

レーザーコンプトン散乱光源のための光共振器開発

DEVELOPMENT OF OPTICAL CAVITY FOR THE LASER-COMPTON SCATTERING PHOTON SOURCE

赤木智哉 ^{*A)}、小菅淳 ^{A)}
Tomoya Akagi^{*A)}, Atsushi Kosuge^{A)}
^{A)}High Energy Accelerator Organization (KEK)

Abstract

Laser Compton scattering photon sources have several features such as narrow bandwidth, energy tunability, small source size, and polarization switching. In order to produce a high-flux and narrow bandwidth X-ray, a small emittance and high-current electron beam and a high-power and tightly focused laser pulse are necessary. Therefore we are developing a ERL-based LCS source using a laser enhancement cavity at the compact ERL (cERL) in KEK. In this paper, we will describe an issue of frequency drift due to the thermal expansion of the optical cavity.

1. はじめに

光・量子融合連携研究開発プログラムの一環として小型加速器による小型高輝度 X 線源とイメージング基盤技術開発を行っている。レーザーコンプトン散乱 (LCS) を利用することで従来の放射光施設と比較して、低い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なため小型高輝度 X 線源の開発において LCS は有用である。また、LCS を利用した光源は狭帯域、エネルギー可変、微小光源、そして偏光の切り替えが容易であるという特徴をもつ。

LCS 光源の重要なパラメータとして、フラックスとエネルギー広がりがある。高いフラックスと狭帯域の LCS-X 線を得るためには加速器としては大電流かつ低エミッタンスの電子ビームが要求される。エネルギー回収型線形加速器 (Energy Recovery Linac) はこの要求を満たし、LCS 光源に最適な加速器である。レーザーシステムについての要求としては高強度で、電子ビームとの衝突点において絞り込み、かつ電子ビームの周波数と同期させる必要がある。これらは光共振器を用いることで達成することができ、我々は KEK のコンパクト ERL (cERL) において光共振器用いた LCS 実験を行った。

cERL は超伝導 ERL の試験加速器である [1]。ERL と光共振器を組み合わせた LCS 光源は昨年、我々が初めて実験的に実証した [2, 3]。2016 年 3 月の LCS 実験では電子ビームの平均電流を増強し、X 線強度の向上を確認したが、この時レーザーを蓄積していると共振器の温度が急激に上昇する問題があった。共振器の温度が上昇し続けると共振器長が変化し、繰り返し周波数を加速器の周波数に同期し続けることが困難になり安定なレーザーコンプトン散乱を行えなくなる。このため高強度レーザーの安定な蓄積を実現するためには共振器長の熱膨張を抑え、周波数を安定化する必要がある。今回、この問題を解決するために行った対策について報告する。

2. フィードバック制御

高フラックス LCS-X 線を生成するためには、高強度かつ衝突点において絞り込んだレーザーパルスが必要であり、さらにレーザーの繰り返し周波数は電子ビームと同期している必要がある。光共振器は周長を維持しながら電子ビームとの衝突点において小さなスポットサイズを達成することができるように調整可能であることが求められ、このため我々は Fig. 1 の写真のような 4 枚鏡共振器を開発した。共振器の設計値を Table 1 に示す。また、この共振器の素材は SUS304 である。この共振器は 2 つの平面共振器を 1 つに組み合わせた共振器として設計されており、将来的には 2 種類の X 線を同時に生成する等の応用も考えられるが現在は片側の 1 セットのみで使用している。

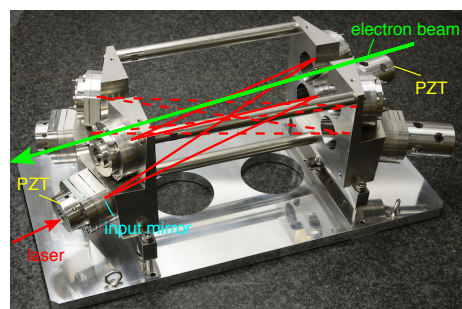


Figure 1: The optical cavity structure.

Table 1: Design Parameters of the Optical Cavity

Repetition rate	162.5 MHz
Finesse	5600
Spot size at the IP (σ_x/σ_y)	20/30 μm

レーザーは Time-Bandwidth 社のモードロック半導体励起固体レーザー (ARGOS) を使用した。主な性能は最大平均出力 45 W、波長 1064 nm、繰り返し周

* akagit@post.kek.jp

波数 162.5 MHz、パルス幅 5.65 ps (rms) である。

LCS 実験を行うためには 2 種類の共振器フィードバック制御が要求される。一つは共振器の共鳴状態を維持するための制御、もう一つは共振器内のレーザーパルスと電子ビームを同期させるための制御（位相同期）である。Figure 2 にフィードバックシステムのブロック図を示す。共鳴維持のための制御ではレーザー発振器内のピエゾを動かし、位相同期は共振器のミラーホルダーに取り付けてあるピエゾで制御する。共鳴維持の方が応答速度の速い制御を必要とするため、より応答速度の速い発振器内のピエゾが使われている。

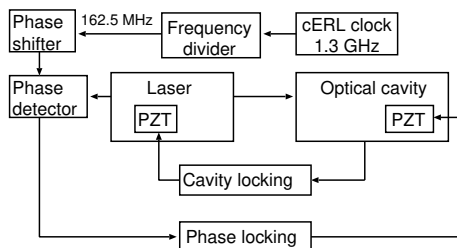


Figure 2: Block diagram of the feedback system.

共鳴状態を維持するためのフィードバック制御に使うエラー信号は共振器の偏光特性を利用した Hänsch-Couillaud 法 [4] や Pound-Drever-Hall (PDH) 法 [5] により生成することができ、現在のセットアップでは PDH 法を採用している。

3. 共振器の温度上昇

共振器のミラーホルダーを取り付けているベースブロックに熱電対を取り付け温度を測定している。共鳴状態維持のフィードバックを動作させて、レーザーを蓄積していると、共振器の温度が上昇することは以前から確認されていた。共振器の温度が上昇すると、共振器長が伸び共振周波数がずれていってしまうが、LCS 実験中は加速器と位相同期させる必要があるため、一定の共振器長を維持できるように、共振器に取り付けている 2 つのピエゾのうちロングピエゾを手動で調整することにより、温度による周長の変化分を補償している。しかし、2016 年 3 月の実験中はこのピエゾで補償しきれないほどの共振器長の変化があった。Figure 3 に 2015 年 3 月と 2016 年 4 月に測定した共振器と共振器中のビームパイプの温度変化を示す。このグラフが示すように、以前は 7 時間で約 1°C の温度上昇だったが、1 年後には 2 時間で約 1.5°C も温度が上昇するようになっている。共振器に蓄積されているレーザーの平均蓄積強度は 2015 年 4 月が 10 kW、2016 年 3 月が 6 kW とむしろ以前のほうが大きい。またこの 1 年間は、何度か真空パージして作業を行っているが共振器ミラーの取り外しは行っていない。

共振器のロングピエゾで調整できる共振器長は周長にして約 30 μm で、これは繰り返し周波数の 162.5 MHz に対して 2.64 kHz 相当である。測定によって共振器の温度が 1°C 上昇すると周波数が約 -2 kHz、周長に

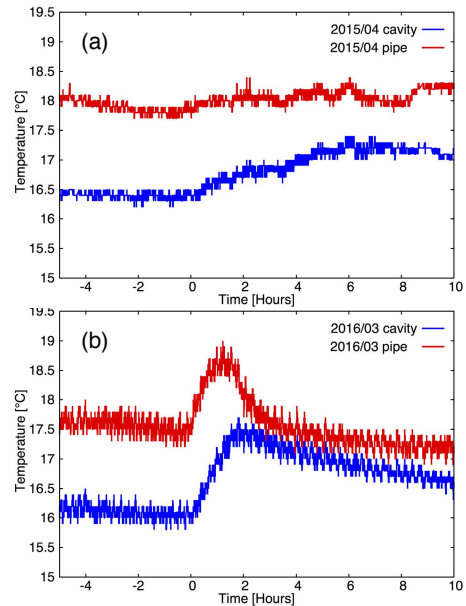


Figure 3: Measurement of changes in the temperature of the optical cavity.

して 22.7 μm 相当伸びるということが分かっている。つまり、共振器の温度が約 1.3°C 上昇するとロングピエゾによる調整可能範囲を超えてしまい、共振器が加速器と同期できなくなってしまう。実際、2016 年 3 月の実験では温度上昇による共振器の周波数変化の影響により実験時間が非常に制限されてしまった。

4. 散乱測定

共振器中を通過している電子ビームパイプを取り外しても共振器の温度上昇の様子に変化がなかったため、共振器ミラーの散乱がインストール時よりも増えたことが急激な温度上昇の原因と考えた。そこで共振器ミラーを取り外し、クリーニングを行った。ミラーのクリーニングには Photonic Cleaning Technologies 社のファーストコンタクトを使用した。この製品はポリマーで構成された複合溶液で、ミラー表面に塗布後、乾燥してから剥がすことで表面の汚れを取り除くことができるというものである。

ミラーのクリーニング作業にあたってはミラー表面の散乱測定系を構築し、散乱光強度を測定しながら行った。Figure 4 にセットアップを示す。散乱を観測しやすくするためグリーンレーザーを使用した。レーザーのスポットサイズを広げて共振器のミラー表面に入射し、散乱光を CMOS カメラで観測した。CMOS へは 1/10 に縮小し像転送を行っている。

Figure 5 に散乱測定結果の例を示す。クリーニングを何度か繰り返したが、何枚かのミラーについて、どうしても取り除くことのできない点があった。この点はミラー中心付近にあり、汚れではなく損傷の可能性もある。そこで手持ちのミラーから、クリーニング後、散乱の少ないものを選び共振器を再構成した。再構成した共振器は真空中から取り出した直後と比較して 4 枚のミラーの合計の散乱強度が 8 割となっ

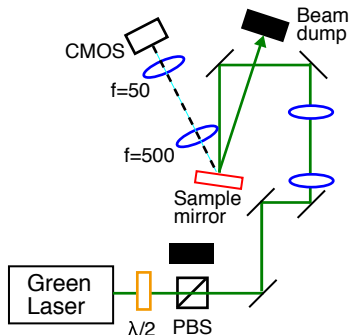


Figure 4: Setup of the mirror scattering measurement.

た。また、共振器を再構築する際に共振器のベースブロックをつないでいる3本の円形支柱をスーパーインバー製のものに交換した。これによって、さらに共振器長の熱による変化は抑えられると考えられる。

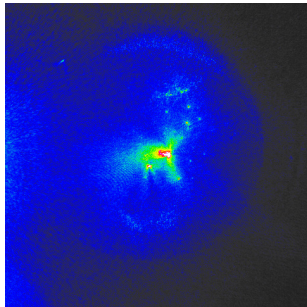


Figure 5: Measurement of scattering loss of the cavity mirror.

5. ミラー交換後の共振器性能

共振器のミラーを散乱の小さなものに交換して、共振器性能の変化を確認するため、まずフィネスを測定した。測定は共振器からの透過光強度の減衰時間を測定する方法で行った。Figure 6に減衰時間測定結果の例を示す。このプロットを指数関数でフィッティングして減衰時間 τ を求める。減衰時間の測定値はミラー洗浄の前と後でそれぞれ、 $\tau_1 = 3.1 \pm 0.1 \mu\text{s}$ 、 $\tau_2 = 6.3 \pm 0.3 \mu\text{s}$ であった。フィネスは $F = 2\pi c\tau/L$ の式で算出することができる。ここで共振器の周長 $L = 1.845 \text{ m}$ 、 c は光速である。フィネスの測定値はミラー交換の前と後でそれぞれ $F_1 = 3200 \pm 100$ 、 $F_2 = 6400 \pm 300$ となる。メーカー仕様のミラー反射率から期待されるフィネスは5600なので、ミラー交換後フィネスについてはそれ以上のフィネスが得られていることになる。

次に、共振器にレーザーパルスを蓄積して温度と周波数の変化を測定した。Figure 7は共振器に1時間レーザーを蓄積したときの周波数の変化である。このプロットからミラー交換後は、周波数の変化が明らかに小さくなっていることが分かる。これには共振器の支柱をスーパーインバーに変えたことも主な理由と考えられるが、この時共振器の温度上昇についてもほとんど見られなかったため、ミラーの散乱

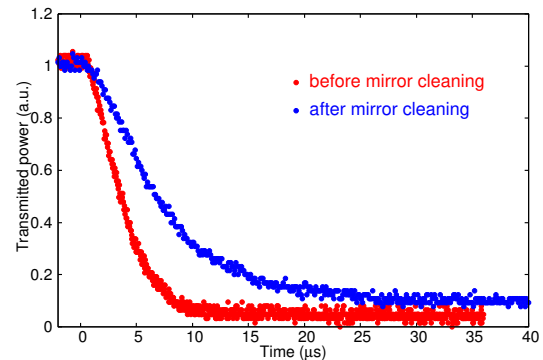


Figure 6: Measurement of the decay time of the laser power in the optical cavity.

が減ったことも効果があったと考えられる。

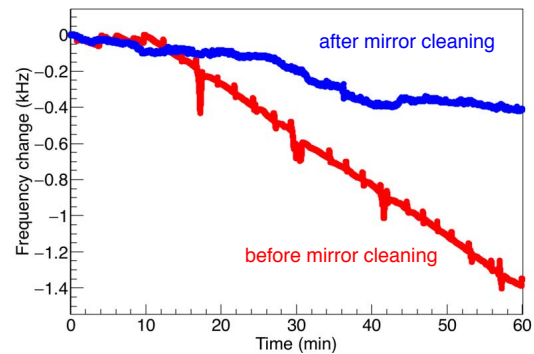


Figure 7: Measurement of changes in the frequency of the optical cavity.

6. まとめ

LCS 実験のための光共振器は、共鳴状態を維持するとともに、加速器と同期させるため、周波数を一定に保つ必要がある。2016年3月の実験で急激な温度上昇が見られるようになったが、ミラーのクリーニングと交換により、共振器の温度上昇を抑えることができ、それに加えて共振器の支柱をスーパーインバー製のものに交換することで周波数の変化を小さくした。フィネスについてもミラーの反射率から期待される値の半分程度になっていたが本来の値に回復したことを確認した。これにより共振器の増大率も向上することが期待される。ミラーの劣化の原因はまだ特定されていないが、クリーニングでは取り除く事ができなかった点がミラー表面に見られる。これについて損傷かあるいは何かが付着しているのか調べることで、共振器の性能を劣化させないための対策について検討する。

謝辞

本研究は文部科学省委託事業光・量子融合連携研究開発プログラム「小型加速器による小型高輝度X線源とイメージング基盤研究開発」によるものである。

参考文献

- [1] R. Takai *et al.*, “Progress on the Compact ERL Commissioning and Efforts toward Beam Utilization”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 2015, pp. 181-186.
- [2] R. Nagai *et al.*, “Demonstration of laser Compton-scattered photon source at the cERL”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 2015, pp. 1328-1330.
- [3] T. Akagi *et al.*, “Development of a compact high brightness X-ray source via laser-Compton scattering”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 2015, pp. 1331-1333.
- [4] T.W. Hänsch and B. Couillaud, “Laser frequency stabilization by polarization spectroscopy of a reflecting reference cavity”, *Opt. Commun.* **35**, 441 (1980).
- [5] R.W.P. Drever *et al.*, “Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator”, *Appl. Phys. B* (1983) pp. 31-97.