

INVESTIGATION ON CHIRPED PULSE GENERATION AND COMPRESSION FOR CHG-FEL

Heishun Zen ^{*,**,A,B)}, Masahito Hosaka^{C)}, Naoto Yamamoto^{C)}, Masahiro Adachi^{A,B)}, Masahiro Katoh^{A,B,C)},

^{A)} UVSOR facility, Institute for Molecular Science, Myodaiji-cho, Okazaki, Aichi, 444-8585

^{B)} The Graduate School of Advanced Studies (Sokendai), Myodaiji-cho, Okazaki, Aichi, 444-8585

^{C)} Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603

Abstract

Short pulse duration and short wavelength lights have various valuable applications. To generate short and intense light from electron beam circulating in a storage ring, we have proposed a new technique, chirped pulse generation by Coherent Harmonic Generation Free Electron Laser (CHG-FEL) and compression of chirped pulse afterward. Proof of principle experiments will be carried out at the wavelength of 266 nm. In this paper, designing work on dedicated pulse compressor is reported. The method to measure the pulse duration of 266 nm light is also discussed.

CHG-FEL による Chirped Pulse の発生とその圧縮に向けた検討

1. はじめに

電子蓄積リングを周回する高エネルギー電子バンチより放出されるシンクロトロン放射光は赤外から硬 X 線に及ぶ非常に広い波長領域において、材料・生物・化学などの分野で幅広く利用されている。一方、近年のレーザーの大強度・短パルス化は目覚しく、フェムト秒、アト秒といった短パルスの大強度光が得られるようになり、その特性を利用した時間分解計測により、様々な高速現象が明らかにされてきた。

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。X線自由電子レーザーはこういった能力を持つ大強度光源であるが、シングルキューザ且つ繰り返しが 100 Hz 程度と言う事もあり、別法として電子蓄積リングを周回する電子バンチから発生させる手法が検討されている。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電子ビーム上に作り出し、その部分から放出される光のみをスリットにて切り出す 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電子を傾けて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, 3]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[4]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)を用いて図 1 の様に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する事ができる手法である。これまで、様々な実験が行われ、通常のアンジュレータ放射よりも単色性に優れ、大強度であること、レーザーとガスを用いた真空紫外光源では困難な円偏光光の発生が可能である事が示されている。また、現在報告されている最短波長は 43 nm であるが、原理的には X 線領域まで拡張できる可能性がある。

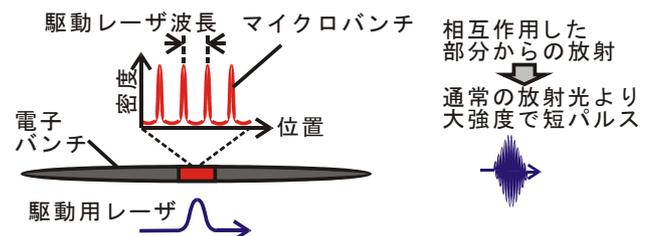


図 1: CHG 法による短パルス光発生

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

* zen@iae.kyoto-u.ac.jp

** Present address: Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011.

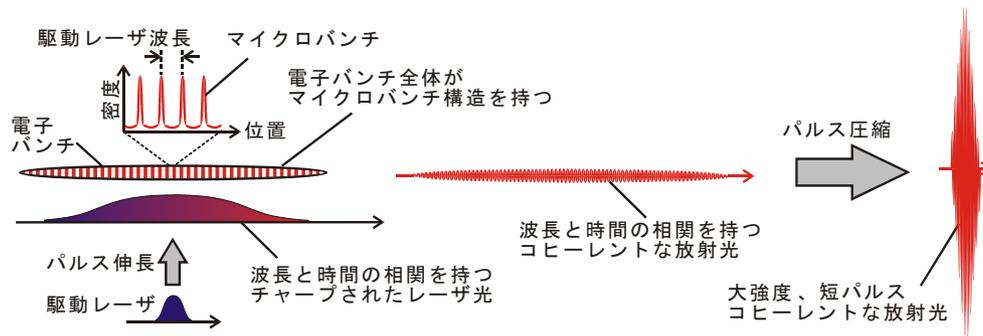


図 2：提案する大強度・短パルス放射光発生原理

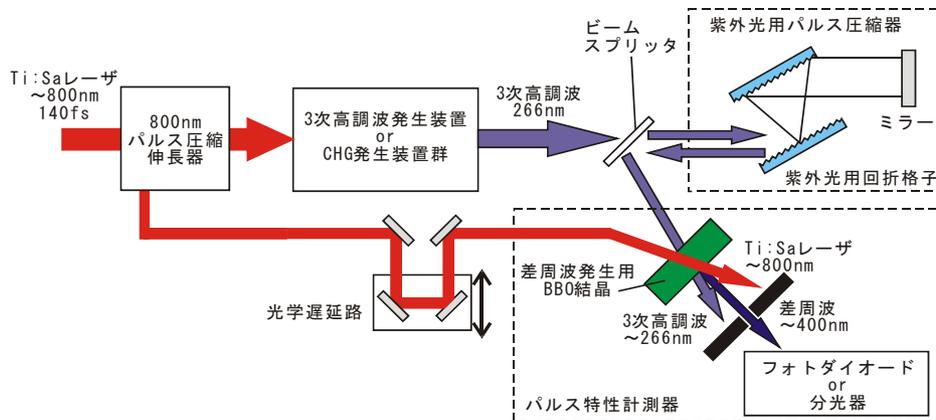


図 3：原理実証実験の概要

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。

上記のトレードオフ関係を克服する方法として、大強度・短パルスレーザー光の発生に用いられるチャープパルス発生法が考えられる。CHG-FEL では駆動レーザーをチャープする事により、チャープされたコヒーレント放射が得られる事が示唆されている[5]。この現象を利用し、図 2 の様に CHG-FEL によりチャープパルスを発生させ、その後パルス圧縮器を通して圧縮することで、短パルス・大強度コヒーレント光を発生できると考えられる。本報告では、原理実証実験の概要と実験装置の設計・準備状況について述べる。

2. 原理実証実験の概要

図 3 に原理実証実験の概要図を示す。原理実証実験には比較的扱いの容易な 266 nm(Ti-Sapphire レーザの 3 倍波)を CHG により発生させ、チャープパルス発生とパルス圧縮を行う。また、CHG を駆動する為に用いた 800 nm 光と CHG により発生した 266 nm 光との差周波発生により 400 nm 光を発生させ、クロスコリレーションにより圧縮前後でのパルス長を計測する。

原理実証はこれまで CHG 発生の研究開発が盛んに行われてきた分子科学研究所の低エネルギー低エミッタンス電子蓄積リング UVSOR-II と既設の Ti-Sapphire レーザを用いる。上記の装置ではこれまでに、CHG による Ti-Sapphire レーザの 3 倍波発生では比較的強い出力が観測されており、容易に実験が

行えると考えている。また、UVSOR-II では電子バンチの RMS 長が 100 ps 以上と CHG 駆動用レーザー(最短パルス長 140 fs)に比べ非常に長い為、本手法を導入するメリットが非常に大きい。

3. 266 nm 用パルス圧縮器の設計

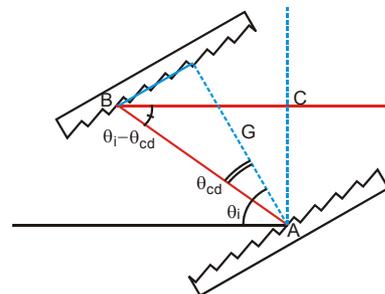


図 4：回折格子対を用いた典型的なパルス圧縮器

ブレード回折格子対を用いた図 4 の様な典型的なパルス圧縮器を検討中である。図 5(a)の様に、回折格子に対する入射光の入射角 θ_i 、回折光の回折角 θ_{cd} 、回折格子のブレード角 θ_B を定義すると、入射角 θ_i と回折角 θ_{cd} の関係は

$$\sin \theta_i + \sin \theta_{cd} = Nm\lambda \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 N は回折格子の単位長さあたり溝本数、 λ は入射光波長である。ここで溝の斜面对して入射光と m 次の回折光が鏡面反射の関

係にあるとき、 m 次の回折光にエネルギーのほとんどが集中するという性質を持ち、この条件を満たす波長をブレイズ波長 λ_B と呼ぶ。効率の高いパルス圧縮器を作る為には、この条件を満たす必要がある。回折格子は一般に図 5(b)に示す 1 次の回折光が入射光と同じ方向に戻るリトロー条件を満たす波長(リトロー配置でのブレイズ波長 $\lambda_{B(Litt)}$)で特徴付けられ、カタログ等にもこの $\lambda_{B(Litt)}$ が示されている。この為、使用する回折格子を選定する際には、 $\lambda_{B(Litt)}$ を決定する必要がある。しかし、パルス圧縮器では、一般にリトロー配置を用いない為、リトロー配置でのブレイズ波長と特定の入射角でのブレイズ波長との関係を知る必要があり、それは

$$\lambda_{B(Litt)} = \frac{2}{N} \sin \left[\frac{1}{2} \left\{ \sin^{-1} (Nm\lambda_B - \sin \theta_i) \right\} + \theta_i \right] \quad (2)$$

で与えられる。今回は入射光波長が 266 nm 固定であり、1 次の回折光を利用するとした。この場合のリトロー配置でのブレイズ波長 $\lambda_{B(Litt)}$ の入射角依存性を図 7 に示す。

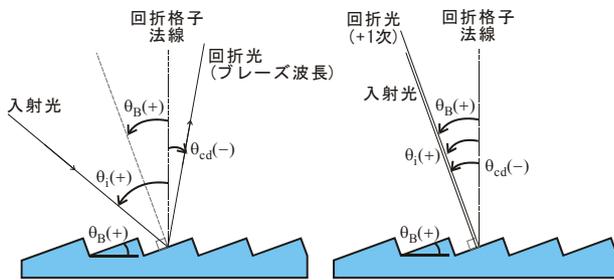


図 5 : (a)角度等の定義の説明図、(b)リトロー配置

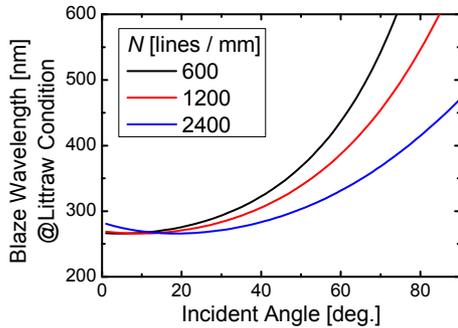


図 6 : リトロー配置でのブレイズ波長と入射角の関係(入射光波長 266 nm、回折次数+1)

使用する回折格子のリトロー配置でのブレイズ波長 $\lambda_{B(Litt)}$ と溝本数 N を決定すると、自動的に入射角が決定される。また、同時に回折角が式(1)により決まる。例えば、 $N=2400$ lines/mm、 $\lambda_{B(Litt)}=300$ nm とすると、回折格子への入射角は 49 度、回折角は-6.7 度となる。

図 4 に示したパルス圧縮器を通過する際の点 A から B を経て C へ到達するまでの行路長は入射光

の波長 λ に依存し、

$$L(\lambda) = \frac{G}{\cos \theta_{cd}(\lambda)} [1 + \cos(\theta_i - \theta_{cd}(\lambda))] \quad (3)$$

と与えられる。ここで、 G は回折格子間距離である。実際には、図 4 の回折格子対を通過した光はミラーで反射され、再度、回折格子対を通過させる事で、空間的な分散を補償するため、パルス圧縮過程での波長依存の行路長は式(3)の 2 倍となる。

UVSOR-II に設置された Ti:Sapphire レーザ(最短パルス長 140 fs)で得られる 3 次高調波 CHG 光のスペクトルは図 7 の様になる。このスペクトルは駆動レーザのチャープ、非チャープに影響されない。

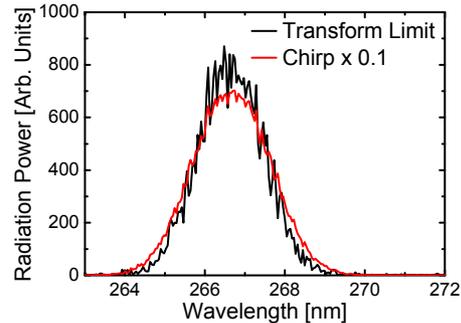


図 7 : UVSOR-II に設置された Ti:Sapphire レーザで得られる 3 次高調波 CHG 光スペクトル

図 7 から、最短波長を 264 nm、最長波長を 269 nm として、それらが回折格子対を往復した際の行路差を求め、互いの遅延時間を計算した。結果を図 8 に示す。例えば、 $N=2400$ lines/mm、 $\lambda_{B(Litt)}=300$ nm、回折格子間距離 $G=1$ m とすると、回折格子への入射角は 49 度となり、得られる時間差は 52 ps となる。

原理実証実験では、10 ps 程度に駆動レーザをチャープする予定であり、上記の条件において回折格子距離 G を 20 cm 程度にして、10 ps 程度の CHG パルスを圧縮する予定である。表 1 に現在のパルス圧縮器の設計パラメータを示す。また、今後、回折格子を 1 個のみ使用する配置での設計検討も行う予定である。

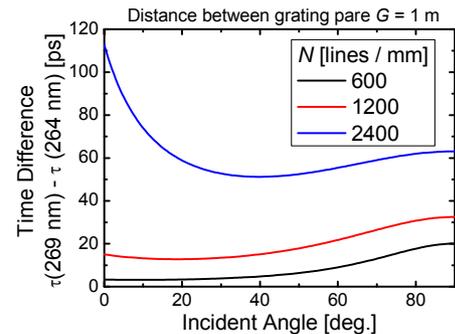


図 8 : 回折格子対を往復した際の 269 nm 光と 264 nm 光に与えられる時間差(回折格子間距離 $G=1$ m)

表 1: パルス圧縮器の設計パラメータ

回折格子溝本数 N [lines / mm]	2400
リトロー配置での ブレイズ波長 $\lambda_{B(Litt)}$ [nm]	300
入射角 θ_i [deg.]	49
回折角 θ_{cd} [deg.]	-6.7
回折格子間距離 G [m]	~0.2
時間差(269 nm – 264 nm) [ps]	10

4. パルス長計測法の検討

本研究では、パルス圧縮前後の 266 nm 光のパルス長の計測が不可欠である。266 nm 光のパルス長計測は既に精華大学において光陰極高周波電子銃駆動用レーザーのパルス長計測の為にに行われている[6]。精華大学では、266 nm 光と 800 nm 光の BBO 中での差周波発生により 400 nm 光を発生させるクロスコリレーションによって 266 nm 光のパルス幅を同定している。本研究では上記の手法を踏襲し、266 nm 光のパルス長を計測する予定である。また、数ピコ秒程度の時間分解能を持つストリークカメラを用いて計測する事も考えている。

上記のパルス圧縮器、パルス長計測系の調整は Ti-Sapphire レーザ(800 nm)から 3 倍高調波発生用結晶を用いて 266 nm 光を発生させ、この光を用いて光軸調整、性能確認を行う予定である。

5. まとめ

チャープパルス発生とパルス圧縮による大強度短パルス短波長コヒーレント放射光発生法の原理実証の為に、パルス圧縮器の設計とパルス長計測法の検討を行った。パルス圧縮器の設計では、高い効率を得るため、入射光と回折光が鏡面反射条件になるよう、回折格子のリトロー配置でのブレイズ波長と入射角との関係を調べた。また、回折格子対を往復する際に与えられる最短波長光と最長波長光との時間差を調査した。調査の結果、パルス幅 10 ps のチャープされた 266 nm 光の圧縮に適した回折格子条件、入射角、回折角、回折格子間距離を決定した。また、パルス長計測には、266 nm 光と 800 nm 光との BBO 結晶中での差周波発生を利用したクロスコリレーションを行う事とした。

今後、機器の購入を進め、今年度中に Ti-Sapphire レーザと 3 倍高調波発生用結晶により発生させた 266 nm 光を使って機器の調整を終え、来年度に本格的な原理実証実験を行いたいと考えている。

6. 謝辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金若手(B) No.23760067 によった。

参考文献

- [1] A.A.Zholents et al., Phys. Rev. Lett. **76**, 912 (1996).
- [2] A.Zholents, NIM-A, **425**, 385 (1999)
- [3] M.Katoh, JJAP, **38**, L547 (1999).
- [4] G. Vignola et al., Nucl. Instrum. Methods A, **239**, 43 (1985).
- [5] 全炳俊, 『数値計算による CHG-FEL の研究』, 第 7 回加速器学会年会プロシーディングス.
- [6] L. Yan et al., Proceedings of PAC07, pp.1052-1054 (2007).