

cERL でのレーザーコンプトン散乱実験用光共振器の開発 DEVELOPMENT OF OPTICAL CAVITIES FOR THE LASER-COMPTON SCATTERING EXPERIMENT AT cERL

赤木智哉 ^{*A)}、本田洋介 ^{A)}、小菅淳 ^{A)}、浦川順治 ^{A)}、羽島良一 ^{B)}、森道昭 ^{B)}、永井良治 ^{B)}、静間俊行 ^{B)}

Tomoya Akagi^{*A)}, Yosuke Honda^{A)}, Atsushi Kosuge^{A)}, Junji Urakawa^{A)},
Ryoichi Hajima^{B)}, Michiaki Mori^{B)}, Ryoji Nagai^{B)}, Toshiyuki Shizuma^{B)}

^{A)}High Energy Accelerator Organization (KEK), ^{B)}Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

Abstract

A nondestructive assay method of isotopes by using quasi-monochromatic gamma-rays based on laser-Compton scattering (LCS) is under development. In order to demonstrate the accelerator and the laser performance required for the gamma-ray source, a LCS experiment is planned at Compact ERL (cERL) at KEK. An optical cavity which can achieve high finesse and small waist size is under construction for the LCS experiment. The new optical cavity comprises two sets of planar 4-mirror cavities.

1. はじめに

加速器の電子ビームとレーザー光子を衝突させるレーザーコンプトン散乱 (Laser-Compton Scattering, LCS) を利用すると従来の放射光施設と比べて、低エネルギーの電子ビームで X 線やガンマ線を生成することが可能である。そのため、小型の高輝度光子源開発において LCS は非常に有用である。また、LCS で生成される X 線やガンマ線のエネルギーは散乱される角度に依存するため、小さな径のコリメータで切り出すことによって準単色の光を得ることができる。

この準単色 LCS ガンマ線の利用として、非破壊核種分析システムの開発が進められている^[1]。LCS ガンマ線源実現のために必要な加速器とレーザーの総合的な性能実証のため、KEK のコンパクト ERL (cERL) で LCS 実験が計画されている^[2]。cERL は将来のエネルギー回収型線形加速器 (Energy Recovery Linac, ERL) の実現のための超電導試験加速器である^[3]。cERL は LCS ガンマ線源に最適な低エミッタンスかつ大電流の電子ビームを生成する事ができる加速器である。高強度ガンマ線生成のためには高出力レーザーシステムが必要である。JAEA 関西研究所では LCS 実験のための Yb 添加ファイバーを用いたチャープパルス増幅システムを開発中である^[4]。このレーザーの設計パラメータを Table 1 に示す。さらに、このレーザーパルスをもつ蓄積することによって平均強度を約 1000 倍に増大させる計画である。この光共振器は高フィネスと衝突点において小さなウエストサイズそして高い安定性を実現しなければならない。ここではこの光共振器の設計と現在の開発状況について報告する。

Table 1: Design parameters of the mode-locked fiber laser.

Average power	100 W
Center wavelength	1040 nm
Bandwidth (FWHM)	2 nm
Pulse duration	1 ps
Repetition rate	162.5 MHz

* akagit@post.kek.jp

2. 光共振器の設計

高強度な LCS ガンマ線を生成するためには、高いフィネスと小さなウエストサイズを同時に達成する必要がある。2 枚鏡の Fabry-Perot 型共振器はウエストサイズを小さく絞る設計にしていると共振器として不安定になってしまう。そのため、2 枚の平面鏡と 2 枚の凹面鏡から構成される 4 枚鏡共振器の開発を行った。この共振器は 2 枚鏡共振器と比べて鏡の横方向のずれに対して安定であるという利点を持つ^[5]。現在開発している光共振器の設計パラメータを Table 2 に示す。共振器の周長は 1845 mm で繰り返し周波数 162.5 MHz に相当する。レーザーパルスと電子バンチを衝突させるため、光共振器の繰り返し周波数と cERL の RF 周波数は整数倍の関係になる。Fig. 1 は光共振器の写真である。この共振器

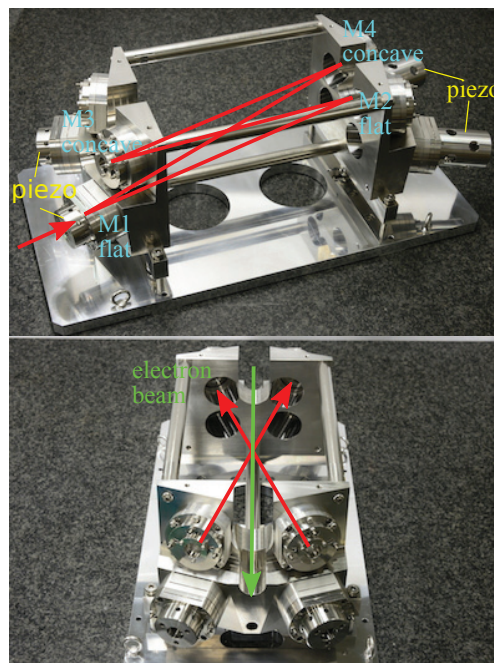


Figure 1: Optical cavity

は 2 台の平面 4 枚鏡共振器を 1 つに組み合わせた共振

器として設計された。この光共振器は直線偏光、円偏光のどちらでも蓄積可能で、例えばそれぞれの共振器に異なった偏光のレーザーパルスを蓄積し、電子ビームとの衝突タイミングを制御することで生成されるガンマ線の偏極を高速に切り替えるといった利用が考えられる。

この光共振器のミラーホルダは全て、アライメント調整のためのおり調整機構を備えている。共振器長を制御するためのピエゾは Fig. 2 のようにミラー M1 と M2 にバネ板を介して取り付けられている。使用しているピエゾの長さは 15 mm と 70 mm である。短いピエゾはレーザーパルスと電子のタイミング同期のために使用され、長いピエゾは共振器の周長を調整するために使う。70 mm のピエゾに 1 kV の電圧を印加することで鏡の位置を約 $20 \mu\text{m}$ 変化させることができる。一組の

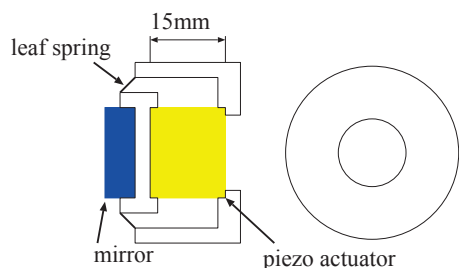


Figure 2: Close view of mirror attachment with the piezo actuator. Two mirrors are attached to the piezo actuator via the leaf spring.

Table 2: Design parameters of the optical cavity

Repetition rate	162.5 MHz
Finesse	5600
Collision angle	18 degree
Spot size at IP (σ_x/σ_y)	20/30 μm
Specification of mirrors	
Substrate material	Fused silica
Diameter	25.4 mm
Reflectivity	
M1	99.9%
M2	99.99%
M3 and M4	99.999%

共振器は 2 枚の平面鏡と 2 枚の凹面鏡で構成されており、凹面鏡の曲率半径は 420 mm である。鏡は REO 社 (Reaearch Electro-Optics, Inc.) と LMA 社 (Laboratoire des Matériaux Avancés) から購入した高反射率ミラーを使用している。レーザーを入射する鏡 M1 の反射率は 99.9% でその他の鏡は M2、M3、M4 の順にそれぞれ 99.99%、99.999%、99.999% である。これらの鏡の反射率から共振器のフィネスの計算値は 5660 となり、このとき共鳴ピークの幅 (FWHM) は 190 pm である。共鳴を維持するためにはこの幅より十分狭い範囲で共振器長を制御する必要がある。

Fig. 3 は共振器中でのレーザーのスポットサイズを示している。平面 4 枚鏡共振器の場合、レーザーの入射と

反射が起こる面 (tangential) とそれに垂直な面 (sagittal) における実効的な焦点距離 (f_t, f_s) が異なるため非点収差を持つ。このため共振器中でのレーザーの形状は一般に楕円形になる。この共振器は垂直平面に鏡を配置しているので、衝突点において水平方向のスポットサイズの方が小さくなり、 σ_x と σ_y はそれぞれ $20 \mu\text{m}$ と $30 \mu\text{m}$ となる。

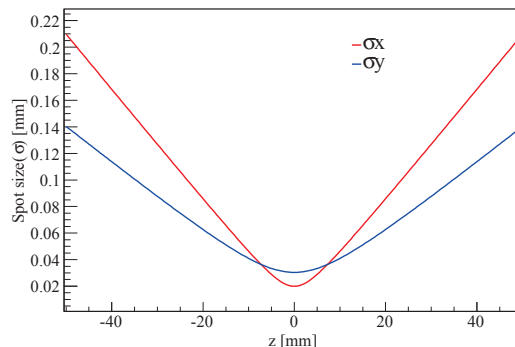


Figure 3: The spot size of laser beam along the propagation in the cavity.

また、この光共振器は真空チェンバーの中に入れてモードロックレーザー発振器や光学系とともにムーバー架台の上に設置する。Fig. 4 にムーバー架台の概略図を示す。このムーバー架台で真空チェンバーごと光共振器の位置を垂直方向と水平方向に動かして電子ビームと衝突させる。

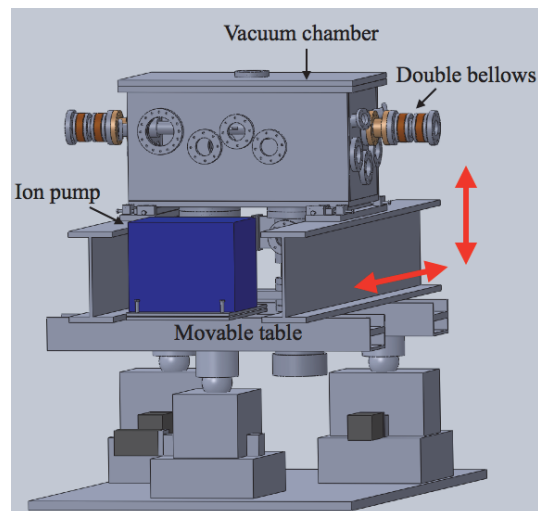


Figure 4: Schematic drawing of the movable table.

3. 性能試験

低出力のモードロックレーザー (GE-100, Time-Bandwidth Products) を使って光共振器の試験を始めた。波長、繰り返し周波数、平均出力、パルス幅 (FWHM) はそれぞれ、1047 nm、162.5 MHz、500 mW、7.8 ps である。

Fig. 5 は共振器の周長をピエゾによって変化させた時の透過光強度である。波長の間隔で共鳴ピークが並び、

レーザーと光共振器のパルス繰り返しが一致した時に最も高いピークとなる。現在、光共振器のパルス繰り返しは大気中で、レーザーの繰り返し周波数 162.257 MHz に対して一致している。このため、cERL の RF 周波数に合わせるためには周長を今よりも若干短く調整する必要がある。

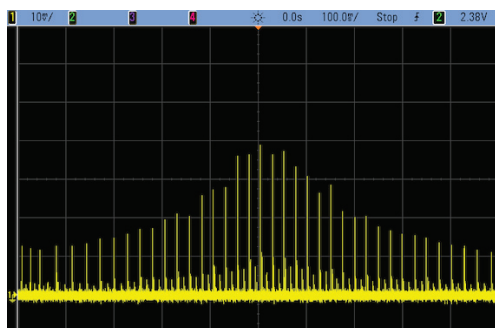


Figure 5: The resonance peaks obtained by scanning the optical path of the cavity.

3.1 ピエゾの周波数応答測定

今回製作したミラーホルダの板バネを含む piezo の周波数応答の測定結果を Fig. 6 に示す。この測定では周波数応答測定器 (Frequency Response Analyzer, FRA) から piezo へ正弦波を入力した。静電容量センサを用いて、ミラーホルダの金属部分を測定することで、piezo の動作を検出し、正弦波に対する振幅と位相の応答を FRA で測定した。測定結果より、この piezo は 5 kHz に共振周波数を持つことが分かった。一般にレーザー発振器の中の piezo はこれよりも速い応答速度を持っている。そこで、我々はレーザー発振器の中の piezo で光共振器の共鳴維持のための速い制御を行い、共振器の piezo でゆっくりとしたタイミング同期の制御を行う。

3.2 ウェストサイズ測定

Fig. 7 はミラー M2 からの透過光形状を測定したものである。この共振器の場合、平面鏡である M2 からの透過光はほぼ平行光であり、測定された透過光のサイズは $\sigma_x = 0.61 \text{ mm}$ と $\sigma_y = 0.51 \text{ mm}$ である。この測定結果と伝播行列を用いた計算から共振器中の集光点におけるレーザーのウェストサイズを推定することができる。ウェストサイズの計算値は $\sigma_x = 30 \mu\text{m}$ と $\sigma_y = 35 \mu\text{m}$ である。ウェストサイズは凹面鏡間の距離によって調整することが可能で、凹面鏡間の距離を今よりも約 2 mm 小さくすることでウェストサイズの設計値を達成することができる。

4. まとめ

高強度 LCS ガンマ線生成のためには高出力のレーザーシステムが必要であり、そのための高フィネスかつ小さなウェストサイズを達成できる光共振器を開発している。2 枚鏡共振器は小さなウェストサイズで不安定になってしまうため平面 4 枚鏡共振器を選択した。現在、低出力モードロックレーザーによる共振器の試験を行っており、 $\sigma_x = 30 \mu\text{m}$ と $\sigma_y = 35 \mu\text{m}$ のウェストサイズ

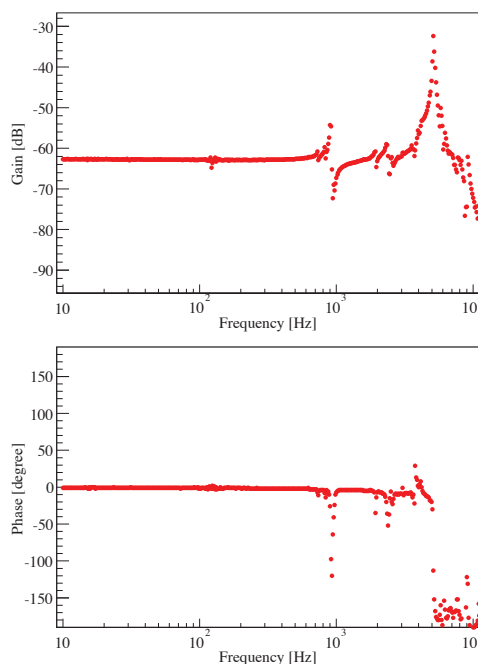


Figure 6: The measured frequency response of the piezo actuator.

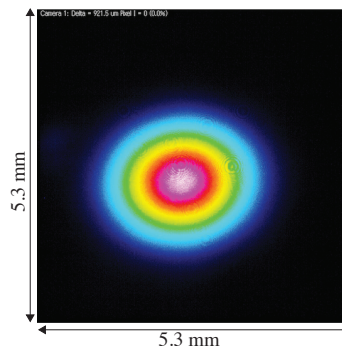


Figure 7: The transmitted laser beam profile from mirror M2.

を得ている。今後は真空中での高出力レーザーの蓄積試験を行う予定である。

参考文献

- [1] R. Hajima et al., "Detection of radioactive isotopes by using laser Compton scattered γ -ray beams", Nucl. Instr. and Meth. A, 608 (2009), pp. S57–S61.
- [2] R. Nagai et al., "Construction of a Laser Compton Scattered Photon Source at cERL", IPAC'14, Dresden, Germany, June 2014, WEPRO003, pp. 1940–1942.
- [3] S. Sakanaka et al., "Progress in Construction of the 35 MeV Compact Energy Recovery Linac at KEK", IPAC'13, Shanghai, China, May 2013, WEPWAP015, pp. 2159–2161.
- [4] M. Mori et al., "Present Status of Laser Development for the Intense laser-Compton Gamma-Ray Source At JAEA", CLEO-PR-2013, Kyoto, Japan, July 2013, MD1-4.
- [5] T. Akagi et al., "Development of a three dimensional four mirror optical cavity for laser-Compton scattering", Nucl. Instr. and Meth. A, 724 (2013), pp. 63–71.