

VUV diagnostic system for SCSS Prototype Accelerator

Makina Yabashi^{1,A,B)}, Toko Hirono^{A,B)}, Tomoyuki Kirimura^{B)}, Atsushi Higashiya^{B)}, Haruhiko Ohashi^{A)},
Shunji Goto^{A)}, Hiroaki Kimura^{A,B)}, Kazuyuki Onoe^{B)}, Tsumoru Shintake^{B)}, Tetsuya Ishikawa^{A,B)}

^{A)} JASRI/SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo 671-5198

^{B)} RIKEN/SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo 671-5148

Abstract

A vacuum ultraviolet (VUV) diagnostic system has been designed and constructed for evaluating photon-beam properties (i.e., spectrum, beam energy, spatial profile, coherence) of SCSS Prototype Accelerator. The system covers a wavelength range from 400 nm to 30 nm. The dispersive spectrometer, which is composed of an incident slit, a spherical grating, and a back-illuminated CCD, enables single-shot measurement of VUV spectrum. Photodiodes are used for measuring beam energy from pJ to >10 μ J in shot-by-shot. Preliminary results are obtained in the machine commissioning period

SCSS試験加速器における光評価システム

1. はじめに

SCSS 試験加速器^[1]における放射光評価システムは、スペクトル、ビームエネルギー、空間プロファイル等の計測を通して、加速器の診断・調整を高精度かつ効率よく行うことを主眼において構築された。波長領域としては可視 (700 nm) から真空紫外領域 (30 nm)、ビームのエネルギーとしては pJ (自発放射光) から 10 μ J 超 (SASE 飽和光)、さらにショット毎の計測を行う必要がある。

デザインは 2005 年のはじめに決定され、試験加速器の建設と並行してインストールが進められた。2005 年秋にはファーストビームを観測し、その後主に可視領域の光診断が行われた。2006 年春には光学素子の入れ替えを行い、2006 年 5 月から 7 月にかけてのビームコミッショニングでは、真空紫外領域の光診断が行われた。特に、6 月にファーストレイジングを観測し、この後 SASE の状態を最適化するように加速器調整が進められた^[2]。

2. デザインと評価

2.1 概要

図1に評価装置の全体図を示す。各コンポーネントは2台の石定盤上に設置され、全体はターボ分子ポンプによって 10^{-6} Pa台の高真空に保たれている。入射パワーは最大でも1 mWを超えないため、光学素子の冷却は不要である。上流の石定盤の最下流には、平面ミラー [偏角 170° 、金コート (VUV用) またはアルミニウムコート (可視用)、合成石英基板] が置かれ、高エネルギーのプレムスが除去される。下流の石定盤には、スリット、回折格子、裏面照射型 CCD によって波長分散型のスペクトロメータが構成される。各コンポーネント間には、いくつかのニューマティックアクチュエーターが用意されており、検出器、蛍光スクリーン、光学素子等が挿入可能である。また、最上流には、アライメントレーザーをモニターするための CCD カメラと光学素子駆動機構が設置されている。このアライメントレーザーは本光学系のアライメントにも利用される。

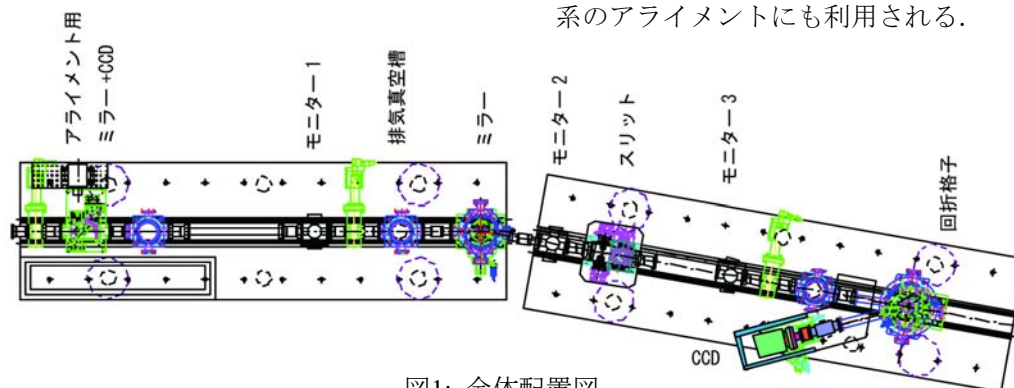


図1: 全体配置図

¹ E-mail: yabashi@spring8.or.jp

2.2 スペクトロメータ

スペクトロメータは、凹面回折格子 ($R = 922 \text{ mm}$) を用いた直入射定偏角型 (偏角 25°) である。入射スリットから回折格子までの距離は固定されており (1615 mm)、回折格子の回転と CCD の光軸方向の並進という二軸動作によって、CCD の中心に結像する中心波長を変化させる。CCD は出射ビームに対して垂直に置かれている。水平方向 (長手方向) が分散方向となり、垂直方向は入射スリット近傍の実空間に対応している。

回折格子は、真空紫外用として金コート・2400本/mm、可視用としてアルミニウムコート・600本/mm の 2 種類が用意されている。CCD (Princeton Instruments社: PI-SX 400-1340B) は、1340 (水平)・400 ピクセル (垂直)・ピクセルサイズ 20 msq の電子冷却の裏面照射型で、可視光から X 線まで感度を有する。

スペクトロメータの分解能を定める要因は次の3つである:

- ① 回折格子の照射範囲内の刻線数
- ② 検出器の空間分解能
- ③ 収差

特に、本光学系では、入射スリットに対する前置光学系として平面ミラーを用いているため、入射スリットに対してビームは (集束ではなく) 平行に輸送される。したがって、回折格子の照射範囲は、入射スリットにおける平面波回折による拡がりによって決定される。

図2に、入射スリット $100 \mu\text{m}$ 、検出器の空間分解能を $60 \mu\text{m}$ (3 pixels) としたときの分解能 $\lambda/\Delta\lambda$ の計算値と、ヘリウムランプ (He I, $\lambda = 58.43 \text{ nm}$) 及び水銀ランプ (Hg I, $\lambda = 184.95, 253.65 \text{ nm}$) を用いた分解能の計測値を示す。また、実際の CCD 上のプロファイルを図3に示す。実測値は検出器の分解能で定まる計算値とおおむね一致しており、 $\lambda = 58.4 \text{ nm}$ においても 1000 を超えている。また、①②に比べ③の収差の影響は小さいことがレイトレース計算から示されているが、これは実測においても確認された。さらに、波長をヘリウムランプで校正した場合、ヘリウムから水銀ランプの波長範囲内で、絶対値の誤差は 0.1 nm より小さいことがわかった。

また、回折格子の回折次数を 0 次とすることで、入射スリット近傍の空間プロファイルを計測することが可能である。

2.3 強度モニター

ショット毎のビーム強度 (ビームエネルギー) の計測は、フォトダイオード (IRD 社^[3] SXUV100 / SXUV100RPD, 受光面サイズ $10 \times 10 \mu\text{m}^2$) をチャージアンプ (AXUV100) またはオシロスコープと組み合わせることで行われている。オシロスコープの代

わりに A/D コンバータに繋ぎ込むことで、加速器制御系からモニターすることも可能である。現在、フォトダイオードは、ミラーの上流 (PD1) とスリットの下流側 (PD2) に設置されており、遠隔制御によりビーム光軸への挿入・退避が可能である。また、入射エネルギーが過大になるとキャリアの再結合がおきレスポンスが飽和してくるが、その閾値は $1 \mu\text{J}$ 程度であるとみられている。

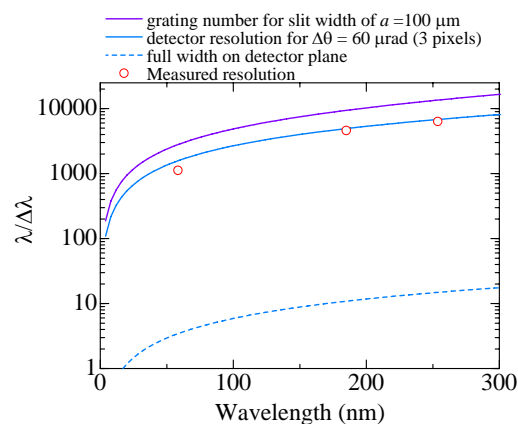


図2: スペクトロメータの分解能. 紫実線は刻線数, 青実線は検出器の分解能から決まる計算値 (@スリット幅 $100 \mu\text{m}$). 赤丸は実測値. 青点線は CCD の視野範囲内の波長領域.

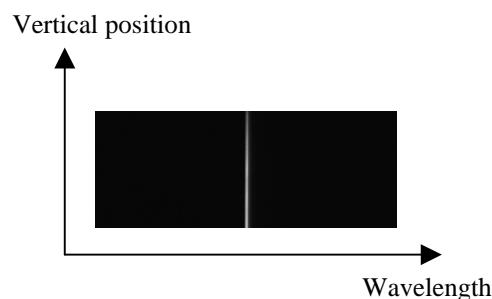


図3: CCD上のイメージ. 水平方向が分散方向, 垂直方向が実空間に対応している.

3. 評価結果

3.1 スペクトル

コミッション時には、自発光及び SASE 光のスペクトル計測を通して次のような調整・評価が行われた。

- ・ 軌道、バンチング等の電子ビーム条件の最適化
- ・ アンジュレータのチューニング
- ・ SASE 強度のアンジュレータ K 値依存性の評価^[2]
- ・ 電子ビームのエネルギーの測定^[4]

自発光の場合は約 100 ショット、SASE の場合はシングルショットでスペクトルを取得することが可能である。図4に、シングルショットで取得された

SASEのスペクトルを示す. 電荷量は約 0.24 nC, アンジュレータギャップは3 mm, 入射スリット幅は100 μm である. スペクトルは弓型になっているが, これは垂直方向に関して中心軸上が最短波長 (左方向)で, 軸外にいくにつれ長波長側 (右方向) にシフトすることを意味している. 中心付近の軸上のスペクトルを図5に示す. これより, 中心波長は $\lambda = 59.0$ nm, 半値幅は $\Delta\lambda = 0.234$ nm と求められた.

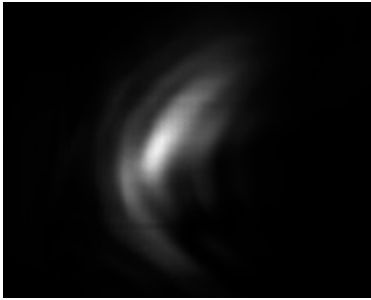


図4: 分光後のSASEのプロファイル.

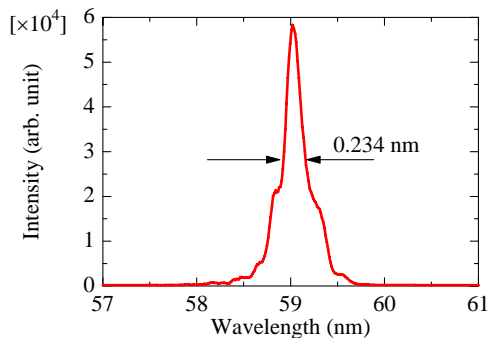


図5: 軸上のスペクトル.

このスペクトル幅から, もとのパルス形状を仮定することでパルス長を推定することが可能である. 例えば矩形の形状を仮定すると, フーリエ限界光のエネルギーバンド幅 ΔE とパルス幅 Δt の関係は次のように表される.

$$\Delta E \cdot \Delta t = 3.6 \text{ (eV.fs)}$$

ここで, $\Delta E/E = \Delta\lambda/\lambda$ の関係より, $\Delta E = 0.83$ eVとなるため, $\Delta t = 43$ fs と見積もられる.

3.2 ビームエネルギー

フォトダイオードを用いてビームエネルギーが計測された. 特に発振時のビーム強度の様々な依存性 (ビーム軌道, バンチング, タイミング, コリメーション, アンジュレータのアライメント等々) をリアルタイムで確認しながらビーム調整が行われた.

図6に, フォトダイオード (SXUV100) の出力波形をオシロスコープで観測した結果を示す. これはデバンチング条件 (自発光) のもと, 電荷量 0.24 nC, アンジュレータギャップはID1 = 6.5 mm (ID2 = 25 mm), 中心波長は35 nm (スペクトロメータで計測)

といったパラメータで計測された. この場合ビームエネルギーが比較的小さいため, フォトダイオードの出力にチャージアンプ (PA-100) を接続して増幅している. ゲインはオペアンプの帰還抵抗の値で決まっており, この測定では100 k Ω を用いているが, 広いダイナミックレンジに対応できるように5000 k Ω から1 k Ω まで遠隔で可変である. さらに大強度になったときは, チャージアンプをバイアスティ (BT250) に変更し, 高い逆バイアス (50 V 以上) をかけながら50 Ω 入力で受ける..

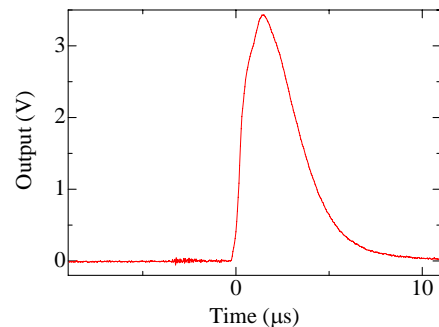


図6: オシロスコープで計測されたフォトダイオードの出力波形.

図6のような結果から, 次に示す手順によって入射エネルギー (単位 J) に変換される

- ① 出力波形の面積を時間積分する. (単位V.s)
- ② ①をゲイン (単位 Ω) で割る. (単位C)
- ③ ②を検出器の効率 (単位C/J) で割る. (単位 J)

検出器の効率は, 現在はカタログ値を利用しているが, 素子間のばらつき等を考慮すると実験的に確認できるのが望ましい. そのために, 自発光を用いた次のような較正法のテストを行った.

まず, デバンチング条件でアンジュレータの自発光に対して強度の計測を行い, 上記①, ②の手順により検出器からのチャージ量に変換する. 一方, 検出器が光源を見込む立体角を用いると, 自発光の部分パワーが計算^[5]により求められる. この部分パワーは, 電子ビームのエネルギーと電荷量以外のパラメータの依存性が比較的小さいため, よいリファレンスとなる. したがって, この計算値で規格化することで, 精度良く効率を求められる. この方法で重要なことは, 単色光に対する効率を求めるためにアンジュレータの高次光の影響を防ぐ必要があるということである. このためにはK値を小さくする必要がある. 一方で, K値が極端に小さい場合はパワーのK値依存性が大きいためやはり誤差が大きくなる. したがって, 適当なK値は0.2から0.7程度と考えられる.

図7に, いくつかのK値に対して効率を求めた結果を示す. PD1に関してはカタログ値と30%以内で一致する結果が得られた. PD2に関しては, 金ミラー (反射率約80%) の下流にあることを考慮するとPD1

とよく一致している。今後、40 nm 以上の長波長側に対して、電子ビームのエネルギーを下げた計測する予定である。

現在、フォトダイオードによって最大で2 μJ 程度のエネルギーが確認されているが、検出器の出力は飽和に近づいている。したがって、金属箔のアッテネータ等により強度を減衰させて計測する必要がある。この場合でも、上記の較正方法を用いるとアッテネータの透過率込みの効率を求めることができるため絶対強度への変換が可能である。

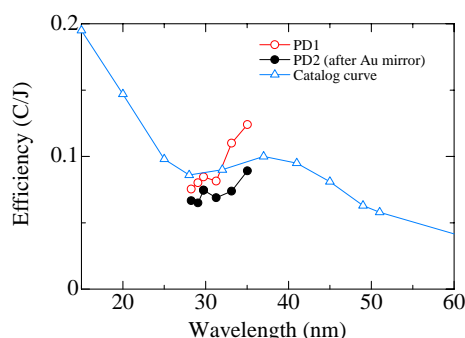


図7: 効率の較正. 赤丸, 黒丸がそれぞれPD1, PD2の実測値. 青線はカタログ値.

3.3 空間プロファイル及び空間コヒーレンス

回折格子の次数を0次で用いると、回折格子を球面鏡とみなすことができるため、入射スリット近傍の空間プロファイルを測定することが可能である。図8に結果を示す。ID1のみギャップを閉めた (3.18 mm) 状態で、シングルショットで計測された。これより半値幅は3.4 mm / 3.9 mm (水平/垂直) と求められ、ID1出口からスリットまでの距離 13.9 m を用いると発散角が 240 urad / 280 urad (水平/垂直) と求められた。

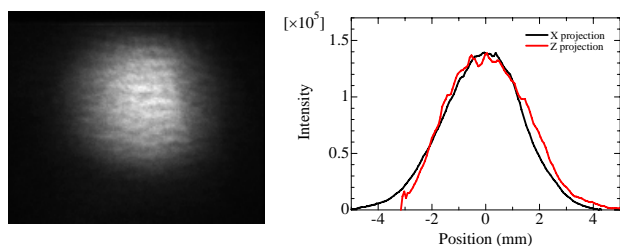


図8: 空間プロファイルの2次元イメージ (左) と各軸への投影 (右).

次に、ダブルスリットを用いたヤングの干渉実験によって、空間コヒーレンスの確認を行った。幅 100 μm (高さ500 μm) の開口が中心間隔400 μm で開けられたダブルスリットを、入射スリットの位置に取り付けられた。さらに、回折格子を平面ミラーに変更して、ダブルスリットを透過した光の干渉像をCCDで計測した。図9に結果を示す。SASE (バンチング条件, シングルショット) と自発光 (デバンチング条件, 100ショット) を比較すると、前者の方が高

い可視度が得られた。今後は、より定量的な議論を行うために、異なる間隔のダブルスリットを複数用意して干渉実験を行うことを計画している。

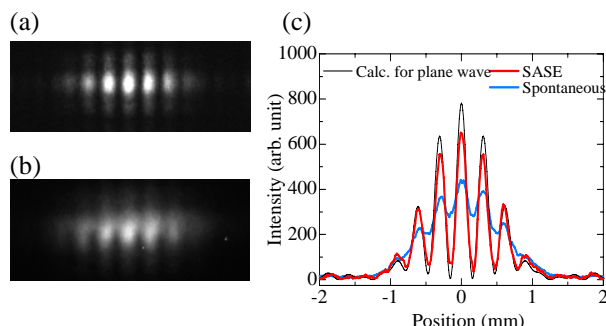


図9: ヤングのダブルスリットを用いた干渉実験. SASE (a) 及び自発光 (b) のCCD上のイメージと水平方向のプロファイル (c).

4. 謝辞

スペクトロメータの設計に当たっては、高田恭孝博士、原田慈久博士、徳島高博士 (以上理研) にご助言を頂きました。また、ヘリウムランプを用いた評価では関山明博士 (阪大)、松下智裕博士 (JASRI)、為則雄祐博士 (JASRI) にアドバイスを頂きました。改めて感謝の意を表します。

参考文献

- [1] T. Shintake, et al., "Status of SCSS X-FEL project at RIKEN/SPring-8" presented in the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, 2006.
- [2] H. Tanaka, et al., "Beam Performance of the SCSS Prototype Accelerator" presented in the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, 2006
- [3] International Radiation Detector Inc., URL:<http://www.ird-inc.com/>.
- [4] K. Shirasawa, "Operational experience of C-band accelerator at the SCSS prototype accelerator", presented in the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, 2006.
- [5] SPECTRA, developed by T. Tanaka and H. Kitamura (RIKEN/SPring-8).