

# 極短電子ビームによるコヒーレントスミス=パーセル放射の研究 STUDY OF COHERENT SMITH-PURCELL RADIATION USING ULTRA-SHORT ELECTRON BUNCH

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, 柴田晃太郎, 齊藤寛峻, 石附勇人, 寺田健人, 濱広幸

Hiroki Yamada, Shigeru Kashiwagi, Fujio Hinode, Sadao Miura, Toshiya Muto, Kenichi Nanbu, Ken Takahashi,  
Ikuro Nagasawa, Ken Kanomata, Kotaro Shibata, Hirotochi Saito, Nozomu Morita, Yuto Ishiduki, Kento Terada  
and Hiroyuki Hama

Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University

## Abstract

At the test accelerator t-ACTS in Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University, we are conducting research and development of terahertz light sources and beam monitors using ultra-short electron bunches of 100 fs or less by the velocity bunching method. Smith-Purcell radiation (SPR) is considered to be useful as a beam non-destructive bunch length monitor, and many experiments have been conducted so far. The bunch length was usually obtained by reconstructing the spectrum from the observed angular distribution of radiation, based on model calculations. There are different theoretical models describing SPR, but the differences between the models are not small, and the available experimental data has not yet come to a conclusion on the validity of these models. For the purpose of comparison with the theoretical model, we conducted an observation experiment at t-ACTS in order to confirm the basic characteristics of SPR. We will report the experimental results and future prospects.

## 1. はじめに

東北大学電子光学研究センターの試験加速器 t-ACTS では速度集群法による 100 fs 以下の極短バンチの生成およびこれを用いたテラヘルツ光源の開発研究を行っている。電子が周期的構造を持った金属表面近傍を通過する際に生じるスミス=パーセル放射 (SPR) [1] は、ビーム非破壊のバンチ長モニターとして有用と考えられていて、これまでも少なからぬ実験が行われてきた [2-5]。SPR を記述する理論モデルとしては、金属の回折格子に誘起された表面電荷が加速されることにより放射が生じるとする表面電流モデル [6] やエバネッセント波の伝播と励起に基づくとする van den Berg モデル [7] などが存在するが、モデル間での差異は小さくはなく、利用可能な実験データもこれらのモデルの妥当性に対する結論を与えるまでには至っていない [8]。今回、理論モデルとの比較検討を目標に、手始めとして SPR の基本的な特性を確認すべく t-ACTS において観測実験を行った。

## 2. スミス=パーセル放射

スミス=パーセル放射の特徴は放射の波長が、回折格子の周期と観測角により規定されていることである。十分遠方で観測したとき、スミス=パーセル放射の波長は

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

で表される。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。

表面電流モデルによれば単電子からのスミス=パーセル放射の強度は次の式で与えられる。

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

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

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。 $R^2$  は解析的に求めることができるのはごく限られた回折格子形状の場合のみであり、今回は数値計算による評価を行った。

Figure 1 は周期長 200  $\mu\text{m}$  で角度 10 度の斜めの溝

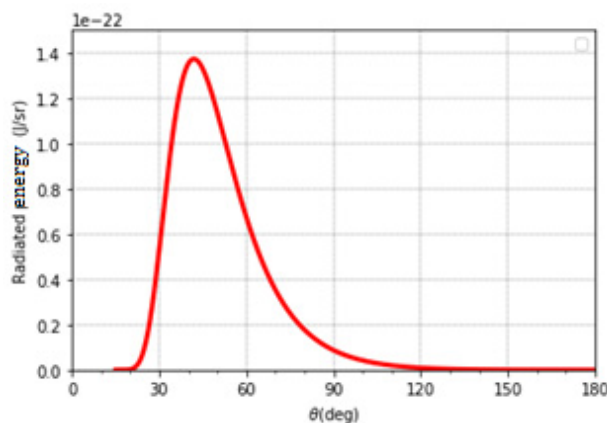


Figure 1: Angle dependence of SPR energy from an electron.

からなる回折格子について単電子からのスミスパーセル放射強度の数値計算を行ったものである。SPR の放射は主に 30 度から 90 度の範囲で観測されることがわかる。また、観測角が小さいほど波長が短くなるので、実際のビームでの観測では十分に電子バンチが短くなければ形状因子の効果でコヒーレントな放射が得られず強度が小さくなる。

### 3. FDTD によるシミュレーション

FDTD (Finite Difference Time Domain) 法とは時間領域差分法とも呼ばれる、電磁場の時間発展を数値解析により計算する方法の一つである。回折格子の形状を境界面として設定し電子ビームからの電場の時間発展を解くことで SPR のシミュレーション計算を行うことができる。我々の研究室においては独自に開発した FDTD 計算コード FB(Floating Boundary)-FDTD[9]を用いて電子ビームによる放射の計算を行っている。

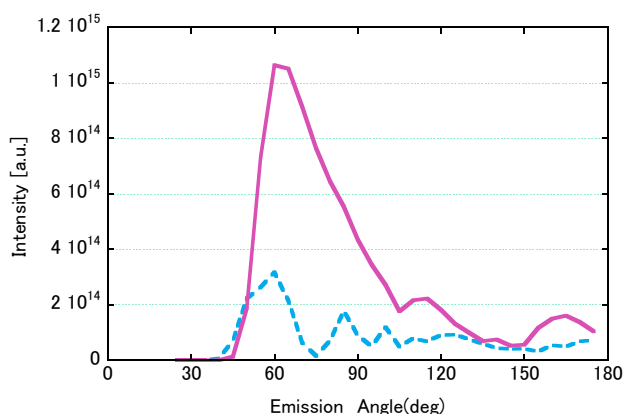


Figure 2: Angle dependence of coherent SPR energy calculated by FDTD method.

Figure 2 は二種類の形状の回折格子について FDTD 法を用いてコヒーレントな SPR 強度分布を計算したものである。点線は周期長 250  $\mu\text{m}$  のラメラ回折格子(G1)、直線は角度 12 度で斜めの溝をつけた周期長 200  $\mu\text{m}$  のブレード回折格子(G2)である。この時の電子ビームのバンチ長は 20  $\mu\text{m}$ 、エネルギーは 22 MeV である。これを見ると G1 の回折格子は複数のピークをもつ複雑な形状をしていて、60 度付近で一番放射が大きくなっている。一方 G2 の回折格子は 60~70 度の位置にピークを持ち、これより角度が小さい側では急に強度が小さくなり、大きい側では緩やかに強度が小さくなっている。二つの回折格子ではブレード回折格子の G2 のほうがラメラ回折格子の G1 よりも全範囲で放射が大きくなっている。90 度の位置では約二倍であり、60 度付近では三倍以上になっている。

## 4. 実験

### 4.1 実験の目的

t-ACTS における手始めに、スミスパーセル放射の基

本的な特性を確認することを目的として観測実験を行った。FDTD 計算によると、回折格子の形状により放射の強度や角度分布に明確な違いが現れることがわかったため、アルミ製の回折格子 2 種を作成した。そしてそれぞれの 90 度方向の放射を確認し、実際に強度の違いが現れるのかを調べた。

また、より強い強度が得られると考えられるブレード回折格子(G2)を用いてスミス=パーセル放射のインパクトパラメータの影響や角度と放射波長の分散関係などについて測定を行った。

### 4.2 実験セットアップ

Figure 3 に実験のセットアップを示す。真空窓から SPR を取り出しマイケルソン干渉計により SPR のスペクトルを計測する。検出器には、THz 領域に感度のある焦電検出器 (PYD-1@PHLUXi [10]) を用いて観測を行う。実験系は乾燥空気中で置換することでテラヘルツ波の水による吸収を抑えた。アパーチャ直後の OAP をビーム軸と平行に移動させることで、放射分布の観測を可能にする。また、回折格子は直線導入機でビームとの距離を調節することができ、回折格子とビームの距離によるスミス=パーセル放射の強度の依存性を確かめることができる。さらに、集光系の平面鏡以降でマイケルソン干渉計を組むことでスミス=パーセル放射のスペクトル測定を行った。これにより、スミス=パーセル放射の波長と角度の分散関係を確かめた。測定に当たっては、回折格子と同じステージに設置されたビーム観測用の 45 度ミラーを用いてビーム-回折格子距離の導出等を行った。

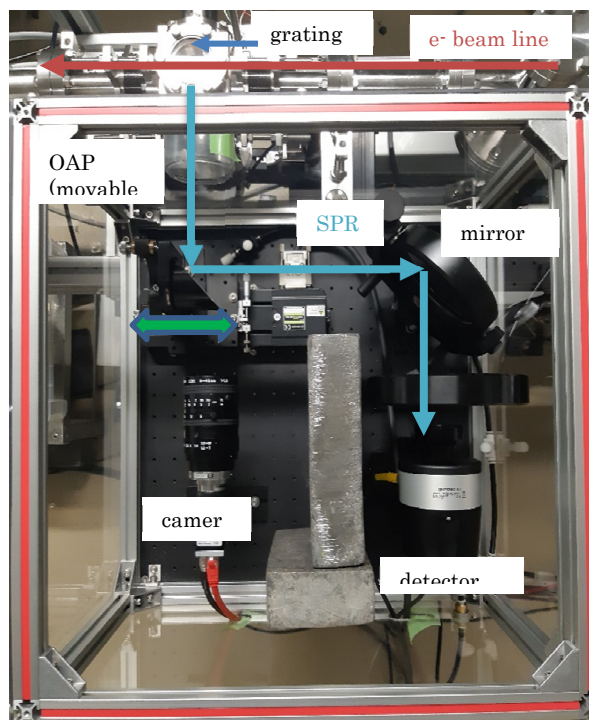


Figure 3: SPR focusing system and experimental setup.

### 4.3 製作した回折格子の評価

溝の形状が異なる二つの回折格子を作製した。その回折格子のパラメータを Table 1 に示す。また回折格子の外見とそれぞれの回折格子表面を拡大した写真を Fig. 4 に示す。

Table 1: Grating Parameter

type of grating	lamella grating(G1)	brazed grating(G2)
grating block size	(15mm × 10mm × 10mm)	
grating pitch	0.25mm	0.2mm
number of groove	50	62
depth of groove	0.08mm	
width of groove	0.15mm	
Angle of groove		10°
material	Aluminum (A5052)	

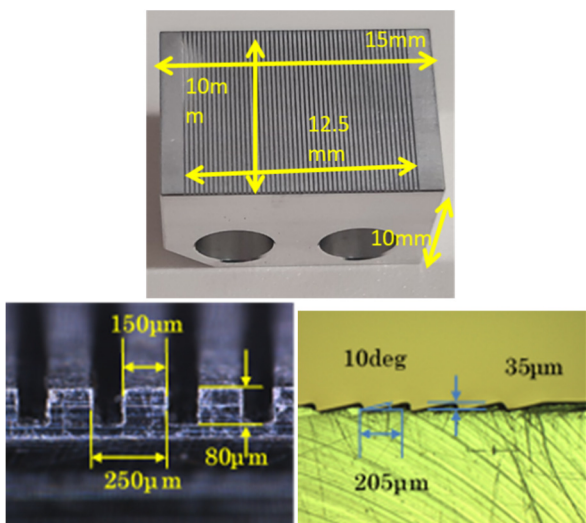


Figure 4: Manufactured grating. below figure shows a magnified view of the grating surface.

金属回折格子はアルミ合金製で、エンドミルにより溝加工された。それぞれの形状について溝表面やエッジの部分において放射に影響するような歪みやバリがないことを光学顕微鏡で確認した。

## 5. 実験結果、考察

回折格子の形状によりスミス=パーセル放射の強度が異なることを確かめるため、ラメラ回折格子 G1、ブレード回折格子 G2 それぞれについて回折格子の正面方向(観測角 90 度方向)に放射される SPR の観測を行った。回折格子正面に置いた非軸放物面鏡をビーム軸に沿った方向で平行移動させることで放射の横方向分布を測定した。回折格子 G1, G2 について取得した分布を Fig. 5 に示す。横軸は回折格子中央を基準に観測角を取った。回折格子正面からの OAP の移動距離を観測角に変換した。この際立体角の補正は行っていない。

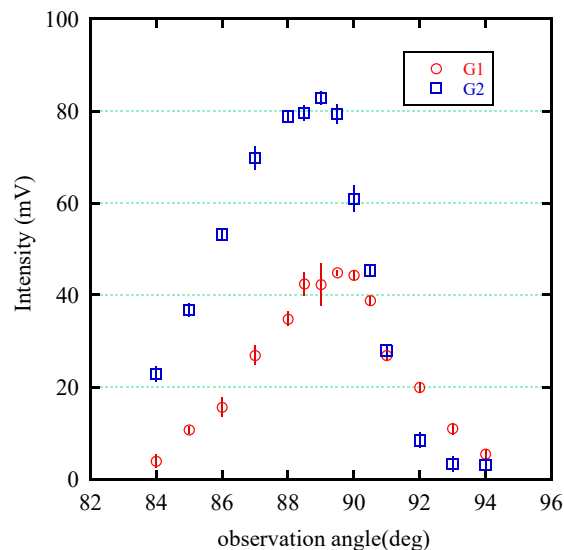


Figure 5: SPR angular distribution G1 and G2.

測定の結果、放射の強度について、ブレード回折格子 G2 の放射強度がラメラ回折格子 G1 の二倍となっていることがわかる。FDTD の計算と比較すると 90 度付近で強度が二倍の差となるという結果は確かめられた。一方で、観測角が 85 度付近のデータは OAP の一部しか集光に寄与していないので、計算の結果と直接比較することは出来ない。

予想通り G2 の回折格子でより高い強度の放射が得られたので、これを用いて SPR の放射特性に関する測定を行った。

直線導入機により回折格子をビームと垂直に操作することで、ビーム-回折格子距離とスミス=パーセル放射強度の関係を得た。この測定では放射強度が距離の増大に従って指数関数的に減少するという Eq. (2) の結果を確認した。Figure 6 に横軸ビーム回折格子距離、縦軸信号強度のプロットと指数関数によるフィッティング曲線を示した。ビーム回折格子距離にしたがってスミス=パーセル放射強度が指数関数的に減少していることがわかる。

このフィッティングの結果と Eq. (2) の指数部分の係数を比較すると、実際の減衰率が Eq. (2) より緩やかであっ

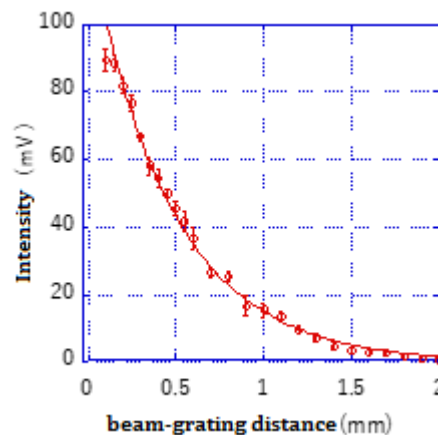


Figure 6: SPR intensity's dependence on beam-grating distance.

た。これはビームが有限の大きさを持っていることにより、ビームと回折格子が近い距離にある場合のビームロスやビーム-回折格子距離の計測に影響したことが考えられる。

バンチ電荷量をアルファスリットで調整し、ビーム電流量とスミス=パーセル放射強度の関係を調べた。その結果電流量の約 1.34 乗に比例して強度が大きくなることがわかり、観測したスミス=パーセル放射がコヒーレント放射であることを確認した。Figure 7 に横軸ビーム電流、縦軸信号強度のプロットとフィッティング曲線を示した。このとき電流量の二乗とならなかった理由としては、電流量が大きくなるにつれて、低エネルギーの放射が増え、インコヒーレントな放射が含まれるようになったことが考えられる。

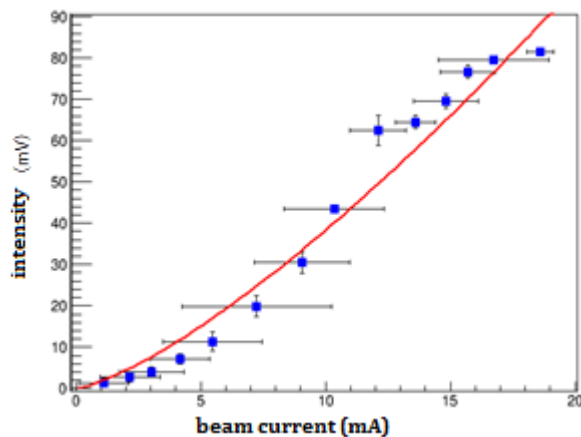


Figure 7: SPR intensity's dependence on beam current.

マイケルソン干渉計によるフーリエ分光システムを構築して放射の周波数スペクトルを取得した。この測定は回折格子 G2 で行った。非軸放射物面鏡をビーム軸に沿って移動させ、最も強い放射が得られた 88 度付近でのスミス=パーセル放射について測定を行った。ステップ距離 5  $\mu\text{m}$ 、移動距離 1800  $\mu\text{m}$  で取得した干渉パターンと周波数スペクトルを Fig. 8 に示す。

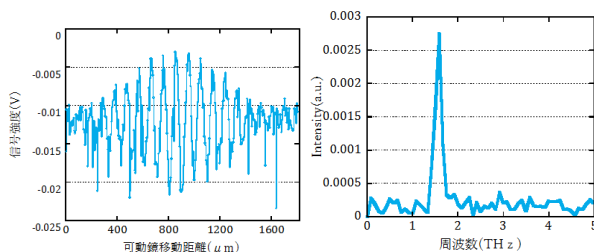


Figure 8: Smith-Parcel radiation interference pattern (left) and frequency spectrum (right).

干渉パターンはおよそ 100  $\mu\text{m}$  の周期で振動を繰り返している Eq. (1)より周期長 200  $\mu\text{m}$  の回折格子から 88 度方向には 1.55 THz の放射が得られる。測定された放射は 1.57 THz に明確なピークを持ち、予測値と極めて良い一致を示している。

## 6. まとめ

本研究では、試験加速器 t-ACTS において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=パーセル放射の発生実験を行った。FDTD 法を用いたシミュレーション計算で、回折格子の形状による SPR 強度の変化が予想された。そこで2種類の形状の異なる回折格子を製作し、それぞれについて SPR 強度の測定を行った。そして、より強い強度が得られたブレード回折格子によって放射強度の電流量依存性、ビーム-回折格子距離依存性、および波長スペクトルを測定した。この結果から極短電子ビームによる 1.57 THz のコヒーレントスミス=パーセル放射の観測に成功した。観測された放射の性質については FDTD 法によるシミュレーションや表面電流理論の計算とある程度一致する結果がえられた。今回の実験セットアップでは、角度分布の詳しい構造を得ることは出来なかった。今後の展望としてまずは、放射の角度範囲全体で周波数スペクトルを取得し、角度による周波数の違いを確認することを目標とする。次により広い角度範囲を取得できるようなセットアップを構築し、詳細な角度分布を取得する。また、高強度なスミス=パーセル放射を得るための方法を検討する。将来的には、コヒーレントスミス=パーセル放射により非破壊で極短電子ビームのバンチ長を取得するための研究を進めていく。

## 参考文献

- [1] S. J. Smith and E. M. Purcell, Phys. Rev. 92, 1069 (1953).
- [2] G. Kube *et al.*, Phys. Rev. E, 65, 056501 (2002).
- [3] S. E. Korbly *et al.*, Phys. Rev. ST-AB 9, 022802 (2006).
- [4] H. L. Andrews *et al.*, Phys. Rev. ST-AB 17, 052802 (2014).
- [5] N. Delerue *et al.*, Proc. of IPAC2018, p.2239 (2018).
- [6] J. Brownell, G. Doucas, Phys. Rev. Special Topics – Accelerators and Beams, Vol. 8, 091301 (2005).
- [7] P. M. van den Berg, J. Opt. Soc. Am. 63, 689 (1973).
- [8] G A Naumenko *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. 732 012018 (2016).
- [9] H. Hama Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 528 (2004) 371–377.
- [10] PYD-1; <http://www.phlux.com/Pyranth.pdf>