

## LASER BUNCH SLICING AT UVSOR-II WITH LOW ALPHA OPTICS

Miho Shimada<sup>1,A)</sup>, Masahiro Katoh<sup>A)</sup>, Masahiro Adachi<sup>A)</sup>, Takanori Tanikawa<sup>A)</sup>, Hisashi Chiba<sup>A)</sup>, Shin-ichi Kimura<sup>A)</sup>,  
Masahito Hosaka<sup>B)</sup>, Naoto Yamamoto<sup>B)</sup>, Yoshifumi Takashima<sup>B)</sup>, Toshiharu Takahashi<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> UVSOR facility, Institute for Molecular Science, National Institutes of Natural Sciences

38 Nishigo-naka, Myodaiji, Okazaki, 444-8585

<sup>B)</sup> Graduate School of Engineering, Nagoya University

Furo, Chikusa, Nagoya, 464-8603

<sup>C)</sup> Research Reactor Institute, Kyoto University

Kumatori, Sen-nan, Osaka, 590-0494

### Abstract

Terahertz Coherent Synchrotron Radiation (CSR) from a relativistic electron bunch, which has information of the longitudinal distribution with sub pico-second order, is expected as the monitor tool at advanced accelerators for next generation light sources. At UVSOR-II, it was demonstrated that, by using Laser bunch slicing technique, a small dip structure on an electron bunch can be created and that the spectrum of CSR emitted by the bunch depends on the dip size. According to our simulation results, it was expected that, at low alpha operating mode, such a dip structure is kept for multi revolution of the electron bunch and the dip size is oscillated due to the betatron frequency. Recently, we have succeeded in detecting the dip oscillation via CSR signal by introducing the diode detectors with high temporal resolution.

## UVSOR-IIにおける低 $\alpha$ 運転とバンチスライス

### 1. はじめに

ERLやFELなどの次世代の加速器にとって重要なパラメーターのひとつがバンチ長であり、数百フェムト秒オーダーとなることが期待されている。そのような短バンチを安定的に実現するにはリアルタイム性の高いバンチ長モニターの整備が必要不可欠であり、その候補としてテラヘルツ領域のCSR (Coherent Synchrotron Radiation)の利用が注目を浴びている。

我々はCSRのバンチ形状モニターとしての有効性を、円形加速器上で実証することを試みた。円形加速器では、大強度の短バンチを安定に周回させることは困難である。そこで、長いバンチ上に小さなディップを形成し発生するCSRを観測することを試みた。このディップはレーザーバンチスライスという手法で形成することができる。

UVSOR-IIは国内で初めてレーザーバンチスライスによるCSRの発生に成功し、形成されたディップの幅によってCSRのスペクトルが異なることを実証した[1]。また、周期的なディップ構造を形成することで準単色のCSRの検出に世界で初めて成功した[2]。これらの結果から、電子バンチ上に形成されたディップの形状はCSRのスペクトルを反映すること

が実験的に分かっている。

通常の運転状態では、形成されたディップは、バンチ内で電子が進行方向に運動するため、リングを数周すると消滅してしまう。そこで、モーメントコンパクションファクター $\alpha$ を低く、つまり進行方向の運動を小さくし、ディップが長時間保持される状態でバンチスライスを行った。異なる波長領域に感度のある複数のダイオードディテクターでCSRを観測することによって、ディップの形状の推移を調べた。

### 2. レーザーバンチスライスによるディップの形成

ディップは、電子バンチの一部がフェムト秒レーザーとアンジュレーター内で相互作用によって電子のエネルギー分布が広がることによって生じる。電子の状態を $(x, x', z, \delta)$ の4次元で表すと、 $\Delta E$ だけエネルギーが変わった電子の $z_b$ は転送行列 $R$ の成分を用いて次のようになる。

$$z_b = R_{51}x_u + R_{52}x'_u + R_{55}z_u + R_{56}(\delta_u + \Delta E)$$

ここで、下付き $u$ はアンジュレーターでの座標を表す。通常の運転状態では $R_{56}$ の寄与に比べて $R_{51}$ および $R_{52}$ の寄与が無視できるほど小さく、 $\Delta E \gg \delta$ のとき

<sup>1</sup> E-mail: [miho.shimada@kek.jp](mailto:miho.shimada@kek.jp)

\*現所属：高エネルギー加速器研究機構

は、レーザーと相互作用した電子がバンチの前方後方に移動して電子密度が小さくなる。このようにしてディップが形成される。バンチがさらに加速器中を進行すると、レーザーと相互作用していない電子がディップ領域に入ってくることから、ディップ構造は次第に埋められ消滅する。しかし、低 $\alpha$ 運転のときは、 $R_{56}$ が小さくなるため、ディップ構造が長時間持続し、また、 $R_{51}$ および $R_{52}$ の寄与によってディップは埋まったり、広がったりする。

ディップ形成後の電子密度分布を $\rho(z)$ と表すと、

$$P(k) \approx N(N-1)F(k)p(k)$$

$$F(k) = \left| \frac{1}{2\pi} \int \rho(z) \exp[-ikz] dz \right|^2$$

CSRのスペクトル $P(k)$ は次式で計算できる[3]。

ここで、 $p(k)$ および $N$ はそれぞれひとつの電子からの放射光強度および電子数である。CSRの強度は電子密度のFourier変換の二乗にほぼ比例することから、CSRスペクトルを高い時間分解能で計測することで、電子密度構造の時間変化の情報を得ることができる。具体的には、鋭い(浅い)ディップほど短い(長い)波長でCSRが強くなる。

### 3. 低 $\alpha$ モードのオプティクス

低 $\alpha$ モードへの変更はSADの計算結果をもとに4極電磁石の強度を変えて行った。分散関数やシンクロトロン振動数の測定値を元にラティスを推測しアンジュレーターから周回毎の計測位置までの転送行列を求めた結果を図1に示す。

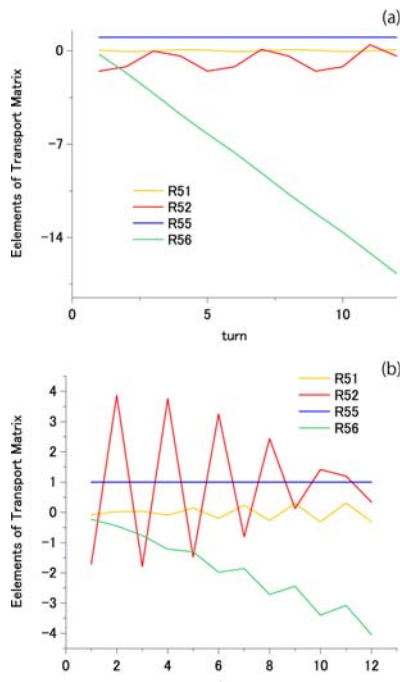


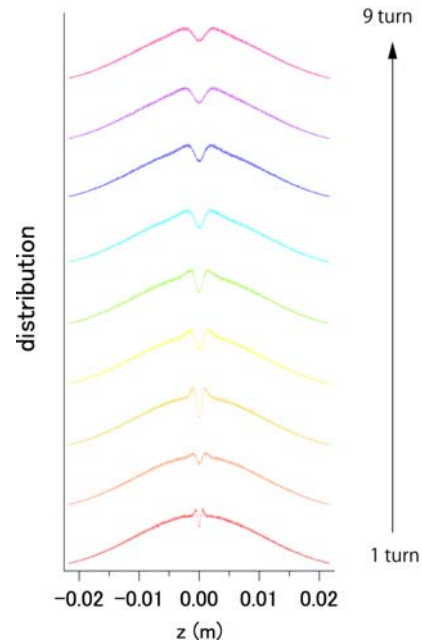
図1. 周回毎の転送行列の推移。(a)通常の運転、 $v_\beta=3.75$ , (b)低 $\alpha$ 運転  $v_\beta=3.53$

(a)の通常運転では $R_{56}$ が周回毎に絶対値が大きくな

る一方で $R_{51}$ および $R_{52}$ の変化は緩やかである。一方で、(b)の低 $\alpha$ 運転では、 $R_{51}$ および $R_{52}$ が大きくなり、ベータatronチューン $v_\beta$ が顕著に見られる。なおシンクロトロン振動数から推測される $\alpha$ は通常運転状態が0.028、低 $\alpha$ 状態が $0.0055 \pm 0.001$ である。

図1(b)の結果からMonte Carloシミュレーションを用いて、低 $\alpha$ 運転におけるディップの形状の変化を計算したところ、1周目、3周目および5周目でディップが鋭くなっていることが分かる。(図2)この2周毎の強いCSRの信号は $v_\beta$ の3.53の端数が半整数に近いためであると考えられる。全体的には周回数が増えるに従ってディップの変化は緩やかになり、徐々に広がっていく。

図2. 低 $\alpha$ 運転におけるレーザーバンチスライスの



ディップの変化の計算値

### 4. UVSOR-IIにおけるテラヘルツ光発生・計測システム

レーザーバンチスライスの実験システムを図3に示す。チタン・サファイアレーザーは平均出力2W、繰り返し1kHz、パルス幅はおよそ250~400fsで実験を行った。CSRの測定は赤外・テラヘルツ用のビームラインBL6Bで行い、検出器にダイオードディテクターを用いた。時間応答が数百ピコ秒と速く、容易にUVSORの周回時間177nsを分解することができる。スペクトルの情報を得るために、感度領域が異なる3つのディテクター(millitech社DXP-06;  $3.7 \sim 5.7 \text{cm}^{-1}$ , VDI社ZBD3.4;  $7.3 \sim 11 \text{cm}^{-1}$ , VDI社ZBD2.2;  $11 \sim 16.6 \text{cm}^{-1}$ )で測定を行った。

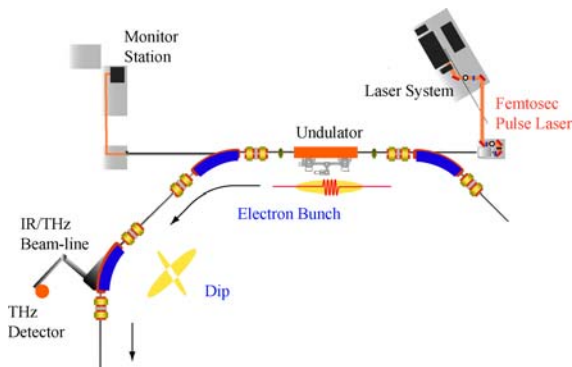


図3. UVSOR-IIレーザーバンチスライスシステム

### 5. テラヘルツダイオード検出器によるCSR計測

通常運転と低 $\alpha$ 運転におけるZBD3.4の計測結果を図4に示す。(a)の通常の運転では、最初の周の信号が大きく、2周目はわずかに信号が見える程度である。しかし、(b)の低 $\alpha$ 運転では1周目と3周目に大きな信号が見える。これは図2に示したように、 $v_\beta$ の端数が半整数に近いために起こったと考えられる。 $v_\beta$ を3.66と端数が2/3に近くに設定した(c)では1、4周目に強いCSRを観測し、7周目に弱い信号を捕らえた。これより、強いCSRが発生する周期は $v_\beta$ に由来することが分かった。

低 $\alpha$ 運転 ( $v_\beta = 3.53$ ) で、さらに長い波長のCSRの信号をDXP-06で測定した結果を図5に示す。ZBD3.4の場合と異なり、1周目で信号が弱く、3および5周目で強いCSRが観測されている。このことから、1周目は浅く鋭いディップが形成されており、3および5周目では比較的深く広いディップになっていることが推定できる。この波長領域では11周目まで信号が観測されており、広いディップ構造は長時間保持されていることが分かる。

ここでは図を示さないが、ZBD2.2については、信号が確認されたのはほとんど1周目のみであった。

### 6. まとめ

時間応答の速いディテクターを用いることでバンチスライスCSRの周回毎の変化を観測することができ、また、複数の波長領域で観測を行うことによってディップの形状の推移を見ることができた。観測結果はMonte Carloシミュレーションによるトラッキングの結果とよく一致する。これより、テラヘルツのCSRはサブピコ秒領域の電子バンチ形状の計測ツールとして有効であることが示された。

### 7. 謝辞

この研究を推進する際に、分子科学研究所・極端紫外光研究施設の技術職員から多くの協力をいただきましたことを感謝します。また、本研究は日本学術振興会の科学研究費補助金(基盤研究(B), 15360039および若手研究(B), 19740150)の支援の下に行われました。

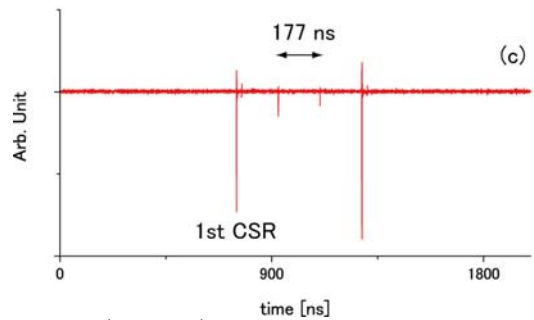
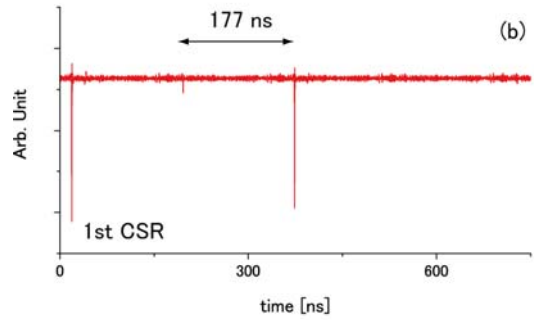
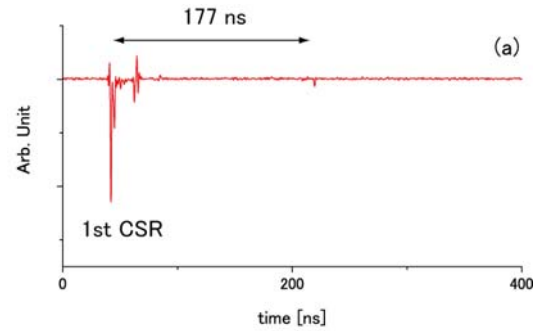


図4.  $7.3\text{cm}^{-1} \sim 11\text{cm}^{-1}$ の波長領域におけるCSRの信号。  
(a): 通常の運転、(b): 低 $\alpha$ 運転( $v_\beta = 3.53$ ) (c): 低 $\alpha$ 運転 ( $v_\beta = 3.66$ )。なおUVSOR-IIの周回時間は177nsecである。

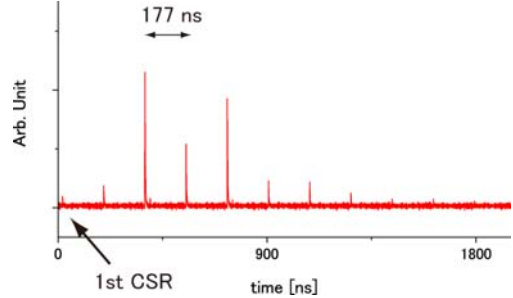


図5.  $3.7\text{cm}^{-1} \sim 5.7\text{cm}^{-1}$ の波長領域におけるCSRの信号。  
運転モードは図4の(b)と同じである。

### 参考文献

[1] M. Shimada *et al*, Jpn. J. Appl. Phys. **46**, 7939-7944, 2007  
[2] S. Bielawski *et al*, Nature Physics, doi : 10.1038/nphys916 (2008)  
[3] J. S. Nodvick and D. S. Saxon, Phys. Rev. **96**, 180-184, 1954