

UVSOR-III における単一電子蓄積 SINGLE ELECTRON STORAGE AT UVSOR-III

加藤政博^{#A, B)}, 四之宮諒^{A)}, 浅井佑哉^{A)}, 島田美帆^{C, A)}, 宮内洋司^{C, A)}
Masahiro Katoh^{#, A, B)}, Ryo Shinomiya^{A)}, Yuya Asai^{A)}, Miho Shimada^{C, A)}, Hiroshi Miyauchi^{C, A)}

^{A)} Hiroshima Synchrotron Radiation Center, Hiroshima University

^{B)} UVSOR, Institute for Molecular Science

^{C)} KEK

Abstract

We successfully demonstrated single electron storage in the UVSOR-III electron storage ring. The electron beam intensity is reduced using a beam scraper while measuring the ultraviolet synchrotron radiation from an undulator. We succeeded in observing a step-function like intensity change, which corresponds to a loss of one electron. In parallel, we observed the filling of the electrons in the RF buckets and confirmed the last electron was stored in one RF bucket. We also succeeded in accumulating single electrons for more than two hours. This unique operation mode may be useful for basic researches on synchrotron radiation and developments of novel light source technologies.

1. はじめに

電子シンクロトロン・蓄積リングにおける単一電子の蓄積は、1990年代に加速器中での単一電子の運動、単一電子からの放射光を目的とした先行研究例がいくつかあり、その後も、標準光源としての利用などを目的として研究が継続されている[1-8]。一方、我が国においては、単一電子蓄積を積極的に応用研究に利用しようとする試みは、我々の知る限り、例がない。我々は新奇な放射光の利用法の開拓や高エネルギー電子からの電磁放射の基礎研究への応用展開を目指して、分子科学研究所の放射光源 UVSOR-III において、単一電子蓄積を試みた。

放射光源用の電子蓄積リングを周回する電子ビームの強度は数 100 mA 程度であり、周長にもよるが 10^{11-12} 個前後の電子が蓄積されている。電子ビーム強度を減らしていくといずれかの時点で一個の電子が周回している状態が実現されているはずである。その意味では単一電子の蓄積そのものに特殊な技術や仕掛けが必要であるわけではないが、単一電子蓄積状態をどのようにして確認するか、という点に関して少し工夫が必要となる。本報告でもこの点に重心を置いて、UVSOR-III での単一電子蓄積の現状を報告する。

2. 実験方法

本実験に用いた UVSOR-III は電子エネルギー 750 MeV、周長 53 m の小型低エネルギーの放射光源である。通常のユーザー運転ではビーム電流 300 mA で Top-up 運転を行っている。RF 周波数は 90.1 MHz、周囲周波数は 5.6 MHz であり、ハーモニック数は 16 である。300 mA 蓄積状態での電子数は 3×10^{11} であり電子が 1 個になった場合の電流値はおおよそ 1 pA である。

実験では 1 mA 程度の電子ビームを蓄積した後、ビームスクレーパを挿入し、ビーム寿命を 10 分程度まで短縮した。UVSOR-III のビームスクレーパは銅製のロッドであり、ビームダクトの鉛直方向からビーム軌道におよそ

1 mm 程度の距離まで接近させることで振幅の大きな電子を衝突させ失わせている。

ビーム電流値は通常 DCCT で計測するが、0.1 mA 以下では正確な計測は困難となり、それ以下は放射光強度を光電子増倍管で計測することで電子ビーム強度の情報を得た。放射光強度の計測はアンジュレータビームライン BL1U で行った。このビームラインは紫外線領域のアンジュレータ光を、分光器などを介することなく、加速器から直接取り出せるという特長を有している。

アンジュレータ放射は超高真空内に設置されたアルミニウムミラーで 90 度反射された後、サファイア窓を通して大気中に取り出され、直径 5 mm のピンホールで中心部を切り出したのち、さらにアルミニウムミラー 1 枚で 90 度反射され光電子増倍管へと導かれた。ピンホールの位置はアンジュレータ中心から約 7 m である。これらの装置は簡易的な暗室の中に設置されたが、外部光は完全に遮断されてはいない。

光電子増倍管の前にはバンドパスフィルターと複数枚の ND フィルターを設置した。ND フィルターはビーム強度の低下に合わせて光量が計測可能な範囲となるよう枚数を調節し、少数電子蓄積状態では ND フィルター無しで計測を行った。バンドパスフィルターは様々なバンド幅のものを試行し、60 nm という広帯域のものがもっともよい SN 比を与えたので、これを使用した。

3. 実験結果

電子ビームの減少にともない ND フィルターを減らして光量を調節し、最終的に ND フィルター無しの状態で計測を継続した。その結果、極低ビーム電流領域において Fig. 1 に示すような階段関数的な放射光強度の変化を極めて良好な SN 比で計測することに成功した。それぞれの不連続な強度変化が一個の電子の喪失に相当していると考えられ、最後の一個が失われた後のバックグラウンドは非常に小さいことがわかる。最後の一個が失われた後、スクレーパをさらに深く挿入し、信号強度に変化がないことを確認した。

[#] mkatoh@hiroshima-u.ac.jp

本報告では詳細は省略するが、上記の計測と並行してオシロスコープの機能を用いて、16個のRFバケットごとの放射光強度の計測も行った。その結果、少数電子蓄積下ではRFバケットごとの強度も不連続に変化し、且つ、空のRFバケットの増大、さらに最終的にはある一つのRFバケットに最後の電子が蓄積されていることが確認できた。

以上の実験により、単一電子蓄積状態の確認方法が確立できたことから、次に、単一電子状態が確認できた直後にスクレーパを引き抜くことで、長時間の単一電子蓄積を試みた。その結果、2時間にわたって単一電子状態を保持できた。今回は、ビームタイムの制約から、それ以上の蓄積は試みなかったが、さらに長時間の蓄積も可能と思われる。

今回の計測では、一つの電子からのアンジュレータ放射の光電子増倍管による計測数は2000 ct/sec程度であった。これはアンジュレータ光の取り込み開口、ミラーやバンドパスフィルターの透過率、さらに光電子増倍管の量子効率を考慮すると理論計算との矛盾はない。

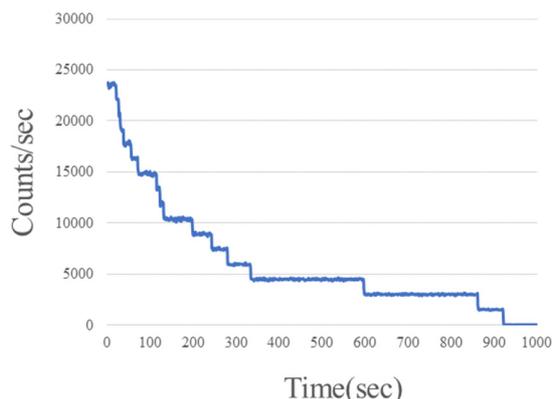


Figure 1: Undulator radiation intensity under small number electron storage.

4. まとめと展望

本研究により、UVSOR-IIIにおける単一電子蓄積の基礎技術を確認することができた。紫外領域でのアンジュレータ放射を適正な帯域のバンドパスフィルターを通すことで、環境光を低減しつつ信号強度を高く保つことで極めて良好なSN比が実現できることがわかった。ただし、単に単一電子蓄積を確認するだけであれば、偏向磁石などからの白色光の利用も可能であると思われる。

単一電子状態の確認には、RFバケットごとの放射光強度の計測が有効であることがわかった。本報告では詳細は省略したが、デジタルオシロスコープの機能を利用することで、特殊な信号処理系を使うことなく、このような計測が簡便に行えることも実証できた。

本実験ではマルチバンチ蓄積状態からビーム強度を低減したため、最後の電子がどのRFバケットに残るかは確率的であったが、シングルバンチ蓄積状態で同様な実験を行うことで、ある特定のRFバケットに電子を残すことは可能である。

今回の実験では約2時間、単一電子状態を維持できたが、さらに長時間、この状態を維持することは可能である。ただし、最後の電子もスクレーパを抜いた状態でのビーム寿命で決まるある一定の確率で失われるはずである。

今後の単一電子状態の応用展開に向けての課題のひとつは、単一電子状態実現までの調整時間の短縮である。微弱電流を蓄積した後、スクレーパでビーム強度を低減するが、現状、光電子増倍管への放射光光量を調整するためのNDフィルターの着脱に時間がかかっている。ダイナミックレンジの極めて広い光電子増倍管の利用によりこれを解決することを検討している。

謝辞

この研究は、四之宮諒君の卒業研究(広島大学理学部物理学科2021年度)として実施したものである。実験は分子科学研究所の共同利用(UVSOR 施設利用21-810)として実施された。実験に際してはUVSOR施設の職員の皆様には多大なるご協力をいただいた。この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- [1] A. N. Aleshaev *et al.*, NIM A 359, 80 (1995).
- [2] I. V. Pinayev *et al.*, NIM A 375, 71 (1996).
- [3] I. V. Pinayev *et al.*, NIM A 341, 17 (1994).
- [4] A. Romanov *et al.*, 2021 JINST 16 P12009.
- [5] R. Klein *et al.*, Phys. Rev. STAB 11, 110701 (2008).
- [6] R. Klein *et al.*, 2010 Metrologia 47 R33.
- [7] R. Klein *et al.*, PRSTAB 11, 110701 (2008).
- [8] A. Romanov *et al.*, Proc. IPAC2021, THXB01 (2021).