

SPECTRAL STUDY OF VUV COHERENT LIGHT SOURCE BY LASER SEEDING AT UVSOR-II

Takanori Tanikawa^{1,A, B)}, Masahiro Adachi^{B)}, Heishun Zen^{B)}, Masahito Hosaka^{C)}, Naoto Yamamoto^{C)},
Yoshitaka Taira^{B, C)}, Jun-ichiro Yamazaki^{B)}, Masahiro Katoh^{B)}

^{A)} JSPS Reserch Fellow DC, The Graduate University for Advanced Studies [SOKENDAI]
38, Nishigo-naka, Myodaiji-cho, Okazaki, Aichi, 444-8585

^{B)} UVSOR facility, Institute for Molecular Sciences, 38, Nishigo-naka, Myodaiji-cho, Okazaki, Aichi, 444-8585

^{C)} Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8603

Abstract

At the UVSOR-II electron storage ring, light source developments based on the laser seeding technique are in progress. In the past results, generation of deep ultraviolet coherent harmonics of variable polarization by using a femto-second laser has been achieved. A VUV (Vacuum UltraViolet) spectrometer has been constructed and is under testing. The CHG (Coherent Harmonic Generation) spectra in the VUV region was successfully observed, which was extending up to 8th harmonics.

As a near future plan, a new undulator system for CHG will be constructed. The undulator system will consist of a modulator, a buncher and a radiator. Parameter designs of them are in progress.

UVSOR-IIにおけるレーザーシーディングを用いた真空紫外 コヒーレント光源開発とスペクトルスタディ

1. はじめに

近年、世界的各地の放射光施設においてコヒーレント光発生の研究が活発になってきている。中でも短波長領域の研究開発が顕著であり、加速器群のみで実現できる光共振器型の自由電子レーザー(以下、FEL: Free Electron Laser)や、シングルパスでレーザー発振を可能とする SASE (Self-Amplified Spontaneous Emission)型FELが挙げられる。さらに最近話題となっているTHz領域のコヒーレントシンクロトロン放射(CSR: Coherent Synchrotron Radiation)は長波長領域におけるコヒーレント光発生の一つである。また、外部からコヒーレントなレーザー光を電子ビームに注入(レーザーシーディング)することでSASEの時間コヒーレンスを改善したシングルパス・シード型FELやコヒーレント高調波発生(以下、CHG: Coherent Harmonic Generation)も挙げられる。

UVSOR-IIでは、共振器型自由電子レーザー研究に長年取り組んできたが、近年では、フェムト秒レーザーを用いることでテラヘルツ領域でのCSRと深紫外領域でのCHGの研究を進めている^{[1][2]}。本研究は、CHGの更なる短波長化を実現する為に、UVSOR-II電子蓄積リングにおけるレーザーシーディングを用いた真空紫外(以下、VUV: Vacuum UltraViolet)領域のコヒーレント光発生を目的としている。本研究の特徴として、シード光源となるガス高次高調波(以下、HHG: Higher Harmonics in Gas)を世界で初めて電子蓄積リングに適用することにある。HHGは軟X線領域までの強度が均一な高次高調波を

発生することができる。HHGを適用したレーザーシーディングは線形加速器であるSASE型FELにおいて既に実現されている^[3]。しかしこれには問題点があり、シード光以外の波長、特にHHGのポンプ光である大強度チタンサファイアレーザーの基本波が増幅されたシード光と同軸に輸送されてしまう。これは光を利用するユーザーにとって大きな問題となる。またHHGを利用しているユーザーはこの問題を解消する為に多層膜ミラーを用いて単一波長を取り出して利用しているが、VUV領域では波長選択に有効なミラーが存在しない為、利用があまり促進されていない。そこで以下で述べる新規に開発するアンジュレータを適用することで、高次まで発生している高調波の中から単一の波長を選択的に取り出すことが可能になり、またこの方式を用いれば円偏光のVUVコヒーレント光を発生させることができるので、新しい応用開発が盛んになると見込んでいる。

UVSOR-IIは昨年度より5ヶ年の光源改造計画が始まっている。蓄積リングのビーム入射点を変更することで長直線部を創出し、そこにコヒーレント光発生専用アンジュレータ及びビームラインを建設する。現在はレーザーシステムの増強を進めており、また先日、FEL光やCHG光を診断する為のVUV分光システムが完成した。他にも新規アンジュレータのパラメータデザインを行うと共に、シード光源となるHHG発生システムの開発にも着手した。

¹ E-mail: tanikawa@ims.ac.jp

2. コヒーレント高調波発生光源と測定系

2.1 コヒーレント光発生用アンジュレータの設計

新しく製作するコヒーレント光発生専用アンジュレータは図1に示すように、モジュレータ部、バンチャー部、ラディエータ部からなる3つの独立したシステムで構成されている。モジュレータ部は電子ビームにシード光を注入することにより電子ビームにエネルギー変調を発生させ、バンチャー部はそのエネルギー変調を空間密度変調に変換し、ラディエータ部ではシード光の波長間隔で空間的にコヒーレントに整列した電子マイクロバンチからコヒーレント光を発生させる。既設の光クライストロンは上記3つの構成が一体となって駆動する為、CHGには不向きであるが、新規アンジュレータはこれらを独立して駆動することができる為、CHGに最適な磁石パラメータを設計できる。また、このアンジュレータの特徴として、モジュレータ部とラディエータ部を直線上に設置しないことが挙げられる。これはシード光と発生したCHG光を同軸に輸送させないという目的がある。これにより様々な波長成分を含むHHGから単一の波長だけを取り出すことが可能となる。また、アンジュレータはAPPLE-II型を採用することで偏光可変のコヒーレント光発生が可能となると同時に、このアンジュレータは筐体可動式とし、共振器型FEL実験を行う際には直線状に並べることも可能とする予定である。現在、モジュレータ部の磁石パラメータ設計が完了した。パラメータ設計には3D磁場計算コードRADIAを用いた。計算の結果、磁石周期長は84 mm、周期数12で全長約1 mに決定した。

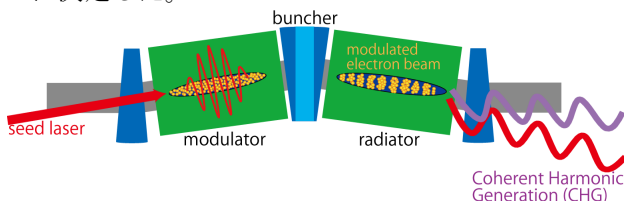


図1:コヒーレント光発生用アンジュレータ配置案。

2.2 VUV分光器と前置光学系

UVSOR-IIにおけるこれまでの実験は既存のFEL用光共振器を流用して行われてきた。光共振器下流側石英窓から大気中に光を取り出して可視領域分光器(浜松ホトニクス社製C5094)を用いて深紫外領域までのCHG光やFEL光のスペクトル測定等の光診断を行ってきた。しかし、より短波長の光は窓材によって透過率が制限される為、測定することができなかった。よって、VUV領域のCHGの研究を行うために新たに真空紫外領域の分光システムを建設することとなった。

図2にVUV分光システムの構成を示す。今回導入したVUV分光器(真空光学社製VMK-200-UHV)の仕様として、測定可能波長領域は凹面型レプリカ回折

格子(2400本/mm、Ptコート)で決まる直入射領域50~300 nmで、入射角64度の瀬谷波岡型、バッフル内蔵、超高真空対応となっている。検出器には電子増倍管(浜松ホトニクス社製R5150MOD)を使用しており、測定可能波長は200 nm以下、第1ダイノードは酸化ベリリウム、最大ゲインは10の9乗となっている。

前置光学系は2段ホルダーが付随した直進導入器とVUV分光器入射用ステアリングミラーから成る。2段ホルダーの上段には図4に示す光診断系に光を輸送する為の45度反射平面アルミミラーを取り付けており、下段にはバンドパスフィルターや金属薄膜フィルターなど様々な光学部品を取り付けられるようになっている。ステアリングミラーは、今後SiCミラーに交換する予定である。

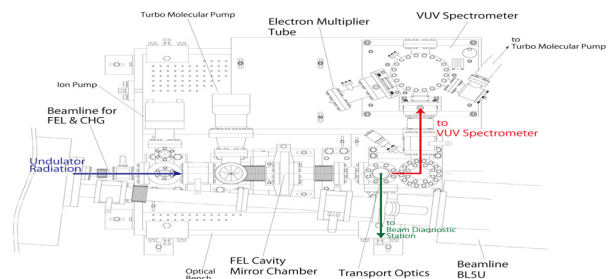


図2:真空紫外分光器及び前置光学系周辺の配置図。

3. CHG予備実験

3.1 装置配置

実験装置配置を図4に示す。フェムト秒チタンサファイアレーザーパルス(COHERENT社製外部RF同期モードロック発振器Mira及び再生増幅器Legend)はFEL用光共振器上流側よりARコート付きサファイア窓を介して入射される。窓の上流側にはBK7の集光レンズ($f=5000$ mm)が設置されており、光クライストロン前段の内部で集光されるようになっている。シード光と相互作用して発生したCHGはFEL用光共振器下流側に設置された光診断系及びVUV分光システムに輸送される。

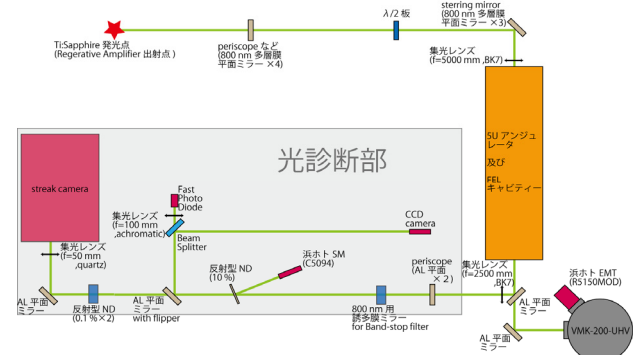


図4:CHG実験で用いた各種装置配置。

3.2 実験条件

本実験における電子ビーム、光クライストロン及びチタンサファイアレーザーのパラメータを表1に示す。

<Electron Beam>	
Beam Energy	600 MeV
Beam Current	~30 mA
Natural Bunch Length	108 ps
Natural Emittance	27.4 nm-rad
Energy Spread	4.2×10^{-4}
Revolution Frequency	5.64 MHz
Operation Mode	Single Bunch
<Optical Klystron>	
Pole Length	110 mm
Pole Number	9 + 3 + 9
K Value	6.32
<Ti: Sapphire Laser>	
Fundamental Wavelength	801 nm
Power	2.05 mJ
Pulse Duration	442 fs
Bandwidth	11 nm

表1: 実験で用いた各種パラメータ。

3.3 実験方法

まず光診断部にて、電子ビームとシード光となるチタンサファイアレーザーの時空間アライメントを行う。空間アライメントは図4のCCDカメラを用いて電子ビームとレーザー光が光クライストロン全体に渡って一様に重なるよう、シード光のアライメントを行う。続いて、高速ピンフォトダイオードを用いて、電子ビームとシード光の粗い時間重ね合わせを行う。その後、ストリークカメラ(浜松ホトニクス社製C5680)を用いて精密に時間重ね合わせを行った。

時空間アライメント完了後、VUV分光システムを用いて表1の条件で分光システム建設後初めてのスペクトル測定を行った。

4. 実験結果と考察

VUV分光器で測定された自発光の高調波スペクトルを図5に示す。測定で得られたデータは光学素子の回折効率は反射率を考慮していない。結果として、VUV分光システムの仕様通り50~200 nm(5~15次)までの光が観測できた。続いて、実験において測定した自発光の高調波及びCHGスペクトルを図6に示す。結果より、CHG光は8次高調波(波長100 nm)までの観測に成功した。なお、スペクトル強度は各高調波次数におけるピーク強度で規格化を行った。予測された通り、CHG光のスペクトル幅は自発放射光よりも狭くなっている。

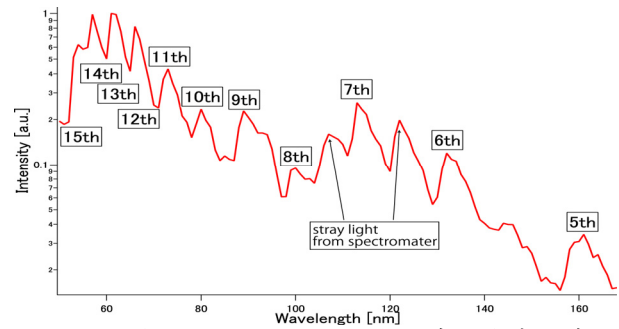


図5: 光クライストロンからの自発光高調波スペクトル分布。

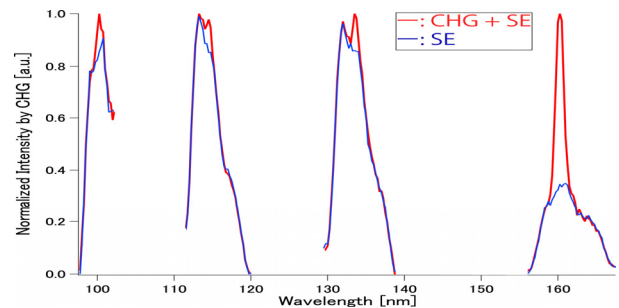


図6: 第5~8次におけるCHGと自発光(SE)とのスペクトル比較。

5. 今後の予定

現在設計中のHHG発生システムを完成させ、HHGをシード光としたCHGの研究に取り組む。また、コヒーレント光発生専用アンジュレータのパラメータはモジュレータ部まで決定したので、これからCHGに適したバンチャー部とラディエータ部のパラメータの設計を行っていく。

6. 謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究Bおよび量子ビーム基盤技術開発プログラムの支援を得て行われた。

参考文献

- [1] S.Bielawski, C.Evan, T.Hara, M.Hosaka, M.Katoh, S.Kimura, A.Mochihashi, M.Shimada, C.Szwaj, T.Takahashi and Y.Takashima, "Tunable narrowband terahertz emission from mastered laser-electron beam interaction", Nature Physics, VOL4, 390-393, 2008.
- [2] M.Labat, M.Hosaka, A.Mochihashi, M.Shimada, M.Katoh, G.Lambert, T.Hara, Y.Takashima and M.E.Coupric, "Coherent harmonic generation on UVSOR-II storage ring", The European Physical Journal D, VOL44, Number1, 187-200, 2007.
- [3] G.Lambert, T.Hara, D.Garzella, T.Tanikawa, M.Labat, B.Carre, H.Kitamura, T.Shintake, M.Bougeard, S.Inoue, Y.Tanaka, P.Salieres, H.Merdji, O.Chubar, O.Gobert, K.Tahara and M.E.Coupric, "Injection of harmonics generated in gas in a Free-Electron-Laser providing intense and coherent extreme-UV light", Nature Physics, VOL4, 296-300, 2008.