉自己相関測定シミュレーション

示す[2]。(a),(b)はそれぞれカオス光とパルス光の時間領域での強度、(c),(d)は青色が干渉自己相関信号、赤色が強度自己相関信号である。また、測定する光パルスがチャープしていた場合の測定信号例を図 6 に示す[3]。測定光がチャープしていた場合、測定信号の振動している範囲が強度自己相関関数 $G_2(\tau)$ の範囲よりも狭くなる。

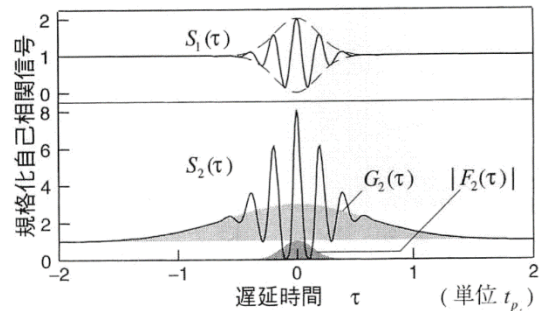


図 3 チャープしている光のフリンジ

分解自己相関測定信号[3]

3.1 実験方法

エラー! 参照元が見つかりません。に示されたフリンジ分解自己相関計を作成した。ミラーM2 をステッピングモータによって駆動するステージ(シグマ光機 OSMS20-85)で移動させることで遅延時間を操作できるようにになっている。また定電流源方式のドライバ(SG-514MSC)を用いてモーター内の各コイルに流す電流を調整し、より細かい角度での回転を行わせるマイクロステップ制御を用いることでステージ移動距離の分解能を向上させた。その際定電流源の制御を行うパルスジェネレータ兼相関信号のデジタルアナログ変換を行う DAC としてワンボードマイコン Arduino を、ステージに行わせる動作を使用者が選択するコントロールパネル兼リアルタイムに自己相関信号をグラフ化する機能として Python で記述したプログラムを用いた。非線形結晶は厚さ 400 μm の type2 型の KTiOPO_4 (KTP)結晶を用いており、集光には広帯域な光の測定を行う場合を想定し、色分散のない放物面鏡を用いた。その後カットオフ波長 1500 nm のショートパスダイクロイックミラーを通すことで基本波をはじき、高調波のみが検出器に入るようにしている。検出器として感度波長範囲 400~1200 nm の光電子増倍管 (HAMAMATSU Photonics R5108)を用い、また測定を行うパルス源として研究室で開発したカーレンズモード同期 $\text{Tm}:\text{Sc}_2\text{O}_3$ レーザーを用いた。

3.2 実験結果

測定を行ったカーレンズモード同期レー

ザーのスペクトルを図 エラー! 参照元が見つかりません。に示す。

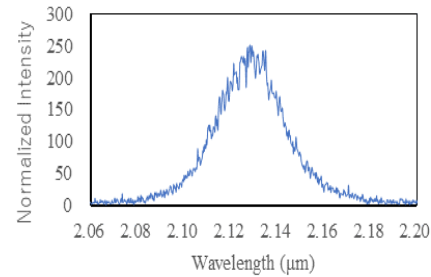


図 4 モード同期レーザースペクトル

スペクトルの中心波長は 2.13 μm 、半値幅は波長で 35.5 nm、周波数幅で 2.351THz となり、フーリエ限界パルス幅は 134 fs である。次にフリンジ分解自己相関測定で得られた信号を図 に示す。

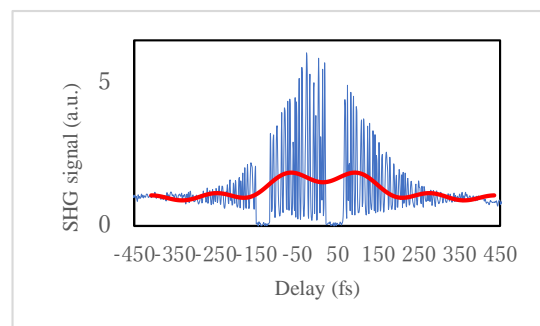


図 5 フリンジ分解自己相関測定信号

青色がフリンジ分解自己相関測定信号である。まず、遅延時間-130 fs、50 fs 付近で信号が 0 に落ちているところは被測定パルス源のモード同期が外れた場所である。これは干渉計とモード同期レーザーの間にアイソレーターを入れていないため、干渉計からパルスの一部がモード同期レーザー側に戻ることでモード同期が不安定になっているためだと考えられる。フリンジ分解自己相関測定では理想的に測定を行うことができれば得られる信号のピークとバックグラウンドの比が 8:1 になるはずだが、今回の測定で得られたものは 6:1 程度になった。

このようになる原因として、遅延時間 0 で信号が 0 に落ちていないことから、BS の分岐比が 1:1 になっていない可能性や分散の影響、2 つに分けた光を合流させる際に完全には光軸が一致していなかった可能性が考えられる。これらはリトロフレクターと表裏を変えたもう一枚の BS を利用することによって改善可能と考えられる。赤色は測定信号をフーリエ変換し、ローパスフィルタをかけ、逆フーリエ変換することで求めた強度自己相関関数 $G^{(2)}(\tau)$ である。前述のとおりモードロックが外れた 2 か所の影響で強度自己相関関数 $G^{(2)}(\tau)$ に振動成分が発生しており、これからパルス幅を求めることができなかった。このため今回はパルスにチャープがない場合フリンジ分解自己相関波形の半値幅と、強度自己相関関数の半値幅が一致するので、青で示されたフリンジ分解自己相関測定信号からパルス幅の推定を行った。得られた相関幅は 234 fs であり、チャープのない sech^2 型パルスと仮定して相関幅からパルス幅を求めると、152 fs となり、これは実際のフーリエ限界パルス幅 134 fs に近い値であり、今回の測定結果の妥当性をしめしている。

4. まとめ

ステップモータのマイクロステップ駆動を用いたフリンジ分解自己相関計の開発を行った。フーリエ限界パルス幅 134 fs のカーレンズモード同期レーザーの測定を行い、コントラスト 6:1、相関幅 234 fs の信号を得た。そこから求められるパルス幅は 152 fs となった。今後はステップモータの制御をオープンからクローズドループ制御に変更することで、ステージ移動距離の不確かさを減らすことや、SPIDER に発展さ

せることで、レーザーのより詳しい位相情報を調べることを目指す予定である。

参考文献

- [1] 黒澤宏著, 入門まるわかり非線形光学, オプトロニクス社
- [2] S. Toenger, R. Makitalo, J. Ahvenjarvi, P. Ryzkowski, M. Narhi, J. M. Dudley, and G. Genty. "Interferometric autocorrelation measurements of supercontinuum based on two-photon absorption". *Journal of the Optical Society of America B* 36, 2019, 1320-1326
- [3] 菊池和朗. "超短光パルス測定法". レーザー研究. レーザー学会, 1999, 762-767