

GAMMA-RAYS GENERATION EXPERIMENT WITH THE OPTICAL RESONANT CAVITY FOR ILC POLARIZED POSITRON SOURCE AT THE KEK-ATF I

Shuhei Miyoshi^{1,A)}, Tomoya Akagi^{A)}, Sakae Araki^{B)}, Yasuaki Ushio^{A)}, Junji Urakawa^{B)},
Tsunehiko Omori^{B)}, Toshiyuki Okugi^{B)}, Masao Kuriki^{A)}, Kazuyuki Sakaue^{C)}, Hiroataka Shimizu^{B)},
Tohru Takahashi^{A)}, Nobuhiro Terunuma^{B)}, Tachishige Hirose^{C)}, Yoshisato Funahashi^{B)}, Guoxi Pei^{D)},
Yosuke Honda^{B)}, XiaoPing Li^{D)}, Masakazu Washio^{C)}

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

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

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

^{D)} Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

We performed a gamma-rays generation experiment by laser-Compton scattering at the KEK-ATF, aiming to develop a Compton based polarized positron source for linear colliders. In the experiment, laser pulses with a 357 MHz repetition rate were accumulated and their power was enhanced by up to 250 times in the Fabry-Perot optical resonant cavity. The control system for the laser pulse accumulation was improved because it had not been possible to accumulate in the optical resonant cavity until last summer. As a result, we succeeded in synchronizing the laser pulses and colliding them with the 1.3 GeV electron beam in the ATF ring while maintaining the laser pulse accumulation in the optical resonant cavity.

KEK-ATFにおけるILC偏極陽電子源の為の 光蓄積共振器を用いた高輝度ガンマ線生成実験I

1. はじめに

国際リニアコライダー (ILC: International Linear Collider)では、物理現象を精密に測定する為、偏極電子ビームの生成を要求している。電子ビームに加え、さらなる精密測定に向けたILCの性能の向上として、偏極陽電子ビームの生成も望まれている[1]。偏極陽電子は10MeV以上の偏極ガンマ線をターゲットに衝突させ、対生成によって生成される。したがって、10MeV程度の高輝度な偏極ガンマ線生成が、偏極陽電子源の重要な要素になる。ILCでは、この10MeVの偏極ガンマ線をヘリカルアンジュレーターによって生成する方式が基準デザインとなっている。ヘリカルアンジュレーター方式では、この偏極ガンマ線生成の為に150GeVの電子ビームと150mのアンジュレーター長が必要となる[2]。また150GeV電子ビームは容易に供給できる物ではないので、150GeVの電子ビームが生成可能なILCのメイン線形加速器が完成するまで、150mヘリカルアンジュレーターの開発は進めることが出来ない。

ILC偏極陽電子源のオプションデザインとして、レーザーコンプトン散乱によるガンマ線生成も考えられている。レーザーコンプトンによる方式では、

10MeVのガンマ線を生成するには、1GeV程度の電子ビームを用いれば良い。それ故、現存する小規模な電子ビーム加速器で陽電子源の開発が可能である。また、生成される陽電子の偏極は散乱に用いるレーザーの偏光を変える事で、簡単に制御出来る。

このように、レーザーコンプトン方式は、ヘリカルアンジュレーター方式より、いくつか優位な点がある為、平行して開発が進められている。ここでは高エネルギー加速器研究機構 先端加速器試験施設 ATFで行っているレーザーコンプトン散乱によるガンマ線生成実験について報告する。`KEK-ATFにおけるILC偏極陽電子源の為の光蓄積共振器を用いた高輝度ガンマ線生成実験I'では、主に衝突点でのレーザー強度の向上と、レーザーパルスと電子ビームのタイミング制御について述べる。ガンマ線生成実験の詳細なセットアップ・実験結果については`同ガンマ線生成実験II'[3]で述べる。

レーザーコンプトン散乱による偏極陽電子生成の原理検証は、既にATFで行われている[4]。ILC陽電子源に向けた次のステップは、生成ガンマ線強度の増加である。そこで我々は、レーザーパルスを光蓄積共振器に蓄積し、レーザーの強度を増大させる方法を採用している。光蓄積共振器へのレーザーパル

¹ miyoshi@hep.adsm.hiroshima-u.ac.jp

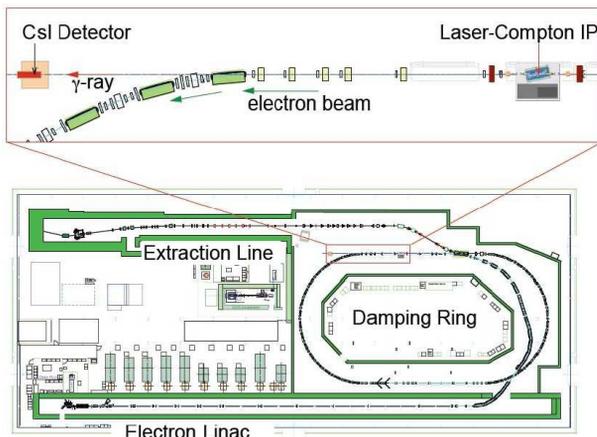


図 1: ATFの全体図と光蓄積共振器の設置場所[5]

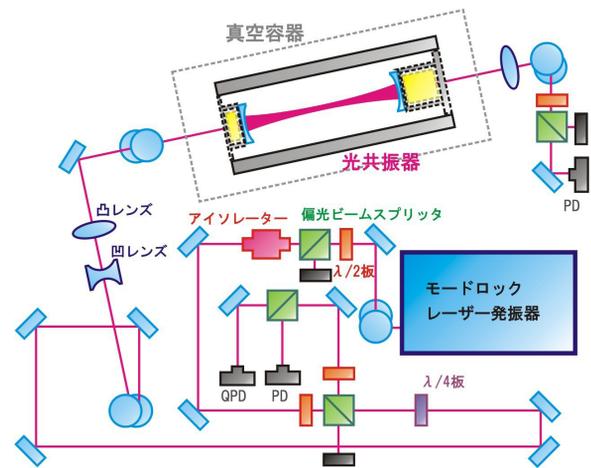


図 3: 光学系 セットアップの概要

スの蓄積は、光学システムの精密な制御が必要である。加速器環境下において、光学システムを使用する事や、レーザーパルスと電子ビームを衝突させる事は容易ではない。我々はFabry-Perot型の光蓄積共振器をATFダンピングリングにインストールした。その様子を図1に示す。また、レーザーコンプトン散乱によりガンマ線を生成する実験を行った。

2. 光学セットアップ

レーザーは電子ビームのバンチ間隔と等しい繰り返し周波数357MHzのモードロックレーザーを使用している。過飽和吸収ミラーを用いており、パッシブ発振である。レーザー光の波長は1064nm、パルス長は1σで5psである。出射時のレーザー強度は10Wで1パルスあたり28nJである。

レーザー光を光蓄積共振器に蓄積する時、光蓄積共振器長がレーザーの半波長の整数倍でなければならない。それに加え、我々はモードロックレーザー光を蓄積するので、光蓄積共振器長をモードロックレーザー発振器内の発振用共振器長の整数倍にしなければならない。それ故、我々は光蓄積共振器長を420mmとした。また、光蓄積共振器の2枚のミラーは、反射率99.6%、曲率半径210.5mmの物を使用した。それにより、光蓄積共振器内に入射光強度を約250倍に増大させ、中心でのレーザーサイズを1σで30μmまで絞る事が出来る。

光蓄積共振器の概要を図2に示す。光蓄積共振器の2枚のミラーは板バネを挟んでピエゾアクチュ

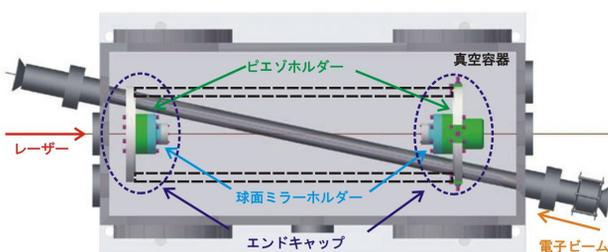


図 2: 真空容器内の光蓄積共振器の概要

エーターと接触している。2つのピエゾアクチュエーターは長さ異なり、短いピエゾアクチュエーターは光蓄積共振器の共鳴維持の為に制御に用いる。ATFダンピングリングの周長は外気温により変化するので、長いピエゾアクチュエーターを用いて、季節変動に合わせて光蓄積共振器長を大幅に伸縮させる事が出来る。同様にモードロックレーザー発振器内にもピエゾアクチュエーターが組み込まれている。これを使用し、レーザーパルスの繰り返し周波数を制御する事が出来る。また、モードロックレーザー発振器内のピエゾアクチュエーターに接続されているミラーは、光蓄積共振器に組み込んでいる両ピエゾに接触しているミラーより小型であるので、より速い動作が可能である。

光学セットアップの概要を図3に示す。モードロックレーザー発振器から出射後、限られたスペースで光蓄積共振器に蓄積可能なプロファイルにする為、2枚のレンズを用いている。また、光蓄積共振器の透過光強度と反射光強度をフォトダイオードでモニターしている。

光蓄積共振器のピエゾアクチュエーターを動かし、光蓄積共振器長を変化させながら透過光強度をモニターすると、図4のようにピークをもつ。透過光強度がピークの時に、光蓄積共振器が共鳴しており、レーザーパルスが蓄積される。反射率99.6%のミラーを用いた光蓄積共振器の場合、ピークの半値全

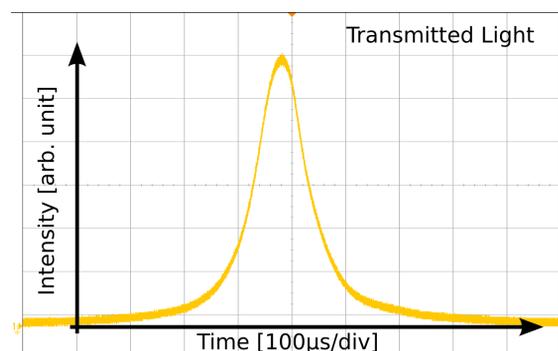


図 4: 光蓄積共振器長を変化させた時の透過光強度

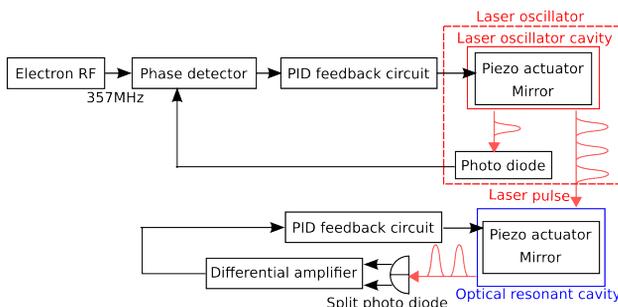


図 5: ダブルループ制御システム

幅は約0.7nmである。その為、光蓄積共振器の共鳴を維持する為には、光蓄積共振器長を0.7nm以下の精度で制御する必要がある。

3. 制御システムとその改良

レーザーコンプトン散乱により、効率良くガンマ線を生成する為には、光蓄積共振器に蓄積され、強度が増大したレーザーパルスを電子ビームのバンチ毎に衝突させなければならない。その為には、

- ・光蓄積共振器の共鳴維持。
- ・レーザーパルスと電子ビームバンチのタイミング同期。

の2つを同時に満たす必要がある。それらを満たす為に、まず図5の様なシステムを構築し制御を行った。図5のダブルループ制御システムでは、共鳴維持を光蓄積共振器の Piezoアクチュエーターに制御させている。また、タイミング同期はレーザー発振器の Piezoアクチュエーターに制御させている。タイミング同期は、PID回路を用いた Phase Locked Loop であり、共鳴維持には光蓄積共振器の反射光の位相による Tilt Locking を用いている[6]。この制御システムを用いる事で、タイミングの同期は維持する事が出来た。しかし、発振器の Piezoアクチュエーターによって、急激に変化する発振波長に光蓄積共振器の Piezoアクチュエーターが追随する事が出来ず、共鳴を維持する事は出来なかった。

そこで、制御システムを図6の様に改良した。それにより、共鳴維持とタイミング同期を同時に満たす事が可能となった。その共鳴の維持とタイミング同期の様子を図7に示す。黄線が光蓄積共振器の透過光強度、赤線がレーザーパルスの位相と電子ビームの位相の差である。図7の左では光共振器長を変

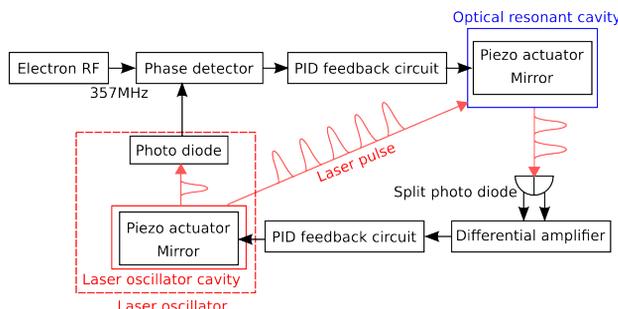


図 6: シングルループ制御システム

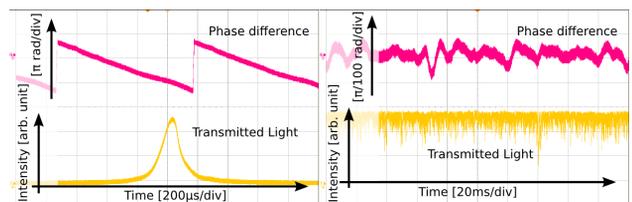


図 7: 黄色線が光蓄積共振器の透過光強度。赤線が位相差。左図は光蓄積共振器長をスキャンし、タイミングは非同期。右図はシングルループによる共鳴維持とタイミング同期。

化させ、タイミング同期制御も行っていない。右図では、共鳴維持とタイミング同期制御を行っており、2つを同時に満たしている事が分かる。改良後のシングルループ制御システムでは、共鳴維持をレーザー発振器の Piezoアクチュエーターに制御させ、タイミング同期を光蓄積共振器の Piezoアクチュエーターに制御させている[7]。それにより、0.7nm以下の制御が求められる共鳴維持を、速い動作が可能なレーザー発振器の Piezoアクチュエーターで制御する事ができ、システム全体を1つのループで閉じる事が出来ている。ただし、この制御システムではタイミング同期をより遅い光蓄積共振器の Piezoアクチュエーターで制御する為、タイミングジッターが数ps程度まで増加してしまう。しかし、現在のセットアップでは、レーザーのパルス長が5psであるのに対し、電子ビームのバンチ長は20~30psである。シミュレーション計算によるガンマ線生成数もタイミングジッターの有無で大きな差が出ない。

この様に制御システムを改良する事により、光蓄積共振器の共鳴維持と、レーザーパルスと電子ビームバンチのタイミング同期を同時に満たす事が出来た。

4. まとめ

我々は ILC の偏極陽電子源開発の一環として、レーザーコンプトン散乱による偏極ガンマ線生成の実験を行っている。KEK-ATF ダンピングリングにインストールした光蓄積共振器に、モードロックレーザー光を蓄積し、レーザー強度を約250倍に増大する事が出来た。また、制御システムを改良する事により、光蓄積共振器の共鳴維持とレーザーパルスと電子ビームバンチのタイミング同期を同時に満たす事が可能となった。光蓄積共振器に蓄積され強度が増大したレーザーと、電子ビームとの衝突によるガンマ線生成実験については、[3]で述べる。

参考文献

- [1] G. Moortgat-Pick et al., Physics Reports, 460 (2008) 131
- [2] ILC-REPORT-2007-001(2007)
- [3] 赤木 智哉 他, 加速器学会 Proceedings, TOLSB04 (2009)
- [4] T. Omori et al., Phys. Rev. Letts 96 (2006) 114801
- [5] H. Shimizu et al., J. Phys. Soc. Jpn. 78 (2009) 074501
- [6] D.A. Shaddock et al., Opt. Lett. 24 (1999) 1499
- [7] K. Sakaue, Doctoral thesis, Waseda University (2009)