

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

Ryunosuke Kuroda^{1#}, Eisuke Miura¹, Hiroyuki Toyokawa¹, Eriko Yamaguchi¹, Masafumi Kumaki²,
Masaki Koike¹, Kawakatsu Yamada¹,

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

The laser cavity of Ti:Sa laser has been developed for the multi-collision laser Compton scattering (Multi-LCS) in order to enhance the X-ray yields of the LCS hard X-ray source. This cavity is like a regenerative amplification including a laser crystal and a collision point for the LCS. The cavity length is about 7.56 m for the 4 seed pulses injection according to the mode-locked frequency about 79.33 MHz which is corresponding to the pulse spacing of about 12.6 ns. The build up waveform in the cavity has been calculated for our design by numerical simulation. The maximum laser pulse energy and the total stored energy were estimated to be about 180 mJ and 10 J, respectively. The enhanced X-ray yield was also estimated to be about 5.0×10^9 /sec in case of the intra-cavity stored energy of 10 J.

マルチ衝突レーザーコンプトン散乱のための 再生増幅器型レーザー共振器の開発

1. はじめに

現在、独立行政法人 産業技術総合研究所(産総研)では、Sバンド小型電子リニアックを用いたレーザーコンプトン散乱X線源の開発とイメージング応用研究を行っている[1-3]。レーザーコンプトン散乱X線源の開発では、これまで、シングルパルスの電子ビームとレーザーを10Hzで衝突させることにより、エネルギー可変(10keV~40ke)で収量 10^7 photons/secの準単色X線を得ているが、現在、X線収量増加のため、図1に示すようなマルチ衝突レーザーコンプトン散乱X線の生成を目指している。その際、レーザーのマルチパルス化を行うため、再生増幅器型レーザー共振器の開発を行っている。このレーザーシステムでは、発振器からのモードロックレーザーを数パルス切り出し、ストレッチャーにより約10ps程度まで時間幅を拡げ、それをシード光として再生増幅器型の共振器で増幅しながら、ビルドアップ中のレーザーパルスとマルチバンチ電子ビームとの衝突を行い、マルチパルスのX線を生成する。予備的な実験としては外部共振器から取り出した数パルスのレーザーを用いて、これまで数パルスのマルチパルスX線生成に成功しており[4]、本研究の内部共振器タイプの再生増幅器型レーザー共振器での衝突が実現することで、X線収量としては現状の100倍の 10^9 photons/sec以上が可能となる。

2. 理論

マルチ衝突レーザーコンプトン散乱は、マルチ

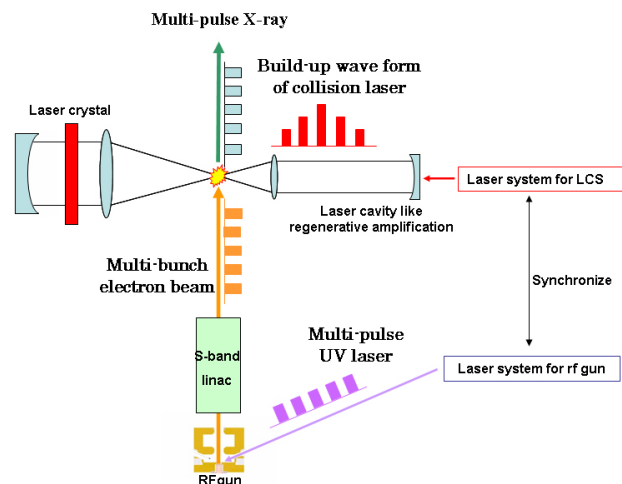


図1：マルチ衝突レーザーコンプトン散乱の概念
バンチ電子ビームと、増幅結晶を有する再生増幅器型のレーザー共振器内で、レーザーパルスが共振器の増幅往復により複数回衝突することで実現できる。レーザーのフルエンスを I は、レーザーの増幅結晶を通過する回数を k とすると、

$$I_{k+1} = TI_s \ln \{ G_k [\exp(I_k / I_s) - 1] + 1 \},$$

となる。ここで、 T は、シングルパルスの透過率、 I_s は、 $I_s = h\nu\sigma$ 、で与えられる飽和フルエンスである。また、 h は、プランク定数、 ν は周波数、 σ は誘導放出断面積である。この時、小信号利得 G は、増幅媒質の長さ(結晶長)を L とすると、

E-mail: ryu-kuroda@aist.go.jp

$$G_k = \exp(g_k L).$$

となる。この利得は、信号パルスが1パスするごとに、

$$g_{k+1} = g_k - (p/I_s)[(I_{k+1}/T) - I_k].$$

で表される関係式で減衰していく。ここで、 p は、利得回復係数で、完全にゲイン回復がなされたときは $p=0.5$ 、ゲイン回復がまったくない場合は、 $p=1$ となるが、我々のモデルでは、簡易的にすべてのパスにおいて $p=0.72$ とする。また、小信号利得係数の初期値は、

$$g_0 = \frac{\eta_a \eta_q \eta_s \eta_o P \sigma}{ALh\nu} = \frac{\eta_a \eta_q \eta_s \eta_o P}{ALI_s},$$

で表せられる。ここで A と P は、ビーム面積と励起光のパワー、 η_o は励起光とレーザーとのオーバーラップ効率、 η_s はストークスファクターとして知られる発光光子のエネルギーをポンプ光のエネルギーで割ったもので、 η_q は量子効率、 η_a は $1-\exp(-\rho L)$ で表される励起光の吸収率である。尚、ここで ρ は、増幅媒質の吸収係数である。

このモデルでは、エンドミラーの近くにレーザー結晶を配置するため、複数のシードパルスを入射したときでも、1つ目のパルスは、2つ目のパルスが到達する前に、増幅結晶を2回通過することになる。また、共振器内のすべてのミラーの反射率や、その他の透過媒質を用いた際の透過率を考慮し、1ラウンドあたりの比減衰率をラウンドロスファクター R とする。

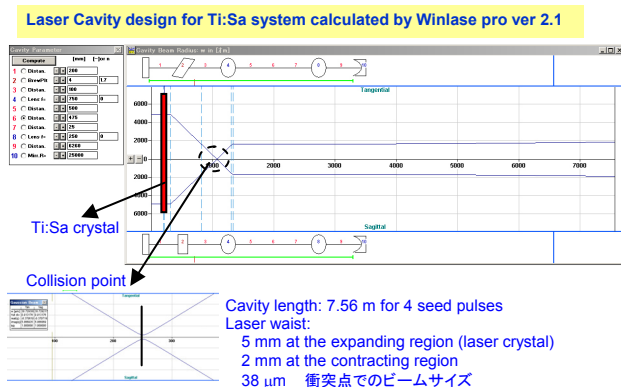


図2：Winlaseを用いた共振器設計

本研究では、モードロック周波数は、79.33MHz (S-band 2856MHz の 36 分周) であるため、パルス間隔は約 12.6ns となり、長さになると約 3.78m である。そのため、共振器長は、入射するシード光の本数とパルス間隔との積の 1/2 となる。本研究では、実際の電子ビームとの真空チャンバー内での衝突を想定し、電子ビーム用Q磁石トリプレット等のコンポーネント類との干渉を防ぐため、比較的長い共振器を選ぶ必要があり、

ここでは、シード数 4 本、共振器長約 7.56m にて設計を行った。

3. デザイン設計

図 2 に WinlasePro2.1 で計算した再生増幅器型レーザー共振器のデザインを示す。共振器長は 4 シード光を入射するため、上述のよう約 7.56m とし、テレスコープの光学系を構成し、短方向はビーム径の大きい領域で、長方向はビーム径の小さい領域としている。ビーム径は、それぞれ 5 mm、2 mm となる。この時、衝突点での集光サイズは、38 μm である。結晶はブリュースターカットのため非点収差が生じるが、結晶長を 4mm 程度に薄くすることで X Y 方向(tangential, sagittal) の衝突点サイズにはほとんど影響がない。計算上ではレンズ集光であるが、実際は透過損失を極力制限するため、凹面鏡を使用する。この際も非点収差が生じるがブリュースター結晶がそれを補正する方向に働く。そのため、フラット結晶を用いる場合は注意が必要である。設計では、R=1500mm と R=500mm の凹面鏡により集光する。エンドミラーには、平面鏡と、凹面鏡を用いるが、凹面鏡の R が大きいほど集光点サイズを小さくすることができるが、共振器の stability が落ちるため、R=25mm の凹面鏡を採用する。この時、結晶上でのビーム径は 5mm となるため、ビームに対して 95%程度の効率でオーバーラップさせるように両側から励起光を入射する。しかしながら、縮小系のビームサイズは 2mm のため、シグナルのビルドアップを計算する際、ミラーのダメージ閾値を考慮したピークエネルギーの制限を加える必要がある。共振器内で用いる波長 800nm 用のミラーは、ダメージ閾値の高い CVI メレス社の TLMB シリーズが想定されるが、カタログ上のダメージ閾値は、300ps のパルス幅の時 8J/cm² である。我々が想定している共振器内のパルス幅は、緩和発振を極力少なくすると同時に、レーザーコンプトン散乱させる電子ビームのバンチ長とほぼ同じ 10ps(FWHM)程度を想定しているため、ミラーのダメージ閾値は、パルス幅の比のルートと仮定すると、約 1.5J/cm² となり、ビーム径の 2mm を考慮すると、共振器内で制限されるビルドアップのピークエネルギーは 180 mJ/pulse となる。ここで表 1 に示すパラメータを用いて、シード光 4 本のパルスあたりのエネルギーを 1 μJ とした時の、本モデルにおける増幅計算の結果を図 3 に示した。ラウンドロスファクターは 95%、励起光のパワーは 730mJ とした。しかしこの時、シードパルスのうち、最初のパルスの増幅が強くなりすぎるため、ビルドアップ波形はフラクチュエー

ションを起こし、ミラーのダメージ閾値である180mJを越えてしまう。そのため、シード4本には、強度変調を行う必要がある。次に、1.0、1.2、1.5、1.8 μJ とした増幅計算を図4に示した。その結果、ビルドアップ波形のフラクチュエーションはなくなり、同時に増幅ピークをダメージ閾値の180mJをギリギリ越えない程度に抑えることができた。この時、増幅ピーク近傍の100パルスを合計すると、共振器内に約10J蓄積したことになり、1パルスあたりの平均エネルギーは、100mJとなる。しかしながら、共振器のロスパラメーターが90%の時は、励起光が820mJ必要であり、蓄積エネルギーも8J程度に落ちることがわかる。すなわち、目標値の10Jを得るためには、共振器長を構成するミラーの数を極力少なくしたレイアウトを構成することが必要である。ここで、再生増幅器型レーザー共振器での蓄積が10J/100 pulse得られた時の、マルチバンチ電子ビームとのマルチ衝突レーザーコンプトン散乱によるX線収量は、表2に示すような現実的なパラメータを仮定すると、 $5.0 \times 10^9/\text{sec}$ の収量が得られることになる。

表1：共振器計算のパラメーター

Laser medium	Ti:Sa
Crystal length (L)	4 mm
Stimulated emission cross section (σ)	$2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
Absorption coefficient (ρ)	3.5 cm^{-1}
Pump light wavelength	532 nm
Emission light wavelength	800 nm
Quantum efficiency (η_q)	91 %
Overlap efficiency (η_o)	95 %
Transmission (T)	98 %
Cavity round loss (R)	95 %, 90%
Beam waist of pump light	5 mm
Pulse width (FWHM)	10 ps (chirped)
Pulse spacing	12.6 ns
Number of seed pulse	4
Pomp light energy	730 mJ, 820 mJ

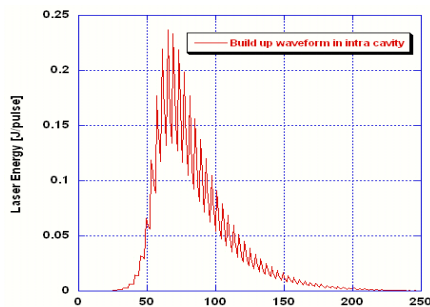


図3：フラットシード時のビルドアップ波形

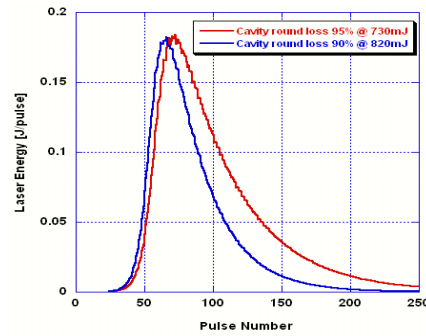


図4：モジュレーション時のビルドアップ波形

表2：マルチ衝突レーザーコンプトン散乱によるマルチパルスX線生成の予想パラメータ

Electron energy	40 MeV
Electron charge	1 nC/bunch
Bunch number	100
Electron spot size (σ_x, σ_y)	40 μm
Electron bunch length	10 ps (FWHM)
Laser wavelength	800 nm
Stored laser power	10 J / 100 pulse
Average laser energy	100 mJ/pulse
Laser spot size (σ_x, σ_y)	38 μm
Laser pulse width	10 ps (FWHM)
Collision angle	170 deg
Maximum LCS X-ray energy	38 keV
LCS photon number	$5.0 \times 10^6/\text{pulse}$
Repetition rate	10 Hz
Total photon yield	$5.0 \times 10^9/\text{s}$

4. まとめ

本研究において、マルチ衝突レーザーコンプトン散乱のための再生増幅器型レーザー共振器の開発を目的とした共振器設計・ビルドアップ計算を行った。その結果、蓄積エネルギーとしては、10 J/100 pulsesが達成可能であり、その際、生成可能なマルチパルスX線の収量は、 $5.0 \times 10^9/\text{sec}$ である。しかしながら、レーザーの蓄積エネルギーは、共振器のラウンドロスパラメーター R に大きく依存するため、共振器内の損失を極力抑えたミラーレイアウトにする必要がある。

参考文献

- [1] 黒田隆之助 他、日本加速器学会誌「加速器」5巻2号p137-143 (2008)
- [2] H. Ikeura-Sekiguchi, R. Kuroda et al., Appl. Phys. Let., 92, 131107 (2008)
- [3] K. Yamada, R. Kuroda et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 608, S7 (2009)
- [4] R. Kuroda et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 608, S28 (2009)