

## Generation of THz Coherent Synchrotron Radiation on Electron Storage Ring

Miho Shimada<sup>1,A)</sup>, Masahiro Katoh<sup>A)</sup>, Akira Mochihashi<sup>A)</sup>, Shin-ichi Kimura<sup>A)</sup>,  
Masahito Hosaka<sup>B)</sup>, Yoshifumi Takashima<sup>B)</sup>, Toru Hara<sup>C)</sup>, Toshiharu Takahashi<sup>D)</sup>,  
Serge Bielawski<sup>E)</sup>, Christophe Szwej<sup>E)</sup>, Clement Evain<sup>E)</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> RIKEN Spring-8 Center, RIKEN Harima Institute  
1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148

<sup>D)</sup> Research Reactor Institute, Kyoto University  
Kumatori, Sennan, Osaka, 590-0494

<sup>E)</sup> Laboratoire de PhLAM, Université des Sciences et Technologies de Lille  
59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France

### Abstract

At UVSOR-II, we have been dedicated to generation of THz Coherent Synchrotron Radiation (CSR) by using a technique of “laser induced slicing”, in which an electron bunch interacts with a Titanium Sapphire femto-second short pulse laser. Recently we have succeeded in producing a narrow-band CSR in the THz region from a bending magnet. We modulate the amplitude of the laser pulse by using a method the so-called “chirped pulse beating” and create the sinusoidal energy modulation on the electron bunch along the longitudinal direction. The quasi-sinusoidal energy modulation was converted to the longitudinal density distribution, which emits a narrow-band CSR at the beat frequency of the laser.

## 電子蓄積リングとレーザーを用いたコヒーレントテラヘルツ光の発生

### 1. はじめに

世界で初めてのコヒーレント放射光(CSR)の観測は東北大学原子核理学研究施設の線形加速器で成功し、世界各地で同様の実験が行われている。これは電子バンチをサブミリメートルまで圧縮することによって実現されたが、近年、蓄積リングの比較的長い電子バンチからもCSRがバースト的に発生することが各研究施設で報告されている。これは電子バンチの不安定性によって微細構造がバンチ内に形成されたことが原因であると説明されている。このように発生するテラヘルツコヒーレント放射光(THz CSR)は、将来有望な放射光源として期待されているが、利用研究に適用させるには様々な点で安定性に乏しいことが問題となっている。

そこで、THz CSRを供給する新たな方法としてレーザーバンチスライスが提唱されている。これは、フェムト秒レーザーとの相互作用させることによって、バンチ内に微細構造(ディップ)を形成するものである。当初、この方法は、ALSが極短X線パルス生成のために提案したものであるが、ALS、BESSYやSLSなどの複数の蓄積リングでテラヘル

ツ・近赤外領域のCSRの観測が報告された<sup>[1,2]</sup>。これらの蓄積リングに比べて電子エネルギーの低いUVSOR-IIではレーザー強度が数百 $\mu\text{J}$ であってもディップを形成しやすいという利点があり、この特色を生かしてレーザーのパルス長の伸長によるTHz CSRのスペクトルの変化について報告している<sup>[3]</sup>。今回はレーザーパルスに正弦波の振幅変調を与え、複数のディップを持つ電子バンチからのTHz CSRの測定を行ったので、その結果について報告する。

### 2. コヒーレントテラヘルツ光発生の原理

アンジュレーターの中で外部からのレーザーと相互作用を起こすことによりエネルギー変調した電子は、リング内を進むうちにバンチ内の位置を変え、バンチの進行方向に密度変調を与える。レーザーのパルス形状がgaussian分布であるときは、バンチ内にレーザーのパルス長に相当するひとつのディップが形成されるが、正弦波に振幅変調されたパルスの場合、その正弦波に対応した密度変調の電子バンチが生成される。図1にその電子バンチの密度分布のシミュレーション結果を載せる。

<sup>1</sup> E-mail: shimada@ims.ac.jp

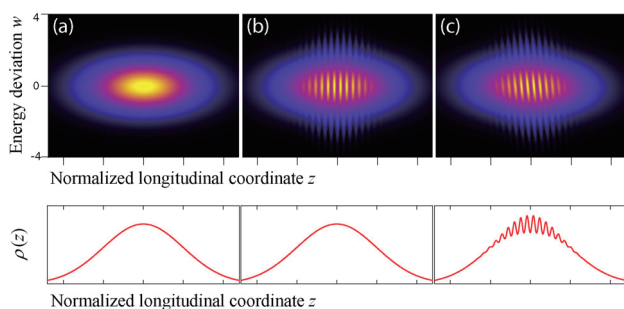


図1. 正弦波に振幅変調したレーザーパルスとの相互作用による電子密度分布の形成

ディップ形成後の進行方向に対する電子密度を  $\rho(z)$  と表すと、放射光のスペクトル  $P(k)$  は次式で計算できる<sup>[2,3]</sup>。

$$P(k) = Np(k) + N(N-1)F(k)p(k)$$

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

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。Form Factor と呼ばれるパラメーター  $F(k)$  はコヒーレント性の割合を示し、電子密度の Fourier 変換の二乗で定義される。この式から容易に分かるように、THz CSR のスペクトルは、gaussian 分布の極短パルスレーザーではバンド幅が広くなり、正弦波の構造を持つレーザーではバンド幅が狭く、特定の波長付近で強い THz CSR が放射することが推定される。

### 3. UVSOR-II おけるテラヘルツ光発生・計測システム

図2にUVSOR-IIにおけるレーザーバンチスライスの実験機器配置図を載せる。アンジュレーター上流部に Titanium Sapphire レーザーを導入し、自由電子レーザー用共振器を通して、レーザーをアンジュレーター内に導いた。

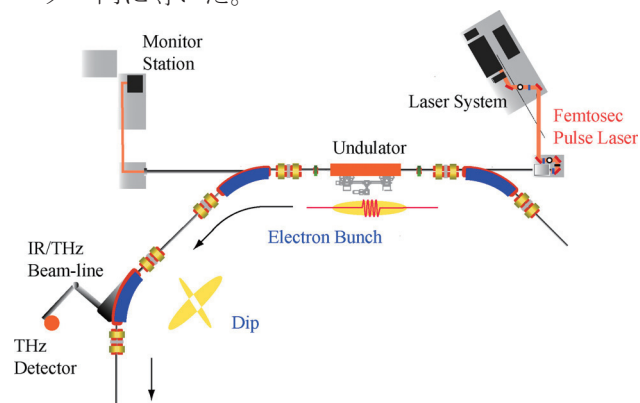


図2. UVSOR-II レーザーバンチスライス実験機器配置

レーザーと相互作用した電子バンチから発生する THz CSR は IR/THz ビームラインに設置した Martin-

Puplett 干渉計でスペクトル分解し、InSb ホットエレクトロンボロメーターで計測した。ビームラインのカットオフを含めた検出可能範囲は  $7\text{cm}^{-1}$  から  $55\text{cm}^{-1}$  である。UVSOR-II および Ti:Sa レーザーの主要パラメーターを表1. および表2. にそれぞれ示す。

表1. レーザーバンチスライス実験における UVSOR-II の主要パラメーター

Electron Energy	600 MeV
Undulator Length	2.31 m
Natural Emittance	17.4 nm-rad
Natural Energy Spread	$3.4 \times 10^{-4}$
Natural Bunch Length	3.1 cm ( $\sim 100$ ps)

表2. Ti:Sa フェムト秒レーザーの主要パラメーター

Pulse Energy	2.5 mJ
Pulse width	130 fs $\sim$ 2 ps
Repetition rate	1 kHz
Wavelength	790 $\sim$ 810 nm
Waist Size in undulator	247 $\mu\text{m}$
Rayleigh Length	0.24 m

レーザーパルスの成形に“chirped pulse beating”という手法を用い、正弦波の振幅変調を与えた<sup>[4]</sup>。図3に光学系および模式図を示す。2枚の回折格子を通して市販の Ti:Sa レーザーからのフェムト秒パルスをチャープをさせるとともにパルス長を伸ばす。回折格子の位置を調整することによって、パルス長が調節可能である。その後、チャープしたパルスをマイケルソン干渉計に導く。ビームスプリッターで2つに分けたパルスは異なる距離を伝播し再合成すると、パルス中央部で波長の差によるビートが発生する。つまり、振幅が正弦波となるパルスが発生することができる。マイケルソン干渉計のリトロリフレクターの位置を調節することによって、ビートの波長を変更することができる。また、パルス長を伸ばすことにより、ビートの数を増加させることができる。

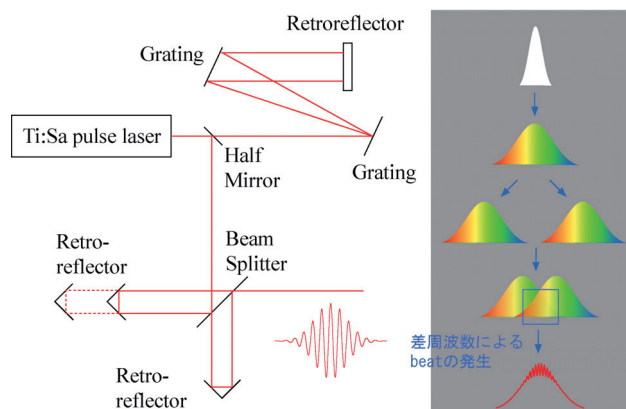


図3. 振幅変調パルス形成の光学系と模式図

#### 4. CSRスペクトル計測

THz CSRのスペクトルを計測するとともに、マイケルソン干渉計型のオートコリレーターで随時レーザーパルスの振幅変調のモニターを行った。図4および図5にそれぞれTHz CSRスペクトルと振幅変調パルスのオートコリレーターの応答を示す。THz CSRのバンド幅は平均およそ $4\text{cm}^{-1}$ であった。また、レーザーパルスのビートの周波数に比例して、THz CSRのスペクトルのピークが高周波数側にシフトすることを確認した。

図3に示した回折格子の光学系を調整して、レーザーパルス長をおよそ60 psまで伸ばし、ほぼ同じ周波数のビートを発生させた。そのときに計測されたTHz CSRとオートコリレーターの応答をそれぞれ図6および図7に示す。THz CSRのピークとビートの周波数の関係は図4および図5のケースと同じであった。また、ひとつのパルスに多くのビートが発生したことにより、バンド幅が $1\text{cm}^{-1}$ と小さくなった。

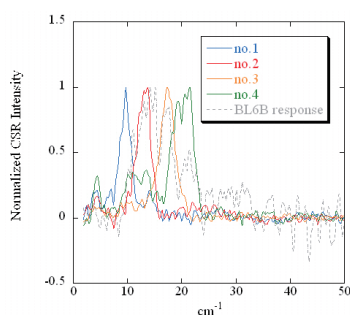


図4. 振幅変調レーザーパルスとの相互作用によって発生したTHz CSRスペクトル。パルス長は2 ps。

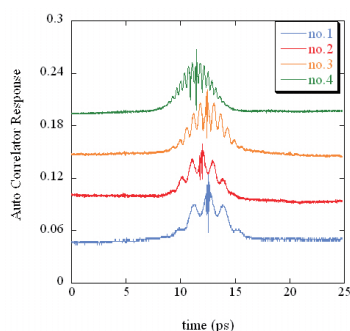


図5. 図4のTHz CSRスペクトルが観測されたときのオートコリレーターの応答

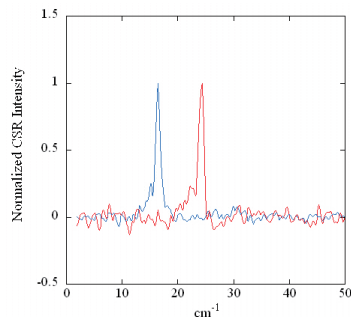


図6. 振幅変調レーザーパルスとの相互作用によって発生したTHz CSRスペクトル。パルス長は60 ps。

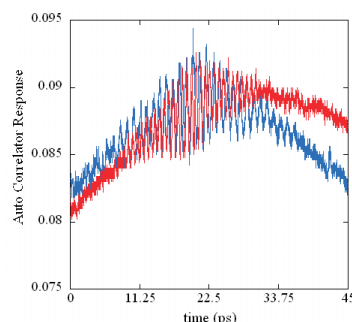


図7. 図6のTHz CSRスペクトルが観測されたときのオートコリレーターの応答

#### 5. まとめ

正弦波の振幅変調を与えたレーザーパルスを外側から入射し、電子バンチと相互作用させることに成功し、バンド幅の狭いTHz CSRが発生することを確認した。また、レーザーパルス成形の光学系の一部を調整することにより、THz CSRのピークの周波数およびバンド幅を容易にコントロールできることが分かった。このように、アンジュレーターのような周期構造の磁場を持たない偏向磁石から、電子バンチの中に周期的な密度構造をもたせることにより、バンド幅の狭い放射光を得た世界最初の例であり、新たなTHz CSR光源としての可能性を今後追求していきたい。

#### 6. 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スタッフから協力をいただきました。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。また、レーザー輸送路の構築にあたり、分子科学研究上の国際協力研究費の支援の下、M. E. Couprie氏、M. Labat氏、G. Lambert氏からの協力をいただきました。

#### 参考文献

- [1] J. M. Byrd et al, "Coherent infrared radiation from the ALS generated via femtosecond laser modulation of the electron beam", EPAC2004. 2448-50, 2006
- [2] K. Holldack, et al., "Characterization of laser-electron interaction at the BESSY II femtoslicing source", Phys. Rev. ST-AB, Vol. 8, 040704, 2005
- [3] M. Shimada et al, "Intense terahertz synchrotron radiation by laser bunch slicing at UVSOR-II electron storage ring", submitted to Jpn. J. Appl. Phys.
- [4] A. S. Welington et al, "Novel sources and detectors for coherent tunable narrow-band terahertz radiation in free space", J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 13, 2783-91, 1996