

STATUS OF LIGHT SOURCE DEVELOPMENTS AT UVSOR-II; 2007

Masahiro Katoh^{1,A,B)}, Akira Mochihashi^{A)}, Miho Shimada^{A)}, Jun-ichiro Yamazaki^{A)}, Kenji Hayashi^{A)}
Masahito Hosaka^{B)}, Yoshifumi Takashima^{B)}

^{A)} UVSOR Facility, Institute for Molecular Science, National Institutes of Natural Sciences
38 Nishigo-naka, Myodaiji, Okazaki, 444-8585

^{B)} Graduate School of Engineering, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603

Abstract

At the UVSOR-II electron storage ring, researches on generating coherent radiation are progressing. A resonator type free electron laser is successfully operational in very wide range, from visible to deep UV, with high average power exceeding 1 W. A femto-second laser system was introduced and the laser transport line was constructed by utilizing a part of the FEL system. Intense coherent terahertz radiation was successfully produced by the laser-electron interaction. It is also demonstrated that quasi-monochromatic terahertz radiation could be produced in a uniform magnetic field by creating periodic density modulation on electron bunches. Coherent harmonic generation was also demonstrated by using the same laser system.

UVSOR-IIにおける光源開発研究の現状

1. はじめに

UVSOR-II電子蓄積リングは、周長53m、電子エネルギー750MeVのシンクロトロン光源である。全国共同利用施設として年間約40週間運転されているが、その一方で、光源開発研究も盛んに行われている。リングの一部を利用して行われている共振器型自由電子レーザーの研究は、建設期以来の長い歴史を持つが、後述するように、2003年に実施された光源加速器の高度化によって、短波長領域での性能が大幅に向上し、利用研究も開始されている。2005年には、電子ビームと同期した極短パルスレーザー装置が導入され、レーザーと電子ビームを併用した光発生に関する研究がスタートした。本報告ではUVSOR-IIにおける光源開発研究の最近の状況について述べる。

2. 共振器型自由電子レーザー

共振器型自由電子レーザー装置はUVSOR-IIの4本の長直線部のうち1本を利用して建設されている。レーザーの源となるアンジュレータ装置は可変偏光型のオプティカルクライストロンである。通常はVUV領域の直線/円偏光アンジュレータ光を利用者に供給するために使用されている。全長約13mの光共振器もアンジュレータ光ビームラインと共存できるようにコンパクトに設計されている。自由電子レーザーの主要パラメータは表1にまとめてある。

2003年の蓄積リングの低エミッタンス化^[1,2]とそれに引き続く高周波加速系の増強^[3]により、特に短波長領域での増幅率が大幅に向上し、波長200nm近傍での発振が視野に入ってきた^[4]。既に波長215nmでの発振に成功しており、今後更に発振波長域を

200nm以下の領域へ拡大していきたいと考えている。

自由電子レーザー実験は、長年、電子エネルギー600MeVで行われてきたが、前述した電子ビームの品質の向上により、通常ユーザー運転時と同じ750MeVでの発振も可能となった。これによりビーム寿命はより長くなり、また、出力も向上し、可視から深紫外の広い領域で最大1Wを超えるまでになった^[5]。蓄積リング自由電子レーザーとしては現在のところ世界最強である。

この高出力、波長可変、また、同じリングから発せられるシンクロトロン光との完全同期という特性を活用した利用研究もスタートしている。その最初

表1. 自由電子レーザーの主要パラメータ

<u>Laser</u>	
Wave Length	215~800 nm
Spectral Band Width	~10 ⁻⁴
Polarization	Circular/Linear
Pulse Rate	11.26 MHz
Max. Average Power	~1 W
<u>Optical Cavity</u>	
Type	Fabry-Perot
Cavity Length	13.3 m
Mirror	HfO ₂ , Ta ₂ O ₅ , Al ₂ O ₃ multi-layer
<u>Optical Klystron</u>	
Polarization	Circular/Linear
Length	2.35 m
Period Length	11 cm
Number of Periods	9 + 9

¹ E-mail: mkatoh@ims.ac.jp

のものは可視領域のレーザーとアンジュレータ放射光を併用したいいわゆるポンププローブ実験であった^[6,7]。その後、深紫外領域での大強度発振が実現されるようになり、最近では波長200-250nmの領域での実験が中心となっており、成果も挙がり始めている^[8]。

一方、自由電子レーザー発振過程の基礎的な研究も行われている。UVSOR-II自由電子レーザーは通常の運転エネルギーで発振が実現することから安定性が高く、基礎的な研究を系統的に行うのに非常に適している。発振の不安定性とその抑制に関する研究^[9]や発振に伴う電子ビームの加熱に関する研究^[10]で成果が挙がっている。

3. レーザーバンチスライス

レーザーバンチスライスは、元々、電子蓄積リングでサブピコ秒の極短シンクロトロン光パルスが発生するために考案された手法であり、海外ではALS, BESSYで実証実験が行われている。UVSOR-IIでは自由電子レーザーと並ぶ光源開発の主要研究テーマとなりうると考え、いち早く検討を開始した。

レーザーバンチスライスでは電子蓄積リングに外部から極短パルスレーザーを打ち込み、アンジュレータ中で電子バンチと相互作用させ電子バンチの一部に大きなエネルギー変調を発生させる。電子バンチがリングを進む間にエネルギー変調を受けた電子がバンチから切り離されて、サブピコ秒の断片やディップが形成される。サブピコ秒の断片からのシンクロトロン光を取り出せば極短パルスが得られる。一方、ディップ構造からはテラヘルツ・ミリ波領域でのコヒーレントシンクロトロン光が得られる。

UVSOR-IIでは電子エネルギーが低いことから、カタログ製品として入手の可能なフェムト秒レーザー装置で実験に十分なピークパワーが得られる。前述した自由電子レーザー用光共振器を流用することで、加速器本体を改造することなく、レーザーをリング内に導入する光学路を容易に建設できる。また、自由電子レーザー用アンジュレータはその基本波長をTi:Saレーザーの基本波である800nmに合わせることができる。更にはバンチスライスの結果発生させるコヒーレントテラヘルツ光を観測するのに最適な赤外テラヘルツビームラインが稼動している。2005年にはフェムト秒レーザー装置が導入され、その後直ちに実験を開始することができた。UVSOR-IIでの実験装置の配置を図1に示す。

表2. 極短パルスレーザー装置の主要パラメータ

Wave Length	800 nm
Pulse Energy	2.5 mJ
Repetition Rate	1 kHz
Pulse Width	130 fs~1 ps
Waist Size in Undulator	247μm
Rayleigh Length	0.24 m

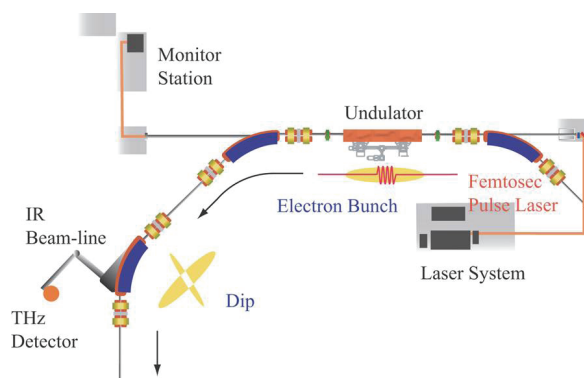


図1. UVSOR-IIレーザーバンチスライス実験機器配置

UVSOR-IIではテラヘルツ領域でのコヒーレント光発生を中心に実験を進めている。これまでに、パルス強度が通常シンクロトロン光の 10^5 倍程度の大強度のテラヘルツパルスの発生に成功している。テラヘルツ光の強度が電子バンチのピーク電流値の二乗に比例して増大すること、テラヘルツ光スペクトルがレーザーパルス長に応じて変化することなどの観測結果を得ている^[11,12]。

バンチスライスは、レーザーを用いた電子線パルス整形法の一つと捉えることができると考えている。その一例であるが、振幅変調をかけたレーザー光をリングに打ち込むことで、電子バンチ上にミリメートルあるいはサブミリメートルスケールの周期的な密度変調を形成し、偏向電磁石中で準単色のコヒーレント光を発生させることに世界で初めて成功した^[13,14]。洗練されたレーザー技術を用いて電子パルスを自在に整形することで、様々な特徴を持つコヒーレント光を生成できる可能性があると考えている。

4. コヒーレント高調波発生

レーザーバンチスライスのために導入したレーザー装置を用いて、コヒーレント高調波発生の研究も行っている。レーザーパルスと電子バンチがアンジュレータ中で相互作用することで、電子バンチ上にレーザー波長の周期でエネルギー変調が形成される。電子バンチがアンジュレータ中を進む間に、このエネルギー変調が密度変調へと変換される。周期的な密度変調をもつ電子バンチは相当する波長でコヒーレント放射する。もしエネルギー変調が、電子バンチのエネルギー拡がりよりも十分大きい場合には、形成される密度変調は、レーザー波長の整数分の1の波長の高調波成分を含むようになる。このため、元のレーザー波長だけでなくその整数分の1の波長の高調波もコヒーレントに放射する。これはコヒーレント高調波発生と呼ばれ、共振器用のミラーの製作が極めて困難な短波長域でコヒーレント光を作り出すための技術の一つと考えられている。電子蓄積リングにおいて、比較的手軽にシンクロトロン光と同期した真空紫外領域でのコヒーレント光を得

る手法である。いわゆるSASEの原理をベースにしたX線自由電子レーザーにおいても、より短波長の光を得る、あるいは、レーザー光の特性を改善するための基礎技術として注目されている。

UVSOR-IIでは、図1に示すシステムをそのまま流用することで、コヒーレント高調波発生の実験を行うことができる。これまでにTi:Saレーザーの三倍高調波の観測に成功しており、その強度が電子バンチのピーク電流の二乗に比例することも確認できた^[15]。また、空間的干渉性などのコヒーレント光の特性に関する研究も進めている。

5. おわりに

UVSOR-IIでは、共振器型の自由電子レーザーにより可視から深紫外のコヒーレント光を生成できる。その平均強度は1Wを超える。一方、外部レーザーを利用した電子パルス整形の手法により、テラヘルツ領域の大強度白色コヒーレント光、同じく準単色コヒーレント光の生成に成功している。また外部から注入したレーザー光のコヒーレント高調波の発生にも成功した。現在は深紫外の領域で三倍波を確認しているに過ぎないが、実際には高調波は真空紫外領域にまで及んでいると考えられる。真空紫外・軟X線領域から赤外・テラヘルツ領域に及ぶ通常シンクロトロン光や外部レーザーも含めたこれら全ての光は相互に同期が取れている。時間領域での計測においてユニークな利用法があるのではないかと期待している。本稿では述べなかったが、コヒーレント光を電子ビームで逆コンプトン散乱させることによるX線やガンマ線発生の可能性もあり、今後更に波長域を拡大できる可能性もあると考えている。

Acknowledgement

We would like to give thanks to all the staff members of the UVSOR facility. A part of this work was supported by Grant-in-aid for Scientific Research from JSPS. Some parts are collaboration works with Drs. S. Kimura, T. Takahashi, M. E. Couprie, M. Labat, G. Lambert, S. Bielawski, C. Sz waj, C. Evain partly supported by International Collaboration Program of IMS and by the Invitation Fellowship Program of JSPS.

参考文献

- [1] M. Katoh, et al., "Construction and Commissioning of UVSOR-II", AIP Conf. Proc. 705 (2004) 49-52
- [2] M. Katoh et al., "New Lattice for UVSOR", NIM A 467-468 (2001), 68-71
- [3] A. Mochihashi et. al., "Upgrade of Main RF Cavity in UVSOR-II Electron Storage Ring", Proc. EPAC2006 (2006, Edinburgh), 1268-1270
- [4] M. Hosaka et al., "Upgrade of the UVSOR storage ring FEL", NIM A 528 (2004), 291-295
- [5] M. Hosaka et. al., "High Power Deep UV Lasing on the UVSOR-II Storage Ring FEL" , Proc. FEL2006 (2006, Berlin), 368-370
- [6] T. Gejo et al., "The investigation of excited states of Xe atoms and dimmers by synchronization of FEL and SR pulses at UVSOR", NIM A 528 (2004), 627-631
- [7] M. Hosaka et. al., "Status and Prospects of User Application of the UVSOR Storage Ring Free Electron Laser," AIP Conf. Proc. 705 (2004) 61-64
- [8] T. Nakagawa et al., "Measurements of threshold photoemission magnetic dichroism using ultraviolet lasers and a photoelastic modulator", Rev. Sci. Instr. 78 (2007), 023907
- [9] S. Bielawski et al., "Feedback Control of Dynamical Instabilities in Classical Lasers and FELs", Proc. 27th FEL Conf. (2005), 391-397
- [10] M. Labat et al., "Longitudinal and transverse heating of a relativistic electron bunch induced by a storage ring free electron laser", PRSTAB 9, 100701 (2006)
- [11] M. Katoh et al., "Coherent Terahertz Radiation at UVSOR-II", AIP Conf. Proc. 879 (2007), 71-73
- [12] M. Shimada et al., "Intense Terahertz Synchrotron Radiation by Laser Bunch Slicing at UVSOR-II Electron Storage Ring", submitted to Jpn. J. Appl. Phys
- [13] M. Shimada et al., "Generation of THz Coherent Synchrotron Radiation on Electron Storage Ring", in these proceedings
- [14] S. Bielawski et. al., "Tunable narrowband terahertz emission from mastered laser-electron beam interaction", in preparation
- [15] M. Labat et al., "Coherent harmonic generation on UVSOR-II storage ring", Eur. Phys. J. D. e2007-00177-6 (2007).