



49. コンプトン散乱用レーザーのパルスタイミング安定化 Pulse Timing Stabilization of a Laser for Compton Scattering

小林 克行^{1*}, 三浦 泰祐², 高砂 一弥¹, 伊藤 紳二¹, 遠藤 彰¹

¹フェムト秒テクノロジー研究機構

300-2635 茨城県つくば市東光台 5-5

²慶應義塾大学工学部電気工学科

Katsuyuki KOBAYASHI^{1*}, Taisuke MIURA², Kazuya TAKASAGO¹, Shinji ITO¹ and Akira ENDO¹

¹The Femtosecond Technology Research Association

5-5 Tokodai Tsukuba Ibaraki 300-2635 Japan

²Dept. of Electro Engineering, Keio University

We stabilized the pulse timing of a mode-locked Ti:sapphire laser for electron-laser Compton scattering. The short-term jitter was reduced to 77 fs and the long-term drift was reduced to 70 μ Hz. We achieved the synchronization of two independent mode-locked lasers, and proposed a new method for shingle-shot jitter measurement.

Keywords: Compton scattering, mode-locked laser, regenerative amplifier, stabilization, synchronization, jitter, drift

1. コンプトン散乱 X 線発生

電子・レーザー衝突で起こるコンプトン散乱により発生する X 線は、高輝度・単色性がよい・低エミッタンスなど、従来の方法で発生する X 線に比べて優れた性質を持ち、物性科学や化学反応の評価ツールとして幅広い応用が期待されている。発生する X 線のパルス幅は概ね電子パルスとレーザーパルスの相互作用時間程度になる。90 度散乱の場合は細く絞った電子ビームをレーザーが横切る時間が相互作用時間であるため、極端に短い電子パルスを用いなくてもパルス X 線発生が実現できる。例えば電子のビーム径を 50 μ m に絞ると、200 fs 程度のパルス幅が期待できる。ただし、この際に電子パルスとレーザーパルスが確実に衝突することが求められ、両パルス間の高精度な時間同期が必要となる。

我々は短パルス X 線を発生させることを目的に、表 1 のレーザーパルスと電子パルスを 90 度衝突させることを計画している。数値計算¹により、表 2 の X 線が発生する予定である。電子のパルス幅が 1 ps であるため、電子パルスとレーザーパルスは最悪でも 1 ps 以下の時間精度で同期されている必要がある。また電子パルスは概ねガウス型の分布となり、中心部に多くの電子が集中している。発生 X 線の光子数を多くするためには、なるべく中心部でレーザーパルスと衝突することが望ましい。そこで、レーザーのタイミング精度を電子パルス幅の 1/10 である 100 fs を開発目標に定めた。これらの仕様を満たすため、Ti:sapphire の CPA レーザーを用いる。CPA の構成要

* 現在の所属: 住友重機械工業総合技術研究所, 188-8585 東京都田無市谷戸町 2-1-1

Laser pulse	
Energy	100 mJ/pulse
Wavelength	800 nm
Pulsewidth	100 fs
Focused beam size	50 μm
Electron bunch	
Energy	150 MeV
Charge	1 nC/pulse
Pulsewidth	1 ps
Focused beam size	50 μm

表 1: レーザー、電子パルス仕様

X-ray pulse	
Photon energy	268 keV
Wavelength	4.6×10^{-3} nm
Pulsewidth	248 fs
Photon number	2.6×10^6 /pulse

表 2: X線パルス仕様

素のうち特にモード同期レーザーは最初の種となる光パルスが発生させる最上流であるため、この部分で時間変動が大きいと下流がいかにか安定であっても全体の安定度は確保できない。そのため、モード同期レーザーの時間安定化は、短パルス X 線発生のための重要な開発項目である。

2 モード同期レーザーのパルスタイミング変動

モード同期レーザーでは、光共振器を光が一往復するたびにパルスを発振する。共振器の光路長が変動すると、パルス発生タイミングが変動することになる。光路長変動の要因として、1 温度変動に伴う熱膨張、2 温度・湿度・気圧変動に伴う空気の屈折率変動、3 機械的振動による構成部品(ミラー等)の位置変動が挙げられる。このうち 1 および 2 は数秒から数時間にわたる非常に遅い変動であり、3 は百ミリ秒から 1 秒程度の速い変動である。また、3 は一般にある位置を中心に振動するのに対して、1 および 2 は中心そのものが変動するという特徴を持つ。

パルス発生タイミングが変動するもう一つの大きな原因として、レーザー結晶中でのゲインの変動がある。結晶中のゲイン変動は主に励起光源の強度変動によってもたらされる。ゲイン変動に伴い自己位相変調の状態が変動し、これがパルスタイミングの変動となって現れる²。

3 パルスタイミング安定化

タイミング安定化モード同期レーザーを図 1 に示す。s-band 加速器と同期させるためにレーザーの繰り返し周波数を 119 MHz に設定した。ミラーのうち 1 枚は新たに開発した Broadband SESAM³ である。開発したレーザーは励起強度 3.5 W, 中心波長 800 nm, スペクトル幅 20 nm, パルス幅 56 fs(sech²を仮定)である。平均出力は 100 mW で、60 分間の測定で出力変動は 0.4%(rms)と非常に安定である。

タイミング変動をもたらす原因の多くは環境変動に起因する。我々の実験室はクラス 1000 クリーンルームで、室温変動は±0.1 °C 以下(60 分安定度)に抑制されている。また、振動対策として光学定盤が置かれている床は建物とは分離

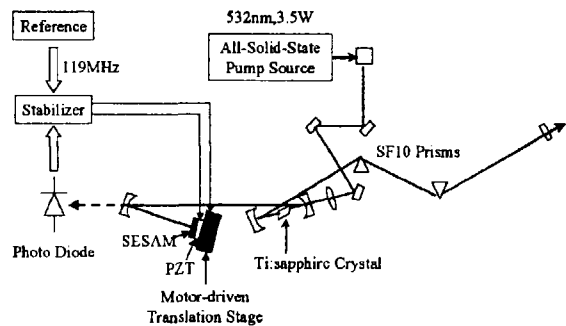


図 1: タイミング安定化モード同期レーザー

され、地中深くまで杭が打ち込まれている。空気の流れが擾乱を引き起こすので、レーザーはアクリルボックスで覆われ、さらに光学定盤全体がビニール製カーテンで囲われている。レーザー構成部品、特にミラーホルダーの良否は機械的振動に大きく影響するため、滑らかに動きバックラッシュの小さいものを慎重に選定した。

前節で記したように、パルスタイミング変動は共振器の光路長変動、およびレーザー結晶中でのゲイン変動が主な原因となって引き起こされる。結晶中でのゲイン変動は安定な励起光源を用いることで低減させることができる⁴。我々は励起光源として半導体レーザー励起 Nd:YVO₄ レーザーの第2高調波による高安定全固体グリーンレーザーを用いた。光路長変動については、共振器ミラーの1つを動かすことにより光路長が常に一定に保たれるように、移動ステージとピエゾ素子の併用による粗微動フィードバック制御を行った。

レーザーパルス列をフォトダイオードで検出し、バンドパスフィルターを用いて正弦波に変換する。この正弦波が 119 MHz 基準信号と一致するように PLL(phase lock loop)を用いて共振器長を制御する。動かすミラーは上記 Broadband SESAM である。ピエゾ素子を用いて高速に制御するためには小型軽量のミラーが望まれる。そこで、我々は 5 mm 平方で厚さ 300 μm の Broadband SESAM を作製した。フィードバックループの固有振動数は約 10 kHz である。ピエゾ素子は高速制御が可能である反面、移動距離が小さい。熱膨張による共振器長の変動がピエゾ素子の移動距離を越える場合は、移動ステージを用いてピエゾ素子の移動範囲に戻す制御を行う。

4 タイミング安定度測定

パルスタイミングの安定度は便宜的に短時間安定度(ジッター)と長時間安定度(ドリフト)に分けて考えることができる。ジッターはパルス間隔を測定し、測定時間内の全パルスについての平均値からのずれを rms 値で表したもので、単位は秒である。これに対してドリフトは平均値そのものの変動で、さらに長い時間をかけてどのように平均値が変動したかを表す。通常はパルス間隔ではなく、その逆数である繰り返し周波数の変動として表され、単位は Hz が用いられる。

ジッター測定

ジッター測定にはスペクトル解析法⁵が広く用いられており、また最近では位相復調法⁶も用いられるようになった。スペクトル解析法はレーザーパルス列をスペクトラムアナライザーで測定し、周波数領域でタイミング変動を解析する。レーザーのパルスタイミングが理想的に安定であると、スペクトラムアナライザーの測定データはレーザーの繰り返し周波数とその高次高調波にδ関数のような鋭いピークのみが現れる。実際のレーザーには変動があるため、鋭いピークの両側に裾野が広がったようになる。この裾野にはタイミング変動と強度変動を合わせた情報が含まれており、次式のような関係が成り立つ。

$$\sigma_E^2 + (2\pi n f_0)^2 \sigma_J^2 = \int_{f_{low}}^{f_{high}} \frac{2P_{SSB}}{P_S \cdot BW} df \quad (1)$$

ここで、 σ_E は強度変動、 σ_J はタイミング変動(ジッター)、 f_0 はパルス繰り返し周波数、 n は高調波の次数、 BW はスペクトラムアナライザーの分解能で、 P_S および P_{SSB} はそれぞれキャリア周波数および側帯波(single side band)における信号強度である。また、 f_{low} f_{high} は積分範囲で、式(1)から

すぐ分かるように計算結果は積分範囲によって異なる。また本節冒頭で述べたように、ジッターはある測定時間の平均値に対する変動であるため、測定に要した時間によって結果が異なる。そのため、積分範囲と測定時間は明示する必要がある。我々の測定結果を図2に示す。スペクトラムアナライザーの分解能 10 Hz、測定時間 3.7 秒である。安定化制御のために裾野の部分が非常に小さくなり、低次数での測定ではスペクトラムアナライザーのバックグラウンドノイズに埋もれてしまう。そこで、200 次という大きな次数での測定を行った。式(1)を用いて積分範囲 10 Hz-5 kHz で計算ジッターは 77fs となった。我々の知る限り Ti:sapphire レーザーとして最も安定な値である。

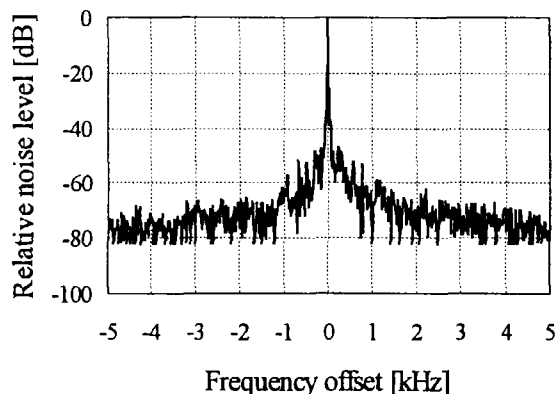


図 2: タイミングジッター測定結果

ドリフト測定

長時間安定度を示すドリフトの測定では、周波数カウンターを用いて繰り返し周波数を測定し、基準信号との差を求める。安定化制御を行った場合のドリフトを図3に示す。変動量は60分間のrms値で70 μHz となり、非常に安定になっていることがわかる。

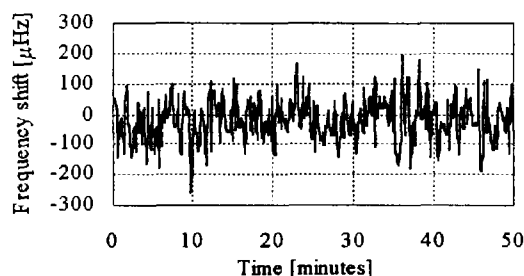


図 3: 周波数変動

本研究はNEDOの委託によりフェムト秒テクノロジー研究機構において実施した。

参考文献

1. J. Yang, M. Washio, A. Endo and T. Hori, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **428** 556 (1999)
2. S. Namiki and H. A. Haus, IEEE J. Quantum Electron., **33** 649 (1997)
3. Z. Zhang, T. Nakagawa, K. Torizuka, T. Sugaya, T. Itatani, H. Takada, H. Takahashi and K. Kobayashi, CTuR6, CLEO'99
4. Y. Ishida and K. Naganuma, Opt. Lett. **21** 51 (1996)
5. D. von der Linde, Appl. Phys. **B39** 201 (1986)
6. H. Tsuchida, Opt. Lett, **23** 286 (1998)