

GAMMA-RAYS GENERATION EXPERIMENT WITH 3D 4-MIRROR CAVITY FOR ILC POLARIZED POSITRON SOURCE

Tomoya Akagi^{#A)}, Sakae Araki^{B)}, Junji Urakawa^{B)}, Tsunehiko Omori^{B)}, Toshiyuki Okugi^{B)}, Hiromi Kataoka^{D)}, Masao Kuriki^{A)}, Tadashi Kon^{D)}, Kazuyuki Sakaue^{C)}, Hiroataka Shimizu^{B)}, Tohru Takahashi^{A)}, Ryuta Tanaka^{A)}, Nobuhiro Terunuma^{B)}, Yoshisato Funahashi^{B)}, Yosuke Honda^{B)}, Shuheji Miyoshi^{A)}, 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

^{D)} Faculty of Science and Technology, Seikei University

Musashino, Tokyo, 180-8633

Abstract

We are conducting gamma-rays generation experiment by the laser-Compton scattering using a Fabry-Perot cavity at the KEK-ATF. Now, we are developing a 3D 4-mirror cavity. By using a 3D 4-mirror cavity, small laser spot can be achieved with stable resonant condition. In addition, we aim more than 1,000 times enhancement of input laser power by a 4-mirror cavity to increase the number of gamma-rays.

ILC 偏極陽電子源の為の 3次元4枚鏡共振器を用いたガンマ線生成実験

1. はじめに

国際リニアコライダー (ILC) の偏極陽電子源開発として、レーザーコンプトン散乱を利用したガンマ線生成を行っている。レーザーコンプトン散乱を利用する陽電子生成の利点は、対生成によって陽電子を生成するために必要な 10MeV 程度のガンマ線生成に要求される電子ビームのエネルギーが約 1GeV と、既存の電子加速器で開発を行える程度であるということである。さらにコンプトン方式ではレーザーコンプトン散乱によって生成されるガンマ線の偏極をレーザーの偏光を調整することでコントロール可能である。

レーザーコンプトン方式による ILC 偏極陽電子生成の課題は大強度陽電子ビーム生成に必要なガンマ線強度を生成することである。そこで我々は Fabry-Perot 共振器にモードロックパルスレーザーを蓄積し、レーザー強度を増大すると同時に集光して電子ビームとの衝突点における光子密度を上昇させて、生成されるガンマ線の強度を上げるという方法を採用している。

我々は既に KEK-ATF の 1.3GeV 電子ビームと 2 枚の凹面鏡で構成された Fabry-Perot 共振器に蓄積したレーザーを衝突させ、ガンマ線を生成することに成功している。このときの共振器のパラメータを表 1 に示す。使用したレーザーは繰り返し周波数 357MHz のモードロックレーザーで、これは ATF 加速器の電子バンチ間隔に対応している。レーザーの

波長は 1064nm、出力が 10W である。

表 1: 2 枚鏡共振器のパラメータ

共振器長	420mm
ウエストサイズ(σ)	30 μ m
増大率	760 倍
レーザー蓄積パワー	1.5kW

ガンマ線生成実験では電子 1 バンチ/トレインとコンプトン散乱を行い 1 回の衝突で 10.8 ± 0.1 個のガンマ線を検出した。ATF の電子の周回が 2.16MHz なので 1 秒あたり 2×10^7 個に相当する^[1]。また、我々はマルチバンチ電子ビームとのコンプトン散乱も行っており、バンチ毎のガンマ線量を測定できるように検出器の改良を進めている。

ILC の偏極陽電子源として要求されるガンマ線量を満たすためには現在得られているガンマ線量を 2 桁以上改善する必要がある。共振器への入射レーザー強度については現在出力が 10W のレーザーを使用しているがより高出力のレーザーを用いれば当然得られるガンマ線量は増える。例えばファイバーレーザー増幅によって数十 W の出力を得ることは技術的には可能であると考えられるが、そう簡単には出来ないためひとまずは既存の 10W レーザーを使用する。共振器の増大率については、後に述べる 4 枚鏡共振器であれば反射率 99.999%程度の鏡を使用すれば増大率 1 万倍以上を得ることができる。た

[#] akagi@hep.adsm.hiroshima-u.ac.jp

だし、このとき共鳴を維持するために要求される共振器長制御の精度はサブオングストローム以下であり技術的に非常に困難であることが予想される。我々はまず、反射率 99.99%の鏡を用いて増大率 1000 倍以上を目指す。

2. 3次元4枚鏡共振器の開発

現在、レーザーコンプトン散乱によって生成されるガンマ線強度をさらに上げるために3次元4枚鏡共振器の開発を進めている。3次元4枚鏡共振器は平面鏡2枚と凹面鏡2枚で構成され、凹面鏡間でレーザーを集光し電子ビームとの衝突を行う。

生成されるガンマ線量を増やすためには、より高反射率の鏡を使用して共振器内のレーザーパワーの増大率を上げる事と電子との衝突点においてレーザー光のウエストサイズを絞ることが必要となる。しかし、2枚の鏡を用いた共振器では増大率の向上と集光性能の向上を同時に達成することが原理的に困難である。そこで我々は増大率と集光性能を同時にかつ共振器として安定に達成することができる3次元4枚鏡共振器の開発を選択した。次に3次元4枚鏡共振器の特徴について述べる。

3. 3次元4枚鏡共振器の特徴

3.1 偏光特性

3次元4枚鏡共振器では円偏光レーザーが蓄積する。直線偏光のレーザーを共振器に入射すると右回りと左回りの円偏光成分に分離して共鳴する^[2]。

3次元4枚鏡共振器で直線偏光が蓄積できない理由は、レーザーが3次元的な光路を通る際に像の回転が起き、それによって偏光が維持されないためである。一方、円偏光に対する像の回転の効果は実効的には位相の変化となり左右の円偏光で共鳴条件を分離させる。

像が回転する向きや回転量は共振器の光路に依存する。右円偏光と左円偏光に対して同じ方向に像の回転の効果があるが一方は実効的に位相が進み、もう一方は位相が遅れる。そのため共鳴条件が異なり図1のように2本の共鳴ピークがみられる。

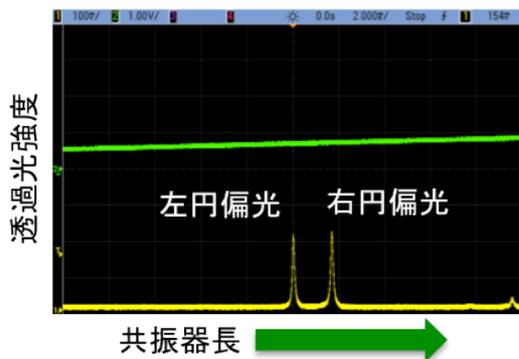
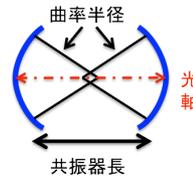


図1：直線偏光レーザーを3次元4枚鏡共振器に入射するとそれぞれの円偏光に対応した共鳴ピークに分離する。

(a)2枚鏡共振器の場合



(b)4枚鏡共振器の場合

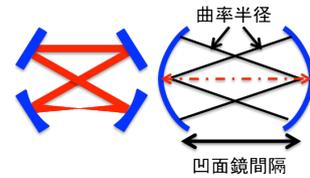


図2：共焦点型の4枚鏡共振器は共心型の2枚鏡共振器に比べ、共振器として安定に小さいスポットサイズを達成できる。

3.2 集光特性

2枚鏡共振器の場合、レーザー光のウエストサイズを小さく絞るためには凹面鏡の曲率半径を共振器長の半分に近づけた共心型にする必要がある(図2の(a))。一方、4枚鏡共振器の場合は凹面鏡でほぼ平行なレーザー光を反射することで曲率半径を凹面鏡間隔に近づけた共焦点型でレーザー光を小さく絞ることができる(図2の(b))。

共心型の2枚鏡共振器では横方向の鏡のミスアライメントに対する光軸のずれが大きく、光軸が共振器内に収まらないほどずれるとレーザーを蓄積することができなくなる。共焦点型の4枚鏡共振器では2枚鏡に比べて横方向のミスアライメントに対する光軸のずれが小さい。つまり4枚鏡共振器ならば共振器として安定であり、同時に小さいレーザーウエストサイズを達成することが可能である。

4. ガンマ線生成実験用4枚鏡共振器

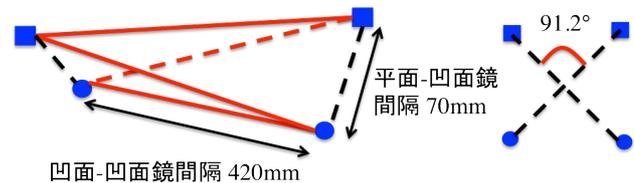


図3：ガンマ線生成実験用4枚鏡共振器の模式図

4.1 共振器の設計

図3はガンマ線生成実験用に設計した3次元4枚鏡共振器を模式的に示した図である。3次元4枚鏡共振器では共振器に蓄積するレーザーのスポットサイズを小さくしていくと形状が楕円形になることが知られており、これは像の回転の効果によるものと考えられている。レーザー光の形状が極端に楕円形になるとレーザーを共振器内に蓄積することができなくなる。即ちそれ以上スポットサイズを小さくしようとしても限界があるということである。

像の回転は光路に依存するため、鏡の配置を変化させた場合のレーザー形状を計算したところ、楕円形にならずスポットサイズを小さくすることができる解を得た。

像の回転の効果を抑えるためには隣接する。平面

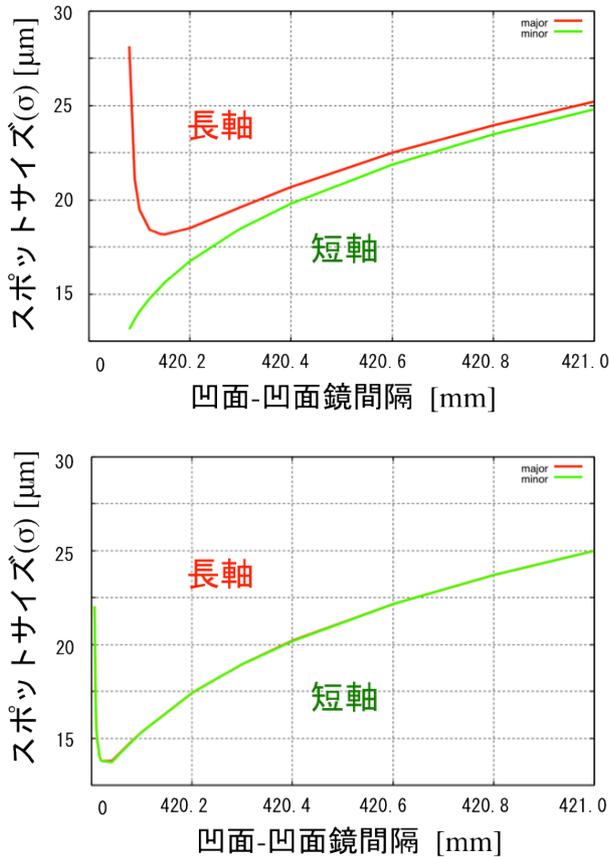


図 4 : (a) : ひねりの角度が 90 度の場合。(b) : 91.2 度の場合。91.2 度にすると楕円にならずにスポットサイズを小さくすることができる。

鏡と凹面鏡の間隔を小さくすればよい。しかし現実的には鏡のホルダーによる制限があり今回は 70mm とした。光路上の各鏡の間隔は 420mm である。

また、4 枚鏡共振器を 3 次元的にひねる角度を変化させることでもレーザーの形状は変化する。この角度は通常 90 度であるが、計算によると若干変化させることで安定にレーザーのスポットサイズを小さくすることができる。今回は 91.2 度のひねり角をつけ、レーザーの形状が楕円になっていく効果を抑える。

図 4 は 3 次元的なひねりの角度が 90 度の場合と 91.2 度の場合についてのスポットサイズの変化を計算した結果である。像の回転の効果があればスポットサイズは凹面鏡間隔を小さくして、鏡の曲率半径に近づけるほど小さくなるはずである。しかし、(a)のひねり角が 90 度の場合にはスポットサイズを小さくしていくと徐々に楕円形になっていき、ある点で急激に楕円になってしまいこれ以上は小さくならない。一方、(b)のひねり角 91.2 度の場合スポットサイズを小さくしていても楕円にはならず 90 度の場合に比べ小さなスポットサイズを達成できる可能性がある。

4.2 レーザー蓄積試験

現在、ガンマ線生成実験用に設計した 3 次元 4 枚

鏡共振器のレーザー蓄積試験を行っている。表 2 にこの 4 枚鏡共振器に使用する鏡の反射率とその組み合わせにおける共振器のパラメータを示す。R1 はレーザーを入射する鏡の反射率である。レーザーは平面鏡から入射する。R2、R3、R4 は入射鏡以外の鏡の反射率である。鏡の内部損失を考えなければ、(鏡の透過率と反射率の和が 100%) 共振器の増大率が最も大きくなるのは入射鏡の反射率がその他の鏡の反射率の積($R2 \times R3 \times R4$)となる組み合わせの時である。

表 2 の(a)の組み合わせについては実際にガンマ線生成実験用の 4 枚鏡共振器を用いて大気中で試験を行いモードロックレーザーの蓄積を確認した。この時のフィネスの実測値は 2400 ± 300 である。

この 4 枚鏡共振器を用いたガンマ線生成実験では増大率 1000 倍以上を目指して(b)の構成で行う。そのため次にこの(b)構成でレーザーを安定に共振器に蓄積することができるかを試験する予定である。(b)の組み合わせの場合、レーザー蓄積パワーの期待値は入射レーザーパワーは 10W と仮定すると 19kW となる。

表 2 : 4 枚鏡共振器のパラメータ

	R1[%]	R2,R3,R4[%]	フィネス	増大率
(a)	99.90	$99.90 \times 1, 99.99 \times 2$	2855	661
(b)	99.90	99.99×3	4831	1893

5. まとめ

我々は ILC の偏極陽電子源開発としてレーザーコンプトン散乱を用いたガンマ線生成実験を行っている。既に増大率 760 倍の 2 枚鏡共振器を用いたガンマ線の生成には成功しており、さらに高強度なガンマ線生成のために増大率と集光性能の向上を同時に達成することが出来る 3 次元 4 枚鏡共振器の開発を行っている。この 3 次元 4 枚鏡共振器も加速器に設置し実際にガンマ線の生成を行う。現在は、KEK-ATF への 4 枚鏡共振器設置に向けて高反射率の鏡を用いて大気中でレーザー蓄積試験を行っている。フィネス 2000 以上の共振器でのレーザー蓄積は確認しており、次は増大率 1000 を超える組み合わせでの試験を行う予定である。

参考文献

- [1] S.Miyoshi, Doctor thesis of Hiroshima University, 2011
- [2] Y.Honda et al., Opt. Commun. 282 (2009) 3108.