

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

$$\text{バンド幅} = \frac{\text{共鳴周波数}}{\text{負荷Q値}} \quad (1)$$

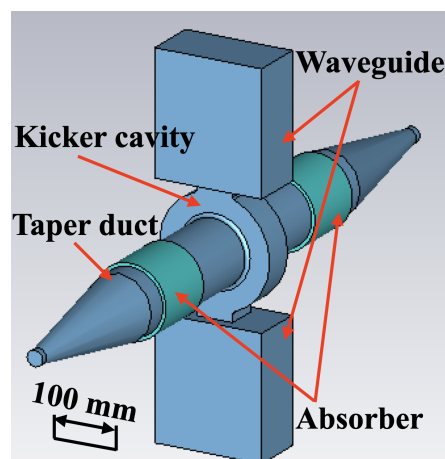


Figure 1: 3D view of the kicker cavity [5].

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

Table 1: The Parameters of the Kicker Cavity

Parameter	Value
Resonant frequency	1.50006 GHz
R/Q	60.38 Ω
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 %

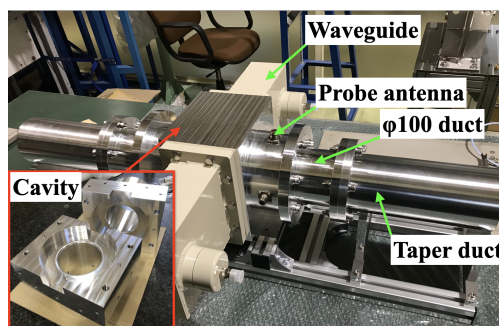


Figure 3: Photo of the low-power model [6].

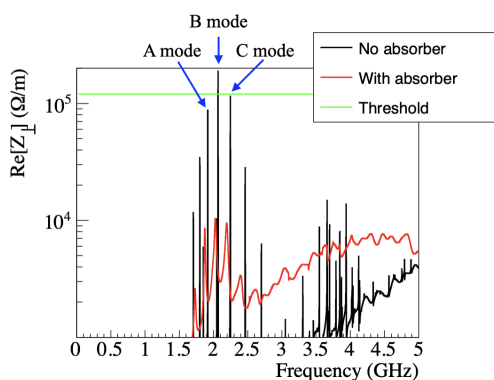


Figure 2: Comparison of the transverse coupling impedance.

て3つのモードを測定することにした。

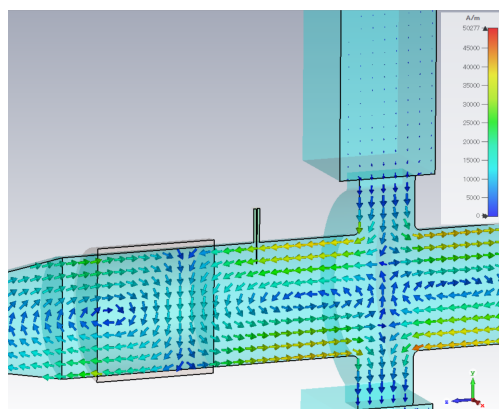


Figure 4: Magnetic field distribution of the A mode.

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図 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 が無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

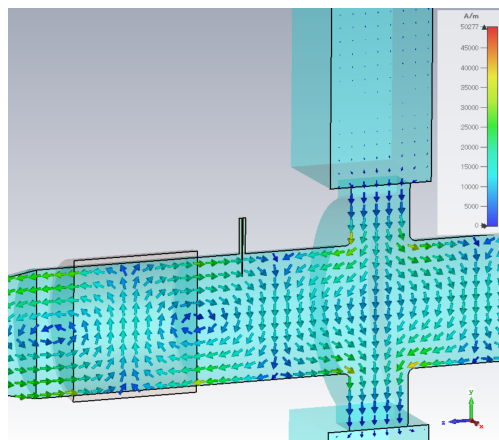


Figure 5: Magnetic field distribution of the B mode.

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

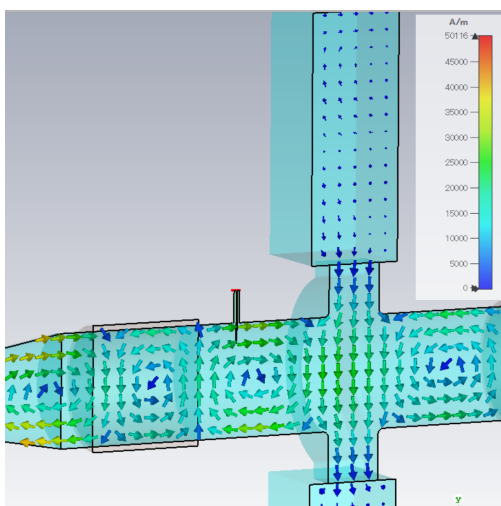


Figure 6: Magnetic field distribution of the C mode.

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。

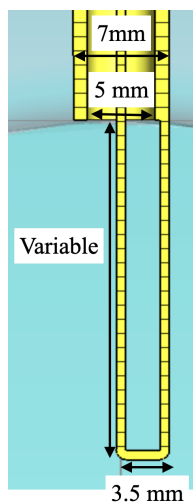


Figure 7: Shape of the probe assumed in the CST.

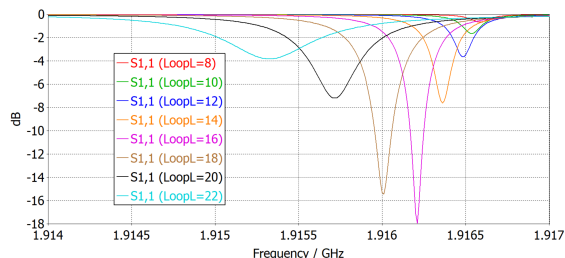


Figure 8: Dependence between the loop length and the S11 of the B mode.

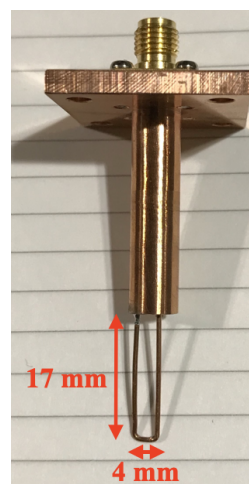


Figure 9: Photo of the antenna probe.

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 吸収体を入れた時の負荷 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。

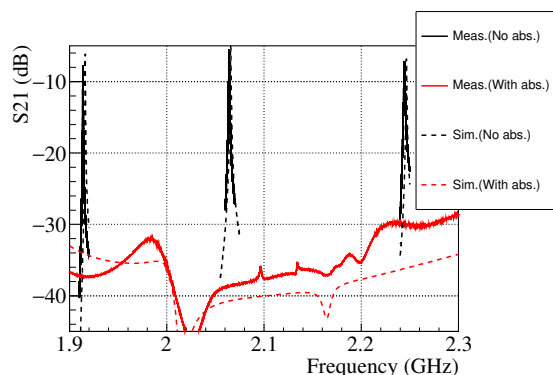


Figure 10: Comparison of the S21 between the measurement and the simulation [6].

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

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

- [1] S. C. Leemann, “Interplay of Touschek scattering, intra-beam 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-MOPAB331
- [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/ceramic.html>
- [9] <https://www.3ds.com>