PASJ2023 WEP55

次世代光源における過渡的電圧補償のための 広帯域空洞低電力モデル HOM 減衰性能の評価 THE HOM ATTENUATION TESTS OF BROADBAND-CAVITY LOW-POWER MODEL TO COMPENSATE THE TRANSIENT BEAM LOADING IN THE NEXT GENERATION LIGHT SOURCES

内藤 大地*,山本 尚人,高橋 毅,山口 孝明,坂中 章悟

Daichi Naito *, Naoto Yamamoto, Takeshi Takahashi, Takaaki Yamaguchi, Shogo Sakanaka High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

To achieve ultra-low-emittance in the 4th generation light sources, the scattering of electrons within the same bunch should be reduced by the bunch lengthening using the combination of fundamental and harmonic cavities. Bunch lengthening performance is significantly limited by the changes in the cavity voltages caused by the transient beam loading effect. To compensate the voltage changes, we designed a wide-band kicker made of a normal conducting cavity. We manufactured a low-power model of the cavity to confirm its compensation performance. In this paper, we reported its performance in damping the harmful higher-order modes.

1. はじめに

第4世代光源では 100 pm-rad 程度の水平エミッタン スがもとめられる。このような極低エミッタンス蓄積リ ングでは、電子のバンチ内散乱 (IBS)によるエミッタン ス増加が深刻な問題となる [1]。IBS を抑えるには基本 波と高調波の空洞を組み合わせたバンチ伸長が有効で ある [2]。しかしながら蓄積ビームのフィルパターンに 長い空バケット列がある場合、過渡的ビーム負荷 (TBL) 変動が起こってバンチ伸長率が低下してしまう [3]。そ こで我々のグループではバンド幅が 5 MHz と広帯域で 50 kV の RF 電圧が出せるキッカー空洞を用いた TBL 補償手法を提案した [4]。また具体的なキッカー空洞の パラメータとデザインの検討を行なってきた [5]。そし て性能実証するために低電力モデルの製作と性能評価 を行なった [6]。本論文では性能評価のうち、高次寄生 モードの減衰性能の評価について報告する。

2. 補償用キッカー空洞のデザイン

キッカー空洞のデザインは KEK Light Source(KEK-LS) [7] で TBL 補償をする際に最適なパラメータをもと に最適化を行なった [5]。TBL 補償には TM010 モード を用い、その共鳴周波数は基本波の 3 倍高調波である 1.5 GHz を採用した。Figure 1 にキッカー空洞の絵を、 Table 1 に代表的なパラメータを示す。キッカー空洞は 空洞本体と 2 つの RF 供給用導波管、SiC でできた RF 吸収体、テーパー型ダクトから構成される。RF は大口 径のカップリングホールを介して 2 つの導波管から同 時に供給される。このデザインにより非常に小さな負 荷 Q 値を達成する事ができた。負荷 Q 値とバンド幅 には

バンド幅 =
$$\frac{共鳴周波数}{負荷Q値}$$
 (1)



Figure 1: 3D view of the kicker cavity [5].

の関係があるので、小さな負荷 Q 値の達成は広いバン ド幅の達成を意味している。

吸収体については CERACSIC-B [8] という素材を用 いることにし、電磁場シミュレーションコードである CST [9] を用いて高次寄生モードの減衰効果について評 価した [6]。縦方向の結合インピーダンスについては吸 収体なしでも、KEK-LS でのバンチ結合不安定性を起 こす閾値より十分低い事がわかった。横方向の結合イ ンピーダンスについては吸収体なしだと、共鳴周波数 が 1.916 GHz、2.066 GHz、2.247 GHz の高次寄生モード が問題となることがわかった。また吸収体を導入する ことで KEK-LS でのバンチ結合不安定性を起こす閾値 よりも結合インピーダンスを十分低くできることがわ かった。Figure 2 に横方向の結合インピーダンスの周波 数依存性とそれぞれのピーク位置を示す。本論文では この 3 つのモードを順に A モード、B モード、C モー ドと呼ぶことにする。

^{*} daichi.naito@kek.jp

PASJ2023 WEP55

|--|

| Parameter | Value |
|----------------------|-----------------------|
| Resonant frequency | 1.50006 GHz |
| R/Q | 60.38Ω |
| Q_0 | 17937 |
| Q_L | 292.41 |
| Synchronous phase | 0° |
| Generator voltage | 53 kV |
| Cavity voltage | 44.2 kV |
| Generator power | 40.4 kW |
| Power loss in cavity | 2.59 kW |
| Reflecting power | 15.7 kW |
| Max power density | 21.7 W/cm^2 |
| Absorber loss | 3.38 % |



Figure 2: Comparison of the transverse coupling impedance.

3. 低電力モデルでの高次寄生モード評価

低電力モデルを用いて、RF 吸収体での高次寄生モードの評価を行なった。低電力モデルの写真を Fig.3 に示す。空洞本体は2分割構造で4つのボルトにより締結される。また空洞中心からビーム軸方向に距離が112.55 mm の位置のビームパイプ側面に高次寄生モードを観測するためのプローブを差し込めるポートがある。RF パワーの供給には WR-650 型の同軸導波管変換を用いた。RF 吸収体が入る部分については2種類のビームパイプを用意した。1つ目は内径 100 mm のビームパイプで、SiC がない時の高次寄生モードを測定する時に使う。2つ目は内径 110 mm のビームパイプで、この中に内径 100 mm で厚さ5 mm の SiC のパイプを入れて高次寄生モードを減衰させる。

3.1 高次寄生モード測定用プローブの設計

高次寄生モード測定用プローブを設計するにあたり、 Aモード、Bモード、Cモードの各電磁場分布を確認す ることにした。Figures 4-6 にそれぞれの磁場分布を示 す。いずれのモードも主にビームパイプ内に励振され たモードであることがわかった。またプローブの挿入 位置では磁場がビーム軸と平行に走っていることがわ かった。この結果からループの平面がビーム軸に対し て直角になるようなループアンテナプローブを作成し



Figure 3: Photo of the low-power model [6].

て3つのモードを測定することにした。



Figure 4: Magnetic filed distribution of the A mode.



Figure 5: Magnetic filed distribution of the B mode.

プローブのループ形状を最適化するために、ループ 形状の違いによる B モードとプローブとのカップリ ングの強さの変化を CST を用いて調べた。Figure 7 に CST で検討したプローブ形状のビーム軸方向からみた 断面を示す。アンテナの直径は 0.7 mm、ループの横幅 は 3.5 mm とした。そしてループの縦方向の長さを変え ていき、B モードとプローブのカップリングの強さの 変化を調べた。Figure 8 にループの縦方向の長さを変 えた時の S11 の変化を示す。縦方向の長さを 8 mm か Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 29 - September 1, 2023, Funabashi

PASJ2023 WEP55



Figure 6: Magnetic filed distribution of the C mode.

ら 22 mm まで変化させたところ、16 mm のところで最 大カップリングとなった。そこでこの形状を再現した ループアンテナプローブの作成を行なった。Figure 9 に 実際に作成したプローブの写真を示す。ループ部の形 状は実測値で横幅 4 mm、縦の長さが 17 mm であり、お およそシミュレーション通りの形状のプローブを作成 することができた。



Figure 7: Shape of the probe assumed in the CST.



Figure 8: Dependence between the loop length and the S11 of the B mode.



Figure 9: Photo of the antenna probe.

3.2 高次寄生モードの測定

プローブアンテナを同軸ケーブルを介してネット ワークアナライザーにつないで S21 を測定した。Figure 10 に測定結果と CST で計算した S21 を示す。黒 線と黒点線が RF 吸収体がない時の実測とシミュレー ションでの S21 を示す。また赤線と赤点線が RF 吸収 体がある時の実測とシミュレーションでの S21 を示す。 黒線と黒点線の比較から、実測でも A、B、Cモードが 測定できていることがわかる。赤線の測定結果から RF 吸収体を入れると全てのモードがプローブとカップル しなくなっているのがわかる。また赤線と赤点線の比 較から実測とシミュレーション結果がおおよそ一致し ていることがわかった。これらの結果から RF 吸収体を 入れる時の負荷 Q 値は測定できなかったが、RF 吸収体 を入れることで全てのモードが想定通り大きく減衰さ れていると結論づけた。



Figure 10: Comparison of the S21 between the measurement and the simulation [6].

4. まとめ

第4世代光源におけるバンチ伸長を改善するため、 我々は広帯域キッカー空洞を用いた TBL 補償手法を提 案した。そしてキッカー空洞の性能を検証するために 低電力モデルを作成して性能評価を行ってきた。本論

PASJ2023 WEP55

文では高次寄生モードの RF 吸収体での減衰を評価し た。横方向結合インピーダンスが最も大きい3つの高 次寄生モードについて、プローブアンテナを作成して RF 吸収体のあり/なし条件での透過係数(S21)を測定 した。RF 吸収体なしでの測定では、測定された S21 は シミュレーション結果と概ね一致した。RF 吸収体あり ではこれら3つの高次寄生モードは十分減衰されてお りプローブでは観測できなかった。一方で測定された S21 は RF 吸収体なしの時と同様にシミュレーション結 果と概ね一致した。これらの結果から設計された補償 空洞において高次寄生モードがシミュレーション通り に十分減衰されていると結論づけた。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP20H04459, 21K17997 の助成 を受けたものです。

参考文献

- S. C. Leemann, "Interplay of Touschek scattering, intrabeam scattering, and rf cavities in ultralow-emittance storage rings", *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 17, 050705, May 2014, doi:10.1103/PhysRevSTAB.17.050705
- [2] A. Hofmann and S. Myers, "Beam dynamics in a double rf system", in *Proc. 11th Int. High-Energy Accel. Conf.(HEACC 1980)*, Geneva, Switzerland, Jul 1980, pp. 610-614.
- [3] J. M. Byrd, S. De Santis, J. Jacob, V. Serriere, "Transient beam loading effects in harmonic rf systems for light sources", *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 5, 092001, Sept 2002. doi:10.1103/PhysRevSTAB.5.092001
- [4] N. Yamamoto, T. Takahashi, S. Sakanaka, "Reduction and compensation of the transient beam loading effect in a double rf system of synchrotron light sources", *Phys. Rev. Accel. Beams* 21, 01200, Jan 2018.

doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.21.012001

- [5] D. Naito *et al.*, "Design consideration of a longitudinal kicker cavity for compensating transient beam loading effect in synchrotron light sources", in *Proc. 12th Int. Particle Accel. Conf.(IPAC'21)*, 2021, pp. 1027-1030. doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-M0PAB331
- [6] D. Naito et al., "Low-power model tests of the wide-band cavity to compensate the transient beam loading in the next generation light sources", in *Proc. 14th Int. Particle Accel. Conf.(IPAC'23)*, 2023, WEPA119. doi:10.18429/JACoW-IPAC2023-WEPA119
- [7] T. Honda, "Concept of a New Generation Synchrotron Radiation Facility KEK Light Source", in *Proc. 8th Int. Particle Accel. Conf. (IPAC'17)*, Copenhagen, Denmark, May 2017, pp. 2687-2690.

doi:10.18429/JACoW-IPAC2017-WEPAB047
[8] https://www.coorstek.co.jp/jpn/products/

- semicon/cerasic.html
- [9] https://www.3ds.com