

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24654076

研究課題名(和文) 超高強度平均パワーパルスレーザー蓄積限界測定

研究課題名(英文) measurement of ultra-high intensity average pulse power storage threshold

研究代表者

浦川 順治 (Urakawa, Junji)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・その他部局等・名誉教授

研究者番号：00160333

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：真空中に設置した光共振器にパルスレーザー(10ps-Pulse)を357MHzの繰返しで入射しながら、新逆周回共鳴フィードバック法により入射レーザーパルス強度を100usの間10000倍以上(バースト増幅)にすることに成功した。これによって、高反射率誘電多層膜ミラーは蓄積レーザーパルスエネルギー 約1.0mJまで使用可能であることが分かった。ミラー表面でのpeak power密度が10GW/cm²以上に対応している。また、連続運転で30kWのレーザーパルス蓄積にも成功した。この時のミラー表面でのaverage powerは1MW/cm²以上に成っていた。ミラーの僅かな熱変形現象も確認している。

研究成果の概要(英文)：Laser pulse with 10ps width was injected into the optical cavity which was installed in vacuum chamber and new amplification method, so called burst amplification, is realized with amplification factor 10000 and 100us pulse duration by inverse circulation feedback method. From this experiment, we confirmed about 1.0mJ of pulse energy had no effect to high reflect mirrors and the storage of laser power 357kW with 100us duration was safe for optical cavity operation. The peak power on the mirrors was about 10GW/cm². Also, we succeeded to storage 30kW in other optical cavity, which means average power of 1MW/cm² is no problem on mirror damage. However, we found a little variation on mirror by measuring transmitted laser profile.

研究分野：加速器科学

キーワード：量子ビーム レーザー密度 レーザー共振器

1. 研究開始当初の背景

レーザーを蓄積する光共振器開発は、1998年に非破壊で電子ビームプロファイルを測定する方法を検討して、我々がファブリ・ペロ型光共振器(共心型、2枚ミラー光共振器)によるレーザーワイヤーを提案した時から始まった。このレーザーワイヤー開発は国際的に認められ、2005年から開始した学術創成研究「レーザー蓄積装置を活用した国際リニアコライダービーム診断技術に関する融合研究」において、パルスレーザー蓄積技術開発に発展した。我々の研究成果や米国の研究者の研究開発報告によって、フランスや英国の研究者もパルスレーザー蓄積光共振器を使った小型高輝度 X 線発生装置の開発を提案した。2009年、4枚ミラー光共振器の2枚の球面ミラー間 midpoint でのレーザー収束サイズに関するフランスの研究者との共同研究の結果、ミラーの横方向制御安定性を約100倍にできることを見つけた。共心型の場合、入射レーザーパワーの1000倍程度を光共振器内に蓄積するのが限界であったが、4枚ミラー光共振器を使えば1万倍から10万倍のパワー蓄積が可能になる。しかし、光共振器内のレーザーピークパワー密度が上がり、高反射率(99.99%以上)ミラーに蒸着された誘電多層膜ミラーの破壊が問題になって来た。さらに共振器内に蓄積された平均パワーも上がるので、熱効果による誘電多層膜の変形も問題になる状況であった。これが本申請の動機であった。

2. 研究の目的

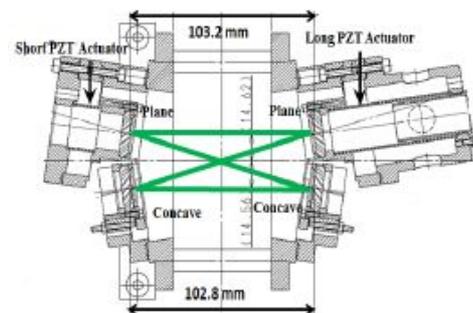
42cmの共心型光共振器に357MHzで4Wのパルスレーザーを入射し、LD pumpによるBurst Amp法を使って約70kWを蓄積していた。この蓄積光共振器では、42cmの midpoint でのレーザーを30 μ mまで収束しているので、ミラー上ではレーザーサイズは2.23mmになり、ピークパワー密度は0.067GW/cm²、平均パワー密度105kW/cm²になっていた。破壊閾値に達するにはさらに100倍以上のレーザー増幅・蓄積が必要であった。すなわち数MWの蓄積平均パワーが必要になっていた。まず、このような状況を実現して、数MWの平均パワーを共振器内に安定に保持する方法を確立することが目標であった。また、4枚ミラー光共振器(共焦点型リング光共振器)では、球面ミラー間の midpoint で10 μ mまでレーザー収束が可能であるので、ミラー上のレーザーサイズ(25mm)を拡大して蓄積平均パワーの限界と誘電多層膜破壊メカニズムを研究するのが目的であった。

3. 研究の方法

ミラー上でのレーザーパワー密度を上げて系統的に破壊実験を行うには、小型4枚ミラーリング型光共振器を製作するのが最も実際的であった。そこで本実験に利用できる714MHzモードロックレーザー発振器に合

せた4分の1の小型4枚ミラーリング型光共振器を設計した。これでミラー上でのレーザーパワー密度を16倍に上げることが可能になった。また、既存のBurst Amplification装置を利用して、レーザー発振器のパワーを100W以上に増幅した。小型4枚ミラーリング型光共振器の増幅率を10000倍以上にするフィードバック技術を開発して、系統的に破壊実験を行う予定であった。平成24年度、小型光共振器製作後光学台に設置して、1W程度の入力パワーによる試験で光共振器の増幅率とレーザー収束サイズの実用的な調整を行った。その後、既存の真空装置に光共振器を設置して、高パワーの実用的な条件での破壊実験を行ったが、高反射率ミラー表面汚染による100倍以上の吸収率増加を克服する設備増強に時間を取られ、系統的なミラー破壊実験のデータ取得に至らなかった。しかし、写真・図面に示す装置が完成し、高反射率ミラー取り扱い技術が向上したので、ミラー吸収率10ppm以下は実現できる状況になった。

小型4枚ミラーリング型光共振器製作による本研究方法は妥当であった。



図：小型4枚ミラーリング型光共振器

4. 研究成果

真空中に設置した光共振器にパルスレーザー(10-ps pulse)を357MHzの繰返しで共鳴入射しながら、新規の逆周回共鳴フィードバック法により入射レーザーパルスの強度を100-usの間10000倍以上にすることに成功した。これによって、蓄積レーザーパルスエネルギー1.0mJ/pulseまで高反射率誘電多層膜ミラーは破壊されないことが確認できた。この増幅レーザーパワーは375kW以上であり、ミラー表面でのpeak power密度が10GW/cm²以上に対応している。マックスプランク研究

所等が 250MHz の繰り返しで行った実験では、平均パワー 670kW(10-ps pulse) と 400kW(250-fs pulse) の安定蓄積を報告している。この結果からミラー表面でのレーザーパルス平均密度 $4.7\text{MW}/\text{cm}^2$, $2.8\text{MW}/\text{cm}^2$ 及び peak power 密度 $2.2\text{GW}/\text{cm}^2$, $53.3\text{GW}/\text{cm}^2$ まで高反射率誘電多層膜ミラー破壊は起きていないことになる。我々の結果とマックスプランク研究所等の結果から破壊閾値はレーザーパルス平均密度で $10\text{MW}/\text{cm}^2$ 、peak power 密度で数十 GW/cm^2 以上が期待できるのであるが、系統的な測定が高反射率ミラーの取り扱いと測定系の構築に多大な時間を要した為に行えなかった。重要な技術は高反射率ミラーの光子吸収率 2ppm/mirror 以下を実現して、その値を保つ方法である。これを実現することによって、ミラーの破壊をレーザーパルス平均密度で $10\text{MW}/\text{cm}^2$ まで回避できる。ただし、ミラーの熱変形は発生するので、冷却法を検討する必要がある。このように MW 級レーザーパルス蓄積共振器の実用化技術が見えてきた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

1. Hirotaka Shimizu, Alexander Aryshev, Yasuo Higashi, Yosuke Honda, Junji Urakawa, "Development of a 4-mirror optical cavity for an inverse Compton scattering experiment in the STF", NIM in Physics Research Section A, 745, 63-72, 2014
2. T. Akagi, S. Araki, Y. Funahashi, Y. Honda, H. Kataoka, T. Kon, S. Miyoshi, T. Okugi, T. Omori, K. Sakaue, H. Shimizu, T. Takahashi, R. Tanaka, N. Terunuma, J. Urakawa, M. Washio, H. Yoshitama, "Development of a three dimensional four mirror optical cavity for laser-Compton", NIMA, 724, 63-71, 2013
3. Arpit Rawankar, Junji Urakawa, Hirotaka Shimizu, Yan You, Nobuhiro Terunuma, Alexander Aryshev, Yosuke Honda, "Design studies on compact four mirror laser resonator with mode-locked pulsed laser for 5 μm laser wire", Nucl. Instr. & Meth. Phys. Res. A, 700, 145-152, 2013
4. Yan You, Junji Urakawa, Arpit Rawankar, Alexander Aryshev, Hirotaka Shimizu, Yosuke Honda, Lixin Yan, Wenhui Huang, Chuanxiang Tang, "Measurement of beam waist for an optical cavity based on Gouy phase", Nucl. Instr. & Meth. Phys. Res.

A, 694, 6-10, 2012

[学会発表](計 11 件)

1. Junji Urakawa, Enhancement cavity laser Compton experiences in KEK, MPQ meeting, Max-Planck-Institut for Quantenoptik, Munich-Centre for Advanced Photonics, Hans-Kopfermann-Str. 1, 85748 Garching, Germany
2. A.A. Rawankar, N. Terunuma, J. Urakawa, T. Akagi, A.S. Aryshev, Y. Honda, D. Jehanno, Pulsed Green Laser Wire System for Effective Inverse Compton, 3rd International Beam Instrumentation Conference (IBIC 2014) (招待講演)
3. 赤木 智哉, 本田 洋介, 小菅 淳, 浦川 順治, 羽島 良一, 森 道昭, 永井 良治, 静岡 俊行, cERL でのレーザーコンプトン散乱実験用光共振器の開発, 第 11 回日本加速器学会年会, 2014 年 08 月 09 日 ~ 2014 年 08 月 11 日, リンクステーションホール青森
4. 坂上和之, その他, KEK 小型電子加速器におけるレーザー蓄積装置を用いた小型 X 線源 (LUCX) の開発(15), 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 03 月 27 日 ~ 2014 年 03 月 30 日, 東海大学湘南キャンパス
5. 浦川順治, 高輝度 LCS ガンマ線生成のためのレーザー蓄積キャビティの開発, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (招待講演), 2013 年 09 月 20 日 ~ 2013 年 09 月 23 日, 高知大学朝倉キャンパス
6. Arpit Rawankar, その他, Performance Study of Four Mirror Laser Resonator for 6 μm Minimum Beam Size using Green Laser Oscillator, 第 10 回日本加速器学会年会, 2013 年 08 月 03 日 ~ 2013 年 08 月 05 日, 名古屋大学東山キャンパス
7. 坂上 和之, その他, 光蓄積共振器を用いたレーザーコンプトン散乱 X 線源の開発, 第 10 回日本加速器学会年会, 2013 年 08 月 03 日 ~ 2013 年 08 月 05 日, 名古屋大学東山キャンパス
8. 坂上和之, その他, KEK 小型電子加速器におけるレーザー蓄積装置を用いた小型 X 線源 (LUCX) の開発(13), 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 03 月 26 日 ~ 2013 年 03 月 29 日, 広島大学東広島キャンパス
9. Arpit Rawankar, その他, Development of Four Mirror Pulsed Laser Wire System for ATF-KEK Damping Ring, IBIC2012, 2012 年 10 月 01 日 ~ 2012 年 10 月 04 日, つくば市工

ポカール

10. 赤木智哉、その他、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“マルチバンチガンマ線生成”、第9回日本加速器学会年会、2012年08月08日～2012年08月11日、大阪大学豊中キャンパス

11. Arpit Rawankar、その他、Compact Four Mirror Pulsed Laser Wire System for Quick Measurement of Electron Beam Profile、第9回日本加速器学会年会、2012年08月08日～2012年08月11日、大阪大学豊中キャンパス

〔図書〕(計 5件)

1. 坂上和之、Alexander Aryshev、荒木栄、浦川順治、武田彩希、照沼信浩、福田将史、三好敏喜、鷲尾方一、日本加速器学会誌、「加速器」Vol.10, No.1, 32-42、KEK-LUCXにおけるレーザーコンプトン散乱小型X線源の開発、69、2013

2. 浦川順治、Isotope News、2月号、No.706、2-7、電子線形加速器の電子ビームの高強度化、119、2013

3. 浦川順治、京都大学エネルギー理工学研究所、次世代レーザーコンプトン散乱ガンマ線源とその利用、154、2013

4. 福田将史、Aryshev Alexander、荒木栄、本田洋介、坂上和之、照沼信浩、浦川順治、鷲尾方一、日本加速器学会誌、Vol.9, No.3、「KEKにおけるレーザーコンプトン散乱を用いた小型X線源の開発と現状とアップグレード計画」9、2012

5. 渡邊謙、早野仁司、浦川順治、松本利広、福田将史、栗木雅夫、飯島北斗、坂上和之、倉本綾佳、Mathieu OMET、日本加速器学会誌、Vol.9, No.2、「L-band 常伝導 RF 電子銃による1msパルス長電子ビームの生成」10、2012

〔産業財産権〕

出願状況(計 6件)

1. 名称：リング型光共振器2複数台を使ったX線及びガンマ線左右円偏光および水平・垂直線偏光高速切換え法
発明者：浦川順治、本田洋介
権利者：高エネルギー加速器研究機構
種類：実用新案
番号：US61/914737
出願年月日：2013年12月11日
国内外の別：外国

2. 名称：光共振器システム
発明者：浦川順治、坂上和之

権利者：高エネルギー加速器研究機構
種類：実用新案
番号：PCT/JP2013/075379
出願年月日：2013年09月12日
国内外の別：国内

3. 名称：2次元4鏡光共振器
発明者：浦川順治、清水洋孝
権利者：高エネルギー加速器研究機構
種類：実用新案
番号：390PCT2,PCT/JP2013/052958
出願年月日：2013年02月01日
国内外の別：国内

4. 名称：光共振器を用いるバーストレザー生成装置
発明者：浦川順治、清水洋孝
権利者：高エネルギー加速器研究機構
種類：実用新案
番号：390PCT1,PCT/JP2013/052961
出願年月日：2013年02月01日
国内外の別：国内

5. 名称：大強度レーザー蓄積システム
発明者：浦川順治、坂上和之
権利者：高エネルギー加速器研究機構
種類：実用新案
番号：397US, US61/805026
出願年月日：2013年03月25日
国内外の別：外国

6. 名称：大強度レーザー蓄積システム
発明者：浦川順治、坂上和之
権利者：高エネルギー加速器研究機構
種類：実用新案
番号：397JP, 2013-62123
出願年月日：2013年03月25日
国内外の別：国内

取得状況(計 1件)

1. 名称：レーザー発振装置
発明者：本田洋介、浦川順治
権利者：高エネルギー加速器研究機構
種類：実用新案
番号：登録第3197007号
出願年月日：平成22年8月5日
取得年月日：平成27年3月25日
国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等
小型高輝度光子ビーム発生装置
<http://kocbeam.kek.jp/>
小型高輝度X線源イメージング基盤技術開発
<http://nkocbeam.kek.jp/>
超放射による超小型短パルス・コヒーレントテラヘルツ光源開発
<http://www-atf.kek.jp/thz/index.html>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

浦川 順治 (Urakawa, Junji)

高エネルギー加速器研究機構・名誉教授

研究者番号：00160333

(2)研究分担者 なし

()

研究者番号：

(3)連携研究者

本田 洋介 (Honda, Yosuke)

高エネルギー加速器研究機構・助教

研究者番号：40509783

坂上 和之 (Sakaue, Kazuyuki)

早稲田大学、助教

研究者番号：80546333