

OBSERVATION OF FAR INFRARED COHERENT SYNCHROTRON RADIATION AT UVSOR-II

M. Katoh^{1,A)}, M. Hosaka^{A)}, A. Mochihashi^{A)}, S. Kimura^{A)}, Y. Takashima^{B)}, T. Takahashi^{C)}

^{A)} Institute for Molecular Science, National Institutes of Natural Sciences, Myodaiji-cho, Okazaki, 444-8585

^{B)} Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chigusa-ku, Nagoya, 464-8603

^{C)} Research Reactor Institute, Kyoto University, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka, 590-0494

Abstract

At a 750MeV electron storage ring, UVSOR-II, possible coherent synchrotron radiation was observed in the wavelength region between 0.2 and 3.0 mm. Bursts of far infrared emission were detected when the ring was operated in single bunch mode and the beam current exceeded a certain threshold current, typically around 100 mA. Typical duration and interval of the bursts are about 200 μ sec and 10 - 15 msec, respectively. Each burst contains many peaks and shows quasi-periodicity of about 30 μ sec. The peak intensities of the bursts are 10000 times higher than that of normal synchrotron radiation in the same wavelength region. The threshold current depends on the operation condition of the storage ring, especially that of the RF system.

UVSOR-IIにおける遠赤外コヒーレント放射光の観測

1. はじめに

高エネルギーの電子群が波長程度の空間スケールで集群すると、各電子からのシンクロトロン放射 (SR) は同位相で重畳し、その強度は関与する電子数の二乗に比例するようになる^[1]。加速器の電子ビーム中の電子数は典型的に 10^{9-10} 個にもなるために、そのごく一部が関与しただけでも放射強度は通常のSRに比べて桁違いの大強度となる。この現象はコヒーレントシンクロトロン放射 (CSR) と呼ばれている。

CSRは電子バンチ長よりも長い波長領域で発生する。線形加速器においてはバンチ長を1mm程度あるいはそれ以下にすることが可能であるが、電子蓄積リングにおいては、通常の運転状態でのバンチ長は1cm程度かそれ以上である。その一方で、CSRは、電子ビームを取り囲むビームダクトによる抑止効果のために、ダクトの口径や偏向半径で決まるある波長よりも短い波長でしか発生しない^[2]。ダクト口径が数cm程度の一般の電子蓄積リングでは、CSRの長波長側の限界は1cm程度かそれ以下になる。したがって線形加速器においてはCSRが遠赤外・ミリ波領域において観測できる可能性があるが、電子蓄積リングにおいてはその可能性は極めて低い、という結論になる。

実際、CSRは世界に先駆けて東北大学の線形加速器を用いて観測され^[3]、その後、数多くの線形加速器において発生が確認され利用に供されている例もある。一方電子蓄積リングにおいてはCSRが観測された例はなかった。

ところがここ数年の間に、いくつかの電子蓄積リ

ングにおいて、遠赤外・ミリ波領域でCSRが観測されたという報告が相次いでいる^[4, 5, 6, 7, 8]。観測されたCSRはバンチ電流値がある閾値を超えると発生し、多くの場合バースト的であり、そのピーク強度は通常のSRに比べて 10^{3-5} 倍にも達する。何らかのビーム不安定性によりバンチ内部に成長した電子密度の揺らぎ (マイクロバンチング) によりCSRが生成されている、という説明がなされている^[4, 5, 9]。

CSRの現れ方はリングによって異なる点も多く、発生メカニズムについても不明な点が多い。将来の大強度電子加速器のビーム品質を制限する要因になる可能性もあり、また、一方で、大強度光源として利用できる可能性もある。研究対象として大変に興味深いものであるが、我が国においてはこれまで電子蓄積リングでCSRを観測した例はなかった。

分子科学研究所の放射光源UVSORはエネルギー750MeV、周長53mの比較的小型の電子蓄積リングであるが、2003年に第3世代並みの高輝度光源UVSOR-IIへと高度化改造され、その後も順調に稼働を続けている^[10]。UVSORは世界に先駆けてSRの赤外・ミリ波領域での利用を開始したことで知られているが^[11]、2004年にその赤外線ビームラインは大幅に増強され^[12]、遠赤外SRとしては世界最高強度が実現できていることがつい最近確認されたばかりである。すなわちCSR観測に最適なビームラインが存在している。更に、2003年高度化に合わせて行われた入射器の更新の結果、従来は100mA前後がバンチ電流値の限界であったものが、最近では200mA以上まで蓄積が可能となった。これまでの報告でもCSRはシングルバンチ大電流域で観測されている例

¹ E-mail: mkatoh@ims.ac.jp

が多く、UVSOR-IIにおいてもCSRが観測できる可能性が高まってきた。このような状況のもと、我々のグループでは、2004年1月から、UVSOR-IIにおいてCSRの観測実験を開始した。

2. 観測実験

CSRの観測においてはシングルバンチ運転でできるだけ大電流を蓄積する必要がある。UVSOR-IIは通常600MeVで入射した後、750MeVまで加速しているが、シングルバンチ大電流蓄積においてはTouschek効果のために寿命が非常に短く、加速している間のビームの減少が無視できない。このため観測実験ではUVSOR-IIを入射エネルギーの600MeVのまま運転した。実験時の主要なビームパラメータを表1に示す。

表1. UVSOR-IIの主要パラメータ (CSR実験時)

Electron Beam Energy	600 MeV
Circumference	53.2 m
Natural Emittance	17.4 nm-rad
Natural Energy Spread	3.4×10^{-4}
Momentum Compaction Factor	0.028
RF accelerating Voltage	55 kV
RF Frequency	90.1 MHz
Natural Bunch Length	3.1 cm
Synchrotron Frequency	14.4 kHz
Damping Time (longitudinal)	19 msec
Bending Radius	2.2 m

CSRの観測には、先に述べたUVSOR-BL6B赤外ビームラインを利用した。いわゆるマジックミラーを用いて偏向電磁石からの赤外SRを $215 \times 80 \text{ mrad}^2$ という大きな立体角で取り出せる^[12]。使用した検出器はヘリウム冷却のInSbボロメータ (Infrared Laboratories 社製 InSb hot electron bolometer) である。検出系は波長3mmから0.2mmまでの領域に感度がある。なお今回の一連の実験では特に波長フィルターなどは使用していない。

SRの平均強度は、周波数100Hzのチョッパーを通した光をボロメータに入れ、その出力をロックインアンプで処理することで計測した。また、放射強度の早い時間変化については検出器からの信号をデジタルオシロスコープで直接計測した。検出系の時間応答はプリアンプの時間応答で制限されており、数 μ 秒程度である。

シングルバンチで大電流運転を行った場合のSR平均強度の観測結果を図1に示す。比較のためマルチバンチ運転での結果も合わせて示してある。当然であるが、マルチバンチ運転ではSR強度はビーム電流値に比例している。シングルバンチ運転でも低電流域では比例しているが、140mAを超えると急激に増加する。また、70-80mA付近

でも強度が増えているのがわかる。

大強度放射が起きている領域で出力にばらつきが見られるのは、以下で述べるように大強度放射が定常的ではなく、また、それをロックインアンプを用いて検出しているためである。図1の測定データは、大強度放射の平均強度を正確に反映したものとはいえないが、大強度放射が起きている電流域を明確に示している。

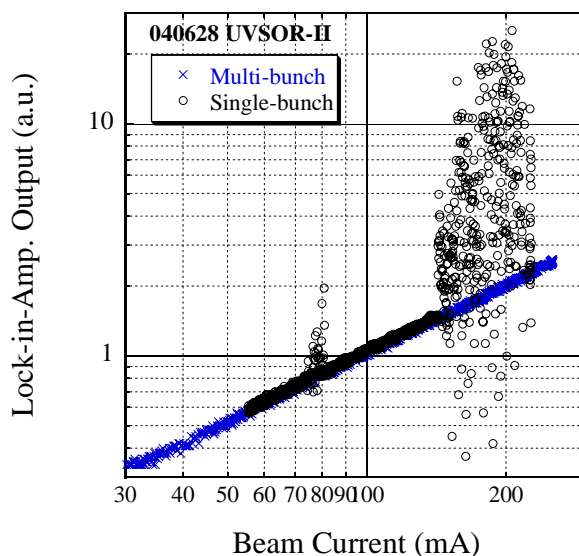


図1 遠赤外放射光強度のビーム電流依存性
ビーム電流値に対してロックインアンプの出力をプロットした。シングルバンチモード(○)とマルチバンチモード(x)を示してある。

放射強度の時間変動の様子を図2と図3に示す。放射はバースト的に起きており、その典型的な持続時間は約200 μ secである。バーストは準周期的に現れる場合が多く、その間隔は、ビーム電流値にもよるが、典型的には10~15msec程度である。200mAを超える大電流域になると周期性は顕著ではなくなる。

個々のバーストは準周期的に現れる多数のピークを持つ場合が多い。その周期は約30 μ secであり、シンクロトロン周期のおよそ1/2である。

バーストのピーク強度は、検出系などの線形性が保たれていることを仮定すると、通常のSRの10000倍超に達しているの見積もることができる。

これまでの実験から、CSRと思われる大強度放射が観測されている電流域では電子ビーム信号スペクトルの周回周波数成分の近傍でシンクロトロン振動数の2倍のサイドバンドが観測されることがわかっている。また、大強度放射の始まる閾電流値は高周波加速系、特に、三倍高調波空洞の運転パラメータに依存する傾向がみられる。

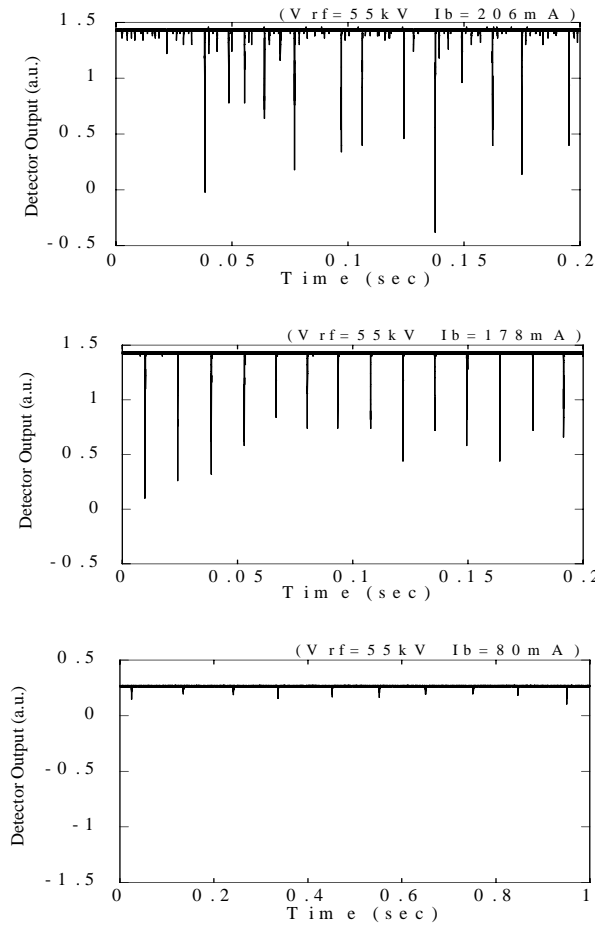


図2 大強度遠赤外線放射の時間変動
上段：ビーム電流206mA、中段：178mA、下段：80mA。
下段のみ時間軸スケールが異なる。信号は負出力。

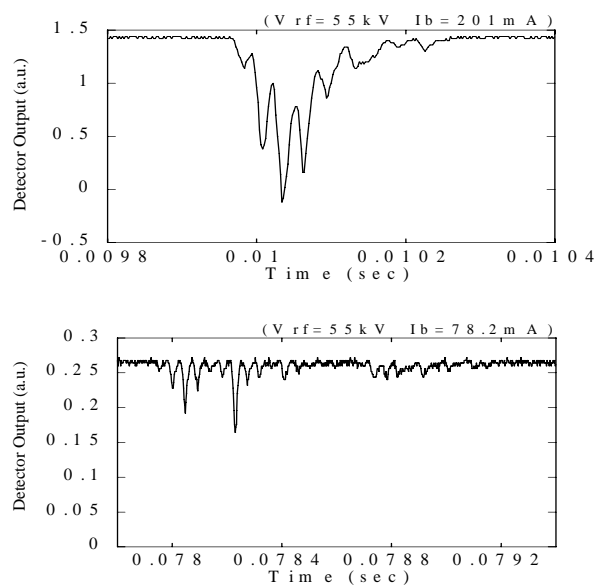


図3 大強度遠赤外線バーストの時間構造
上段：ビーム電流201mA、下段：78.2mA。信号は負出力。
上段、下段で縦軸・横軸ともスケールが異なるので注意。

3. まとめと考察

UVSOR-IIにおいて、通常の放射光強度を大幅に上回る大強度の放射光が遠赤外・ミリ波領域で観測された。この放射はバンチ電流がある閾値を超えると発生する。放射はバースト的であり、ピーク強度は通常の放射光の10000倍以上に達する。この尋常でない強度から、いわゆるコヒーレント放射 (CSR) が起きているものと考えている。

UVSOR-IIの自然バンチ長は約3cm (rms値) であり、大電流域ではpotential well distortionなどの原因でこの2倍以上に伸びることがわかっている。CSRが発生しているとすれば、バンチ内部に何らかの原因で密度揺らぎが形成されているはずである。検出器の感度が長波長側では波長3mm程度までであることから、密度揺らぎは3mm程度かそれ以下の空間スケールでなければならない。なお、ビームダクトによる長波長側でのCSRの抑制^[2]は、UVSOR-IIのビームダクト径 (垂直方向) 38mm、偏向半径2.2mから、約10mm以上の波長域で起きると見積もることができる。

大強度放射の始まる閾電流値はリングの運転条件、特に高周波加速系のそれらに依存することがわかっている。高周波加速系の関与する何らかのビーム不安定性が、バンチ内部に密度揺らぎが形成される原因になっているものと考えられる。大強度放射の起きる電流域が70-80mA付近と100mA超の2つの領域に分かれていることは、他のリングでの観測結果には見られない特徴であり、メカニズムの解明の手がかりとなる可能性がある。

大強度放射の時間変動には2つの特徴的な時間スケールが見出された。ひとつはバーストの発生間隔であり、10msec程度である。これは放射減衰時間と同程度である。また、個々のバーストは多数のピークからなり、ピークは準周期的に出現する。この周期は約30μsecであり、シンクロトロン振動周期のおよそ1/2である。これは他のリングでの観測では見られない特徴である。バーストが起きている電流域で、ビーム信号にシンクロトロン振動の2倍のサイドバンドが現れることとの関連が注目される。

参考文献

- [1] L. I. Schiff, Rev. Sci. Instr. 17 (1946) 6
- [2] S. A. Kheifets and B. Zotter, AIP Conf. Proc. 367 (1995) 424
- [3] T. Nakazato et al., Phys. Rev. Lett. 63(12) (1989) 1245
- [4] U. Arp et al., Phys. Rev. ST-AB 4, 054401 (2001)
- [5] G. L. Carr et al., Nucl. Instr. Meth. A463 (2001) 387
- [6] A. Andersson et al., Opt. Eng. 39(12) (2000), 3099
- [7] M. Abo-Bakr et al., Phys. Rev. Lett. 88(25) (2002), 254801
- [8] J. M. Byrd et al., Phys. Rev. Lett. 89(22) (2002), 224801
- [9] G. Stupakov, S. Heifets, Phys. Rev. ST-AB 5, 054402 (2002)
- [10] 加藤政博、放射光, Vol.17, No.1 (2004), 10-16
- [11] T. Nanba et al., Internat. J. Infrared and Millimeter Waves, 7(11) (1986), 1769
- [12] S. Kimura et al., AIP Conf. Proc. 705 (2003), 416