

レーザーコンプトン散乱のためのリング型 Thin-disk 再生増幅器の開発

DEVELOPMENT OF A RING TYPE THIN-DISK REGENERATIVE AMPLIFIER FOR LASER-COMPTON SCATTERING

小柴裕也^{A)}, 山下洗輝^{A)}, 鷲尾方一^{A)}, 坂上和之^{A), B)}, 東口武史^{C)}, 浦川順治^{D)}
Yuya Koshiba^{A)}, Ryosuke Morita^{A)}, Masakazu Washio^{A)}, Kazuyuki Sakaue^{A), B)},
Takeshi Higashiguchi^{C)}, Junji Urakawa^{D)}
^{A)} WISE, Waseda University
^{B)} Photon Science Center of the University of Tokyo
^{C)} Utsunomiya University ^{D)} KEK

Abstract

We have been working on the proof-of-principle study of the crab crossing laser-Compton scattering. Crab crossing will realize a quasi-head-on collision of an electron bunch and a laser pulse, even when there is an opening crossing angle. In order to make the enhancement factor larger, high pulse energy and short pulse width are required for the colliding laser pulse. We have developed a ring-type, thin-disk regenerative amplifier for this purpose. 10 mJ, 1.5 ps, and M2=1.5 has been achieved.

1. はじめに

電子ビームとレーザーパルスの衝突によって X 線を生成するレーザーコンプトン散乱 (LCS) は小型高輝度 X 線源として期待される。我々のグループは小型な線形加速器と光蓄積共振器を組み合わせその高度化に取り組んできた[1]。しかしながら光蓄積共振器を活用した系では共振器ミラーの存在により、散乱 X 線の高強度化にとって有利な正面衝突が妨げられてしまうという課題がある。そこで我々は電子バンチに傾きを付与することにより、電子バンチとレーザーパルスのクラブ衝突を行い、擬似的な正面衝突を実現することで、ルミノシティの増大、すなわち散乱 X 線強度の増大を目的に、その原理実証として本研究に取り組んでいる。本研究で行うクラブ衝突 LCS の概念図を Fig. 1 に示す。

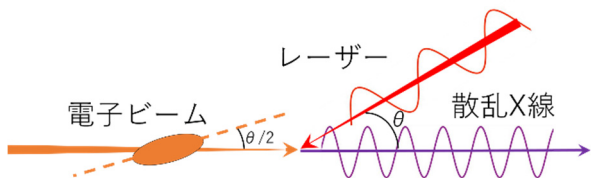


Figure 1: Schematic of crab crossing LCS.

電子ビームとレーザーパルスの諸パラメータを Table 1 に示し、クラブ衝突を用いないときの衝突角とルミノシティの関係性を Fig. 2 に示す。

Table 1: Parameters of Electron Beam and Laser Pulse

	Electron Beam	Laser Pulse
Energy	4.7 MeV	1.2 eV (1030 nm)
Intensity	50 pC	10 mJ
Transverse Size	100 μm	50 μm
Duration	4 ps (rms)	0.5 ps (rms)

2. 衝突用レーザーシステム

2.1 レーザーシステムに対する要求

LCS において散乱 X 線光子数はルミノシティと呼ばれるパラメータで決定付けられる。電子バンチとレーザーパルスの一度の相互作用において、ルミノシティはレー

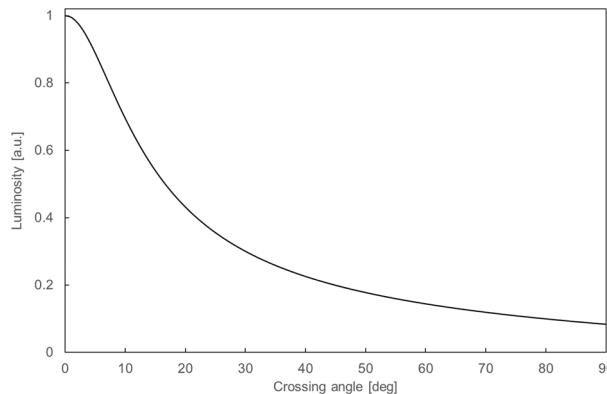


Figure 2: Luminosity as a function of crossing angle.

ザーパルスに含まれる光子数に比例するため、高強度なレーザーパルスが求められる。しかし本研究において最も重要なパラメータはレーザーパルスのパルス時間幅である。クラブ衝突 LCS において、クラブ衝突によるルミノシティの増大率は次式で記述される[2]。

$$G = \sqrt{\frac{(\sigma_x^2 + \sigma'_x{}^2) \cos^2 \frac{\theta}{2} + (\sigma_z^2 + \sigma'_z{}^2) \sin^2 \frac{\theta}{2}}{\sigma_x^2 + \sigma'_x{}^2 \cos^2 \frac{\theta}{2} + \sigma_z^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}}} \quad (1)$$

ここでプライムなしは電子ビームのサイズを表し、プライム付きはレーザーのサイズを表す。添字の x は横方向、 z は縦方向 (進行方向) を表す。Eq. (1) のレーザーパルス

時間幅依存性を図示すると Fig. 3 のようになる。

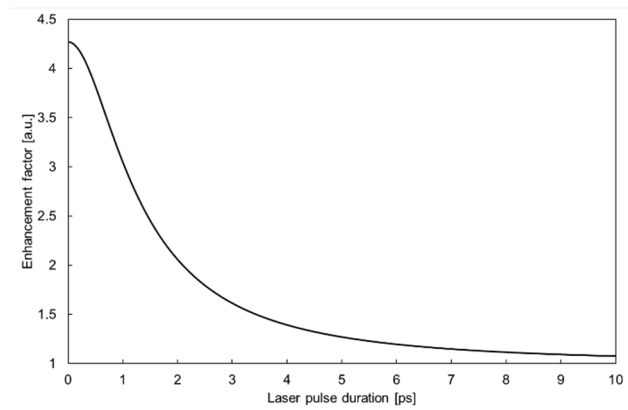


Figure 3: Laser duration dependence of enhancement factor.

Figure 3 を見てわかるようにパルス時間幅が短ければクラブ衝突の効果は急激に大きくなる。より一般的には、レーザーパルス幅が電子バンチのバンチ長に比べて短いほどクラブ衝突によるルミノシティの増大率が大きいとすることができる。従ってレーザーに求められる要求としては高パルスエネルギーかつ超短パルスである。

2.2 レーザーシステムの全容

前節で述べたように、クラブ衝突によるルミノシティの増大率を大きくするためには高パルスエネルギーと超短パルス性が重要となる。当研究室でも可能なレーザー開発として、小型でモードロック発振が可能なファイバーレーザー、ピコ秒ミリジュールの増幅が可能な Thin-disk レーザーの技術を活用したレーザーシステムを開発した。レーザーシステムの全容をブロック図にて Fig. 4 に示す。

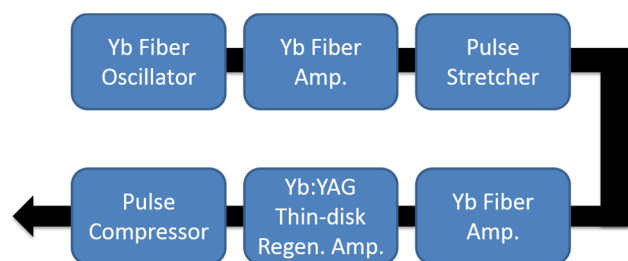


Figure 4: Block diagram of the laser system.

2.3 Thin-disk 再生増幅器

このレーザーシステムで最も重要なのは、パルスエネルギーを nJ から mJ に増幅する、メインアンプの Yb:YAG Thin-disk 再生増幅器である。Thin-disk (薄ディスク) 形状の利得媒質は従来のロッド形状と比較して熱消散性が優れていることが挙げられる。背面にヒートシンクを接合することで効率的に放熱することができ、ハイパワーで問題になる熱レンズ効果が抑制されるため、レーザーの品質劣化を抑制しながらも高いパルスエネルギーを得ることができる。再生増幅器の構成としては光共振器の中で光パルスが往復するリニア型と、一方向に周回するリ

ング型が考えられる。最初に開発を行ったリニア型の構成を Fig. 4 に示す。

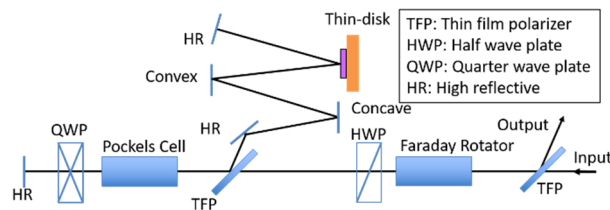


Figure 5: Linear type thin-disk regenerative amplifier.

Figure 5 の左半分が光共振器を構成しており、ポッケルスセルによって偏光状態が s 偏光に固定されている間はパルスが往復し続ける。この構成で 15 mJ のパルス生成 (増幅率としては 10^6 を超える) に成功したものの、戻り光によるシード系の損傷や、ポッケルスセルの損傷、高次モードの出現等の問題が見受けられた。これらの問題解決のために本研究ではリング型の光共振器による再生増幅を行った。リング型の再生増幅器の構成を Fig. 6 に示す。

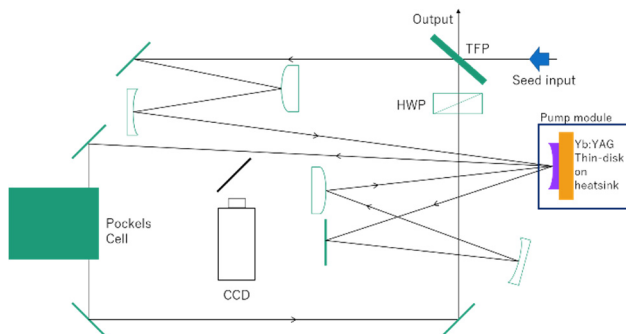


Figure 6: Ring type thin-disk regenerative amplifier.

リング型にすることで戻り光の心配がなくなり、寄生発振の抑制にも効果的とされる。またリニア型には必要なファラデー回転子が必要なくなるのもメリットである。共振器設計は reZonator というソフトウェアを使用している。リング型の光共振器におけるモードサイズを Fig. 7 に示す。

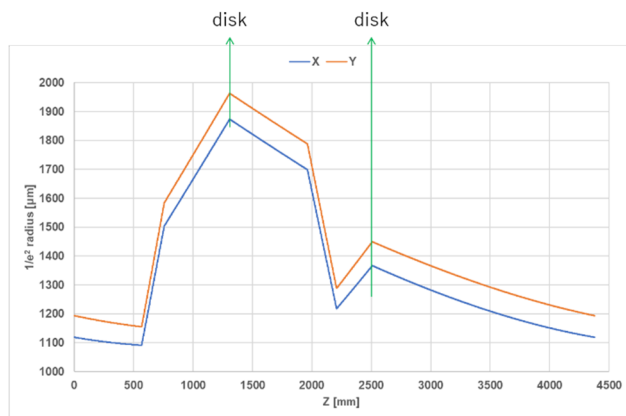


Figure 7: Mode size of the ring cavity.

設計指針としては、ある素子でモードサイズが小さくなると損傷を受けやすくなるので避けること、disk 上でのポンプ径が直径 4 mm なのでできる限りモードサイズを合わ

せ込むこと、複数のパルスが同時に蓄積されないように共振器全体の長さが長くなりすぎないこと、リニア型に比べて小信号利得が小さくなるので Thin-disk を 2 回パスすること、である。アライメントがリニア型に比べて難しいものの再生増幅に成功した。強度としては最大 11 mJ を確認している。再生増幅過程はもれ光をフォトダイオードで観測することで視覚化できる。その様子はビルドアップと呼ばれる。ビルドアップ波形の一例を Fig. 8 に示す。

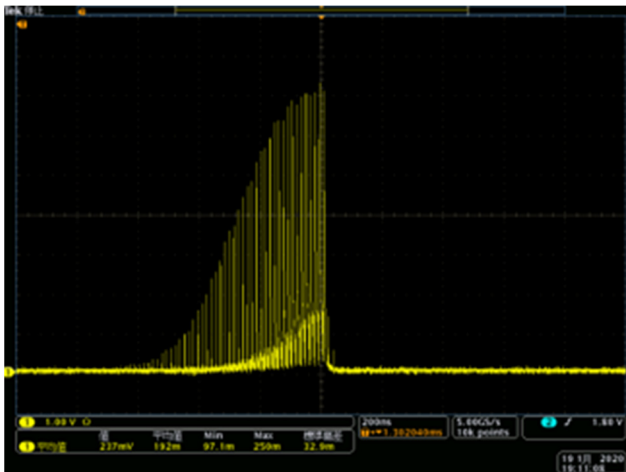


Figure 8: Example of a pulse build-up.

1.51 nJ のシード光が 10 mJ まで増幅され、またこのときの周回回数は 124 回であった。周回回数を減らすためにはシード光をさらに増幅した状態で再生増幅器に入力することが必要である。再生増幅光の品質を評価するために M^2 を測定した。測定結果を Fig. 9 に示し、プロファイルを図 10 に示す。

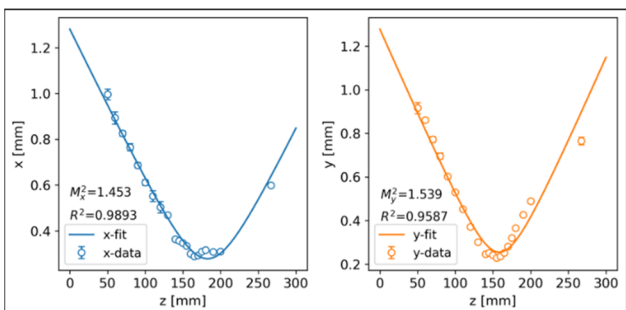


Figure 9: Result of the M^2 measurement.

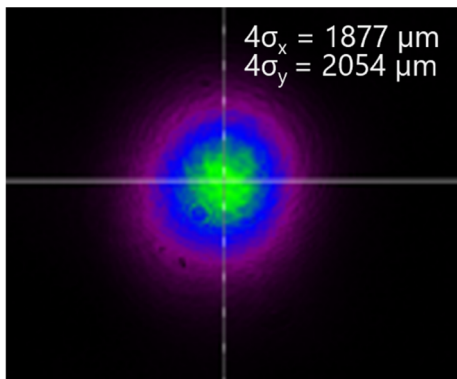


Figure 10: Beam profile of the amplified light.

水平方向、垂直方向ともに約 1.5 という結果が得られ、Thin-disk の利点である品質の良さを確認することができた。回折格子対によるパルス圧縮で 1.5 ps まで圧縮できることを確認している。

3. まとめと今後

リング型共振器による Thin-disk 再生増幅器の開発を行った。リニア型で問題となったマルチモード発振や戻り光の問題が解決でき、10 mJ、 $M^2=1.5$ 、1.5 ps のレーザーパルスの生成を確認した。新型コロナウイルスの影響や、フォトカソードレーザーに問題が見られたため現在実験は中断しているが、再開し次第、クラブ衝突によるルミノシティ増大を実証したい。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 18H01233 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] M. Fukuda *et al.*, “KEK 小型電子加速器におけるレーザーコンプトン散乱を利用した X 線生成強度の改善”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 349-352.
- [2] A. Variola *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 14, 2011.