

# ASTRA を用いた 4.5 空胴 LaB<sub>6</sub> 光陰極高周波電子銃の数値計算

## NUMERICAL SIMULATION OF 4.5-CELL LAB<sub>6</sub>-PHOTOCATHODE RF GUN BY ASTRA CODE

全 炳俊<sup>#</sup>, 紀井 俊輝, 大垣 英明  
Heishun Zen <sup>#</sup>, Toshiteru Kii, Hideaki Ohgaki  
Institute of Advanced Energy, Kyoto University

### Abstract

The photocathode operation of LaB<sub>6</sub> cathode in a 4.5-cell RF gun has been demonstrated at a mid-infrared free electron laser facility, KU-FEL, at Institute of Advanced Energy, Kyoto University. For this cathode, the Schottky effect is significantly high. In order to reproduce the experimentally observed relationship between the electron bunch charge and the laser injection phase, the Schottky effect must be taken into account. In this study, the ASTRA code, which can take into account the Schottky effect, was used for numerical simulation. As the result, we succeeded in reproducing the experimentally observed relationship between the electron bunch charge and the laser injection phase with proper adjustment of the Schottky effect parameter in the ASTRA code.

### 1. はじめに

京都大学エネルギー理工学研究所ではエネルギー関連研究への利用に向けて中赤外自由電子レーザー KU-FEL(Kyoto University Free Electron Laser)を開発してきた[1]。これまでに、2008 年にレーザー発振とパワー飽和を達成し[2]、2009 年以降、ユーザー利用に供している。KU-FEL は高周波電子銃中に熱陰極を設置した熱陰極高周波電子銃を電子源として使用してきたが、性能向上を目的とし、2010 年より光陰極励起用レーザーの開発を開始し 2014 年にその開発を完了した[3]。同年にこれまで熱陰極として使用してきた LaB<sub>6</sub> 陰極に紫外マルチパルスピコ秒レーザーを照射する事で、光電効果により光電子放出を起こし、電子を供給する光陰極運転を実現し、その条件下での自由電子レーザー発振を確認した[4]。この光陰極運転モード下での運転条件の最適化、電子ビーム特性の予測の為に粒子軌道計算を用いた数値計算が不可欠であるが、これまで我々の研究グループで用いてきた計算コード PARMELA では、光陰極の量子効率や陰極表面電界強度の増減により変化する効果(Schottky 効果)の影響を取り入れた計算を行う事が困難であった。

ASTRA(A Space Charge Tracking Algorithm)[5]は DESY, Hamburg で開発された粒子軌道計算コードであり、上記の Schottky 効果を取り入れた計算を行う事が可能である。計算手法は Particle in Cell 法であり、陰極表面の電界強度に応じてマクロ粒子の電荷量を増減させる事で Schottky 効果を取り入れた計算を可能としている。これまでに、PITZ の光陰極高周波電子銃[6]などで電子銃の特性解析に利用されている。

本研究では、4.5 空胴 LaB<sub>6</sub> 光陰極高周波電子銃から発生させた電子ビームの特性解析の為に、ASTRA コードを用い、実験的に観測された発生電荷量とレーザー入射位相の関係を再現する条件を見出した。また、得られた結果を元に、実験結果についての理解を深めると共に、

Schottky 効果による光陰極量子効率増大効果の評価を行った。

### 2. 実験条件と結果

まず、数値計算結果と比較する対象である実験結果を測定した際の実験条件と結果について述べる。

#### 2.1 実験条件

実験に使用した電子銃は KU-FEL の電子源としてこれまで使用してきた 4.5 空胴高周波電子銃である。陰極は単結晶の LaB<sub>6</sub> で、結晶方位は<100>面であり、ヒーターによる加熱により表面温度は約 1400K に保たれている。電子銃の第 1 空胴には電子ビーム軸から約 70 度の角度に光陰極励起レーザー入射用のポートが設けられており、このポートから波長 266 nm、パルス長約 5.6 ps-FWHM の紫外レーザーを照射し、光電子を発生させた。レーザーのマクロパルス長は 1 μs、マクロパルス当たりの光パルスエネルギーは 0.5 mJ、マイクロパルス繰り返し周波数は 29.75 MHz、マイクロパルス当たりのレーザーパルスエネルギーは約 17 μJ である。電子銃出口での電子ビームの最大エネルギーは約 8.3 MeV であり、この値から推測される最大の陰極表面電界は約 27 MV/m である。Figure 1 に測定に用いた装置の配置図を示す。パンチ当たりの電荷量はファラデーカップ FC1 により測定した。

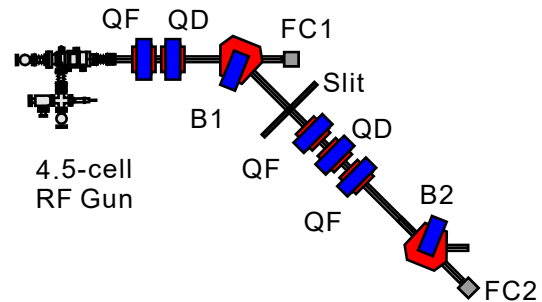


Figure 1: Schematic drawing of experimental setup. FC: Faraday Cup, QF: Focusing Quadrupole, QD: Defocusing Quadrupole, B: Bending Magnet.

<sup>#</sup>zen@iae.kyoto-u.ac.jp

## 2.2 実験結果

Figure 2 に測定されたバンチ電荷とレーザー入射位相の関係性を示す。この測定は Phase Scan と呼ばれている。レーザー入射位相の絶対値を実験的に決定する事が困難である為、横軸は相対位相となっている。相対レーザー入射位相が 0 度から 70 度の間はレーザー入射位相が大きくなる、即ちレーザー入射タイミングが遅くなるほど、バンチ当たり電荷量が大きくなり、70 度よりも大きくなると、レーザー入射タイミングが遅くなるほどバンチ電荷が小さくなる傾向が観測された。

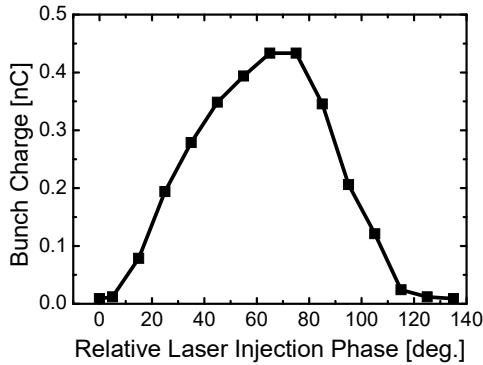


Figure 2: Experimentally observed relationship between the bunch charge and the laser injection phase.

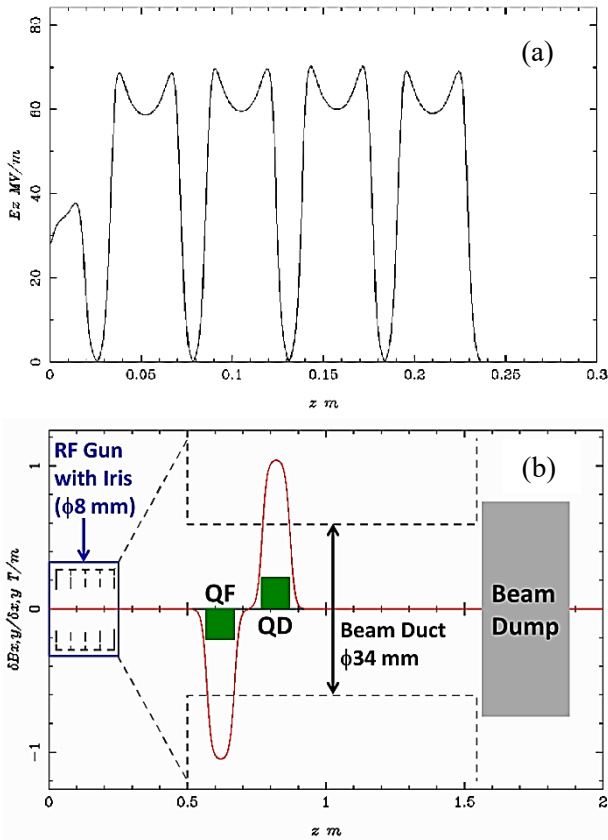


Figure 3: (a) Electric field distribution in the RF gun. (b) Geometry of the RF gun, quadrupole magnets, and beam dump.

## 3. 数値計算条件と結果

### 3.1 計算条件

計算に用いた空胴電界分布およびジオメトリを Figure 3 に示す。空胴の電界分布は出力電子ビームの最大エネルギーが約 8.3 MeV となる様に調整した。また、実験と同じジオメトリを再現する為、直径 8 mm の空胴間アイリス、直径 34 mm の真空ダクト、2 台の四極電磁石を配置して計算を行った。計算に用いたマクロ粒子の数は 100000 個であり、陰極上での初期電子分布の横方向分布は直径 2 mm の一様分布とし、時間方向分布は実測値[7]を参考に 5.6 ps-FWHM のガウス分布とした。

### 3.2 Schottky 効果の取り入れ

ASTRA コードでは初期マクロ粒子分布が generator というプログラム中で生成され、そのマクロ粒子分布を取り込んで Astra というプログラム中で粒子軌道計算が行われる。このプログラムでは、陰極表面電界に応じて下記の式 1 に従い、マクロ粒子当たりの電荷量をスケールする事で Schottky 効果の取り入れを可能としている。

$$Q = Q_0 + C_1 \sqrt{E} + C_2 \cdot E \quad (1)$$

ここで、 $Q_0$  は入力電子分布とユーザー定義パラメータ  $Q_{\text{bunch}}$  により決まる電荷量であり、 $Q_0 = Q_{\text{bunch}}/N$  で与えられる ( $N$  はマクロ粒子数)。  $E$  は陰極に垂直方向の電界強度(空間電荷電界も含む)、 $C_1$  と  $C_2$  は電界依存の電子放出量変化を与えるパラメータである。即ち、 $C_1$  と  $C_2$  を変化させる事により、Schottky 効果の強さを調整する事が可能である。また、電界に依存しない電子放出量については  $Q_{\text{bunch}}$  を変化させる事で調整する事が可能である。

### 3.3 計算結果

Figure 4 に  $Q_{\text{bunch}} = 50$  pC、 $C_1 N = 97$  pC/(m/MV)<sup>1/2</sup>、 $C_2 N = 0$  pC/(m/MV) と設定して ASTRA により計算した Phase Scan 結果を示す。この条件において実験結果と良い一致を得た。しかし、レーザー入射位相が 80 度以上の領域では実験結果と計算結果が異なっている。この原因については後述する。尚、実験結果のレーザー入射位相(横軸)は数値計算結果と一致するように平行移動させた。実験では相対値しか分からないが、計算結果と比較する事で、絶対レーザー入射位相と対応付けが可能となる。

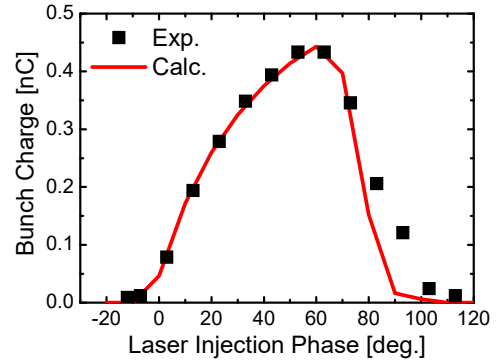


Figure 4: Results of numerical simulation and compared with experimental results.

Figure 5 には陰極で発生した光電子がファラデーカップまで輸送される効率と電子ビームのピークエネルギーのレーザ入射位相依存性を示した。レーザ入射位相-10度から+10度までの領域では、レーザ光の一部が入射した際に陰極上の電界が減速電界であり、陰極から電子が加速されない為、電子の輸送効率がレーザ入射位相に依存して変化する。レーザ入射位相 0 度の条件で丁度半分の電子が加速されず、もう半分の電子が加速される条件となる。また、レーザ入射位相が 60 度よりも大きな条件では、電子ビームのエネルギーが顕著に低下する為、ビームラインのトランスミッションが下がり、電荷量が低下していく事が見てとれる。Figure 4 の 80 度以上のレーザ入射条件で実験結果と計算とで食い違いが生じた原因は輸送系の低エネルギー輸送効率を数値計算上で正しく評価できていない為だと考えられるが、更に詳しい調査が必要である。

次に、Schottky 効果を見逃し、 $Q_{\text{bunch}} = 50 \text{ pC}$  および  $450 \text{ pC}$  と設定して計算した結果を Figure 6 に Schottky 効果を考慮した計算結果と共に示す。Schottky 効果を考慮に入れない場合はレーザ入射位相 20 度から 60 度の間でほぼ一定の電荷量となり、その電荷量はほぼ  $Q_{\text{bunch}}$  と同一の値であった。Figure 7 に陰極表面でのバンチ電荷とファラデーカップに到達するバンチ電荷の計算結果を示した。陰極表面でのバンチ電荷は 0 から  $500 \text{ pC}$  まで変化しており、見かけの量子効率がレーザ入射位相に大きく依存する事が分かる。数値計算により得られた電界に依存しない電荷量  $Q_{\text{bunch}} = 50 \text{ pC}$  に対し、Schottky 効果を含めた場合の全電荷量はレーザ入射位相 90 度の条件において  $480 \text{ pC}$  に及んでおり、本実験での Schottky 効果による量子効果増大効果は約 10 倍程度であると見積もられる。今回は特定のレーザ強度・電子銃加速電界条件での測定結果に着目して比較検討を行ったが、今後、これらのパラメータを変化させた実験を行い、更に詳細な評価を行う予定である。

#### 4. 結論

京都大学エネルギー理工学研究所にて開発してきた 4.5 空胴 LaB<sub>6</sub> 光陰極高周波電子銃にて実験的に観測された Phase Scan 結果を再現する為に、粒子軌道計算コード ASTRA を用いて数値計算を行った。その結果として、計算条件  $Q_{\text{bunch}} = 50 \text{ pC}$ 、 $C_1N = 97 \text{ pC}/(\text{m}/\text{MV})^{1/2}$ 、 $C_2N = 0 \text{ pC}/(\text{m}/\text{MV})$  において実験結果を再現する事に成功した。そして、数値計算結果と実験結果との比較により実験での絶対レーザ入射位相を決定する事ができる事を示した。また、計算結果から Phase Scan 結果の低位相側と高位相側の変化の原因を定性的に理解する事ができた。加えて、陰極の量子効率が Schottky 効果により最大 10 倍も増大している事が示唆された。これは今後、LaB<sub>6</sub> 光陰極を高電場印加可能な高周波電子銃中で使用する際の大きなメリットとなると考えられる。今後、レーザ強度・電子銃加速電界を変化させた測定結果と比較検討を行う事で、より詳細な評価を行う予定である。

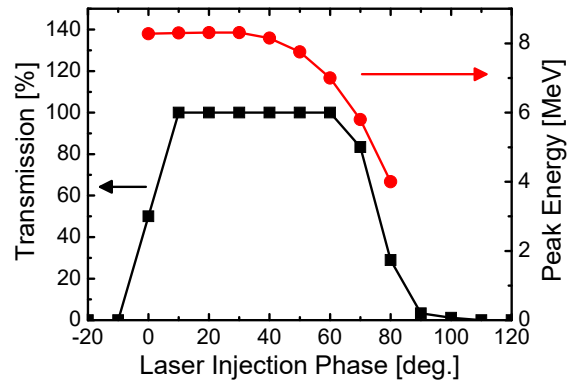


Figure 5: The transmission efficiency from the cathode to Faraday cup and the peak energy of electron beam as the function of laser injection phase.

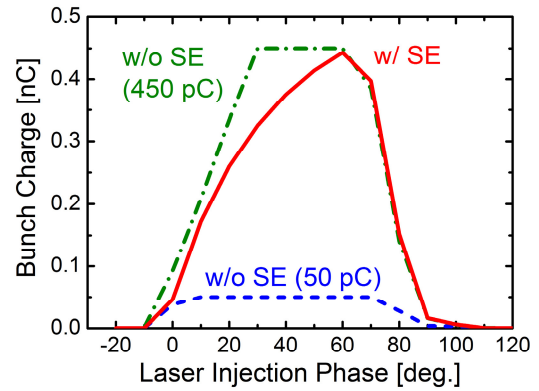


Figure 6: Comparison of numerical simulation results. Solid line: simulation results with Schottky effect (SE) on the cathode. Dashed line: simulation results without SE on the cathode in the case of  $Q_{\text{bunch}} = 50 \text{ pC}$ . Dotted line: simulation results without SE on the cathode in the case of  $Q_{\text{bunch}} = 450 \text{ pC}$ .

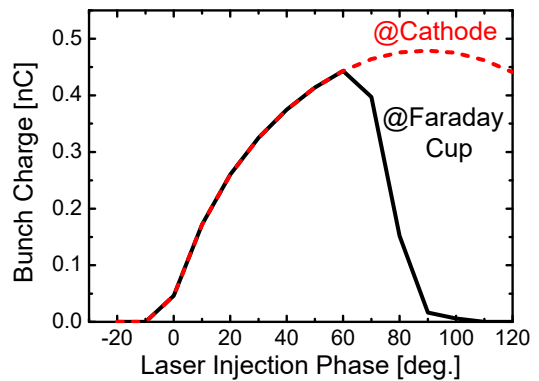


Figure 7: Calculated bunch charge at the cathode surface (dashed line) and at the Faraday cup (solid line).

## 参考文献

- [1] H. Zen *et al.*, *Infrared Physics & Technology* 51, 382-385 (2008);  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449507001077>
- [2] H. Ohgaki *et al.*, *Japanese Journal of Applied Physics* 47, 10R (2008);  
<http://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.47.8091>
- [3] H. Zen *et al.*, *Proceedings of FEL2014*, 828-831 (2015);  
<http://epaper.kek.jp/FEL2014/papers/thp045.pdf>
- [4] H. Zen *et al.*, *Proceedings of IPAC2016*, 754-756 (2016);  
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2016/papers/mopow018.pdf>
- [5] <https://www.desy.de/~mpyflo/>
- [6] J. Li *et al.*, *Proceedings of ICAP2012*, 242-244 (2012);  
<https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/ICAP2012/papers/thp13.pdf>
- [7] H. Zen *et al.*, TUP055, in these proceedings.