

REDUCTION OF ELECTRON CLOUD DENSITY IN A BEAM DUCT FOR POSITRON STORAGE RING USING A CLEARING ELECTRODE AND A GROOVED STRUCTURE

Yusuke Suetsugu^{1,A)}, Hitoshi Fukuma^{A)}, Kyo Shibata^{A)}, Hiromi Hisamatsu^{A)}, Mauro Pivi^{B)}, Lanfa Wang^{B)},
Masaaki Tsukamoto^{C)}, Yasuaki Suzuki^{C)}, Akira Morishige^{C)}, Masao Tsuchiya^{C)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-801, Japan

^{B)} SLAC National Accelerator Laboratory (SLAC)

Menlo Park, CA 94025, U.S.A.

^{C)} Kinzoku Giken Co. Ltd.,

713 Narihira Shake, Ebina, Kanagawa, 243-0424, Japan

Abstract

Beam instabilities caused by the electron cloud are expected to be a limiting factor in the performance of future advanced positron and proton storage rings. In a wiggler magnet of the KEKB positron ring, we have installed a vacuum chamber with an insertion to study the mitigation techniques of the electron-cloud effect in a high magnetic field. The tested insertions are clearing electrodes, triangular grooves and flat surfaces. We report here about the large reduction in the measured electron density when the clearing electrode and the grooves are installed with respect to the flat surfaces.

電極およびグループ(縦溝)構造による 陽電子蓄積リングビームダクト内の電子雲密度低減

1. はじめに

ビームダクト内の電子雲に起因するシングルまたはマルチバンチ不安定性、いわゆる電子雲不安定性 (Electron-Cloud Instability, ECI) は、近年、将来の大強度陽電子・陽子蓄積リングにおける大きな問題の一つとなっている[1]。この問題を解決するため、ソレノイドや表面コーティング、そしてここで述べる電子除去電極やグループ構造など、様々な対策が提案・開発・検証されている[2-6]。

電子除去電極は、ビームダクト内に置かれた電極が作る静電場により軌道付近の電子を引き付ける(或いは追い払う)ものである[3, 4]。一方、グループ(縦溝)構造は、内表面の二次電子放出率(Secondary Electron Yield, SEY)を構造的な工夫によって実効的に下げるものである[5, 6]。双方とも磁場中でも有効なECI対策であり、近年特に注目を集めている。しかし、従来の電子除去電極にはインピーダンス・発熱の問題があり、特に陽電子リングにおいてはほとんど使用されてこなかった。また、グループについても磁場中では未だ十分な実証には至っていなかった。

我々は、KEKB Bファクトリー陽電子リング[7]のウィグラー電磁石を用いて、磁場中での電子除去電極およびグループ構造の電子雲に対する効果を調べた。その結果、TiNコーティングされた平面に比べて、グループ構造で約一桁、電子除去電極では二桁以上電子数を低減できることが分かった。

2. 測定装置

測定には、上面に除去電極やグループなど評価する試料を、下面にRFA (Retarding Field Analyzer) 付きの電子モニターを備えたテストチェンバーを用いた。ウィグラー電磁石内に設置されたテストチェンバーとその断面を図1に示す[4, 6]。除去電極とグループ

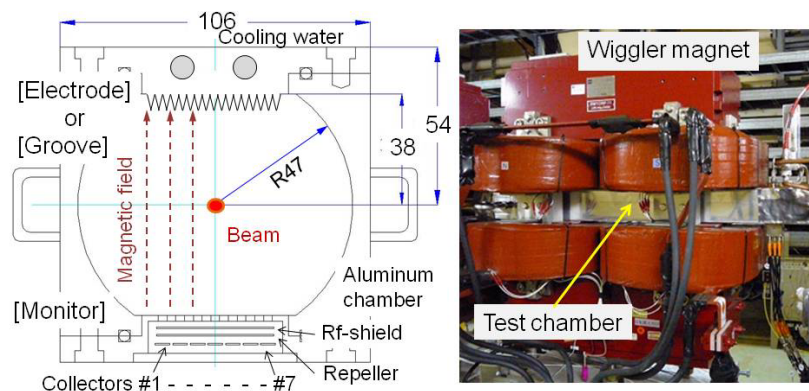


図1：マグネットに設置されたテストチェンバーとその断面

¹ E-mail: yusuke.suetsugu@kek.jp

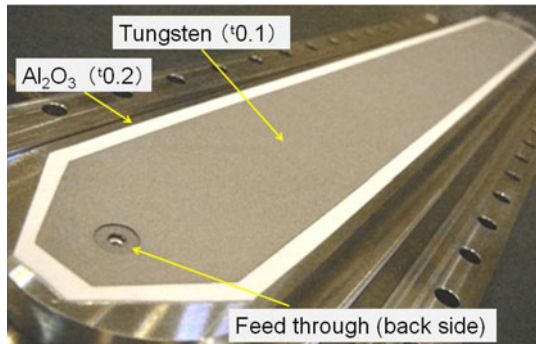


図2：開発された極薄電子除去電極

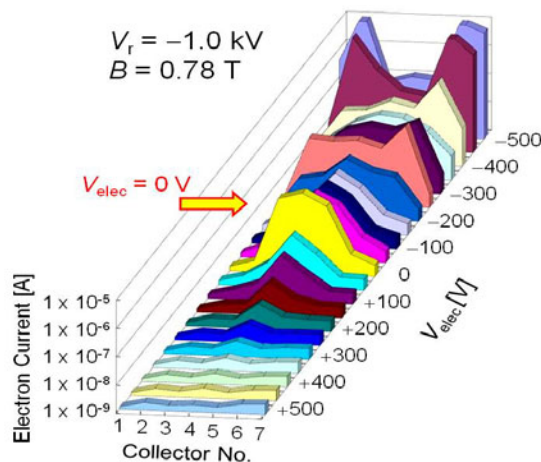


図3： V_{elec} に対する測定電子電流の変化($V_r = -1$ kV, 1.6A, 1585バンチ)

は交換可能なフランジの表面に形成されている。

電子モニターは4層からなる。即ち、ビーム側から、多数のφ2 mmの穴を持つ銅を溶射したステンレス板、RFシールド(ステンレスメッシュ)、グリッド(ステンレスメッシュ)そしてビーム直角方向にならんだ7本の銅コレクター(#1-#7)である。各コレクターの長さ、幅は、それぞれ140 mm、5 mmで、電子密度の水平方向分布を測定することができる。グリッドには-1 kV~0 Vの電圧が、コレクターには+100 Vの一定電圧が加えられる。電子電流はDCモードで測定し、平均の電子数を評価した。

テストチェンバーはウィグラー電磁石の中心部に置かれた。そこでの最大磁場は垂直方向に0.78 Tである。3.5 GeV陽電子ビームの測定時の最大電流は、1585バンチ(約6 ns間隔)にて約1600 mAであった(バンチ電流約 1×10^{-8} C/バンチ)。バンチ長はこの電流で約6 mmである。またテストチェンバー側面には、1600 mA蓄積時 2×10^{17} 個 $s^{-1} m^{-1}$ の光子が直接照射される。

3. 電子除去電極

3.1 構造

今回開発した除去電極は薄いストリップライン構造を持っている(図2) [4]。ステンレスの平面上に、まずアルミナ(Al_2O_3)を0.2 mm溶射し絶縁層とし、そ

の上にタングステンを0.1 mm溶射して電極層とする。電極の幅、長さは、それぞれ、40 mm、440 mmである。電極が非常に薄いため、従来のストリップライン型電極よりもインピーダンスは小さい。電極部のロスファクターは約 7×10^9 $V C^{-1}$ であり、エネルギー損は約110 Wと見積もられた(1600 A, 1585バンチ、バンチ長6 mm)。また、電極が薄いため熱伝導も良く、実際、測定中電極部の温度上昇は小さかった。電極はその一端で同軸導入端子(特性インピーダンス50 Ω)に接続されている。電極には直流電源(± 1 kV, 30 mA)から同軸ケーブルを介して最大 ± 1 kVが印加された。

3.2 結果

テストチェンバー内の電子数を、電極電圧(V_{elec})を-500 Vから+500 Vの範囲で変えて測定した。グリッドの電圧(V_r)は0 Vまたは-1 kVであった。 $V_r = -1$ kVの時の測定例を図3に示す(~1600 mA、バンチ間隔約6 ns)。正の V_{elec} では、電子密度はその絶対値に比例して一様に減少する。 $V_{elec} > +300$ Vでは、#4コレクター(ビーム軌道位置)の電子電流は $V_{elec} = 0$ Vの時の1/100以下となった。 $V_r = -1$ kVの場合、電子モニターはビーム軌道の近くの電子のみを測定する。すなわち、この時の測定電流はビーム軌道近傍の平均電子密度を反映する。測定電流が 1×10^{-9} Aの時、平均電子密度はおおよそ 1×10^9 electrons m^{-3} と見積もられた。一方、 V_{elec} が負の場合の測定電子電流の変化は複雑である。これは、電子が電極の電界によってモニター側に押し戻されるため電子モニターに電子が飛び込みやすくなること、およびバンチとの相互作用があることが主な原因である。他のバンチフィルパターン(4~16 ns間隔)でも同様な結果が得られた。

4. グループ(縦溝)構造

4.1 構造

グループ構造の一例を図4に示す。グループは二等辺三角形の断面を持ち、ビーム軌道方向に形成されている。この構造は、表面から放出された二次電子がサイクロトロン運動により再度表面に戻る確率を上げ、実効的に表面からの二次電子放出率を下げ

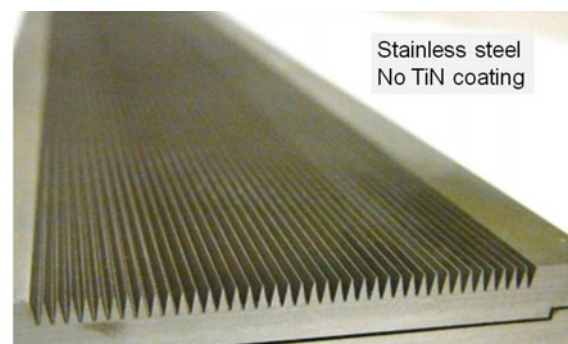


図4：測定に用いたグループ(縦溝)構造

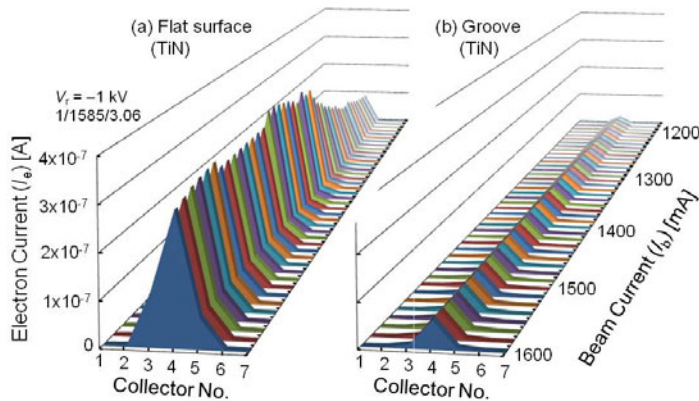


図5：(a)平面および(b)グループ面でのビーム電流蓄積時の電子電流の変化($V_r = -1$ kV、1585バンチ)

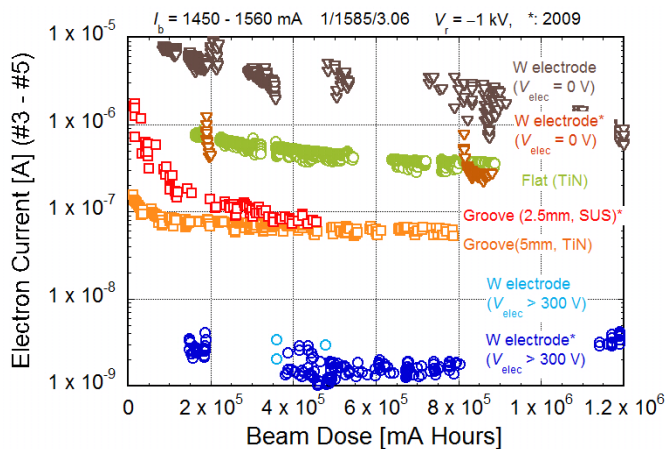


図6：平面、グループ構造(2種)、除去電極($V_{elec} = 0$ V、 $> +300$ V)での測定電子電流(#3~#5の和)の積分ビーム電流(ビームドーズ)に対する変化

るもので、斜面を有効に利用するためには角度や頂部・底部の加工精度が重要となる。図4の例では、深さが約2.2 mm、頂(底)の角度 20° 、ピッチは1 mmである。頂部の曲率半径は約0.05 mmである。このグループの表面はTiNでコーティングされていないが、この他、TiNコーティング(厚み平均50 nm)を施した深さ約5 mmのグループ(頂の角度は 20°)および平面でも測定を行った。

4.2 結果

ビーム電流を1200 mAから1600 mAまで蓄積していく際の測定電子電流の変化を、平面の場合とグループの場合で比較した例を図5に示している(両方ともTiNコーティングあり)。 $V_r = -1$ kV、バンチ間隔は約6 nsである。グループ面にすることにより平面よりも約一桁電子密度を減らすことができた。同様な結果は他のバンチフィルパターンでも得られた。

4.3 除去電極との比較

図6は、2種類のグループ面(深さ約2.2 mmとTiNコーティング付きで深さ約5 mm)、2種類(2008年、2009年)の除去電極($V_{elec} = 0$ V、 $> +300$ V)、そして平面(TiNコーティング)について、積分ビーム電流(ビームドーズ)に対する#3~#4コレクター電流の和(ビーム軌道近傍の平均電子数)の変化を示している($V_r = -1$ kV)。測定時のビーム電流は1450~1550 mA (0.9~1 mA/バンチ)、バンチ間隔は約6 nsである。ビームドーズ(積分ビーム電流)と共にほぼ単調に減少する。除去電極 $V_{elec} = 0$ Vの場合は、単に溶射されたタングステンの表面となる。TiNコーティングされた平面やタングステン表面に比べて、グループ面の電子電流は約一桁小さくなる。そして、除去電極に $+300$ V以上の電圧を加えると、さらに一桁以上小さくなるのがわかる。

これまでの実験から、除去電極、グループ表面とも磁場中において非常に有効なECI対策であることがわかった。両方共通の実用上の課題は、ビームインピーダンスであろう。特にグループは、その加工方向とビーム軌道方向が一致している場合にはインピーダンスは小さいが、軌道が曲がっている場合は大きくなる。一方、電子雲に対する効果から言えば除去電極が大きいが別途電源が必要となる。コストや製作性なども含めて適材適所で適用を考えるべきであろう。例えば、アーク部の偏向電磁石部にはグループ構造が、直線部のウィグラー電磁石部には除去電極が適していると考えられる。

謝辞

本研究にあたり、コーネル大学のM. Palmer氏、M. G. Billing氏、KEKの生出勝宣氏、金澤健一氏を始め多くの方々から貴重な指摘を多数頂きました。また、KEKの飛山真理氏には高電圧回路についての的確な助言を頂きました。ここに深謝します。

参考文献

- [1] K. Ohmi, Phys. Rev. Lett. 75 (1995) 1526.
- [2] Reports presented in the conferences of ECLLOUD'07 (Daegu, April 9-12, 2007), and ECL2 Workshop (CERN, February 28 - March 2, 2007).
- [3] L. F. Wang, D. Raparia, J. Wei and S. Y. Zhang, Phys. Rev. Special Topics - Acc. Beams 7 (2004) 034401.
- [4] Y. Suetsugu, H. Fukuma, L. Wang, M. T. F. Pivi, A. Morishige, Y. Suzuki and M. Tsukamoto, Nucl. Instrum. Methods A598 (2008) 372.
- [5] L. Wang, T. O. Raubenheimer and G. Stupakov, Nucl. Instrum. Methods A571 (2007) 588.
- [6] Y. Suetsugu, H. Fukuma, L. Wang, M. Pivi, KEK Preprint 2008-55 (2008).
- [7] K. Akai et al., Nucl. Instrum. Methods A 499 (2003) 191.