

LASER-BUNCH SLICING EXPERIMENT IN UVSOR-II

Miho Shimada^{A)}, Masahiro Katoh^{A, B)}, Masahito Hosaka^{A)}, Akira Mochihashi^{A)}, Shin-ichi Kimura^{A)},
Yoshifumi Takashima^{B)}, Toshiharu Takahashi^{C)}, Toru Hara^{D, A)}

^{A)}Institute for Molecular Science, Myodaiji, Okazaki, Aichi 444-8585 Japan

^{B)}Nagoya University, Furo, Chikusa, Nagoya, Aichi 464-8603 Japan

^{C)}Kyoto University, Kumatori, Sennan, Osaka 590-0494 Japan

^{D)}RIKEN/SPring-8, 1-1-1 Kouto, Mikazuki-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148, Japan

Abstract

A laser bunch slicing experiment has started at the UVSOR-II electron storage ring. An ultra-short pulse laser system was introduced, which can be synchronized with the RF acceleration of the ring. A laser transport line was constructed by utilizing the existing optical ports for the free electron laser. An undulator which is also used for the free electron laser can be tuned to the laser wavelength and is used for the modulator. Intense terahertz pulses synchronized with the laser injection were observed at an existing infrared beam line located downstream of the undulator section. The intensity of the terahertz pulses is proportional to the square of the peak intensity of the electron beam. This clearly indicates that the terahertz pulses were coherent synchrotron radiation originating from longitudinal density structure produced by the laser bunch slicing.

UVSOR-IIにおけるレーザーバンチスライス実験

1. はじめに

電子加速器におけるシンクロトロン放射において、光源である電子バンチのバンチ長がシンクロトロン放射光の波長より短い場合、コヒーレントなシンクロトロン放射光(Coherent Synchrotron Radiation, 以下CSRと略記)が発生することはよく知られている。初のCSR発生事例^[1]は線形加速器における短い電子バンチを用いたものであり、それ以降数多くの線形加速器においてCSR発生実験が行われた。一方、近年では線形加速器ではなく円形の蓄積型加速器(蓄積リング)によるCSR発生実験が行われており、蓄積リングにおけるCSR発生の事例もまた数多く報告されている^[2]。そのいくつかの事例では、CSR発生の際にはリングのmomentum compaction factorを小さくすることで電子バンチ長を放射光の波長より短くしてCSR発生を促す方法が採られているが、発生する波長より長い電子バンチ長である場合でもCSRが発生する事例も報告されており、この現象は電子バンチ内の進行方向電子密度分布に微細な密度変調が生じた場合に起こるものであると考えられている。

レーザーバンチスライス法は、レーザーと電子バンチとの相互作用によって電子バンチの密度分布に人工的に微細な密度変調を生成する方法であり^[3]、これまでに2つの研究施設からの報告事例がある^[4,5]。この方法では、加速器に設置してあるアンジュレーター内で極短レーザーパルスと電子バンチを相互作用させて電子バンチにエネルギー変調を与える。その結果、レーザーパルス長が電子バンチ長と比較して充分短い場合には電子バンチ内の一部の電子のみがエネルギー変調を受けることになる。一部の電子がエネルギー変調を受けた電子バンチがリング内を進行すると、エネルギー変調を受けた電子

が電子バンチから離れ、その結果電子バンチにはレーザーパルス幅に相当する窪みが生成される。結果、電子バンチには微細な密度変調が生じ、その時間構造に相当する波長のCSRが発生される。

UVSOR-II電子蓄積リングはビームエネルギー750MeVの放射光源加速器であり、複数本の放射光利用ビームラインを有しているが、特に世界一の性能を有する遠赤外ビームラインが稼動中である^[6]。我々は遠赤外ビームラインにおける大強度テラヘルツ放射光の利用を目的としたCSR発生実験を2004年から開始し、開始後間もなくして単バンチ大強度ビーム蓄積時において大強度テラヘルツ放射光バーストの発生を確認した^[7]。引き続き2005年には加速器中を周回する電子バンチと同期可能な極短パルスレーザーシステムを導入し、レーザーバンチスライス実験を開始した。本報告ではレーザーバンチスライス実験のセットアップと実験結果について報告する。

2. 実験のセットアップ

レーザーシステムは図1にあるようにモードロック型チタンサファイア(Ti:Sa)レーザーと再生増幅器で構成されている。Ti:Saレーザーは加速器中の電子バンチと同期して極短パルスレーザーを発生させることができる。パルスレーザーのエネルギーは2.5mJ/pulseであり、パルス繰り返しは1kHzである。Ti:Saレーザーによる電子バンチのエネルギー変調の見積もりを図2に示す。パルスレーザーの照射により、バンチ内の電子に蓄積リングのmomentum acceptanceまたはそれ以上のエネルギー変調を与えることが可能である。

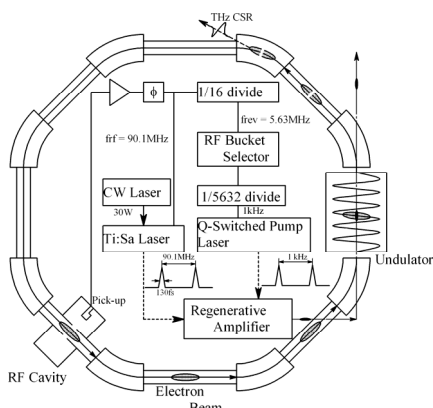


図1 レーザーバンチスライス実験の概略図。

表1 Ti:Saレーザーの主なパラメーター

Wave Length	800 nm
Pulse Energy	2.5 mJ
Repetition Rate	1 kHz
Pulse Width	130 fsec ~ 1 psec

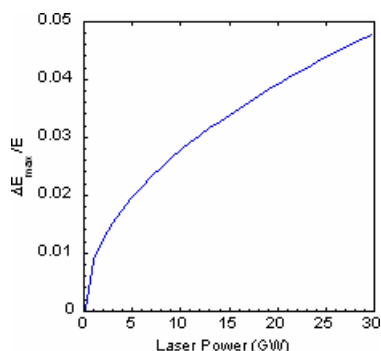


図2 modulator内でのレーザーピークパワーに対する電子ビームのエネルギー変調。適切なレーザー集束条件を仮定した。

レーザーパルスは蓄積リング室内に設けたレーザー輸送路を經由して蓄積リング内に入射される。レーザー入射用窓としては既設の自由電子レーザー(FEL)^[8]取り出し用ポートを使用している。レーザーパルスと電子バンチとの相互作用位置としては、UVSOR-IIに既設の可変偏光アンジュレーター(普段は放射光利用やFEL実験に使用)内に設定してある。レーザーバンチスライス実験ではアンジュレーターを水平方向直線偏光に設定し、またアンジュレーター波長はレーザー波長と同じ800nmに設定して実験を行っている。バンチスライス実験における加速器の設定パラメーターを表2に纏めた。

電子バンチと相互作用したレーザーパルスはアンジュレーターが設置してある直線部ビームダクトを通過してFEL取り出しポートから出射される。FEL取り出しポートではFEL実験に使用するストリークカメラ等の既設機器を用いて電子バンチ診断を行った。レーザーとの相互作用の後、電子バンチがリング内を進行することでCSR発生を引き起こす密度変調

が電子バンチ内に生成される。一連のレーザーバンチスライス実験では蓄積リングは通常の放射光利用運転と同じ低エミッタンス運転状態(分散関数がmodulatorも含めてリング全周に分布^[9])で行った。またUVSOR-IIはビーム入射時のエネルギーは600MeV、通常の放射光利用運転時のビームエネルギーは750MeVであるが、本実験ではアンジュレーター波長をレーザー波長と同一にすることが必要であり、そのためには通常運転時の750MeVより600MeVの方が望ましいため、実験は入射エネルギー(600MeV)、単バンチ運転状態で行った。

CSRの観測は共同利用遠赤外ビームラインBL6B^[6]で行った。BL6Bはアンジュレーターセクションから2つの偏向電磁石セクション下流に位置し、広範囲の放射光取り込み角度(215mrad×80mrad)を持つmagic mirrorを装備している。集光されたテラヘルツ放射光は液体ヘリウム冷却型InSbボロメーターを用いて観測した。使用したボロメーターの感度波長領域は0.2-3.0mmであり、また数マイクロ秒の時間分解能を持っている。

表2 レーザーバンチスライス実験におけるUVSOR-IIの運転パラメーター

Electron Energy	600 MeV
Circumference	53.2 m
Natural Energy Spread	3.4 x 10 ⁻⁴
Natural Emittance	17 nm
RF Frequency	90.1 MHz
Natural Bunch Length	3.1 cm (r.m.s)
Bending Radius	2.2 m

表3 バンチスライス実験におけるアンジュレーター(モジュレーター)の設定パラメーター

Number of Periods	21
Period Length	110 mm
Pole Length	2.35 m
Polarization	Linear (horizontal)
Deflection Parameter	6.18

3. 実験結果

レーザーの動作繰り返し(1kHz)に同期した大強度テラヘルツ放射光パルスを観測した。結果を図3に示す。図中では同じ波長領域の通常放射光も同時に観測されているが、パルスあたりの強度は通常放射光のおよそ10⁴-10⁵程度の強度であった。個々のテラヘルツ放射光パルスを拡大したものを図4に示す。パルス幅は数マイクロ秒であり、これは測定器の時間分解能とほぼ等しい。なお、実験は自発的CSR発生のビーム電流の閾値^[7]以下の低ビーム電流領域で行った。テラヘルツ放射光強度のビーム電流依存性

の測定結果を図5に示す。図ではストリークカメラで観測した進行方向電子バンチ分布から求めた電子バンチのピーク強度に対するテラヘルツ放射光強度をプロットした。ピーク強度の二乗に比例して放射光強度が増大する様子が分かり、CSR発生を強く示唆する結果が得られた。

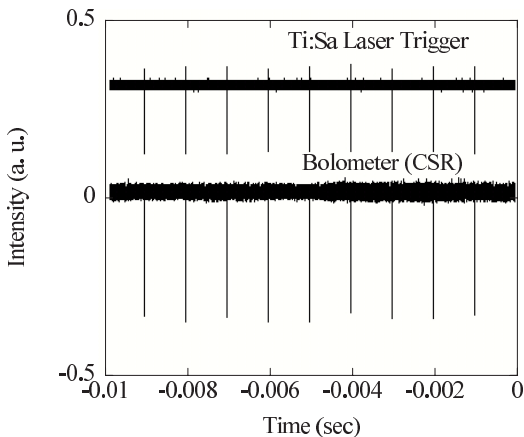


図3 レーザー入射によるテラヘルツパルス発生。

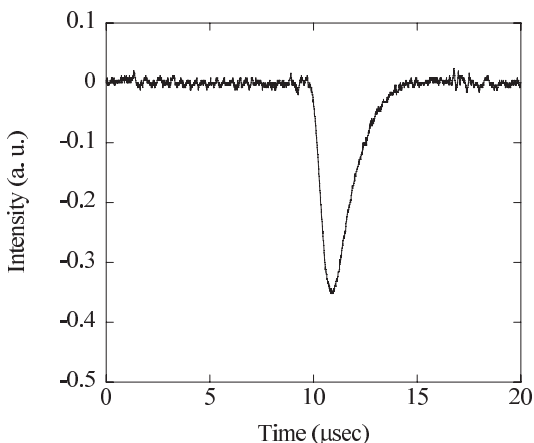


図4 図3内の個々のテラヘルツパルスの拡大図。

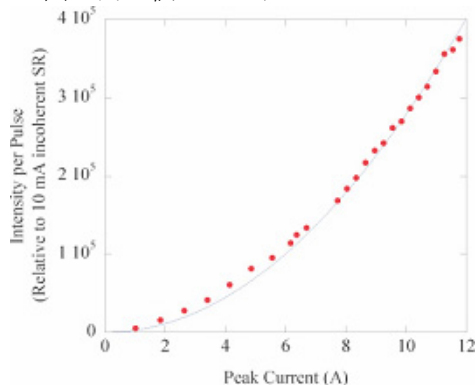


図5 電子バンチのピーク強度に対するテラヘルツ放射光強度の依存性。

4. まとめ

Ti:Saレーザーシステムを導入し、また既設のFELシステムを利用することでレーザーバンチスライス

実験用システムをUVSOR-IIに導入した。既設の遠赤外ビームラインにおいてInSbボロメーターを用いて観測実験を行った結果、パルスレーザー動作と同期した大強度テラヘルツ放射光パルスを観測することができた。観測したテラヘルツ放射光強度は電子バンチのピーク強度の二乗に比例しており、CSR発生を強く示唆する結果が得られている。レーザーによるテラヘルツ放射光パルスの時間幅は非常に短く、パルスの時間構造測定には、数マイクロ秒の時間分解能を持つ測定器でも充分でないのが現状である。

5. 謝辞

本実験を通して御協力頂いたUVSORの各スタッフ、またCSR発生とレーザーバンチスライス実験に関して助言を頂いたG.Wuestefeld, P. Kusuke両博士を始めとするBESSY-IIの方々へ感謝する。レーザー輸送路の建設に当たっては、分子科学研究所の国際共同研究プログラムのもとM. E. Couprie博士, M. Labat, G. Lambert氏らに御協力頂いた。御礼申し上げる。本研究は日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究B15360039)の支援を得て行われた。

参考文献

- [1] T. Nakazato et al., *Phys. Rev. Lett.* **63** (12), 1245 (1989)
- [2] e. g. C. Biscari (ed.), "Coherent Synchrotron Radiation in Storage Rings" in *ICFA Beam Dynamics News Letter* No. 35, 2004, 20
- [3] A. Zholents and M. Zolotarev, *Phys.Rev.Lett.* **76**, 912 (1996)
- [4] J. M. Byrd et al., *Proc. EPAC 2004* (Lucerne, 2004), 2445
- [5] K. Holldack et al., *Proc. EPAC 2004* (Lucerne, 2004), 2281
- [6] S. Kimura et al., in *Synchrotron Radiation Instrumentation*, edited by T. Warwick et al., AIP Conference Proceedings 705, American Institute of Physics, Melville, NY, 2004, pp.416-419
- [7] Y. Takashima et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.44, No.35, 2005, pp L1131-1133
- [8] M. Hosaka et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **528** (2004) 291-295
- [9] M. Katoh et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **467-468** (2001) 68-71