

DEVELOPMENT OF REGENERATIVE-TYPE LASER CAVITY FOR MULTI-COLLISION LASER COMPTON SCATTERING

Eriko Yamaguchi ^{†,1)}, Ryunosuke Kuroda ¹⁾, Hiroyuki Toyokawa ¹⁾,
Eisuke Miura ¹⁾, Masafumi Kumaki ²⁾, Kawakatsu Yamada ¹⁾

¹National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568, Japan

²RISE, Waseda University

3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555, Japan

Abstract

We are aiming at development of X-ray source via the multi-collision laser Compton scattering (Multi-LCS) for X-ray yield increasing. We develop a regenerative amplification laser cavity and manufacture each component for seed generation. We carried out modularization of components and make the build-up waveform in cavity. Hereafter, we optimize the gain of the preamplifier, extend the cavity length up to 7.56m (4 pulse cut out) and optimize the build-up amplification (The target is 100mJ×100pulse=10J). Finally, we will generate multi-pulse X-ray by collision between the build-up laser pulse and multi-bunch electron beam.

マルチ衝突レーザーコンプトン散乱 X 線源のための 再生増幅器型レーザー共振器の開発

1. はじめに

独立行政法人 産業技術総合研究所では S バンド小型リニアックを用いたレーザーコンプトン散乱 X 線源の開発と応用研究を行っている。この X 線は、エネルギー可変性、準単色性、短パルス性、微小光源性などの優れた性質をもっており、装置のコンパクト性にも優れている。これまでは 1 つの電子バンチとレーザーパルスを衝突させていたが、更なる X 線収量増強の為、マルチバンチの電子ビームとレーザー共振器内におけるビルドアップ中のレーザーパルスとのマルチ衝突を目指している。現在、そのための再生増幅器型レーザー共振器の開発と、導入する Seed 光生成のための各コンポーネント製作を行っている^{[1][2][3]}。

本レーザーシステムは、図 1 に示すように、加速器と同期したフェムト秒 Ti:Sa レーザー発振器からのモードロックパルスをオフナー型ストレッチャーにより時間幅を 10 ps 程度まで伸ばし、パルスピッカーで数パルス切り出す。その数パルスに対し変調器で任意のスロープをつけ、プリアンプでマルチパス増幅をしたものを Seed 光として共振器へ導入する構成となっている。その後、図 2 のように共振器内の集光点でビルドアップしたレーザーパルスとマルチバンチ電子ビームを衝突させ、マルチパルスの X 線を生成する。

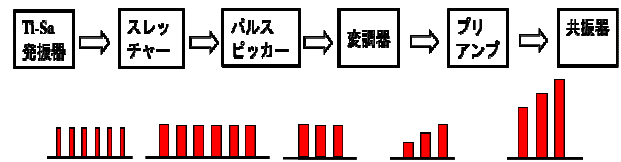


図 1 : Seed 光生成の各コンポーネント

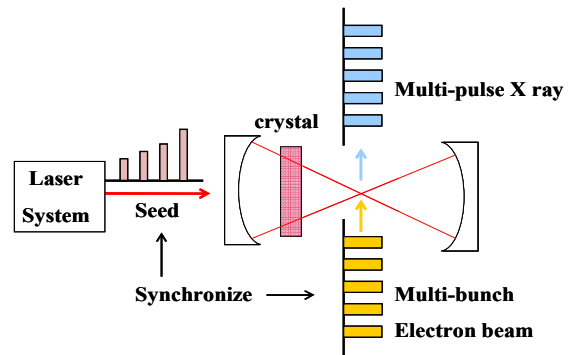


図 2 : マルチ衝突レーザーコンプトン散乱の概念

2. Seed 光生成の各コンポーネント

2.1 ストレッチャー

加速器と同期したフェムト秒 Ti:Sa レーザー発振器からのモードロックパルス (周波数 79.33 MHz、パルス間隔 約 12.6 ns) を図 3 に示したオフナー型

[†]eri-yamaguchi@aist.go.jp

ストレッチャーに導入する。そのままストレッチするとパルス時間幅の FWHM は 100 ps 程度まで伸びるが、電子パルス幅と同程度とするため、凹面鏡の前にスリットを設け、約 10 ps になるようにストレッチ量を調整した。図 4 はオートコリレーターで測定したストレッチャー導入前後のパルス幅である。使用したグレーティングは 1200 line/mm である。

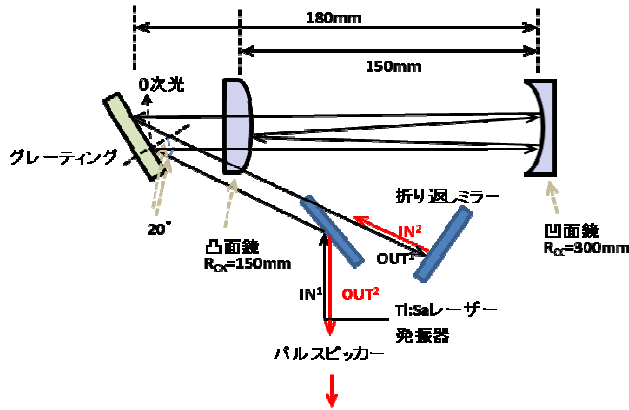


図 3：オフナー型ストレッチャー



図 4：ストレッチャー導入前後のパルス幅
(左図：導入前，右図：導入後)

2.2 パルスピッカー

次に (10 ps 程度にストレッチした) Seed パルスを図 5 (左図) に示すパルスピッカーに導入し、任意に数パルス切り出す。ポッケルスセルの ON/OFF 信号はパルスジェネレータと接続しており、パルスジェネレータの時間を調整することにより、切り出すパルス数を自由に変更する事が可能である。図 5 (右図) は 2 パルス切り出した波形である。また、 $\lambda/2$ 板、 $\lambda/4$ 板、ポッケルスセルの煽り等を調整しベースラインのノイズを出来る限り少なくした。

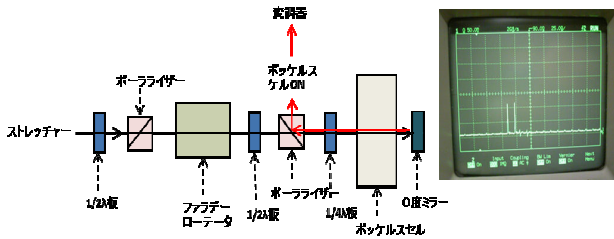


図 5：ストレッチャーとパルス切り出し

2.3 変調器

再生増幅器型レーザー共振器における、パルス列ビルドアップ時には、Seed パルスの 1 本目の増幅が強く起こる為、ミラーのダメージ閾値を超える恐れがある。共振器内で使用している 800 nm 用ミラーは CVI 社の TLMB シリーズであり、このミラーのダメージ閾値は波長 800 nm において、パルス幅 300 ps、繰り返し 20 Hz の時に 8 J/cm^2 である。これを、我々の使用する Seed パルス (800 nm、10 ps、10 Hz) へ換算すると、ダメージ閾値は 1.46 J/cm^2 となる。詳細は後述するが、共振器設計値から想定されるビーム半径 2 mm を考慮すると、共振器内におけるビルドアップのピークエネルギーは 180 mJ/pulse 以下に制限される。そのため、Seed パルスを共振器へ導入する前に強度変調をかける必要がある。

パルスピッカーで切り出したパルス列を、図 6 に示す変調器に入れ、ポッケルスセルへ印可する電圧を変化させて強度変調をかけた。ポッケルスセルの RISE TIME は立ち上がり可変 HV ドライバで調整する。図 7 は RISE TIME を 25 ns、130 ns と変えた 5 パルス Seed 光の波形である。RISE TIME 25 ns の時、Seed パルスの 3 番目で一度、強度減少が起きているが、これはリングングによるものである。しかし、必要なのはスロープを付けた最初の 2 本のパルスだけであり、Seed パルス 3 本目以降はパルスピッカーにて切り捨てるので特に問題はない。

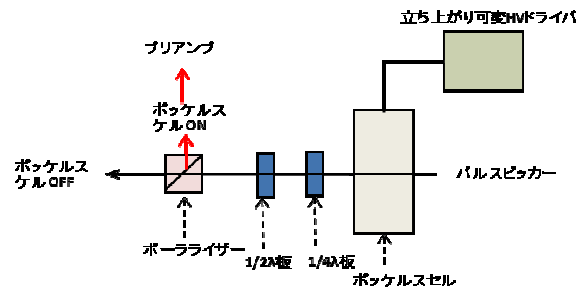


図 6：変調器

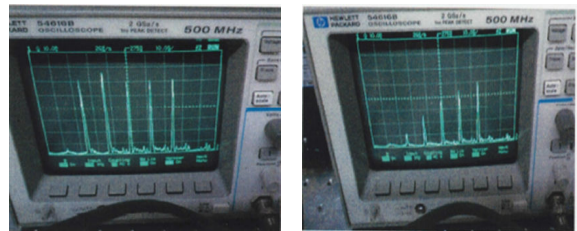


図 7：左図 RIZE TIME 25ns，右図 RIZE TIME 130ns

2.4 プリアンプ

プリアンプのレイアウトを図 8 に示す。プリアンプ内で使用している 800 nm ミラーは CVI の低分散ミラー-TLM1 シリーズである。励起光は凸レンズを使用しビーム径を 1/2 の 5 mm に縮小している。最初、4 パスでアンプを行ったが、強度増幅が約 30 倍と低かった為、ミラーで折り返して 8 パスアンプとした。図 9 は 8 パスアンプで強度が約 400 倍に増幅した Seed パルス (2 本切り出し) である。2 本の Seed パルス前に見える波形は励起光のシグナルである。アンプ前 (図 9 : 上段) のグラフにも小さな励起光のシグナルが見えるが、これは励起光の漏れ光であり実際は入射していない。アンプ時に入射した励起光パワーは約 200 mJ/pulse である。

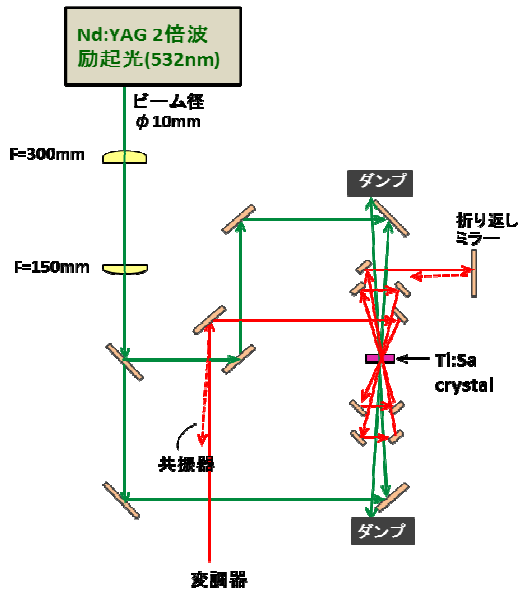


図 8 : プリアンプのレイアウト

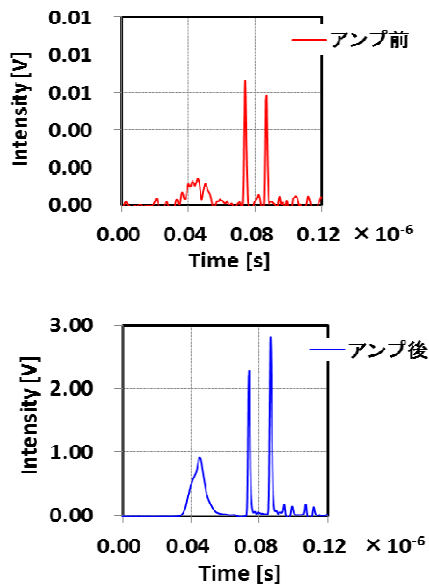


図 9 : 8 パスアンプによる強度増幅 (約 400 倍)

3. 共振器の開発

3.1 共振器の設計

図 10 に Winlase ver 2.1 で計算した再生増幅器型共振器の設計図モデルを示す。今回製作した共振器の長さは 3.78 m である。Seed の本数は共振器の長さに対応しており Seed 2 本の際は共振器長 3.78 m、Seed 4 本の際は共振器長 7.56 m である。

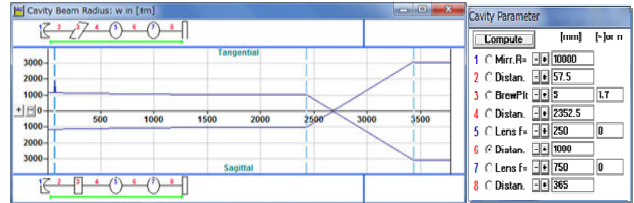


図 10 : Winlase を使用した共振器設計図

共振器のレイアウト概略図を図 11 に示す。曲率の異なる 3 枚の凹面鏡によって共振器内部に集光点を作り、そこへ電子ビームを導く構成とした。ゲイン媒質である Ti:Sa 結晶はブリュスターカットとしたため、集光点には非点収差が発生する。そのため、曲率半径 500 mm の凹面鏡 (図 11、図 12 におけるレンズ 5 に相当) と Ti:Sa 結晶の距離 (Distance4) を最適化する必要がある。そこで、共振器安定度および集光点でのビームサイズがどのように Distance4 に依存するかを計算した (図 12)。ここではミラー 1 の曲率 R を数通り (R = 5, 10, 20, 30 m) 変えて計算した。φ_A、φ_S、φ_B はそれぞれ結晶上でのビーム径、集光点でのビーム径、エンドミラー (IC) 上でのビーム径である。φ_A、φ_B は出来るだけ大きく、φ_S は出来るだけ小さくなり、かつ共振器の安定度が比較的高くなるレイアウトを選び、図 11 に示す構成で共振器を製作した。

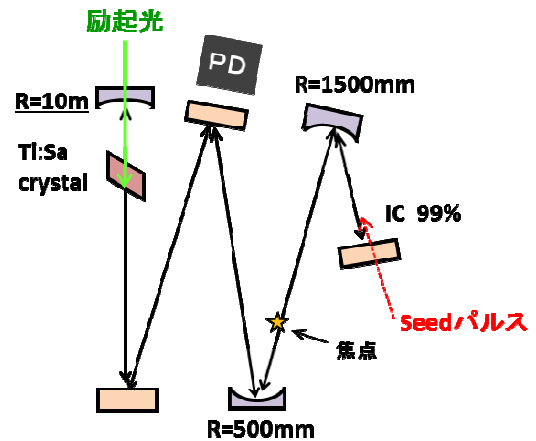


図 11 : 共振器レイアウト (3.78m)

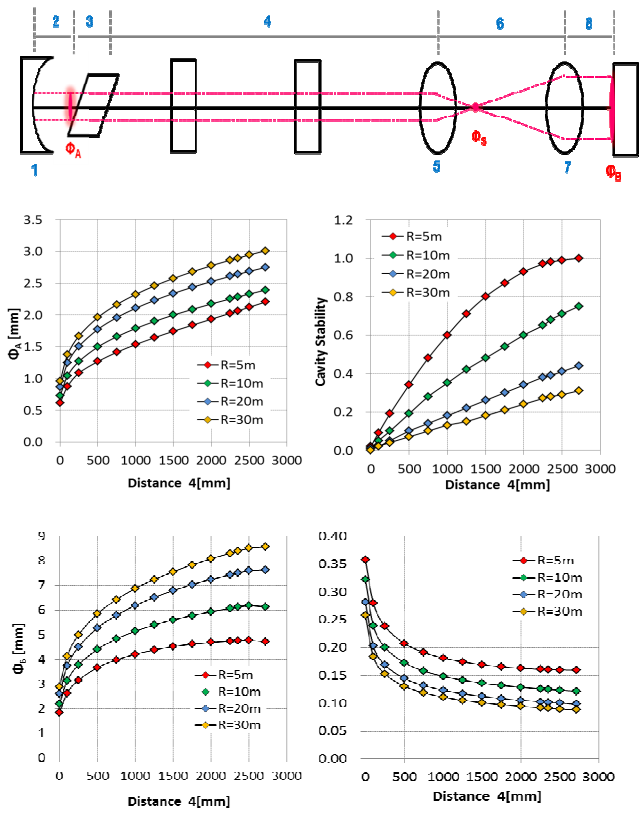


図 12: ビーム径および安定度の曲率半径と Distance4 への依存度

3.2 共振器実験

次に共振器での実験結果を示す。図 13 は実際に励起光 (ビーム径 5mm) を入射し共振器内で緩和発振した時のグラフである。

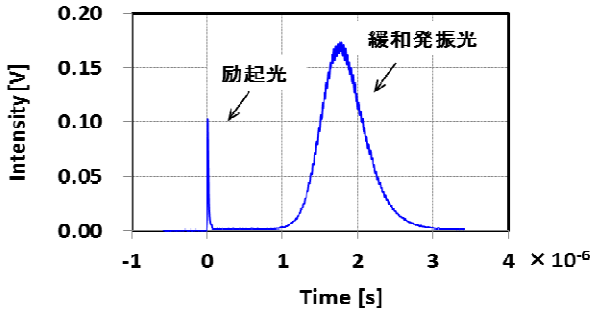


図 13: 励起光と緩和発振光

この状態の共振器にエンドミラー (IC) (反射率 $99\% \pm 0.3\%$) の裏側から 8 パスアンプ (約 400 倍の強度増幅) した Seed 光を入れ、ビルドアップ波形を観測した。共振器からの漏れ光を高速フォトダイオードで測定したビルドアップ波形を図 14 に示す。励起光を入射してから緩和発振が始まるまで約 $1 \mu\text{s}$ 、ビルドアップピークまで約 $1.7 \mu\text{s}$ となっている。共振器内へ入射する励起光パワーをさらに上げていくと、この時間は縮まっていくと想定される。図 15

には Seed パルスを 1 本導入した場合と 2 本導入した場合に得られた緩和発振光とビルドアップ波形を、それぞれ赤線と青線で示した。オシロスコープでアベレージ (32 パルス) を取ったため、見かけ上のピークは下がって見えている。図 15 の右側に示した図はそれぞれの拡大図であり、Seed 1 本時のパルス間隔は $12.6 \text{ ns} \times 2$ 、Seed 2 本時のパルス間隔は 12.6 ns となっていることが分かる。また、Seed 2 本を導入したビルドアップ時の波形 (図 15 下段: 右図) は比較的、増幅がフラットとなった。これは、シード光の強度変調の効果であり、本手法の有効性が示されたものである。図 15 の測定時に用いた励起光パワーは約 40 mJ/pulse である。最終的に入射する励起光パワーは約 700 mJ/pulse を予定している。今後、光学系のさらなる調整が必要である。

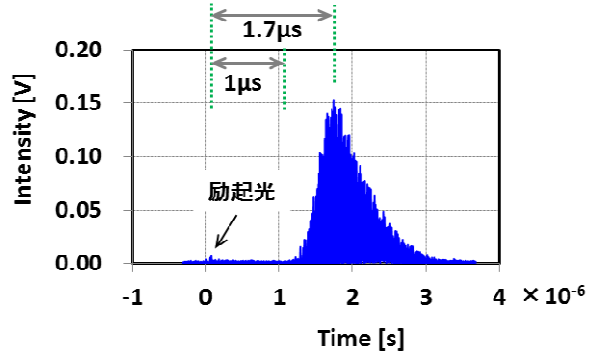


図 14: ビルドアップ波形

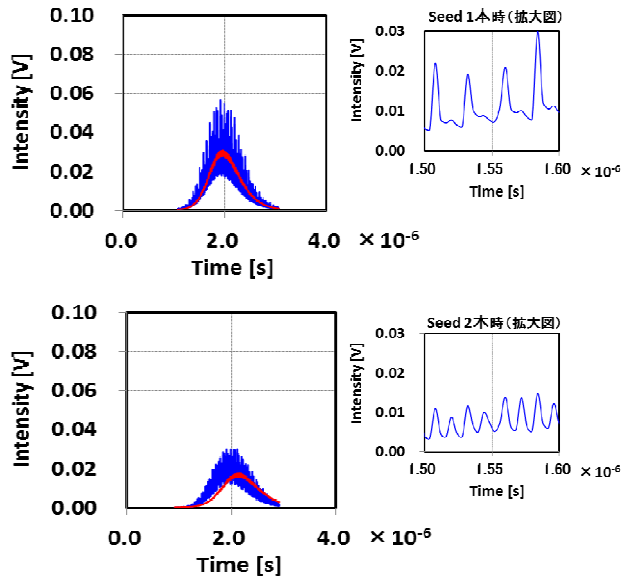


図 15: 緩和発振光とビルドアップ波形 (上段: Seed 1 本, 下段: Seed 2 本)

4. まとめと今後の展開

Seed 光生成のためのコンポーネント製作とモジュール化、再生増幅器型レーザー共振器の製作はほぼ完成しビルドアップ増幅までは確認出来た。これからは、プリアンプのゲイン最適化、共振器長を

7.56m とし、光学系の最適化によって 4 パルスでのビルドアップを行い、最終的に $100\text{mJ} \times 100\text{pulse} = 10\text{J}$ を目指す。今後、最適化した共振器によってシードレーザーパルス列をビルドアップし、マルチバンチ電子ビームと衝突させ、最終的にマルチパルス X 線を生成させることを目指す。

参考文献

- [1] R. Kuroda et al., Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p1224-1226, 2010
- [2] R. Kuroda et al., Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p1105-1107, 2010
- [3] R. Kuroda et al., Proceedings of EPAC'08, 1878, 2008