

クラブ衝突レーザーコンプトン散乱のためのレーザーシステム開発

DEVELOPMENT OF LASER SYSTEM FOR CRAB CROSSING LASER COMPTON SCATTERING

太田昇吾^{#, A)}, 小柴裕也^{A)}, 高橋孝^{A)}, 鷲尾方一^{A)}, 坂上和之^{B)}, 東口武史^{C)}, 浦川順治^{D)}
Shogo Ota^{#, A)}, Yuya Koshiba^{A)}, Takashi Takahashi^{A)}, Masakazu Washio^{A)}, Kazuyuki Sakaue^{B)},

Takeshi Higashiguchi^{C)}, Junji Urakawa^{D)}

^{A)} Research Institute of Science and Engineering, Waseda University

^{B)} Waseda Institute of Advanced Study, Waseda University

^{C)} Utsunomiya University

^{D)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

X-ray generated by Laser-Compton scattering is expected to be applied for a compact high brightness X-ray source because it has excellent features such as quasi-monochromaticity and high luminance. For the practical use, we need sufficient amount of scattered light, in the other word luminosity. In an actual collision, an optical resonator is often used for laser. In that case, the collision must structurally have some angle. Compared with a head-on collision, the luminosity becomes lower. To solve this problem, the crab crossing is proposed. Crab Crossing is a collision with tilted electron beam. This method can produce pseudo frontal collision and improve luminosity. This study is aiming to demonstrate the increase in luminosity due to the crab crossing. In addition, it is known that the contribution to luminosity due to the crab crossing becomes larger as the pulse width of laser becomes shorter, so that the collision laser is required to have ultrashort pulse duration. In this research, we are planning to realize such pulse duration by constructing Yb fiber laser oscillator and Yb:YAG thin disk regenerative amplifier, which is able to amplify a laser pulse greatly and generate high quality beam. At this conference, we will report the development of the laser system for the crab crossing laser Compton scattering and future prospects.

1. はじめに

早稲田大学ではフォトカソードを用いた RF 電子銃によって高品質な電子ビームを生成しており、様々な応用研究を行っている。本研究で扱うレーザーコンプトン散乱は、電子銃より生成される電子バンチとレーザーパルスとの衝突により高品質な X 線などの高エネルギー光を生成できる現象である。高品質で極短波長の光は放射線癌治療、非破壊検査、原子結晶構造の解析、X 線顕微鏡といった実に多岐の分野への応用が期待されている。X 線を生成する装置としては古くはレントゲンによる X 線管が知られ、近年では SPring-8 に代表されるような放射光施設がよく知られる。レーザーコンプトン散乱による手法の持つ大きな利点は、生成できる X 線が準単色・高輝度、指向性・短パルス性に優れる、波長可変性を持つといった高品質である点ばかりでなく、その装置の小型化が可能である点にある。前述した放射光施設で X 線を生成するには GeV 以上の大きいエネルギーの電子ビームを用いる必要があるため、施設が大型化する傾向にある。対してレーザーコンプトン散乱では低エネルギーの電子ビームを用いても X 線を生成することが可能である。そのため、装置を小型にすることが可能であり、実際本研究室で用いている設備も 3m×5m 程度の部屋に収まるほど非常にコンパクトな装置となっている。

2. クラブ衝突レーザーコンプトン散乱

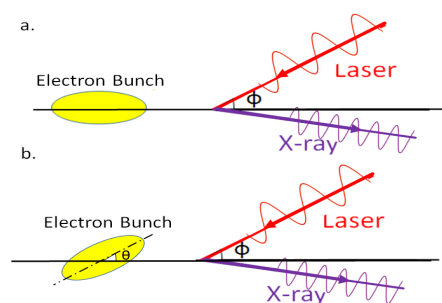


Figure 1: Schema of laser-Compton scattering (a: normal, b: crab crossing).

レーザーコンプトン散乱とは Figure 1-a のように、高エネルギーの電子ビームと低エネルギーの光子 (IR レーザーなど) を衝突させることによって光子がより高エネルギーの光 (X 線など) へ変換されて生成される現象である。よく知られるコンプトン散乱は電子に高エネルギーの光子が衝突することによって低エネルギー光へ変換される現象であるため、レーザーコンプトン散乱はコンプトン散乱の逆過程であるとも見て取れる。このため、逆コンプトン散乱とも呼ばれる。その散乱光子数は散乱断面積とルミノシティの積で表される。

$$N = \sigma L$$

(1)

shougo-6us552@fuji.waseda.jp

散乱断面積の大きさは電子ビームのエネルギーや光のエネルギーなどによって決定され、実質散乱光量を増加させるためにはルミノシティの向上を目指す必要がある。ルミノシティは粒子の衝突頻度を表し、電子バンチとレーザーパルスの重なり具合と言ってもよい。すなわち、正面衝突時で最も重なりが大きくなるとルミノシティは大きくなり、角度を持つことによって徐々にその大きさは減衰する。

クラブ衝突によるレーザーコンプトン散乱とは Figure1-b のように、電子バンチに傾きが付与された状態でレーザーと衝突させるものを指す。こうすることで正面衝突に近い状態を再現することができ、ルミノシティの増加が期待できる。電子バンチへの傾きの付与は RF-Deflector(高周波偏向空洞)によって行い、我々のシステムでは 80 度程度まで傾けることが可能である。

次に本研究で求められる衝突用レーザーの性能について述べる。本研究ではクラブ衝突によってどの程度ルミノシティが増加するのかを実証することに焦点を当てている。そのため、通常の衝突とクラブ衝突とのルミノシティの大きさの比(Crab Ratio と呼称する)が重要となる。Figure2 は本研究で計画している電子ビーム・レーザーのパラメータ(Table 1)で衝突実験を行った場合のレーザーのパルス幅に対する Crab Ratio の値を表しており、レーザーのパルス幅が短いほど顕著にクラブ衝突の影響が出ていることが分かる。すなわち、想定しているパラメータでクラブ衝突による散乱光量増加を実証するためには 1ps 以下程度の超短パルスレーザーが適していることが分かる。

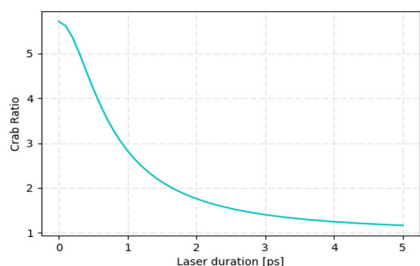


Figure 2: Crab ratio as a function of laser duration[1].

Table 1: Parameters of Electron Beam and Laser Pulse[1]

	Electron Beam	Laser Pulse
Energy	4.2 MeV	1.2 eV(1030 nm)
Intensity	40 pC	10 mJ
Transverse Size	40 μm	50 μm
Duration	3 ps(rms)	0.43 ps(rms)

また、レーザーパルスの 1 パルス当たりのエネルギーが大きいほど散乱光量も大きくなり、クラブ比の効果を確認することが容易となる。さらに、Table2 に示すように電子ビームは RF 電子銃によって生成され、エネルギーは 5MeV 程度、空間電荷効果を抑えるために電荷量は小さく、空間サイズも小さく収束することを想定している。そのため、ルミノシティを向上させるためにはレーザービームの大きさもそれに準じて小さくしなければならない。すなわち、レーザーにも高品質(M スクエアが 1.0 に近い)が要求される。できる限りパルスの増幅を行い、高品質なビームを得るために、本研究では後述する Thin Disk 再生増幅器を採用することを考えている。なお、本節に関する詳細な議論については本年会の小柴氏の報告があるので参照されたい[1]。

3. レーザーシステム

3.1 概要

本節ではクラブ衝突レーザーコンプトン散乱に使用するレーザーについて述べる。前節で説明したように衝突用レーザーには超短パルス性と 1 パルス当たりの高いエネルギーが求められる。1980 年より以前、このような強力な超短パルスレーザーはピーク強度が大きいこと、光学素子へのダメージが大きいことや非線形光学効果を抑制できないことによって実現が困難であった。ところが 1980 年代頃よりシード光のパルス幅を一度伸延してから増幅を行い、最終的に圧縮器によって圧縮して強力な超短パルスを実現するという、CPA(Chirped Pulse Amplification)法が開発[2]され、この手法によるレーザーパルスの増幅が主流となった。本研究も例外ではなく、この CPA 法に乗っ取ったレーザーシステムを構築している。レーザーシステムの概要図は以下のようになっている。

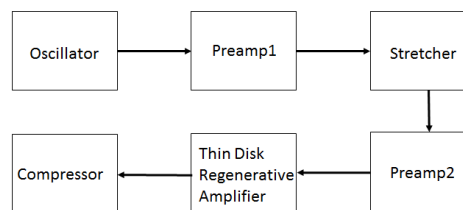


Figure 3: Schema of laser system.

本システムの発振器は Yb ファイバーを用いたリング型発振器であり、前段増幅器は Yb ファイバー増幅器(Stretcher での損失を補うことを目的に挿入されている)、主増幅は Thin Disk 再生増幅器である。Stretcher、Compressor には回折格子を用いる。

3.2 発振器

超短パルス性は発振器によって実現されているため、発振器については本節で詳しく述べる。発振器は以下の図のような構造を取っている。

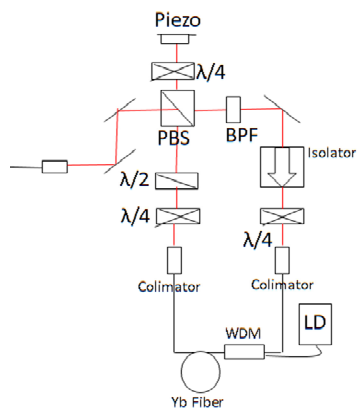


Figure 4: Schema of Oscillator.

図中の BPF は Band Pass Filter を指す。Piezo 素子が内部に挿入されているが、これは電子ビームとのタイミング同期を図るためのものである。そのため、この発振器の共振周波数は加速器の動作 RF 周波数である 2856MHz の 1/48 である 59.5MHz を採用している。本発振器は非線形偏波回転(Nonlinear Polarization Rotation; NPR)を利用することで受動モードロックをかけ、超短パルスを実現している。原理については以下の図で示す。

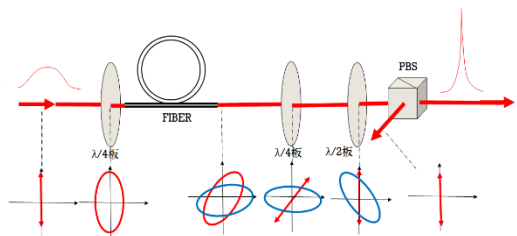


Figure 5: Schema of NPR.

Isolator を起点として考えると S 偏光の光が波長板によって楕円偏光に変換され、光ファイバー中を伝搬することで強い強度の成分は偏光状態の強い回転を受ける。その高強度成分のみが共振器内部を周回する。また同時に弱い成分は損失するように波長板によって偏光状態を調整すれば、モーロックを受動的に引き起こせる。

本発振器の性能は以下の表のようになっている。注目したい点としてフーリエ限界パルス幅が挙げられる。パルス波形をガウシアンであると仮定すればパルス幅 Δt と周波数幅 $\Delta \nu$ の積について次式が成り立つことが知られている[3]。

$$\Delta \nu \times \Delta t \leq 0.441 \quad (2)$$

等式が成り立つ時のパルス幅がフーリエ限界パルス幅であり、すなわち圧縮できる限界のパルス幅を意味する。本発振器によって得られたシード光のフーリエ限界パルス幅は 174fs であり、目標とした 1ps に対して十分である。

Table 2: Parameters of Oscillator

パラメータ	値
共振周波数	59.5MHz
出力	90mW
スペクトル幅	8.9nm
フーリエ限界パルス幅	174fs
パルス幅	3.1ps

3.3 レーザーシステムの性能

本研究ではすでに Thin Disk 再生増幅器に入射する直前までのレーザーシステムは完成している。完成したシステムを以下の図に、出射レーザーの性能を以下の表にまとめた。

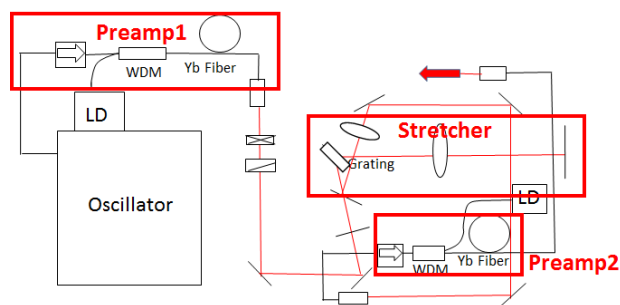


Figure 6: Schema of laser system.

Table 3: Parameters of Laser System

パラメータ	値
共振周波数	59.5MHz
出力	350mW
スペクトル幅	7.75nm
フーリエ限界パルス幅	203fs
パルス幅	170ps

Yb ファイバー増幅器が含まれるため、利得狭帯化 (Gain Narrowing) によってスペクトル幅がやや減少し、フーリエ限界パルス幅が若干伸びているものの依然 1ps に対して十分小さいことが分かる。

4. Thin Disk 再生増幅器

まだ完成には至っていないが、主増幅器の役割を果たす Thin Disk 再生増幅器についてここでは述べる。

4.1 Thin Disk について

Thin Disk は薄いディスク状の利得媒質であり、表面積が大きいため熱消散性に優れる。そのため、熱レンズ効果を抑制し、高品質なレーザービームを得ることができる。高品質であるが故、レンズによって十分に絞ることができるため、レーザーコンプトン散乱においてもレーザービームの径が小さいことはルミノシティの上昇に寄与できる。本研究では使用する利得媒質は Yb:YAG である。Disk は非常に薄いため励起光を一度照射させただけでは十分な反転分

布を形成することはできない。そのため、以下の図のように多重パスにて十分な励起を実現している。

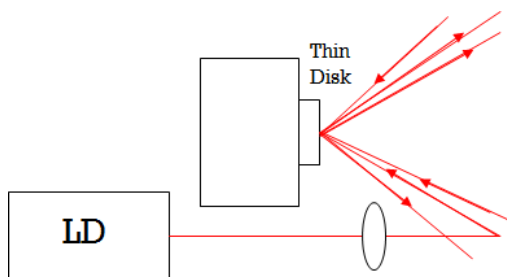


Figure 7: Schema of Thin Disk Pumping.

4.2 Thin Disk の CW 発振試験

実際に Thin Disk が利得媒質として機能するかを確認するため、Thin Disk の前に反射率 99% の ROC(Radius Of Curvature)=1000mm である凹面鏡を設置し、CW 発振が起こるかを調べた(下図。なお Figure9 は本研究で実際に用いた Thin Disk 励起システムである)。出力特性は Figure10 のようになった。

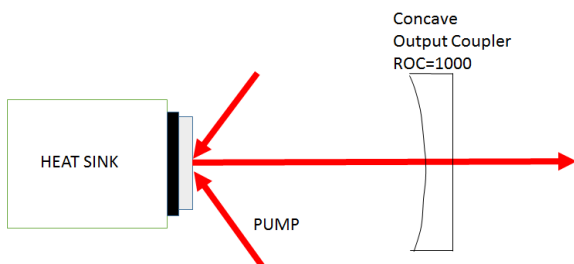


Figure 8: Schema of Thin Disk(CW operation).

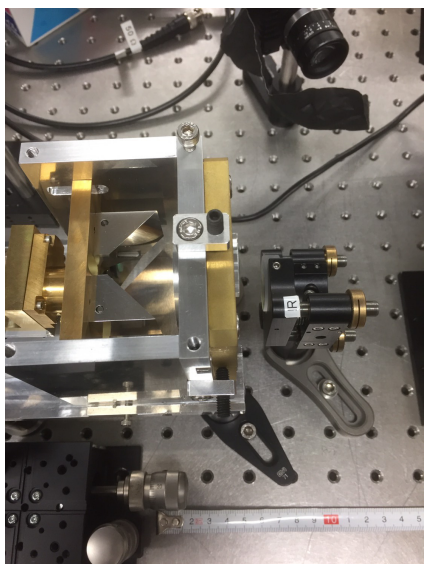


Figure 9: Picture of Thin Disk(CW operation).

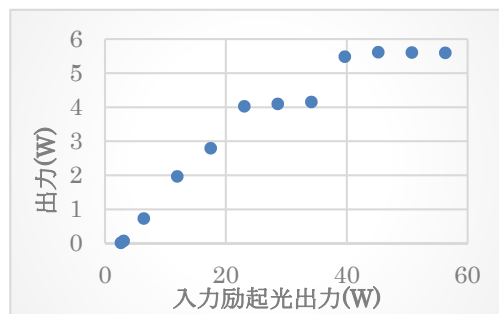


Figure 10: CW power as a function of pump power.

40W 程度の励起光を入力した時、CW 出力は 5W 程度となりそこで飽和した。飽和に至るまでは励起の増加に比例して出力も上昇する。25W 励起時での効率は 15% である。飽和に関して、完全なシングルモード発振となっていないものがあつたためと思われる。今回は初回の発振試験のみであつたため、共振器のモード径と励起スポット径を一致させる等の作業を省いており、両者が合致していない。変換効率は総じて 10-20% 程度であり、通常 Thin Disk Laser は変換効率が 30-40% 程度に届く [4] ことを考えるとかなり低い値であることが分かる。今後、厳密な調整作業を行うとともに、励起系も最適化し、次節の再生増幅器の構築を行っていく予定である。

4.3 Thin Disk 再生増幅器の設計

本研究では以下の図のような Thin Disk 再生増幅器の構築を考えている。

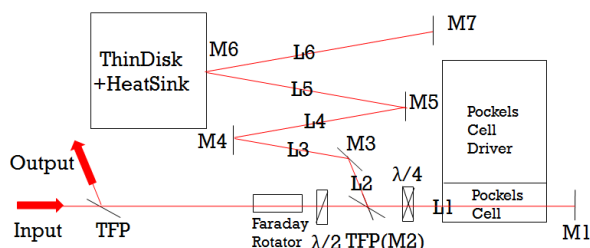


Figure 11: Schema of Thin Disk Regenerative Amplifier.

Thin Disk 再生増幅器を構築するにあたり、できる限り正確な設計が不可欠である。主に満たすべき条件を 3 つ挙げる。

1 つは、共振器長の制限である。再生増幅器は 1 つのパルスのみを強力に増幅するものであるが故、共振器長はパルス間の距離よりも短くなくてはならない。本研究での発振器の共振周波数は 59.5MHz であるため、共振器長はこれを距離に変換した 5.04m 以下でなければならない。また、Pockels Cell の立ち上がり時間内にパルスが戻ってきてしまつては正確な偏光調整ができない。Pockels Cell の立ち上がり時間は測定したものでは 5.3ns であつたため、安全率を 2 として 10.6ns を距離に換算した 3.18m 以上でなければならない。故に共振器長は 3.18m 以上 5.04m 以下

である必要がある。

2 目はモードマッチングである。Thin Disk 表面上でのシード光のビーム径の大きさは、Thin Disk 表面上の励起光の径(Pump Spot Size)の 70-80%程度が理想的である[4]。このずれが大きいほど構成された反転分布からエネルギーを抽出しにくくなる。

3 目は Thin Disk の ROC の変化である。励起光の熱によって Thin Disk の ROC は元の状態から変化する。ある程度変化が起こっても共振状態を維持できる共振器を設計できなければならない。

以上の点に気を付け、ここでは Pump Spot Size を 3.5mm, Thin Disk の ROC を 4500mm と仮定して設計を行った。設計はシミュレーションソフト「ReZonator」を用いて行った[5]。シミュレーションの結果得られた最適な各距離やミラーの ROC の値を以下の表にまとめた。共振器長は 3.8m である。また、Figure12 は各ミラーでのビーム径を示している。図中の赤線は Beam radius 1750 μm を指す。

Table 4: Parameters of the Optical Elements

Distance	Value(mm)	Mirror	Value(mm)
L1	450	M1	Flat
L2	100	M2(TFP)	Flat
L3	200	M3	Flat
L4	400	M4	2000
L5	350	M5	-500
L6	400	M6	4500
-	-	M7	1500

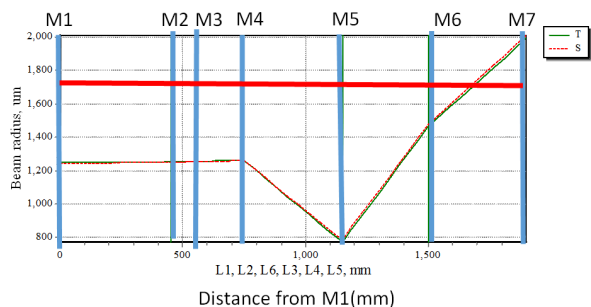


Figure 12: Beam Radius at each Mirror.

Thin Disk(M6)上でおおよそ Beam Radius=1500 μm , すなわち直径 3mm となっていることが分かる。3.5mm よりやや小さい程度である。図中の T, S はそれぞれ Tangential, Sagittal を表し、水平方向と垂直方向を意味する。また、ROC が 3000-5000 の間に変わったとしても以下の図に示すように Thin Disk 上でのビーム径は 3.5mm 以下となっている。図中の赤線は Beam Radius 1750 μm を表す。これにより、概ね再生増幅器の設計は完了することができた。実際には励起後の Thin Disk の ROC 変化等を見極めて最終的な共振器構成を決定することになる。

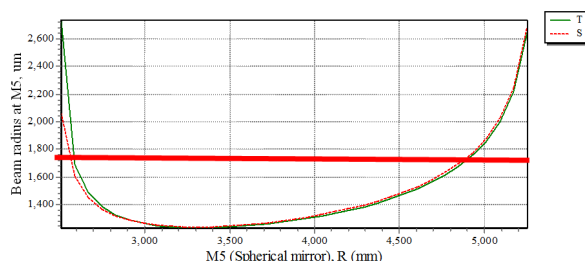


Figure 13: Beam Radius vs ROC(M6).

5. まとめと今後

レーザーコンプトン散乱にクラブ衝突の概念を組み込むことによって散乱光量が増加することを実証することを目的として研究開発を行っている。実験を実施するためには衝突用レーザーの開発が必要であり、そのレーザーの性能には超短パルス性と 1 パルス当たりの高いエネルギー、そして高品質性が求められる。発振器の構築を完了し、主増幅器である Thin Disk 再生増幅器を構築中である。すでに仮設計を終えており、今後は Thin disk の正確な ROC の測定・励起系の再調整を行い、実際の構築を行っていく。今年中にこれらのレーザーシステムを完成させる予定である。その後はクラブ衝突レーザーコンプトン散乱の実験を実施する計画である。

参考文献

- [1] Yuya Koshiba, "Luminosity increase in laser-Compton scattering by crab crossing method", proc of this conference, 2017.
- [2] <http://optipedia.info/laser-handbook/laser-handbook-5th-section/21-1/>
- [3] A.E.Siegman, "Lasers", University Science Books, 1986.
- [4] Adolf Giesen, Jochen Speiser, "Fifteen Years of Work on Thin-Disk Lasers: Results and Scaling Laws", IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics, vol13, 2007.
- [5] reZonator; <http://rezonator.orion-project.org/>