

1.6 セル光陰極高周波電子銃における 0 モードのビーム特性への影響 THE INFLUENCE OF ZERO-MODE ON BEAM PROPERTIES AT 1.6 CELL PHOTOCATHODE RF GUN

犬飼元晴*, 増田開, 全炳俊, 村田智哉, 野儀武志, 梶村勇輔, S.Suphakul, 吉田恭平, K.Torgasin,
H.Negm, 紀井俊輝, 長崎百伸, 大垣英明

Motoharu Inukai*, Kai Masuda, Heishun Zen, Tomoya Murata, Takeshi Nogi, Yuusuke Tsugamura,
Sikharin Suphakul, Kyohei Yoshida, Konstantin Torgasin, Hani Negm, Toshiteru Kii,
Kazunobu Nagasaki, Hideaki Ohgaki
Institute of Advanced Energy, Kyoto University

Abstract

Recently, due to multi-bunch laser injection, it is worried that 0 mode, which is not considerable with single-bunch injection, could be excited by beam loading and would degrade the beam properties. Then, we evaluated the influence in a BNL/SLAC/UCLA 1.6 cell photocathode RF gun, which is made use of widely, by using particle tracking simulations. We assumed the charge in a bunch was 1 nC, and the frequency of the laser injection was the same as that of RF electric field (2856 MHz). As a result, the electric field of the 0 mode became larger and its phase changed by nearly 180° compared with the case without beam loading. Hence, the influence of the 0 mode on the beam properties, i.e. energy spread, transverse emittance, and bunch length, showed the opposite behavior to the single-bunch injection scheme. The change in energy spread by 0 mode at 10° laser injection phase was about -20% without beam loading and +40% with beam loading.

1. はじめに

近年、励起用レーザー光源の高繰り返し化により、自由電子レーザーの電子源として光陰極高周波電子銃が採用されることが増えている。その理由としては、光陰極高周波電子銃は熱陰極高周波電子銃に比べ、エミッタンス、エネルギー、パルス幅、ピーク電流といったビーム特性において優れていることが挙げられる。

広く用いられている光陰極高周波電子銃として BNL/SLAC/UCLA 型^[1,2,3]のものがあ、これは1つのハーフセルと1つのフルセルの1.6セルによって構成される共振空洞を持つ。京都大学自由電子レーザー(KU-FEL)においてもこの型の光陰極高周波電子銃を導入予定である。この1.6セルの共振空洞に高周波電力を入力すると、空洞内に一定の固有モードで振動する定在波が発生する。第1空洞と第2空洞の位相が π rad ずれていると、電子が第1空洞に加速位相で入射した場合に、第2空洞到達時も加速位相が印加されるので電子は効率よく加速される。一般的にこの固有モードを π モードと呼ぶ。逆に第1空洞と第2空洞の位相が同じ場合は第1空洞に加速位相で入射しても、第2空洞では減速されてしまう。この固有モードを0モードと呼ぶ。 π モードと0モードの共振周波数は近く、 π モードを励起させるように設計・運転すると、0モードもある程度励起されてしまう。0モードが励起されると、ビーム特性に悪影響を及ぼす可能性がある。

励起用レーザーを低繰り返しにしてシングルバンチ駆動する場合は、電子ビームと空洞内の高周波電界との相互作用、すなわちビームローディング効果の影響を考える必要はなかったが、励起用レーザーを高繰り返しにしてマルチバンチ運転する場合においては、ビームローディング効果が0モードを励起し、それによって電子ビームに影響が及ぼされることが懸念されている。

しかし、これまでにその定量的評価は行われていない。そこで、本研究においては、高繰り返し励起用レーザーを用いたマルチバンチ駆動の光陰極高周波電子銃において、0モードがどの程度励起されるのか、また、それに伴ってビーム特性にはどういった影響があるのかを定量的に評価することを目的とした。

2. 研究方法

0モードおよびビームローディング効果を考慮した光陰極高周波電子銃のビーム特性を調べるために、本研究では固有モード解析および粒子軌道解析を行った。

2.1 固有モード解析

固有モード解析には本研究室で開発された計算コード KUEMS^[4]を用いる。ここでは、軸対称2次元モデルで与えられた空洞断面形状を空間メッシュで分割して有限要素法を適用し、固有値問題を解く。

2.2 粒子軌道解析

粒子軌道解析には本研究室で開発された計算コード KUBLAI^[4]を用いる。ここでは、電子についての相対論的運動方程式を解くが、電磁界については、

1. 供給された高周波電力および電子ビームによって励振された共振モード電磁界
2. 電子ビームによって作られた非共振モード電磁界

がある。1については固有モード解析によって波形を決定、後述の等価回路により波高値と位相を計算する。

2については空洞形状を境界条件としてマクスウェル方程式を直接解いて計算する。ここでも固有モード解析と同じく、軸対称2次元空間メッシュに対して有限要素法を適用し、電子については複数の電子を1つのマクロ粒子に代表させて計算する。

* inukai.mot@iae.kyoto-u.ac.jp

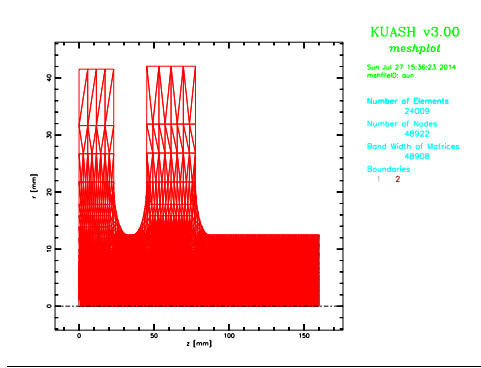


Figure 1: Mesh data for calculation.

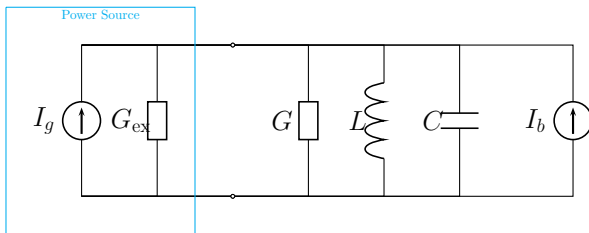


Figure 2: Equivalent circuit of single mode.

Figure1 に解析に用いたメッシュデータを示した。

2.3 等価回路モデル

粒子軌道解析を行うにあたって高周波電源に接続された共振空洞を等価回路モデルで表す。外部回路との結合と電子ビームのある空洞においてマクスウェル方程式を電磁場の固有関数で展開すると Figure2 のような GLC 共振回路にビームローディング電流源が並列に接続された等価回路で表されることが導かれる。^[4, 5, 6]

本研究では π モードと 0 モードの 2 つのモードについて考慮して計算を行う。ある単一モードの入力インピーダンスについて線形結合された高次モードを無視することにより前述のような等価回路が導かれる^[5] ことから、高次モードを無視しない場合は各モードの等価回路は直列に接続されているものとして考えることができる。高周波電源との結合の度合いはモード毎に異なるので、それぞれのモードはトランスを介して高周波電源と接続されているとみなす。これにより、 π モードと 0 モードの 2 つのモードを考慮した等価回路は Figure3 のようになる。

ここでは、 π モードとの結合比を 1:1、0 モードの結合比を 1:n とし、 π モードおよび 0 モードのカップリング係数 β_p 、 β_z と G_{ex} との関係を

$$G_{ex} = \beta_p G_p = \frac{1}{n^2} \beta_z G_z \quad (1)$$

と定義し、 n を決定した。

また、回路方程式を解くことで

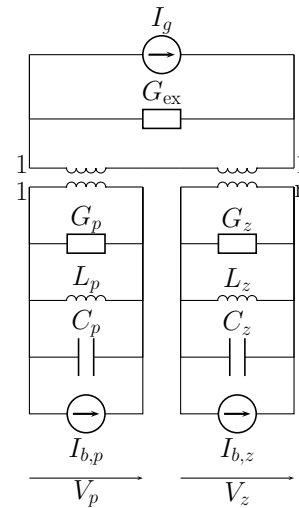


Figure 3: Equivalent circuit of dual mode.

$$V_z = \frac{\left\{ G_p + j \left(\omega C_p - \frac{1}{\omega L_p} \right) \right\} V_p + I_{b,p} - n I_{b,z}}{G_z + j \left(\omega C_z - \frac{1}{\omega L_z} \right)} \frac{1}{n} \quad (2)$$

が導かれる。本研究では π モード等価電圧 V_p を一定値に固定して粒子軌道解析を行い、計算された各モードのビームローディング電流から 0 モード等価電圧 V_z を式 (2) より求め、これが収束するまで繰り返し計算を行った。

等価回路の各回路定数は実際の測定から求めた共振周波数、Q 値、カップリング係数および、固有モード解析により求めたシャントインピーダンスを用いて決定した。

解析に用いるモデルは KU-FEL に導入予定の BNL/SLAC/UCLA 型光陰極高周波電子銃とし、実際の測定より、

- π モード共振周波数：2855.53 MHz
- 0 モード共振周波数：2852.13 MHz

であり、モード間隔は 3.4MHz であることが分かった。また、両モードのフィールドバランスについては Figure4 のように測定された。固有モード解析による電界形状がこの測定波形と同様になるようにメッシュデータを作成した。

また、粒子軌道解析に用いた各パラメータを Table1 に示す。

なお、位相の基準を陰極における π モードの軸方向電界とし、その複素電圧が正の純虚数となる点を 0° と定義する。

3. 結果および考察

Figure5 に KUBLAI による粒子軌道解析のスナップショットを示す。

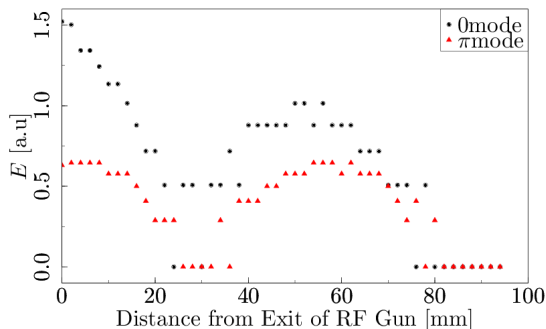


Figure 4: Measured electric field on axis.

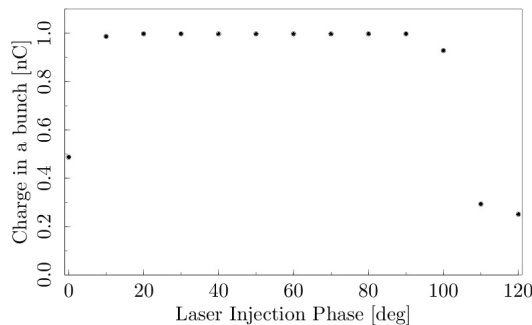


Figure 6: Charge in a bunch.

Table 1: The Condition of Particle Tracking

π モード等価電圧 V_p	6.0 MV
1 バンチあたりの最大電荷量	1.0 nC
運転周波数 f	2856 MHz
レーザー照射スポット直径 (フラット)	2.0 mm
レーザー照射繰り返し周波数	2856 MHz
レーザーのパルス幅 (ガウシアン、FWHM)	10 ps

はじめに、0モードを無視した場合の空洞出口におけるレーザーの入射位相に対する1バンチあたりの電荷量および電子ビームの平均運動エネルギーの計算結果をそれぞれ Figure6、Figure7 に示した。

3.1 ビームローディング効果がない場合

まず、ビームローディング効果がないと仮定した場合について、0モードの立ち上がりとそれによるビーム特性への影響を計算した。このとき、 V_z は式 (2) より、

- 波高値：0.110 MV
- 位相：-178.5°

と計算された。

そして、Figure8 に空洞出口におけるエネルギー幅 (RMS)、横方向規格化エミッタンス、バンチ長 (RMS)

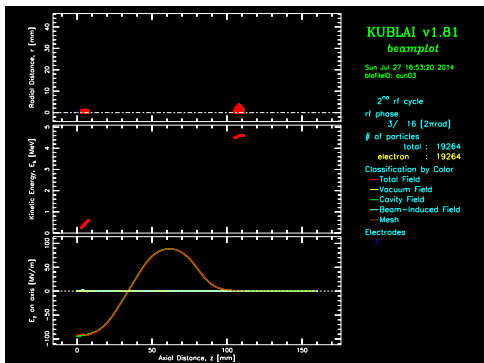


Figure 5: Snapshot of particle tracking.

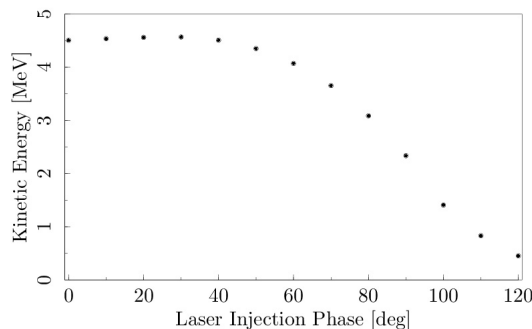


Figure 7: The averaged kinetic energy of the electron beam.

の計算結果を0モードがある場合と0モードがない場合について示した。

いずれのビーム特性についても0モードがある場合もない場合もほぼ同様の変化の傾向を示した。

これらのビーム特性の相対的な差をまとめたものが Figure9 である。縦軸は、

$$\frac{(0 \text{モードありの値}) - (0 \text{モードなしの値})}{(0 \text{モードなしの値})} \times 100 [\%]$$

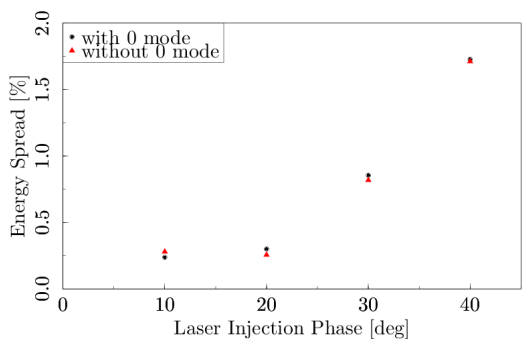
である。

レーザー入射位相が小さい場合において0モードによるビーム特性の変化、とくにエネルギー幅が大きくなっていることが分かった。これは、レーザー入射位相が小さい場合、陰極付近において π モードの電界に対する0モードの電界が相対的に大きいからであると考えられる。

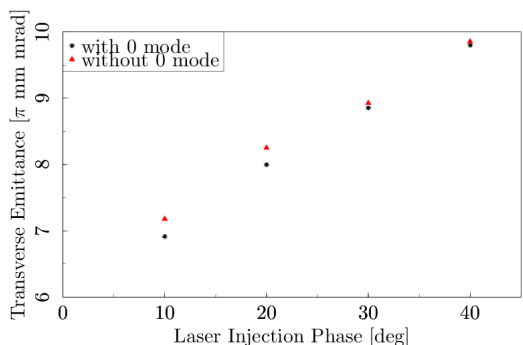
3.2 ビームローディング効果がある場合

次に、本題であるビームローディング効果がある場合について、レーザー入射位相に対する収束時における V_z の波高値および位相を Figure10 に示した。

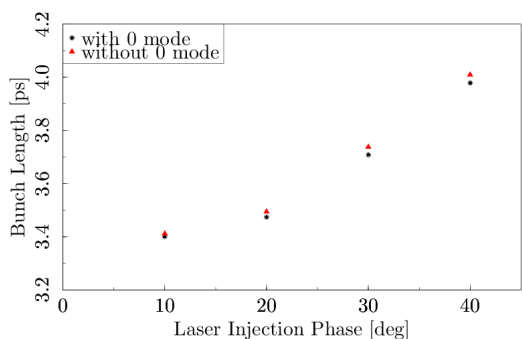
ビームローディング効果がない場合と比較して、波高値は1.5倍以上になり、位相は180°近く変化している。そして、空洞出口における各ビーム特性の計算結果



(a) Energy spread.



(b) Transverse normalized emittance.



(c) Bunch length.

Figure 8: Beam properties without beam loading.

を0モードがある場合とない場合について Figure11 に示した。

ビームローディング効果を見逃した場合と同じく、いずれのビーム特性についても0モードがある場合もない場合もほぼ同様の傾向を示した。

これらのビーム特性の相対的な差をまとめたものが Figure12 である。

ビームローディング効果を見逃した場合に比べ、各ビーム特性の変化は逆方向になり、その変化の大きさは概ね増加した。前者については、 V_z の位相がビームローディングによって 180° 近く変化したことに起因していると考えられる。そして、後者についてはビーム

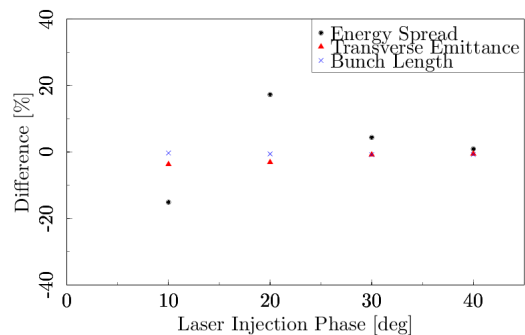


Figure 9: The shifts of beam properties without beam loading.

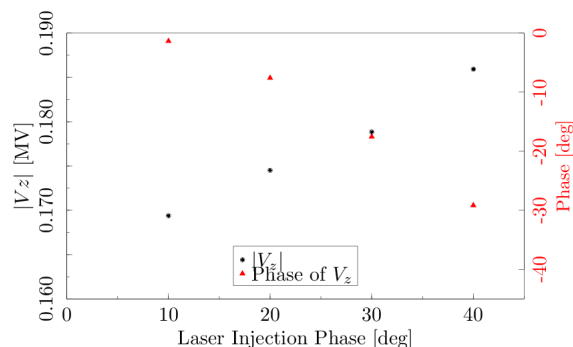
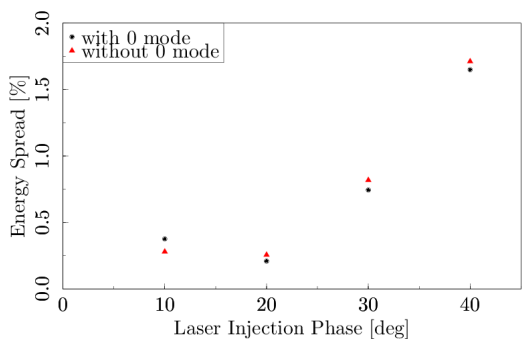


Figure 10: The convergence value of V_z with beam loading.

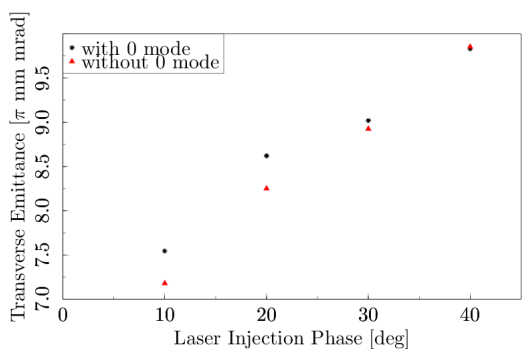
ローディング効果によって V_z の大きさが増加したことが原因として考えられるが、レーザー入射位相が遅れてくると V_z の位相が V_p の位相からずれていき、陰極近傍における0モードの電界の強度が相対的に小さくなるため、各ビーム特性の変化は抑えられていっていると考えられる。

4. まとめ

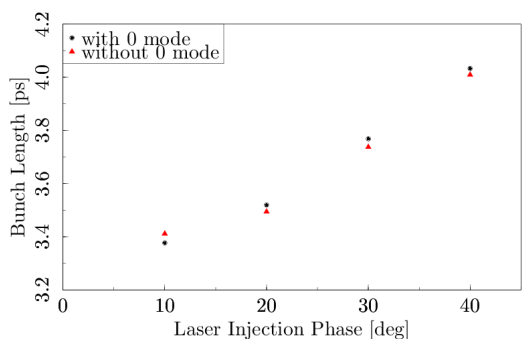
光陰極高周波電子銃において、高い繰り返し周波数でレーザーを陰極に照射しマルチバンチ駆動を行うと、ビームローディング効果によって0モードによる電界の大きさは増加し、その位相は 180° 近く変化する。それにともない、0モードがエネルギー幅、横方向エミッタンス、バンチ長といったビーム特性に与える変化量は増大し、また、シングルバンチ駆動の場合とは逆方向の変化を示す。変化量がとくに大きかったエネルギー幅について言えば、レーザー入射位相 10° における0モードによる変化は、ビームローディング効果がない場合におよそ-20%、ビームローディング効果がある場合におよそ+40%となった。また、レーザー入射位相に対する各ビーム特性の変化の傾向については、0モードの有無によって変化はほとんど見られず、運転に最適なレーザー入射位相はシングルバンチ駆動であってもマルチバンチ駆動であってもほぼ同じであると言える。



(a) Energy spread.



(b) Transverse normalized emittance.



(c) Bunch length.

Figure 11: Beam properties with beam loading.

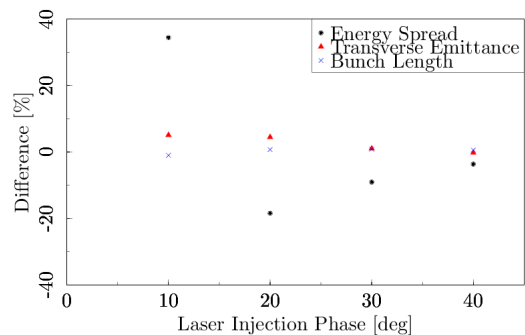


Figure 12: The shifts of beam properties with beam loading.

参考文献

- [1] D.T.Palmer, X.J. Wang, I. Ben-Zvi, R.H. Miller, SLAC-PUB-7420, 1997
- [2] D.T.Palmer, X.J. Wang, I. Ben-Zvi, R.H. Miller, J. Skaritka, SLAC-PUB-7421, 1997
- [3] D.T.Palmer, X.J. Wang, R.H. Miller, M. Babzien, I. Ben-Zvi, C. Pellegrini, J. Sheehan, J. Skaritka, H. Winick, M. Woodle, V. Yakimenko, SLAC-PUB-7422, 1997
- [4] K Masuda : Ph. D Thesis, Dept. of Engineering, Kyoto Univ. (1998)
- [5] 藤澤 和男. マイクロ波回路. コロナ社, 1972
- [6] 高田 耕治. 高周波加速の基礎-改訂版-, 2003
- [7] 犬飼 元晴 : 京都大学 工学部 電気電子工学科 学士論文
- [8] 稲増 崇 : 京都大学 工学部 電気工学専攻 修士論文
- [9] 池田 竜太 : 京都大学 エネルギー科学研究科 エネルギー変換科学専攻 修士論文