

## SATURATION PHENOMENA OF VUV CHG AT UVSOR-II

Takanori Tanikawa<sup>#A)</sup>, Masahiro Adachi<sup>B)</sup>, Heishun Zen<sup>B)</sup>, Masahito Hosaka<sup>C)</sup>, Naoto Yamamoto<sup>C)</sup>,  
Yoshitaka Taira<sup>B, C)</sup>, Jun-ichiro Yamazaki<sup>B)</sup>, Masahiro Katoh<sup>B)</sup>

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

We report some systematic measurements such as the undulator gap dependence and seed laser power dependence on coherent harmonic generation (CHG). In the laser power dependence, we have observed a saturation of coherent harmonics' intensity. Indeed, a system of high-harmonic generation (HHG) in gas for a seed light of shorter CHG is under development.

## UVSOR-II における真空紫外コヒーレント高調波の飽和現象

### 1. はじめに

近年、世界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活発であり、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 Self-Amplified Spontaneous Emission (SASE) 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(以下、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(シード光)を電子ビームに注入、すなわち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するシングルパス・シード型 FEL やコヒーレント高調波発生(以下、CHG: Coherent Harmonic Generation)が挙げられる。

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<sup>[1,2,3]</sup>。そして近年は、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 の研究を進めてきた<sup>[4,5]</sup>。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短パルスで偏光可変な真空紫外(以下、VUV: Vacuum Ultra-Violet)領域のコヒーレント光発生を目的としている。

### 2. VUV CHG のスペクトル測定のために

#### 2.1 装置配置

実験装置配置を図 1 に示す。シード光となる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、シード光は光クライストロン前段のモジュレータで集光されるようになっている。

電子ビームとシード光を相互作用させることによって発生したコヒーレント高調波は 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。

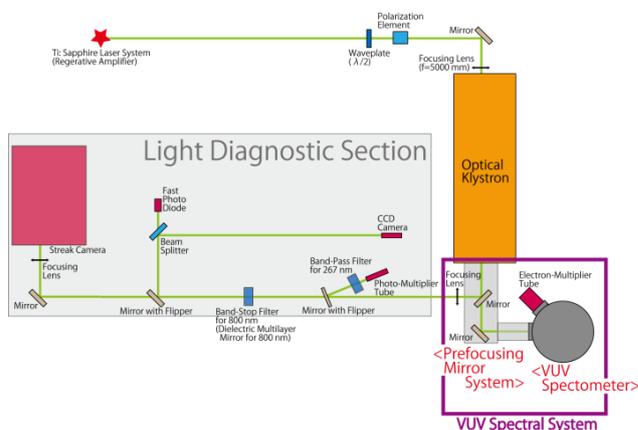


図 1: 実験装置配置の概略図

#### 2.2 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。第 3 章に記述した実験において、シード光強度に対するコヒーレント高調波強度についての測定ではシード光パルス幅は 200 fs、それ以外の測定ではパルス幅 1 ps で実験を行った。

<sup>#</sup> tanikawa@ims.ac.jp

表 1 : 実験で用いた各種パラメータ

< Electron Beam >	
Beam Energy	600 MeV
Beam Current	~ 30 mA
Bunch Length	161 ps
Natural Emittance	17.5 nm-rad
Natural Energy Spread	$3.4 \times 10^{-4}$
Revolution Frequency	5.64 MHz
Operation Mode	Single Bunch
< Optical Klystron >	
Period Length	110 mm
Number of Periods	9 + 9
K Value	6.32
Nd	45
< Ti: Sapphire Laser >	
Wavelength	800 nm
Pulse Energy	~2.0 mJ
Pulse Duration	130 ~ 1215 fs
Repetition Rate	1 kHz

### 2.3 実験手法

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 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のモジュレータ内全体に渡って一様に重なるよう行う。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ている。

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 の条件でスペクトル測定を行った。

### 3. 実験結果と考察

VUV 分光器で自発高調波(以下、SE: Spontaneous Emission)とコヒーレント高調波を測定した結果、コヒーレント高調波は第 9 次高調波(波長 89 nm)までの観測に成功した。図 2 に第 5 次の、図 3 に第 7 次の自発高調波とコヒーレント高調波のスペクトルを示す。図よりコヒーレント高調波のスペクトル幅は自発高調波のスペクトル幅より明らかに狭くなった。

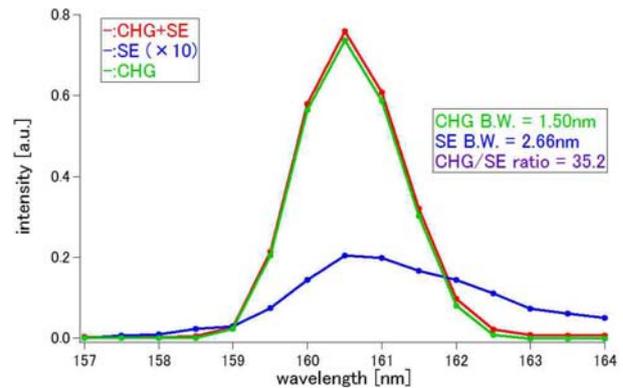


図 2 : 第 5 次高調波における自発高調波及びコヒーレント高調波のスペクトル

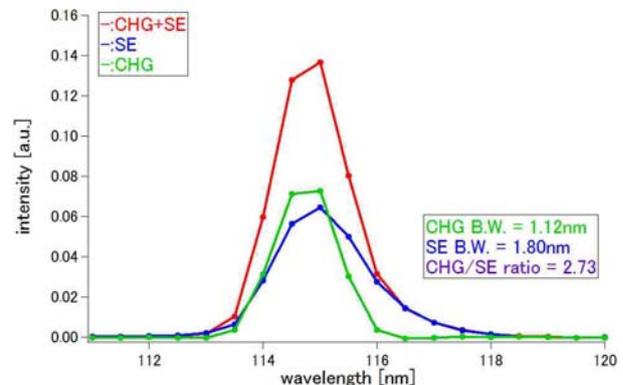


図 3 : 第 7 次高調波における自発高調波及びコヒーレント高調波のスペクトル

第 5 次の自発高調波コヒーレント高調波の波長と強度におけるアンジュレータギャップ依存性について図 4 に、第 7 次のギャップ依存性については図 5 に示す。

自発高調波のピーク波長はギャップに対しほぼ線形に変化していることに対し、コヒーレント高調波の場合ピーク波長はシード光波長の整数分の一に固定されている。加えて、ギャップに対するコヒーレント高調波のピーク強度は自発高調波のそれと似た振舞いを示している。これは以下に示す式で表すことができる。コヒーレント高調波のスペクトルは、

$$\frac{dI_{CH}}{d\lambda} = \frac{dI_{SE}}{d\lambda} N(N-1) |F(\lambda)|^2 \quad (1)$$

ここで  $I_{CH}$  はコヒーレント高調波の強度、 $N$  はシード光と相互作用した電子数、 $F(\lambda)$  は電子バンチのフォームファクター、 $I_{SE}$  は自発高調波の強度である<sup>[6]</sup>。この場合、フォームファクターはシード光の高調波波長において狭いピークを持っているので、ピーク波長はフォームファクターのスペクトル依存性によって決められる。故に、フォームファクター

はアンジュレータギャップに対してほとんど依存性を持たないのでギャップ依存性は式 1 の  $dI_{SE}/d\lambda$  で決まってしまう。

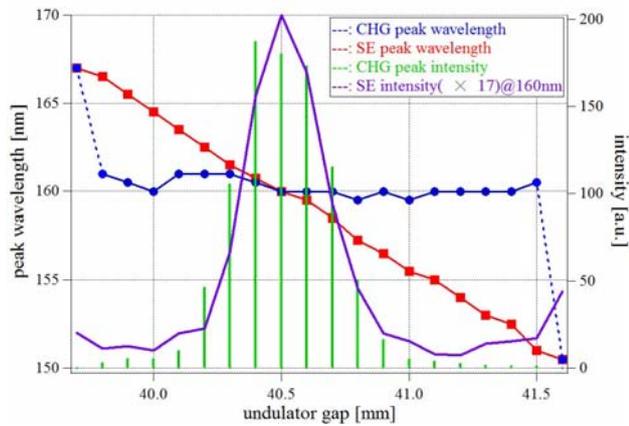


図 4：第 5 次高調波における自発高調波及びコヒーレント高調波のピーク波長及びピーク強度に対するアンジュレータギャップ依存性

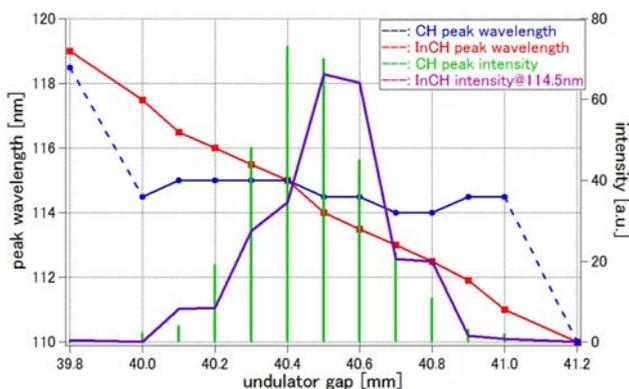


図 5：第 7 次高調波における自発高調波及びコヒーレント高調波のピーク波長及びピーク強度に対するアンジュレータギャップ依存性

シード光強度に対するコヒーレント高調波強度についても測定を行った。その結果、図 6 に示す通りコヒーレント高調波の飽和現象が観測された。この図において、第 3 次と第 5 次の高調波のピーク強度について横軸をシード光のピーク強度でプロットした。シード光のピーク強度が上がるにつれコヒーレント高調波強度も大きくなり、1.5GW 付近で飽和を迎えた。さらにそれを超えると 2 回目の飽和現象が観測された。これはおそらくシード光によって放射波長間隔で整列されたマイクロバンチがさらに進んでオーバーバンチングし、その後再バンチングが起きた結果であろうと考えている。この考察に対し至急計算コードとの比較を行う予定である。

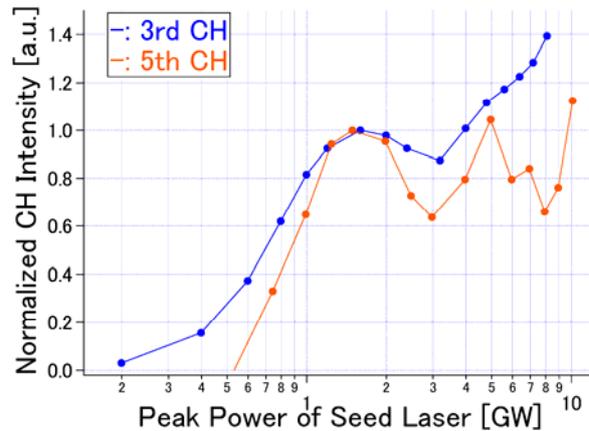


図 6：第 3 次及び第 5 次高調波におけるコヒーレント高調波強度に対するシード光強度依存性

#### 4. 短波長 CHG に向けて

更なる短波長 CHG を目指して、今回使用したチタンサファイアレーザーの代わりにガス高次高調波 (以下、HHG: High-Harmonic Generation) をシード光としたコヒーレント高調波光源の開発を行っている。現在、図 7 に示す通り、ガス高調波発生装置の建設が完了した。これからはガス高調波発生実験を行い、十分な要請を満たす光源となった時にこれをシード光とした HHG-seeded CHG 実験を行う。

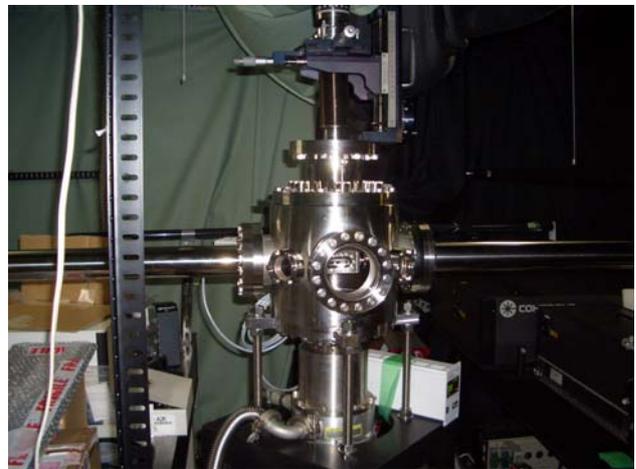


図 7：ガス高調波発生装置

#### 5. まとめ

VUV 分光器を用いた CHG 実験において、アンジュレータギャップ依存性及びシード光強度依存性について測定を行った。アンジュレータギャップ依存性については、コヒーレント高調波の波長がシード光波長の整数分の 1 に固定されること、そしてコヒーレント高調波強度に対するギャップの応答が自発放射光のそれに依存することを確認した。シード光強度依存性に関しては、シード光強度の増加と共にコヒーレント高調波の強度が大きくなりその結果、飽和を観測した。さらにシード光強度を上げていく

と 2 度目の飽和が起こることを観測した。これは電子バンチ内のマイクロバンチがオーババンチング中に再バンチングを起こしている為であると考えている。また短波長 CHG に向けて、シード光となる HHG 光源を準備しており、現在 HHG 装置の建設が終了した。

## 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] M.Hosaka, et.al, UVSOR Activity Report 2007, 2008.
- [2] M.Hosaka, et.al, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 507, 289-293, 2003.
- [3] H.Zen, et.al, Proceedings of FEL 09, Liverpool, England, 2009.
- [4] M.Labat, et.al, The European Physical Journal D, VOL44, Number1, 187-200, 2007.
- [5] M.Labat, et.al, Proceedings of FEL 08, Gyeongju, Korea, 2008.
- [6] O.Grimm, Proceedings of PAC 07, New Mexico, USA, 2007.