

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。

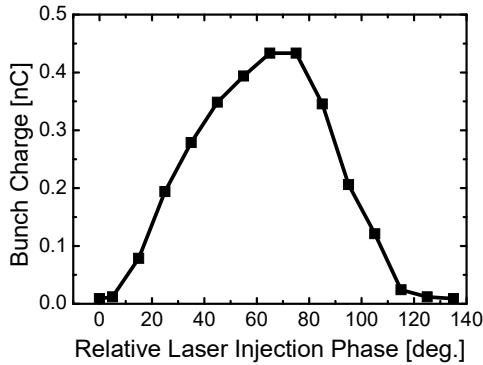


Figure 2: Experimentally observed relationship between the bunch charge and the laser injection phase.

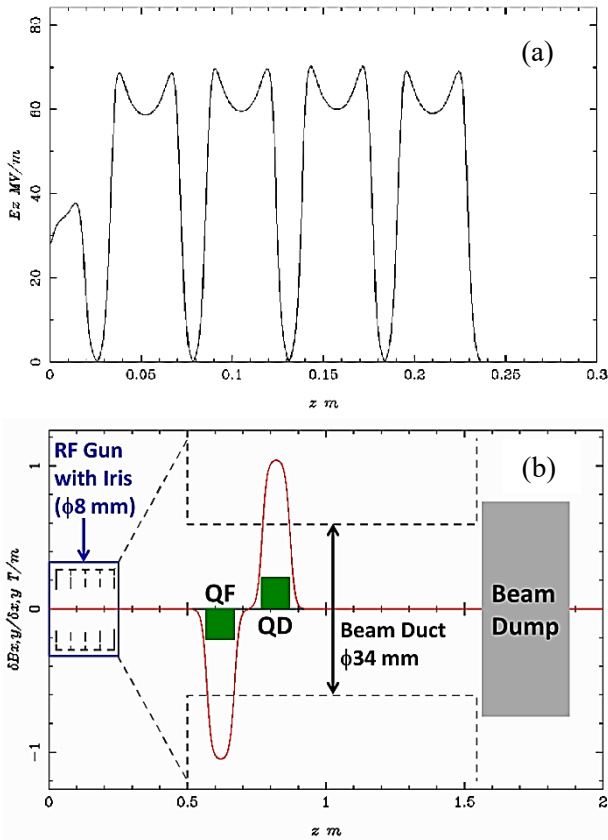


Figure 3: (a) Electric field distribution in the RF gun. (b) Geometry of the RF gun, quadrupole magnets, and beam dump.

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_{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_{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)^{1/2}、 $C_2 N = 0$ 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。

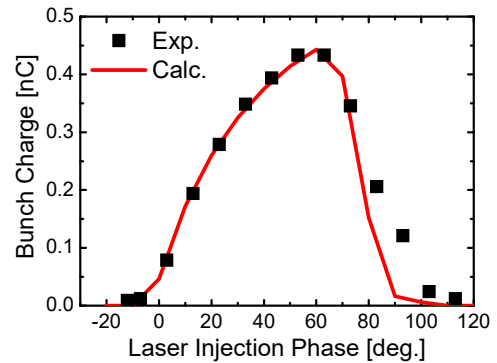


Figure 4: Results of numerical simulation and compared with experimental results.

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 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_{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 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 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 LaB₆ 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、LaB₆ 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。

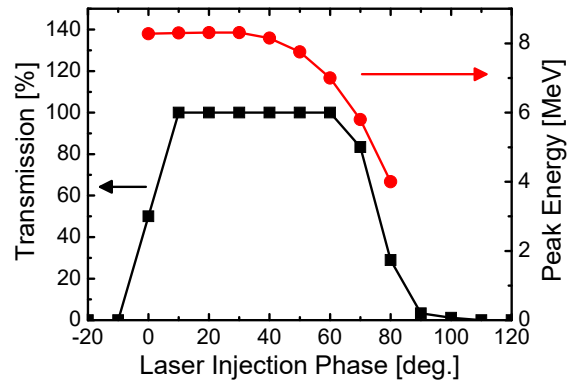


Figure 5: The transmission efficiency from the cathode to Faraday cup and the peak energy of electron beam as the function of laser injection phase.

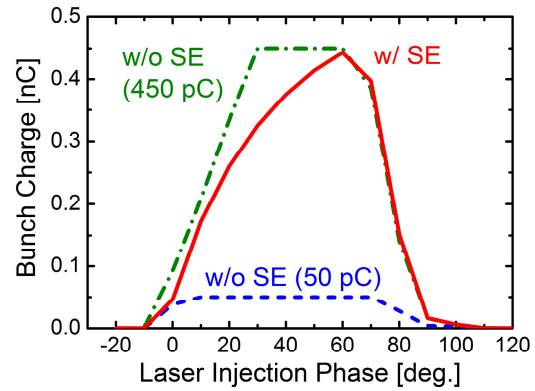


Figure 6: Comparison of numerical simulation results. Solid line: simulation results with Schottky effect (SE) on the cathode. Dashed line: simulation results without SE on the cathode in the case of $Q_{\text{bunch}} = 50 \text{ pC}$. Dotted line: simulation results without SE on the cathode in the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

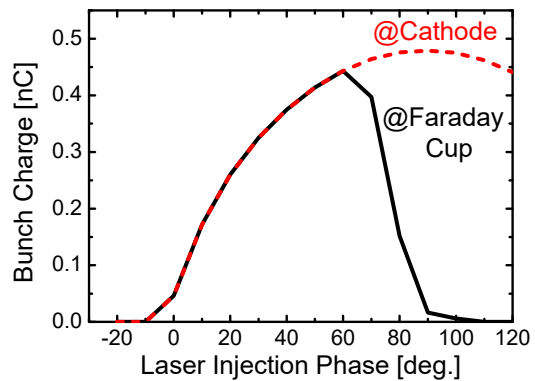


Figure 7: Calculated bunch charge at the cathode surface (dashed line) and at the Faraday cup (solid line).

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.