

クラブ衝突レーザーコンプトン散乱に向けたリング型再生増幅器開発

DEVELOPMENT OF A RING TYPE REGENERATIVE AMPLIFIER FOR CRAB CROSSING LASER-COMPTON SCATTERING

小柴裕也^{A)}, 森田遼介^{A)}, 鷲尾方一^{A)}, 坂上和之^{B)}, 東口武史^{C)}, 浦川順治^{D)}
 Yuya Koshiba^{A)}, Ryosuke Morita^{A)}, Masakazu Washio^{A)}, Kazuyuki Sakaue^{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 trying to demonstrate the enhancement of laser-Compton X-ray by crab crossing of electrons and laser photons. Since the pulse width of laser strongly affects the enhancement factor, we are developing a dedicated laser system based on chirped-pulse amplification (CPA) and thin-disk technology. Although we have succeeded in generating mJ pulses with a linear cavity, thin-disk regenerative amplifier, there remain a few issues. A ring cavity regenerative amplifier is discussed in this paper.

1. はじめに

電子ビームとレーザーの衝突によって 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。これまでのところ実現しているコンプトン X 線源としては Lyncean Technologies が小型のリング加速器と 4 枚鏡の光蓄積共振器を用いて $>10^{11}$ の(平均)輝度を実現しており[1]、これを応用した成果も創出されている[2]。しかし長らくこれを超える小型コンプトン X 線源は報告されておらず、放射光や自由電子レーザー(XFEL)の発展を鑑みると LCS-X 線源のさらなる高輝度化が望まれる。LCS-X の光子数を決定づけるのがルミノシティと呼ばれるパラメータであるが、ルミノシティを増大させるための戦略として 2 つの戦略が考えられる。1 つは電子バンチとレーザーパルスの一度の相互作用におけるルミノシティを増大させる戦略であり、もうひとつは相互作用の繰り返しを高める戦略である。後者においては、加速器とレーザー、双方の繰り返し周波数を高めなければならない。加速器としては超伝導技術を用いたものがこれを可能にする。本研究は前者を実現するために、電子ビームとレーザーパルスの衝突方式としてクラブ衝突を行う。クラブ衝突とはビームに傾きを付与することで衝突時のオーバーラップを増大させることができる技術である。本研究では高周波偏向空胴 (rf-deflector) によって電子ビームに傾き角を与えた状態でレーザーと衝突させ

ることでクラブ衝突 LCS を実現する。クラブ衝突 LCS の模式図を Fig. 1 に示す。

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

クラブ衝突 LCS において、興味があるのはクラブ衝突によるルミノシティの増大率である。既に理論的検討は為されており、次式で記述される[3, 4]。

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

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。ビームパラメータとして Table 1 を仮定し、Eq. (1)のレーザーパルス幅依存性を図示すると Fig. 2 のようになる。

Table 1: Parameters of Electron Beam and Laser Pulse

	Electron Beam	Laser Pulse
Energy	4.7 MeV	1.2 eV(1030 nm)
Intensity	40 pC	10 mJ
Transverse Size	150 μm	50 μm
Duration	4 ps(rms)	-

Figure 2 を見てわかるようにパルス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言えることができる。

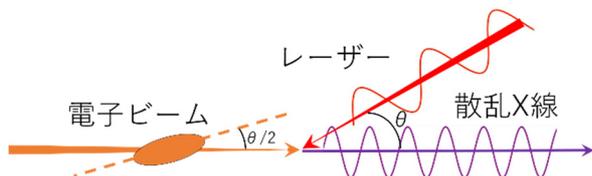


Figure 1: Schematic of crab crossing LCS.

advanced-yuya@asagi.waseda.jp

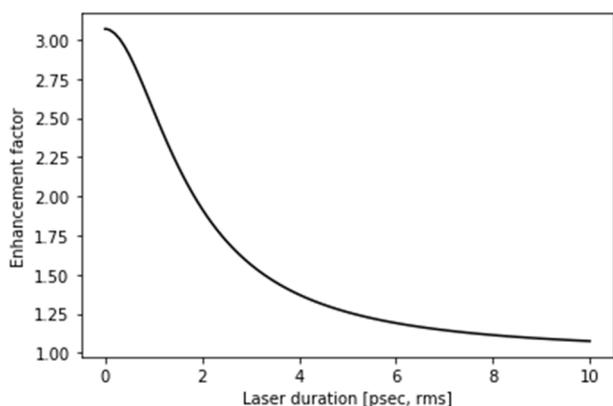


Figure 2: Laser duration dependence of enhancement factor.

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超短パルス性が重要となる。また LCS-X は光子数に比例するため、パルスエネルギーは大きいほど良い。従って高強度・超短パルスなレーザーパルスが適している。将来的に LCS-X の平均輝度の増大を図る場合は、ピークパワーが大きいだけでなく、アベレージパワーも大きい(繰り返しの高い)レーザーが要求されるが、本研究の主目的はクラブ衝突 LCS の実証のため、低繰り返しでも良いのでパルス幅に重きを置いたレーザーパルスが必要となる。当研究室でも可能なレーザー開発として、近年発展が目覚ましいファイバーレーザー及びディスクレーザーの技術を活用したレーザーシステムを開発している。まず初めにレーザーシステムの全容をブロック図にて Fig. 3 に示す。

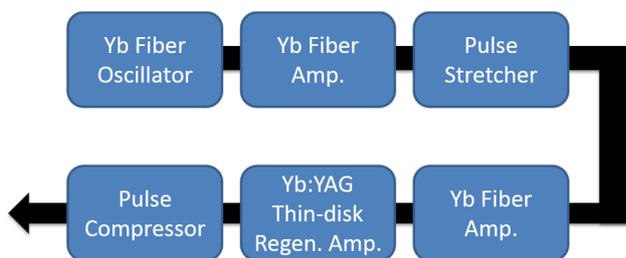


Figure 3: Block diagram of the laser system.

レーザー発振器はコンパクトながらもモードロックパルスを得ることのできる Yb ファイバーレーザーを構築した。光学部品もコンパクトなものを選定することで、全体として A4 サイズ程度のブレッドボードに収まるサイズとなっている。この発振器は共振器中に BPF を挿入することで広がり続けるスペクトル幅、パルス幅をカットしており、ANDi(全正常分散)レーザーと呼ばれるものである。パルスストレッチャーは当初は空間で回折格子を用いていたが、現在は CFBG(チャープファイバーブラッググレーティング)を使用している。シード系はオールファイバーになっているため一度最適化できればアライメントがずれることはない。

2.3 Thin-disk 再生増幅器

このレーザーシステムで重要なのは、パルスエネルギーを nJ から mJ に増幅する再生増幅器である。特に利得媒質として Thin-disk(薄ディスク)形状の Yb:YAG を用いている。従来のロッド形状と比較した Thin-disk 形状の大きな利点として、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防ぐことができる。昨年度開発した Thin-disk 再生増幅器の構成を Fig. 4 に示す。

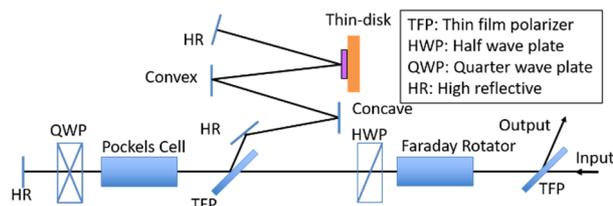


Figure 4: 従来の Thin-disk 再生増幅器。

Figure 4 の左半分が共振器になっており、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構成のため、往復型あるいはリニア型と呼んでいる。Thin-disk の材質は Yb:YAG である。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試みる。現在開発途中の再生増幅器の構成を Fig. 5 に示す。

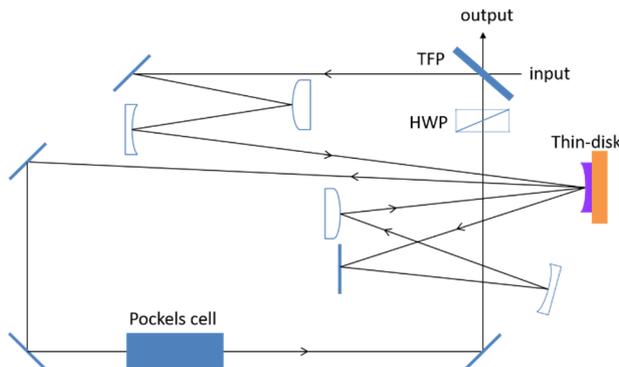


Figure 5: リング型の Thin-disk 再生増幅器。

リングキャビティ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。共振器設計は reZonator というソフトウェアを使用している。共振器内のモードサイズを Fig. 6 に示す。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が重要である。現在の設計では Fig. 6 のように最小値で半径 1 mm 以上、disk 上で直径 3.6 mm となっている。

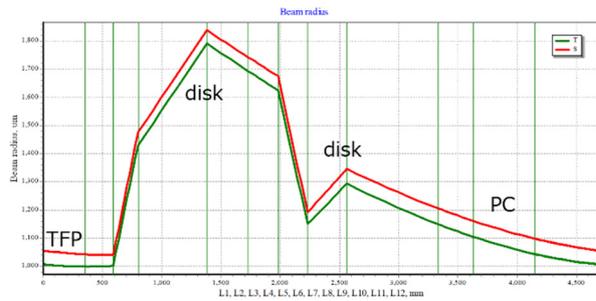


Figure 6: Mode size of the ring cavity.

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ている。リニア型で問題となった寄生発振や戻り光の問題が解決できることを目論んでいる。現状再生増幅には至っていないが、今後出力やスペクトルを評価し、クラブ衝突 LCS の衝突用レーザーとして用いる予定である。

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] G. Krafft and G. Priebe, Rev. Accl. Sci. Tech. 03, 2010.
- [2] E. Ettl *et al.*, J. Synchrotron Rad., 23, 2016.
- [3] A. Variola *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 14, 2011.
- [4] Y. Koshiba *et al.*, “レーザーコンプトン散乱のクラブ衝突化”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 633-636.