

## t-ACTS におけるテラヘルツ域コヒーレントスミス=パーセル放射の計測

### MEASUREMENT OF COHERENT SMITH-PURCELL RADIATION IN TERAHERTZ FREQUENCY REGION AT T-ACTS

山田悠樹<sup>#</sup>, 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, 柴田晃太郎, 齊藤寛峻, 山本大貴, 山田志門, 濱幸幸

Hiroki Yamada<sup>#</sup>, Shigeru Kashiwagi, Fujio Hinode, Sadao Miura, Toshiya Muto, Kenichi Nanbu, Ken Takahashi,  
Ikuro Nagasawa, Ken Kanomata, Kotaro Shibata, Hirotooshi Saito, Daiki Yamamoto, Shimon Yamada,  
Hiroyuki Hama

Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University

#### Abstract

We are currently conducting basic research on the development of a non-destructive real-time bunch length monitor using coherent Smith-Purcell radiation at the test accelerator facility (t-ACTS) at Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University. We have generated coherent Smith-Purcell radiation in the terahertz region using an ultra-short electron beam and have confirmed the basic properties of Smith-Purcell radiation such as radiation spectrum and impact parameter dependence. Here, we considered applying the change in the peak angle of the angular distribution with the change in the bunch length as a bunch length monitor. In this presentation, I will show how it can be used as a bunch length monitor and describe an experiment that is currently planned.

#### 1. はじめに

現在、東北大学電子光物理学研究センターの試験加速器 t-ACTS ではコヒーレントスミス=パーセル放射を用いた非破壊・リアルタイムバンチ長モニターの開発に向けた基礎研究を進めている[1]。コヒーレントスミス=パーセル放射はビーム非破壊で放射が得られ、レーザープラズマ加速で得られる 10 fs のバンチ長のビームへの応用も可能であると考えられている。これまで t-ACTS の 100 fs 極短電子ビームを用いて、テラヘルツ領域のコヒーレントスミス=パーセル放射を生成し、放射スペクトルやインパクトパラメータ依存性といったスミス=パーセル放射の基本的な特性の確認を行ってきた。ここでは、バンチ長の変化に応じた角度分布のピーク角度の変化をバンチ長モニターとして応用することを考えた。本発表ではどのようにバンチ長モニターとして用いることができるのかと、現在計画中の実験について述べる。

#### 2. 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電磁波が放射されるものである[2]。この放射の特徴は放射波長がその周期構造の周期長と観測角によって決まることである。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、 $\theta$  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。

表面電流モデル[3]によれば、単電子からの単位立体角当たりのスミス=パーセル放射強度の角度分布は次の

式で与えられる。

$$\left( \frac{dI}{d\Omega} \right)_1 = 2\pi q^2 \frac{Z}{d^2} \frac{n^2 \beta^3}{(1 - \beta \cos\theta)^3} R^2 \exp\left(-\frac{2h}{\lambda_e}\right) \quad (2)$$

$$\lambda_e \equiv \left( \frac{2\omega}{\gamma\beta c} \sqrt{1 + \gamma^2 \beta^2 \sin^2\theta \sin^2\phi} \right)^{-1} \quad (3)$$

ここで、 $q$  は電子の電荷、 $Z$  は回折格子の全長、 $h$  はビームと回折格子の距離(インパクトパラメータ)、 $\lambda_e$  はエバネッセント波長であり、 $R^2$  は格子効率または放射係数などと呼ばれる回折格子の形状や放射の観測角に依存する係数である。 $\phi$  はビーム進行方向に垂直な平面上の角度で、回折格子の溝に垂直な方向を  $0$  度とする。 $R^2$  は一般的な場合に対して解析的に表すことができないため、数値計算による評価を行った。(2)式より、スミス=パーセル放射の強度はビームと回折格子の距離に従って指数関数的に減少する。

$N_e$  個の電子からなる電子バンチからの放射の場合は、

$$\left( \frac{dI}{d\Omega} \right)_{N_e} = \left( \frac{dI}{d\Omega} \right)_{sp} [N_e + N_e(N_e - 1)f(\omega)] \quad (4)$$

と表される。ここで  $f(\omega)$  はバンチ形状因子と呼ばれるバンチの縦方向の形状の情報を持った値である。

$$f(\omega) = \left| \int \rho(z) \exp(-i\omega z) dz \right|^2 \quad (5)$$

放射波長がバンチ長よりも短い時には、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。

$$\sigma_z < \lambda, \left( \frac{dI}{d\Omega} \right)_{N_e} = N_e^2 f(\omega) \left( \frac{dI}{d\Omega} \right)_{sp} \quad (6)$$

コヒーレントな放射の周波数分布からバンチの縦形状の情報が得られる。スミス=パーセル放射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放射の角度分布が変化する。つまり、コヒーレントスミス=パーセル放射(cSPR)の角

<sup>#</sup> yamada@lms.tohoku.ac.jp

度分布を測定することでバンチ長モニターとして応用が可能である。

### 3. cSPR を用いたバンチ長モニター

今まで我々がやってきた実験はスミス=パーセル放射の特性の確認等のため、観測が容易な 90 度方向の放射に特化して行われていた。そのために周期長を 0.2 mm とし、また得られる強度が小さかったために、できるだけ回折格子とビームの距離を近づけるなどしていた。しかし、バンチ長モニターとしての応用を考えると周期長 0.2 mm の回折格子はその目的に適していなかったため、最適な周期長などの実験条件を検討することとした。

cSPR の角度分布はバンチ長を反映してピーク角度や強度が変化する。この性質をバンチ長モニターとして活用する。スミス=パーセル放射は回折格子の周期長によって周波数範囲を選択することができるので、SPR 強度の角度分布のピーク角度やピーク幅を選択できる。Figure 1 は周期長 1 mm、0.6 mm、0.2 mm の回折格子の場合の単位長さ SPR 強度角度分布を表面電流モデルで計算したものである。計算はビーム電荷 10 pC、ビームエネルギー 22 MeV、ビーム回折格子距離 0.5 mm、バンチ長 100 fs のガウス分布として行った。(2)式より、SPR の強度は周期数( $Z/d$ )に比例する。周期長 0.2 mm と 1 mm では周期数に 5 倍の差があるが、それ以上に周期長が長くなることでピーク強度が大きくなる効果大きい。1 mm の時のピーク強度は 0.2mm の時の 6 倍程度となる。このときそれぞれの周期長でのピークとなる角度は 1 mm のとき 34.7 度、0.6 mm のとき 44.8 度、0.2 mm のとき 82.3 度である。ただし、周期長と放射波長の相関関係から、どの回折格子であってもピークの周波数は約 1.7 THz である。強度のみを考えると周期長が長くなる方が有利であるが、あまりに放射角度が小さいとこえて観測が難しくなる。そのため、周期長 0.6 mm で検討を進めている。

(2)式より、スミス=パーセル放射強度は回折格子にビームを近づけるほど強度が大きくなる。しかしあまり近づけるとビームと回折格子がぶつかりかえてロスが生まれる。現在実験を行っている SPR チェンバーの位置では最小ビームサイズはシグマ 100  $\mu\text{m}$  程度である。従来の

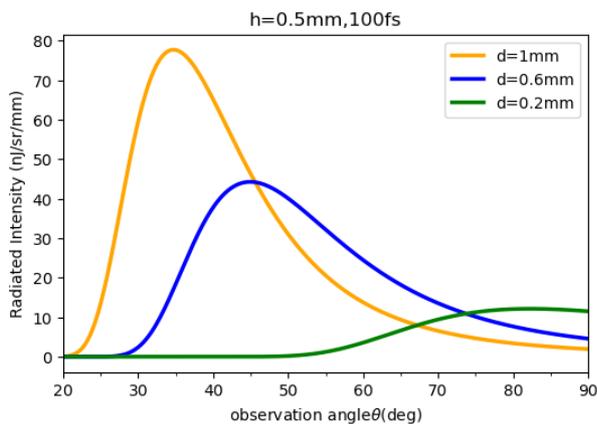


Figure 1: Angle dependence of SPR energy for gratings with different period lengths.

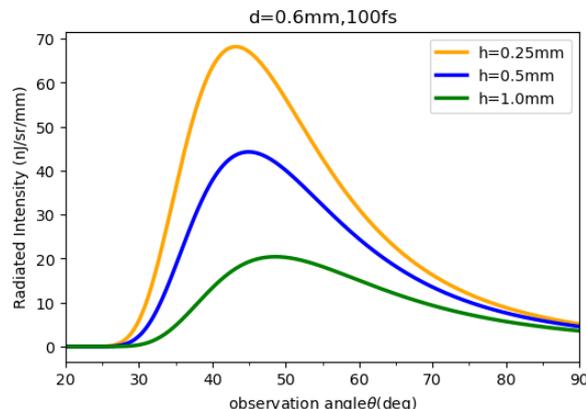


Figure 2: Angle dependence of SPR energy at different beam grating distances.

周期長 0.2 mm の回折格子の実験では得られる SPR 強度が小さかったことから、最小 250  $\mu\text{m}$  までビームを回折格子に近づけて実験を行っていた。しかし、周期長を 0.6 mm に変更すれば、ビームと回折格子の間で十分な距離を取った状態で十分高い強度のスミス=パーセル放射が得られる。Figure 2 は周期長 0.6 mm の回折格子についてビーム回折格子距離をそれぞれ 0.25 mm、0.5 mm、1 mm としたときの SPR 強度の角度分布である。SPR のピーク強度はビーム回折格子距離 0.25 mm の場合に対し 0.5 mm のとき 2/3 程度になるが、それでも周期長 0.2 mm の時に比べると 2 倍程度大きい値となる。また、SPR の減衰の仕方を決定する  $\lambda_e$  には放射波長  $\lambda$  が含まれており、従って放射角度によって減衰の割合が異なる。その結果、ビーム回折格子距離によって同じバンチ長でもピークとなる角度が異なる。実際、周期長 0.25mm ではピークとなる角度は 43.2 度であるが 0.5mm では 44.8 度、1mm では 48.6 度となる。測定に当たっては、ビーム回折格子距離を一定に保って行う必要がある。

実際にバンチ長と SPR 強度のピーク角度にどのような相関があるのかについて計算を行った。Figure 3 は周期長 0.6 mm の回折格子についてバンチ-回折格子距離 0.5 mm でバンチ長 75 fs、100 fs、125 fs、150 fs のときの角度分布を計算したものである。この時バンチ形状はガウス分布を仮定している。Figure 4 はこのような計算を基にバンチ長 10 fs から 200 fs までのバンチ長におけるピーク角度をグラフにまとめたものである。バンチ長が 25 fs 変化するごとに約 5 度のピーク角度の変化があることがわかる。このようにピーク角度がバンチ長に従って変化することから、ピーク角度を求めることでバンチ長モニターに役立てたい。バンチ長の絶対値は別の方法で較正する必要があるが、相対的な違いをモニターするには有用である。適切な周期長を選べば、バンチ長 10 fs と 20 fs の場合をピーク角度で見分けることも可能であると考えられる。実際に計算を行うと、周期長 0.2 mm の回折格子でバンチ長 10 fs のとき 41.9 度、20 fs の時 46.1 度となった。0.6 mm の周期長の場合は 25 fs に対し約 5 度の差であったが、0.2 mm の周期長であればバンチ長 10 fs 付近で 10 fs の違いが 5 度のピーク角度の違いと

なって表れる。

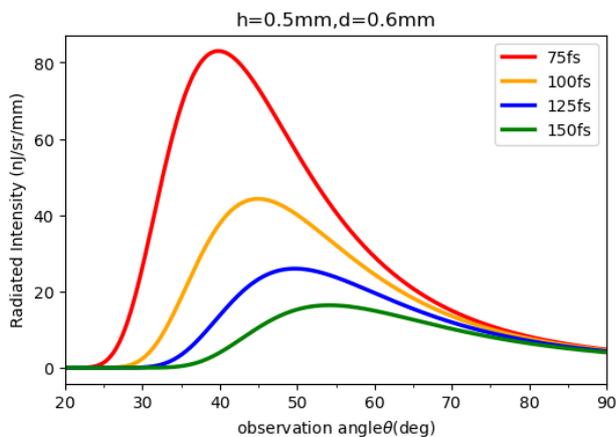


Figure3: Angular distributions of SPR intensities for different bunch lengths.

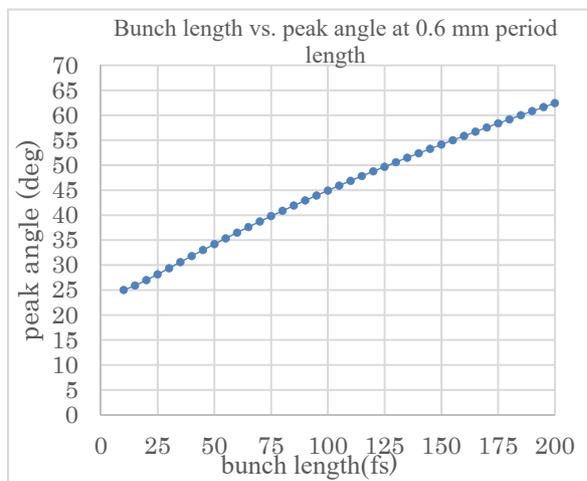


Figure 4: Bunch length dependence of peak angle in the SPR intensity distribution.

#### 4. t-ACTS における実験の検討

東北大学電子光センターの試験加速器 t-ACTS ではバンチ長 100 fs 程度の極短バンチの生成が可能である [4]。これを用いて SPR の角度分布におけるピーク角度を検出することによる簡便なバンチ長モニターの実証実験を検討している。ピークの測定にはいくつかの方法が考えられるが、もっとも容易な方法として検出器をある角度範囲で走査的に動かして微分波形を取るという方法が考えられる。今までに角度分布を測定するにあたって 66 度から 106 度の範囲を 2 度刻みで測定する実験を行った。100 fs 付近のバンチのピークを測定するとき、30 ~ 60 度の範囲の測定を行いたい。このとき、特に浅い角度の時は直接真空窓から取り出そうとすると回折などの影響が大きくなり、強度を比較することが難しくなる。その

ため真空中において一度ミラーで反射させるなどの方法を検討している。この方法では、真空中でミラーを回転、平行移動させる必要があり、またミラー由来のバックグラウンド等も発生することが考えられる。

#### 5. まとめ

現在東北大学電子光センターで cSPR をもちいた非破壊バンチ長モニターの研究を行っている。cSPR を用いた非破壊バンチ長モニターとして、ピーク角度に着目した方法を考えた。周期長 0.6 mm の回折格子を用いたとき、100 fs 程度のバンチ長のビームに対し、ピーク角度の測定精度が 5 度程度であればバンチ長の精度が 25 fs のオーダーで得られることが計算で分かった。現在実際に t-ACTS において実験を行うためのチャンバーの設計などを進めている。将来的にはレーザープラズマ加速における 10 fs ~ 20 fs のバンチのバンチ長モニターとしての応用を可能にしたいと考えている。

#### 参考文献

- [1] H. Yamada, "Measurement of Coherent Smith-Purcell Radiation Using Ultra-Short Electron Bunch at t-ACTS", IPAC2021.
- [2] S.J. Smith and E. M. Purcell, "Visible Light from Localized Surface Charges Moving across a Grating", Phys. Rev. 92, 1069 (1953).
- [3] J. Brownell, J. Walsh and G. Doucas, "Spontaneous Smith-Purcell Radiation Described Through Induced Surface Currents", Physical Review E, Vol. 57, No. 1, p. 1075 - 1080(1998).
- [4] 柏木茂他, "東北大学 t-ACTS における加速構造中の Velocity Bunching を用いた超短バンチ生成", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, Aug. 9-11, 2014, SUOM02.