

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760067

研究課題名（和文） パルス圧縮を用いた大強度短パルス放射光発生に関する研究

研究課題名（英文） Study on Generation of Intense and Short Pulse Synchrotron Radiation by Pulse Compression Technique

研究代表者

全 炳俊（ZEN HEISHUN）

京都大学・エネルギー理工学研究所・助教

研究者番号：80548371

研究成果の概要（和文）：

これまでレーザー分野で発展してきたパルス圧縮の原理を放射光発生に応用する事で電子蓄積リングを周回するパルス幅 200 ps 程度の電子バンチから大強度短パルス放射光を発生させることを目的とし、原理実証実験に必要な要素技術の開発を行った。紫外光(266 nm)のパルス長を計測するためのクロスコレレータを構築・評価した。また、パルス圧縮器の設計、製作を行った。加えて、自作の 1 次元数値計算コードを GPU 上で実行可能な様に改良し、計算時間を従来の 10 分の 1 に短縮する事に成功し、多次元化への道筋をつけた。

研究成果の概要（英文）：

Essential instruments for proof of principle experiment of intense and short pulse synchrotron radiation generation by pulse compression technique have been developed in this study. A cross-correlator for measuring the pulse duration of UV-pulses in the wavelength of 266 nm has been developed. A pulse compressor of the UV-pulses has been designed and constructed. In addition, 1-D numerical simulation code which had been developed was modified for GPU architecture. The modification reduced the required calculation time as short as one-tenth of that before the modification.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

応用物理学一般

キーワード：放射光、パルス圧縮、短パルス光

1. 研究開始当初の背景

レーザーの短パルス化と時間分解計測の成功を受け、近年、X線領域の放射光を数百フェムト秒程度まで短パルス化し、フェムト秒オーダーの時間分解計測を行おうとする研究が盛んに行われている。電子蓄積リングを周回する電子ビームのパルス幅は数十から数百ピコ秒であり、その電子ビームから放射される放射光のパルス幅も同程度である為、短パルス化するには何らかの工夫が必要である。現在、パルス幅が 1 ピコ秒以下の放射光

を得る事が可能な、2 つの代表的な手法が存在する。一つは短パルスレーザーと電子バンチを相互作用させ、100 フェムト秒程度の羽状の構造を作り出し、その部分から放出される光のみを切り出す laser bunch slicing と呼ばれる手法[1]であり、もう一つは電子バンチを高周波空洞やパルス電磁石を用いて傾け、その中心から放出された光のみをスリットにより切り出す事で短パルス化するバンチ回転法[2]である。どちらの手法も原理的に 1 ピコ秒以下のパルス長の放射光を発生させ

る事が可能であるが、電子ビームの一部を切り出す為、通常の放射光よりも大幅に強度が低下してしまうと共に、短パルス化すればするほど放射光強度が低下するという問題がある。一方で、真空紫外(VUV)領域では、Coherent Harmonic Generation(以下 CHG 法)と呼ばれる手法[3]が研究されている。この手法では短パルスレーザー(以下駆動用レーザーと呼ぶ)を用いて電子ビームの一部に駆動レーザー波長以下の微細構造(マイクロバンチ)を作り出し、駆動用レーザーのパルス幅程度のパルス幅を持つ駆動用レーザーの高調波を発生させる事ができる手法である。しかし、この手法においても、蓄積リング周回電子バンチを利用した場合には、レーザーのパルス長よりも電子バンチの時間幅が非常に長く、短いパルス長のレーザーを用いた場合には放射に寄与する電子の量が減少し、放射の強度が格段に小さくなるという問題がある。

[1]A.A.Zholents et al., Phys. Rev. Lett. 76, 912 (1996).

[2]A.Zholents, NIM-A, 425, 385 (1999).

[3]G. Vignola et al., Nucl. Instrum. Methods A, 239, 43 (1985).

2. 研究の目的

これまでの手法において、問題となっているパルス長と光子数のトレードオフ関係を打ち破るために、研究代表者は従来の大強度・超短パルス固体レーザーにおいて用いられてきたチャープパルス発生とパルス圧縮の技術を応用した大強度・短パルス放射光発生法を提案している。これは前述の CHG 法において、駆動用レーザーに周波数チャープを与え、時間的に引き延ばしたレーザーを用いた際に、発生した放射光が駆動用レーザーの特性を引き継ぎ、周波数チャープを持つ事を利用した手法である。時間的に引き延ばした駆動用レーザーと長い電子バンチとを相互作用させ、電子バンチ全体にマイクロバンチを形成させ、電子バンチに含まれる電子全体を放射に寄与させる。そして、発生した周波数チャープを持つコヒーレントな放射光をパルス圧縮器に通すことで、短パルス化する事により、大強度・短パルス放射光を発生させる。

3. 研究の方法

原理実証実験を行うには、紫外光用のパルス圧縮器の開発と、パルス圧縮器前後でのパルス長を計測するための計測装置の開発が不可欠である。本研究では、UVSOR に既設のフェムト秒チタンサファイアレーザー(波長 800 nm)と非線形光学結晶を用いて、その三次高調波である波長 266 nm の紫外光を発生させ、それら要素技術の開発を行った。具体的にはチタンサファイアレーザーの基本波と紫外光との差周波発生を利用したパルス長

計測用クロスコリレータを開発した。また、パルス圧縮器の設計と構築を行った。加えて、現象の理解に重要な 1 次元数値計算コードを GPU 上で実行可能な様に改良した。

4. 研究成果

図 1 に開発したパルス長計測用クロスコリレータの概念図を、図 2 に写真を示す。

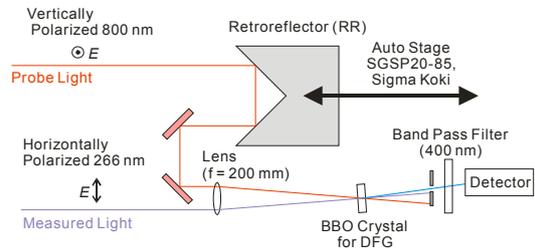


図 1：紫外光パルス長計測用クロスコリレータの概念図

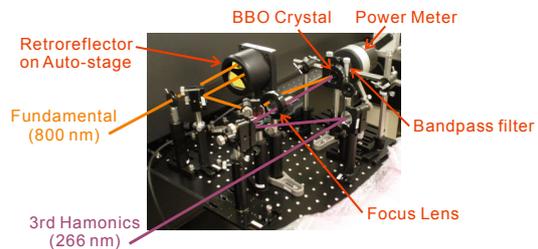


図 2：構築した紫外光パルス長計測用クロスコリレータの写真

非線形光学結晶を用いて発生させた紫外光を用いて、構築したクロスコリレータの特性評価を行った。図 3 に典型的な計測結果を示す。構築した計測系を用いて計測されたパルス長は約 800 fs であった。計測に用いた 800 nm 光と 266 nm 光のパルス幅はおおよそ 100 fs であり、この計測結果は構築した計測系の時間分解能を表していると考えられる。これは、今回、差周波発生に用いた厚さ 2 mm の BBO 結晶中で 800 nm の光と 266 nm の光の群速度差により与えられる時間分解能劣化と考えられる。この 800 fs という時間分解能は数十ピコ秒から 1 ps 程度までのパルス圧縮を行う原理実証実験には十分な時間分解能である。

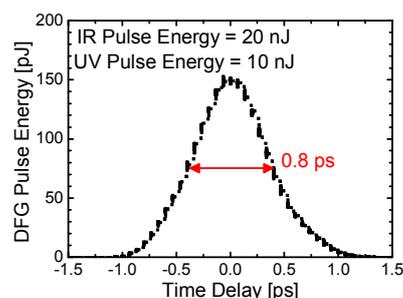


図 3：典型的なパルス長計測結果。

図4に設計・製作した紫外光用パルス圧縮器の設計図を、図5にその写真を示す。パルス圧縮器に用いる回折格子には、島津製作所製平面ブレード・ホログラフィック・グレーティング(溝本数 1800 g/mm、ブレード波長 300 nm、サイズ 60 × 60 mm)を採用し、波長 266 nm にてリトロ配置となる様に、入射角 43 度を選んだ。この時、回折格子において回折された光が、再度回折格子に入射するまでの距離 G と圧縮率 c との関係は

$$c = G [\text{m}] \times 31 [\text{ps/m}]$$

と計算される。構築した系では、 G を 0.32 ~ 1.32 m まで変える事ができるため、圧縮率を 10 ~ 41 ps まで変える事が可能である。

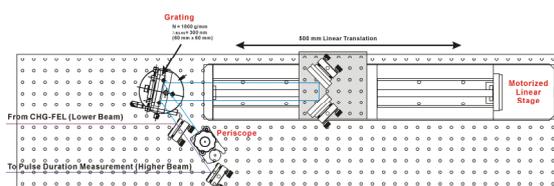


図4：設計・製作した紫外光用パルス圧縮器の設計図



図5：設計・製作した紫外光用パルス圧縮器の写真

上記のパルス長計測系、パルス圧縮器の設計・構築を完了したことにより、原理実証実験の準備が全て整った。

加えて、研究代表者が開発中の1次元数値計算コードをGPU上で実行可能な様に改良した。その結果、これまで80秒かかっていた計算を7秒で実行可能となった。これにより、将来の多次元化に道筋をつける事が出来た。

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1件)

- ① M. Adachi, H. Zen, T. Konomi, J. Yamazaki, K. Hayashi, M. Katoh, Design and Construction of UVSOR-III、

Journal of Physics: Conference Series、
査読有、Vol. 425、2013、42013
DOI: 10.1088/1742-6596/425/4/042013

[学会発表] (計11件)

- ① H. Zen, M. Hosaka, N. Yamamoto, M. Adachi, M. Katoh, J. Yamazaki, Chirped Pulse Generation by Coherent Harmonic Generation Free Electron Laser, The 4th International Particle Accelerator Conference, 2013年5月14日、上海(中国)
- ② 関田創、保坂将人、高嶋圭史、山本尚人、植松遥平、浅野友歌、阿達正浩、山崎潤一郎、林憲志、田中誠一、全炳俊、加藤政博、UVSORにおけるCHGのためのシード光源開発、第26回日本放射光学会年会、名古屋大学、2013年1月14日
- ③ 植松遥平、保坂将人、高嶋圭史、山本尚人、関田創、浅野友歌、阿達正浩、山崎潤一郎、林憲志、田中誠一、全炳俊、加藤政博、UVSOR新オプティカルクライストロンの性能評価とCHGへの応用、第26回日本放射光学会年会、名古屋大学、2013年1月12日
- ④ 田中 誠一、阿達 正浩、林 憲志、山崎 潤一郎、木村 真一、中村 永研、加藤 政博、保坂 将人、山本尚人、高嶋 圭史、高橋 俊晴、全 炳俊、UVSORにおけるコヒーレント光源実験ステーションの建設と立上、第9回日本加速器学会年会、大阪大学、2012年8月9日
- ⑤ 植松 遥平、高嶋 圭史、関田 創、保坂 将人、山本尚人、阿達 正浩、山崎 潤一郎、林 憲志、田中 誠一、加藤 政博、全 炳俊、UVSOR新オプティカルクライストロンのためのバンチャー電磁石の設計とその性能評価、第9回日本加速器学会年会、大阪大学、2012年8月8日
- ⑥ 全 炳俊、阿達正浩、保坂正人、山本尚人、加藤政博、Chirped Pulse Generationを用いたCHG-FELによる大強度・短パルス放射光発生、第25回放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム、鳥栖市民文化会館(佐賀県)、2012年1月8日
- ⑦ 阿達正浩、田中誠一、山崎潤一郎、林憲志、木村真一、保坂将人、山本尚人、高嶋圭史、平義隆、全炳俊、高橋俊晴、谷川貴紀、加藤政博、UVSOR-IIにおけるコヒーレント光源開発の現状、第25回放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム、鳥栖市民文化会館(佐賀県)、2012年1月8日
- ⑧ 植松遥平、保坂将人、高嶋圭史、山本尚人、和佐直毅、阿達正浩、山崎潤一郎、林憲志、全炳俊、加藤政博、UVSOR新オプティカルクライストロンのためのバン

チャー電磁石の設計、第 25 回放射光学会
年会放射光科学合同シンポジウム、鳥栖市
民文化会館(佐賀県)、2012 年 1 月 8 日

- ⑨ H. Zen, M. Adachi, M. Katoh, T.
Tanikawa, N. Yamamoto, M. Hosaka,
Chirped Pulse Generation by CHG-FEL,
33rd International Free Electron Laser
Conference, Shanghai (China), 2011 年
8 月 24 日
- ⑩ Heishun Zen, Masahito Hosaka, Naoto
Yamamoto, Masahiro Adachi, Masahiro
Katoh, CHG-FEL による Chirped Pulse
の発生とその圧縮に向けた検討、第 8 回
日本加速器学会年会、つくば国際会議場
(茨城県)、2011 年 8 月 2 日
- ⑪ N. Wasa, Y. Uematsu, Y. Takashima, T.
Tanikawa, M. Adachi, H. Zen, M. Katoh,
M. Hosaka, Naoto Yamamoto, 相対論的
電子ビームとレーザーの高調波を用いた
コヒーレント高調波発生、第 8 回日本加
速器学会年会、つくば国際会議場(茨城県)、
2011 年 8 月 2 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

全 炳俊 (ZEN HEISHUN)

京都大学・エネルギー理工学研究所・助教
研究者番号：80548371