

スミス=パーセル放射角度分布の計測とバンチ長計測への応用

MEASUREMENT OF SMITH-PURCELL RADIATION ANGULAR DISTRIBUTION AND ITS APPLICATION TO BUNCH LENGTH MEASUREMENT

山田悠樹*, 柏木茂, 日出富士雄, 三浦禎雄, 武藤俊哉, 南部健一, 高橋健, 長澤育郎,
鹿又健, 柴田晃太朗, 山田志門, 熊谷航平, 濱広幸

Hiroki Yamada, Shigeru Kashiwagi, Fujio Hinode, Sadao Miura, Toshiya Muto, Kenichi Nanbu, Ken Takahashi,
Ikuro Nagasawa, Ken Kanomata, Kotaro Shibata, Shimon Yamada, Kohei Kumagai and Hiroyuki Hama
Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University

Abstract

Basic research for the development of a beam non-destructive and single-shot bunch length measurement using coherent Smith-Purcell radiation (CSPR) has been carried out at the test accelerator t-ACTS in Tohoku University. Using ultra-short electron bunch beam, some basic properties of the CSPR generated in the terahertz frequency region were observed such as the radiation spectrum and impact parameter dependence. We describe an attempt to monitor the bunch length fluctuation with a simple measurement configuration for CSPR and present the preliminary results of test experiments.

1. はじめに

現在、サブ ps から fs までの超短電子バンチを生成できる次世代加速器の開発が世界的に進められている。例えば、プラズマを用いた次世代加速器では、数十 fs レベルの超短電子バンチを生成できるが、従来の高周波加速に比べると相対的なショットごとのばらつきは大きい [1]。ビーム非破壊かつシングルショットでの測定が可能な CSPR は、このようなビームのバンチ長モニターとして極めて有用と期待される。さらに、CSPR の放射角度は波長分散をもっているため、付加的な分光器を用意することなくコンパクトにスペクトルの測定系を構築することが可能である。これまでも CSPR のスペクトル計測を用いたバンチ長の測定は既に試みられている [2]。バンチ長が短いほどバンチ形状因子の分だけ CSPR スペクトルの短波長成分が大きくなるため、角度分布の前方方向の強度が増加する。ピーク角はバンチ長に対してほぼ直線的に変化し、バンチ長が同じであれば、バンチ電荷の違いなどで光強度が変化してもピーク角は変化しない。ピーク角の位置がバンチ長を反映することを利用して、我々は相対的なバンチ長の変動をシンプルなシステムで観測可能なモニターの開発を進めている。

2. コヒーレントスミス=パーセル放射

スミス=パーセル放射は周期構造を持った金属近傍を電子が通過する際に発生する電磁波である [3]。SPR は放射波長がその周期構造の周期長と観測角によって規定される。放射波長は次のようにあらわされる。

$$\lambda_n = \frac{d}{n} \left(\frac{1}{\beta} - \cos\theta \right) \quad (1)$$

ここで、 d は格子の周期、 n は放射の次数、 θ はビーム

の進行方向からとった観測角、 $\beta = v/c$ は粒子の相対論的速度である。SPR の強度はビームと回折格子の距離 (インパクトパラメータ) にしたがって指数関数的に減少する。また、角度分布の形状は回折格子の形状によって決まる回折格子因子に大きく影響される。回折格子因子は解析的に解くのが困難なため表面電流(SC)モデル [2] を使って数値計算を行う。電子バンチからの放射について放射波長 λ がバンチ長 σ_z よりも短い時には、コヒーレントな放射となる。このとき放射のエネルギーは電子数 N_e の二乗に比例する強い放射となる。また、その時の CSPR の分布は単電子の分布に電子数の二乗 N_e^2 と縦方向のバンチ電荷分布 $\rho(z)$ の情報を持つバンチ形状因子 $f(\omega)$ をかけた形になる。

$$\sigma_z < \lambda, \left(\frac{dI}{d\Omega} \right)_{N_e} = N_e^2 f(\omega) \left(\frac{dI}{d\Omega} \right)_{single} \quad (2)$$

$$f(\omega) = \left| \int \rho(z) \exp(-i\omega z) dz \right|^2 \quad (3)$$

コヒーレントな放射の周波数分布にはバンチの縦形状の情報が含まれる。SPR は放射角度と放射波長に相関があるため、放射の角度分布はバンチ形状因子を反映した形になる。そのためバンチ長によって CSPR の角度分布が変化する。

3. CSPR を用いたバンチ長の計測

CSPR を用いた非破壊バンチ長モニターに対する従来のアプローチは、複数の回折格子を使って広い周波数範囲にわたって CSPR 強度を測定し、これと理論的に得られる単電子のスペクトルを比較することで縦方向バンチ形状因子を求めるといったものである [4]。この方法は、原理的には精度よくバンチ形状を得られる一方で、形状因子が 0 に近づく領域を正確に把握する必要があり、小さい強度の SPR を正確に測る必要がある。また、正確なバンチ形状の再構成のためには、測定条件に適合し

*yamada@lms.tohoku.ac.jp

た信頼性の高い単一電子のスペクトルが得られている必要もある。そこで我々は、バンチ長の違いによる角度分布の変化そのものに注目し、バンチ長の変化をシングルショットで観測可能な相対バンチ長モニターを考えた。SPR の発光角度は Eq. (1) のような分散関係を持っているので、バンチ長の変化は CSPR 強度の角度分布の違いとして観測することができる。Figure 1(a) は、 $d = 600 \mu\text{m}$ 、 $h = 500 \mu\text{m}$ 、ビームエネルギーと電荷をそれぞれ 20 MeV と 10 pC として、SC モデルに基づいて計算した様々なバンチ長に対する角度分布の一例である。ここで、角度分布のピーク角度がバンチ長にほぼ線形に変化していることがわかる。1 ショットごとに角度分布を測定し、そのピーク角度を測定することで、シンプルな構成でバンチ長の相対的な変化をリアルタイムに知ることができる。シングルショットの測定は、発光角度の異なる複数の検出器を円周上に配置し、同時に測定することで実現可能である。Figure 1(b) は t-ACTS の場合におけるバンチ長のピーク発光角度依存性を示している。ピーク角が 5 度の分解能で測定できれば、25 fs のバンチ長差を識別することができる。またこの方式は、バンチ長に応じた周期長を選ぶことによりレーザープラズマ加速で想定される数十 fs の電子バンチの測定にも適用可能で、Fig. 1(b) に示すように、200 μm の周期長の回折格子を用いることで 10 fs のバンチ長の違いも識別できると期待される。

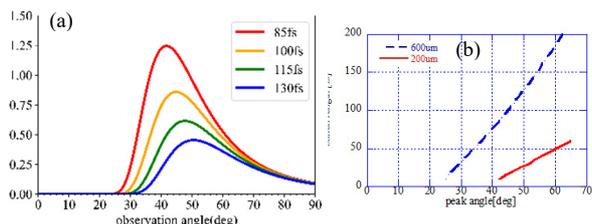


Figure 1: Calculated angular distribution of SPR for various bunch length; 85 fs, 100 fs, 115 fs, and 130 fs (a) and dependence of the bunch length on the peak position of emission angle of CSPR (b).

4. テスト実験

4.1 t-ACTS

電子光理学研究センターの試験加速器 t-ACTS (test Accelerator as Coherent THz Source) では、velocity bunching 法により 100 fs 以下の超短バンチの電子ビームを生成することができ、この超短電子バンチに基づくテラヘルツ光源やビームモニタの研究開発が行われている [5]。velocity bunching 法では、加速管へのビームの入射位相によってバンチ長を調整することができる。t-

Table 1: Beam Parameters

macro-pulse duration	~2.0 μs
Number of bunches	~5700 (per macro-pulse)
Beam energy	20 MeV
Beam emittance	~3 $\pi\text{mm mrad}$
Bunch charge	3 ~10 pC
Bunch length (σ_t)	80~100 fs

ACTS リニアックは、熱陰極 RF 電子銃、アルファ電磁石、3 m 長の進行波型加速管から構成されている。Table 1 にビームパラメータを示す。加速管下流にはマイクロソソ干涉計でコヒーレント遷移放射 (CTR) スペクトルを観測してバンチ長を測定する診断部があり、その 1 m 下流に SPR を生成する回折格子が設置されている。

4.2 実験セットアップ

シングルショット測定に先立ち、まず、バンチ長の応答が正しく観測できることを確認するための予備測定を行った。この目的のために、実験では一つの検出器を約 30 度から 90 度の放射角でスキャンした。ピッチ 600 μm 、傾斜角 6 度ののこぎり歯状の回折格子を用意した。この回折格子から観測角 60 度で放射される SPR の周波数は 1 THz と推定される。また、回折格子の溝の数は 21 本である。この回折格子ブロックを可動ベースに取り付け、ビームと回折格子表面との距離を調整した。ビームの位置やプロファイルを観察するための AI ミラーが同じ可動ベースに設置されている。Figure 2(a) に、CSPR の角度分布を測定するためのレイアウトを示す。テラヘルツ光の透過率に優れた有効径 100 mm の Zcut 結晶窓により広い角度の観測が可能である。光学系の周囲は放射線の影響を防ぐために鉛のブロックを設置している。また、水によるテラヘルツ光の吸収を抑えるために、真空外の光学系全体を乾燥空気でパージした。CSPR の検出には、テ

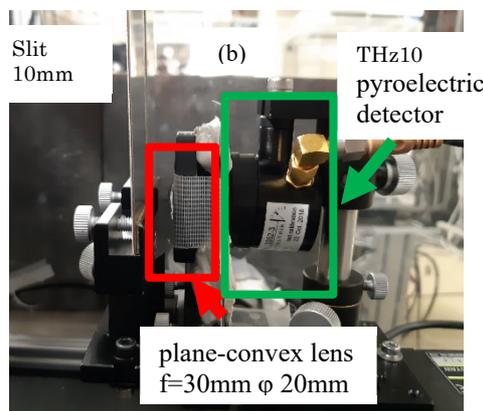
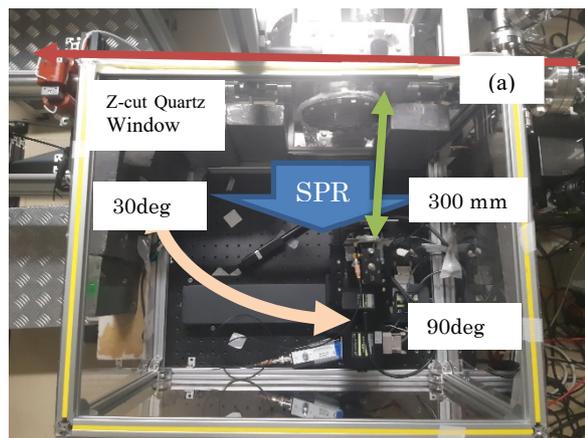


Figure 2: SPR measurement system (a) and Enlarged view around the detector (b).

ラヘルツ帯域で高感度・広帯域の焦電型検出器 THz10 (SLT センサーアンドレーザータクニク社製)を用いた。CSPR の角度分布を測定するために、Fig. 2(a)に示すように、光路長を 300 mm に保ちながら、この THz 検出器を動かして 32 度から 90 度の角度でスキャンした。Figure 2(b)に示すように THz 検出器は検出面が 9 mm であり、 φ 方向の集光を行うために焦点距離 30 mm の平凸レンズを検出器直前に設置し、 θ 方向に ± 1 度の角度制限を行うための 10 mm スリットを設置した。

5. 測定結果

5.1 CSPR スペクトル測定

CSPR が正しく観測されていることを確かめるために、マイケルソン干渉計で角度ごとのスペクトルを測定した。45 度と 60 度のスペクトルを Fig. 3 に示す。60 度の時 1 THz、45 度の時約 1.6 THz と(1)式を満たすことが確認できた。

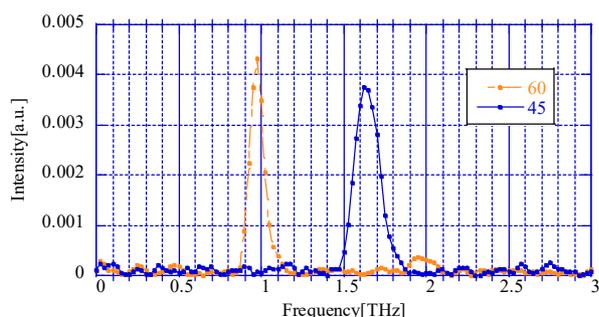


Figure 3: Measured spectra for the observation angles at 45(solid line), and 60 degrees (dashed line).

5.2 バンチ長の変化に対する角度分布

加速位相を調整することで 85 fs から 130 fs まで約 15 fs ごとにバンチ長を変化させて、対応する CSPR の角度分布を測定した。このときのバンチ長は、SPR チェンバーの 1 m 上流に設置したアルミスクリーンからの CTR のスペクトルを測定して導出した。測定は 2 度ステップで 90 度から 34 度まで行い、15 回分の測定の平均をとった。ま

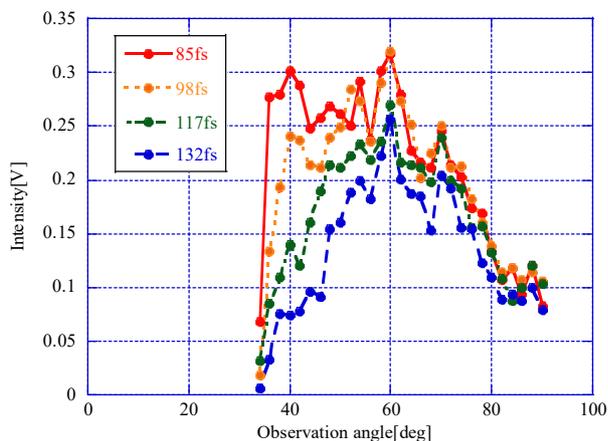


Figure 4: Measured angular distributions of CSPR (preliminary) for the bunch lengths of 85 fs (solid line), 98 fs (dot line), 117 fs (dash dot line) and 132 fs (dashed line).

た、各バンチ長で窓にアルミ箔で蓋をし、光が通らない状態でバックグラウンドの測定を行った。Figure 4 に 85 fs、98 fs、117 fs、132 fs での暫定的な測定結果を示す。測定の結果、計算と異なりバンチ長を変化させても 60 度がピークとなる分布が得られた。小さい角度になるにつれてバンチ長が短いほど大きい強度が得られており、バンチ形状因子による CSPR 角度分布の変化は確認できた。85 fs での CSPR の分布と BG の分布を比較したものを Fig. 5 に示す。今回の測定に使用した焦電検出器の特性として、光の信号に対し、放射線の信号は逆の極性となる。40 度付近において大きい放射線の BG があり、これが正確な角度分布が得られていない原因の一つと考えられる。窓の方向からくる放射線を現セットアップでは防げないため、直接窓を見ないように光路を考えるような対策が必要だと考えられる。

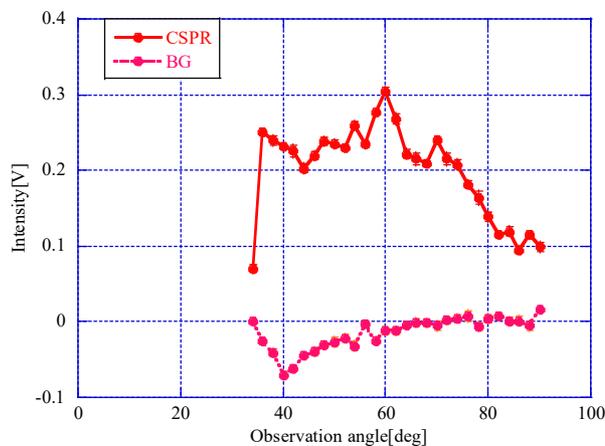


Figure 5: CSPR (solid line) measurement results and BG (dot line).

6. まとめ

CSPR はビーム非破壊かつシングルショットでの計測が可能でバンチ長モニターとしての応用が期待されている。我々は CSPR を用いた相対バンチ長モニターで数 10 fs のバンチの観測への応用を目指している。現在 t-ACTS において 100 fs 電子バンチを用いたテスト実験を行っている。CSPR のスペクトルでは、観測角 60 度、45 度の地点で 1 THz、1.62 THz と SPR の分散関係を満たす放射が観測された。バンチ長を変えながらの角度分布の測定を行った結果、常に 60 度付近がピークとなるという事前の予想と異なる結果が得られた。放射線の影響が完全に排除できていないことが示唆されており、セットアップの改善を今後検討していく。また、傾斜角が異なる回折格子の測定を行い、計算モデルとの整合性を併せて確認する予定である。

参考文献

- [1] Victor Malka *et al.*, “Principles and applications of compact laser-plasma accelerators” Nature Physics volume 4, pages 447–453 (2008).
- [2] I. V. Konoplev *et al.*, “Single Shot, Nondestructive Monitor for Longitudinal Subpicosecond Bunch Profile

PASJ2022 THOA01

- Measurements with Femtosecond Resolution” Phys. Rev. Accel. Beams 24, 022801 (2021).
- [3] S.J. Smith and E. M. Purcell, “Visible Light from Localized Surface Charges Moving across a Grating” Phys. Rev. 92, 1069 (1953)
- [4] J. H. Brownell and G. Doucas, “Role of the grating profile in Smith-Purcell radiation at high energies” Phys. Rev. STAB. 8, 091301 (2005).
- [5] S. Kashiwagi *et al.*, Proof-of-principle Experiment of velocity Bunching for Ultra-Short Electron Pulse Production” Energy Procedia, vol.89, pp. 346-352, (2016).