

Gamma-ray generation experiment using the 3D 4-mirror optical resonant cavity: Development of cavity control system

Ryuta Tanaka^{*A)}, Tomoya Akagi^{A)}, Sakae Araki^{B)}, Junji Urakawa^{B)}, Tsunehiko Omori^{B)},
Toshiyuki Okugi^{B)}, Masao Kuriki^{A)}, Kazuyuki Sakaue^{C)}, Hiroataka Shimizu^{B)}, Tohru Takahashi^{A)},
Nobuhiro Terunuma^{B)}, Yoshisato Funahashi^{B)}, Yosuke Honda^{B)}, Hitoshi Yoshitama^{A)}, Masakazu Washio^{C)},

^{A)}Graduate School of Advanced Science of Matter, Hiroshima University
Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8530

^{B)}High Energy Accelerator Research Organization
Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{C)}Research Institute for Science and Engineering, Waseda University
Shinjuku-ku, Tokyo, 162-0044

Abstract

The polarized gamma ray source based on Laser-Compton scheme have been developed for the purpose of developing a polarized positron source for the ILC. We installed new 3 dimensional 4 mirror cavity in the KEK-ATF ring which enhances laser pulse energy for effective laser-electron interaction. We report initial performance of a high precision feedback system to control length of the cavity with the accuracy of better than 110 pm.

3次元4枚鏡レーザー蓄積共振器を用いたガンマ線生成実験 共振器制御システムの開発

1. はじめに

国際リニアコライダー (ILC) の偏極陽電子源として、レーザーコンプトン散乱からの偏極ガンマ線を用いた方法が検討されている。この方法では、効率よく対生成が可能な 10MeV 以上のエネルギーのガンマ線を生成するために必要な電子ビームのエネルギーが 1GeV 程度でよいという利点がある。また、ガンマ線の偏極は電子ビームに衝突させるレーザー光の偏極により操作可能であり、偏極切り替えが容易となる。

レーザーコンプトン散乱からのガンマ線による偏極陽電子生成は実験的検証は既に行われており [1], ILC が要求する陽電子数を満たすためのガンマ線強度の増大が課題となっている。ガンマ線強度は衝突点での電子ビームとレーザー光の強度に依存する。我々はレーザー光強度増大に着目し、レーザー蓄積共振器を用い、モードロックレーザーパルスと共鳴させることで強度の増大を図っている。

これまで我々は、高エネルギー加速器研究機構にある先端加速器 (KEK-ATF) に、2枚の凹面鏡で構成された Fabry-Perot 共振器を導入し、開発を行ってきた [2]。それによってレーザー光の増大率 760 倍、1.5kW の強度蓄積に成功した。また、強度を維持したまま、レーザーパルスと電子ビームを同期し、ガンマ線生成に成功した。検出されたガンマ線は、1バンチ/トレインで 1回の衝突あたり 10.8 ± 0.1 個の検出であった。

更なるガンマ線取量の増大のためには、電子ビームとの衝突点でのレーザー光のスポットサイズを小さく絞りこむことが重要である。そのために、安定的に小さなスポットサイズが実現可能な、4枚の鏡を3次元的に配置した3次元4枚鏡共振器の開発を行い [3], 2011年

の秋に KEK-ATF に導入した。共振器の主要なパラメータを表 1 に示す。構成する鏡の反射率を高めることにより、増大率を 1850 倍にした。その一方で共振器の共鳴幅が 110pm となり、高精度の共振器長制御が求められるようになった。



図 1: 3次元4枚鏡共振器

表 1: 共振器の比較

パラメーター	Fabry-Perot	3次元4枚鏡
入射鏡の反射率	0.9964	0.999
反射鏡の反射率	0.9994	0.9999×3
増大率	760	1850
共鳴幅	300pm	110pm
衝突点でのレーザーサイズ (1σ)	$30\mu\text{m}$	$15\mu\text{m}$

* r-tanaka@huhep.org

2. 3次元4枚鏡共振器

2.1 蓄積偏光特性

3次元4枚鏡共振器では、共振器内の光路が3次元的になっていることによる像の回転が起こる。そのため、直線偏光は共振器内のレーザー光と、共振器内に入射されるレーザー光の偏光方向が異なるために共鳴することが出来ない。一方、円偏光では位相の変化として現れるため、共振器長を制御することによって共鳴可能となる。また、左右の円偏光に対して位相の変化が逆になるために、左右偏光で異なった共鳴条件を持つ。

図2は入射レーザーを直線偏光とし、共振器長を変化させた際の透過光強度である。左右の円偏光成分が異なった共鳴条件で共鳴していることが分かる。

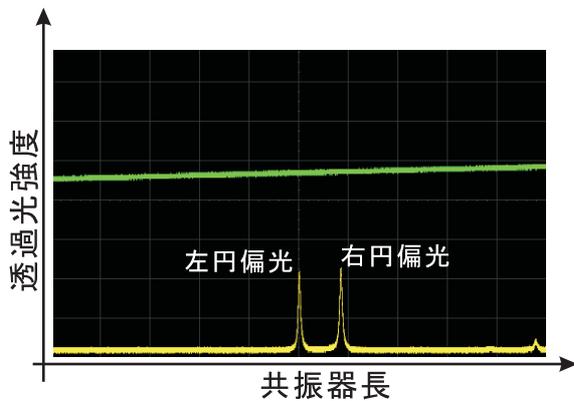


図2: 円偏光の分離

2.2 蓄積偏光特性を用いた共鳴維持^[4]

共振器の共鳴維持には共鳴点から変位を誤差信号として検知する必要がある。3次元4枚鏡共振器に、直線偏光レーザーを入射すると、直線偏光は、共振器内に蓄積した円偏光成分と、入射部で反射され蓄積できない成分に分離する。入射した成分と、反射された成分の位相差は、共振器の共鳴状態の情報を持っているため、これを検出することによって、誤差信号とすることが出来る。

図3に誤差信号を取得するセットアップを示す。入射レーザーは偏向ビームスプリッター (PBS) を通ることにより、直線偏光となり、共振器に入射している。共振器からの反射光は、前述の円偏光の2成分の重ね合わせによる直線偏光となっており、2成分位相差は、直線偏光の向きの変化として検出することができる。これを測定するために PBS でレーザー光を p と s 成分に分けて光検出器 (PD) で強度を測定し、差分を測定している。また、非共鳴状態における p 成分と s 成分の強度が等しくなるように、予め半波長板 (HWP) で調整している。

3. 共振器制御

3.1 共鳴維持

図4.(A)は共振器長を変化させた時の透過光強度の変化である。入射光は完全な直線偏光でなく、左右の円偏光の強度を2:1にした楕円偏光にしている。これは共鳴

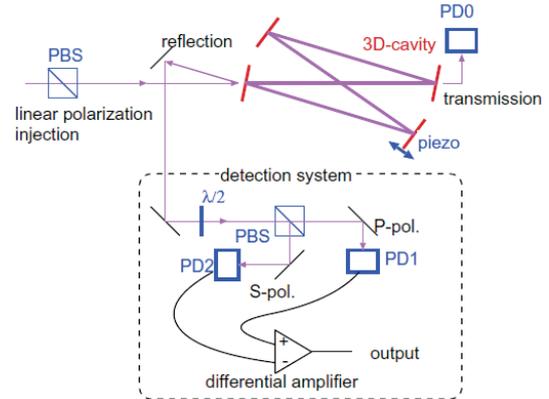


図3: 共鳴維持セットアップ

しない光の割合を低くすることにより蓄積強度を上げることが可能である。

共鳴維持のために誤差信号をPID回路に入れて、レーザーの内部にある共振器を制御した。図4.(B)に制御結果を示す。図4.(A)のピーク強度で強度が維持されていることが分かる。その結果、共振器内に2.6kWの蓄積に成功し、Fabry-Perot共振器の蓄積強度を上回る結果を得た。

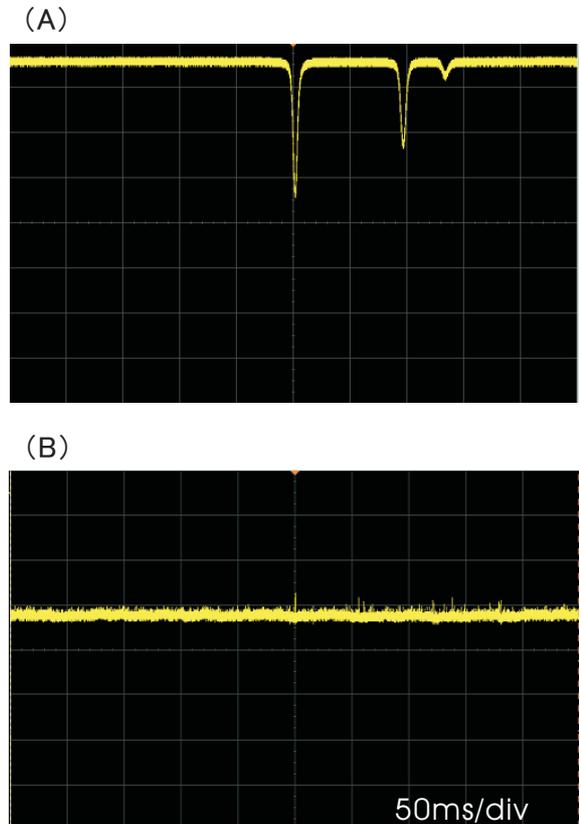


図4: 共鳴維持制御

3.2 電子ビームとのタイミング同期

レーザー光としてパルスレーザーを用いているために、レーザーパルスと電子バンチの同期とレーザー共鳴維持の二つの制御を同時に実現させなくてはならない。

図5は電子ビームとレーザーパルスの位相差に対する検出器の信号強度(すなわちガンマ線数)である。位相差が5.2rad 近くのとときにガンマ線が生成されていることが分かる。

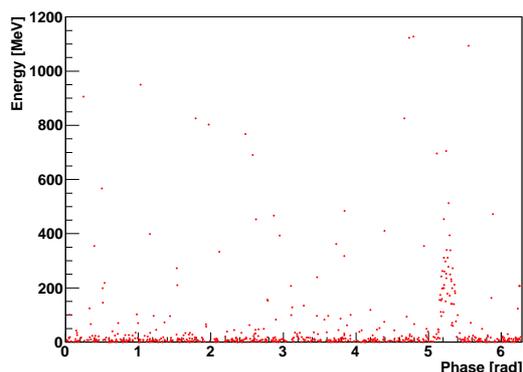


図5: タイミング非同期でのガンマ線生成

同期制御のための帰還回路を加えて、制御した結果を図6に示す。同期精度は、 1.86×10^{-2} rad、時間に換算すると8.29psであり、KEK-ATFの電子バンチの長さの30psより短いので十分な精度で制御できている。また、ガンマ線収量は1バンチ/トレインで約32個という結果を得た。

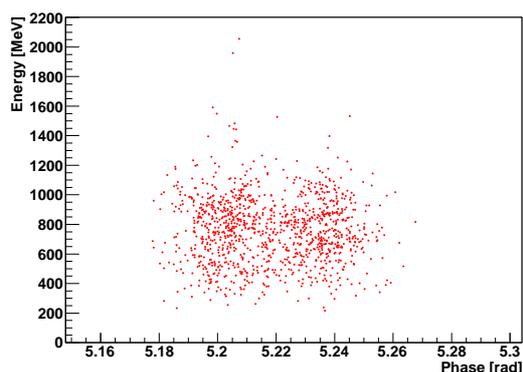


図6: タイミング同期でのガンマ線生成

4. まとめと今後の予定

ILCの偏極陽電子源の為にレーザー蓄積共振器を開発している。高輝度化には、共鳴幅が狭い共振器を制御しなくてはならないが、共鳴幅110pmと狭い共振器の共鳴維持制御に成功し、2.6kWの蓄積に成功した。また、蓄積を維持したまま、電子ビームとレーザーパルスのタイミング同期に成功しガンマ線生成に成功した。ガンマ線収量が約32個と過去最高の値を更新した。

2012年秋の加速器運転の前に、鏡の反射率を更に高いものに変更し、増大率6000の共振器でのガンマ生成を予定している。また、共振器制御に問題がなければ、17000の増大率も計画している。

参考文献

- [1] T. Omori, *et al.*, Efficient Propagation of Polarization from Laser Photons to Positrons through Compton Scattering and Electron-Positron Pair Creation, *Phys. Rev. Lett.* 96 114801, 2006
- [2] S. Miyoshi, *et al.*, Photon Generation by laser-Compton scattering at the KEK-ATF, *Nuclear Instruments and Method in Physics Research A* 623 576-578, 2010
- [3] 赤木智哉, *et al.*, ILC 偏極陽電子源の為に3次元4枚鏡共振器を用いたガンマ線生成実験, 第8回日本加速器学会年会, 2011
- [4] Y.Honda, *et al.*, Stabilization of a non-planar optical cavity using its polarization property, *Opt. Commun* 282 3108, 2009