

IMPACT EVALUATION OF ION BACK-BOMBARDMENT OF NEA-GaAs PHOTOCATHODE

K. Miyoshi^{#1)}, M. Kuriki¹⁾, L. Guo¹⁾, H. Iijima²⁾

¹⁾Graduate School of Advanced Science of Matter, Hiroshima University
1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8530

²⁾ Department of Physics, Faculty of Science Division II, Tokyo University of Science
1-3 Kagurazaka Sinjuku, 162-8601

Abstract

We study GaAs photocathode with NEA (Negative Electron Affinity) surface as electron source of accelerator. Advantage of NEA GaAs photocathode is generating ultra-low emittance and polarized electron beam with circularly polarized laser. However, the cathode is so sensitive and quantum efficiency degradation limits the operational lifetime. Among several processes, Ion Back-bombardment (IBB) is the most serious phenomenon to limit the lifetime. In IBB, ions generated by ionization of residual gas molecule with electron beam collide to cathode and degrade NEA surface. We improve photocathode test bench in Hiroshima University to prevent vacuum pressure evolution during the experiment and control ion orbits to switch the IBB effect. In this study, we simulate ion orbits and evaluate distribution of ion collision on cathode to switch the IBB in on cathode. With this modification, IBB effect on the cathode lifetime will be evaluated more quantitatively.

NEA-GaAs フォトカソードにおけるイオン衝突の影響評価

1. はじめに

本研究室では ILC(International Linear Collider)^[1]および ERL (Energy Recovery Linac)^[2]等の電子線形加速器をベースとした先進的加速器の電子源に用いられるカソードの研究を行っている。NEA-GaAs 光陰極は高量子効率、低エミッタンス、円偏向レーザーの入射による偏極電子の生成等の特長を持つ反面、カソードの短寿命克服が課題になっている。短寿命の要因として、①熱による NEA 表面を形成している分子の脱離、②残留ガスの付着による NEA 表面の汚染、③電子ビームと残留ガスの衝突によって発生したイオンの衝突による NEA 表面の破壊(Ion Back-Bombardment:IBB)等が原因であることが今までに明らかとなっている。

これまで当研究室では、NEA-GaAs 光陰極の活性化およびビーム生成試験が可能な光陰極試験装置^[3]を用いて研究を行ってきた。その結果、①と②については長寿命化への対策が判明し、克服されたといわれてよい^{[4][5][6]}。他方、③については、より定量的な測定を行うために現在光陰極試験装置の改良を行っている。この新装置は、電場及び粒子軌道のシミュレーションをもとに、積極的に電子ビームおよびイオンの軌道を制御するための電場補正電極、電子ビームを収集するコレクター電極の設計、搭載した。改良以前は電子ビームが真空容器壁に衝突することで真空圧力が変動していたが、高温バーク可能なコ

レクター電極の設置によりそれを大幅に抑制する。また、カソードへのイオン逆流の制御を行うことで、IBB の定量的な理解が期待できる。

IBB による量子効率の劣化は Eq(1)^[7]のように、カソード上に衝突するイオン密度レートに依存する。このことから逆流イオンの衝突密度を正確に求める必要がある。本研究では、より定量的な実験を行うためにシミュレーションを用いた電極への電圧印加パターンによる衝突イオン密度の解析を行った。

2. イオン衝突による劣化モデル^[7]

イオン衝突による量子効率 η の劣化は Eq(1)に従う。

$$\frac{d\eta}{dt} = -\sigma_{NEA} \frac{N_B}{S} \eta \quad (1)$$

$$N_B \left[\frac{1}{S} \right] = N_e n_R \int \rho(z) \sigma(E) dz.$$

ここで、S はカソード上の電子の発生領域、 σ_{NEA} は単位密度のイオンが NEA 表面の活性を奪う影響係数、 N_B は単位時間あたりにカソードに衝突するイオン数で、 σ はイオン化断面積、 ρ はカソードへのイオンの衝突率である。

Eq(2)は、Eq(1)から計算される量子効率 η の時間変化を表したものである。

[#] E-mail: m126930@hiroshima-u.ac.jp

$$\eta = \eta_0 \exp\left(-\frac{\int Pjdt}{\theta}\right) \quad (2-1)$$

$$\theta = ekT/(\sigma_{NEA} \int \rho(z)\sigma(E)dz) \quad (2-2)$$

実際の量子効率の測定結果と Eq(2-1)を比較することで電荷引き出し寿命 θ [C/mm²]を求め、シミュレーションを援用して衝突イオン密度を評価し、影響係数 σ_{NEA} を求めることができる。図 1 は σ_{NEA} の解析結果の一例である^[7]。

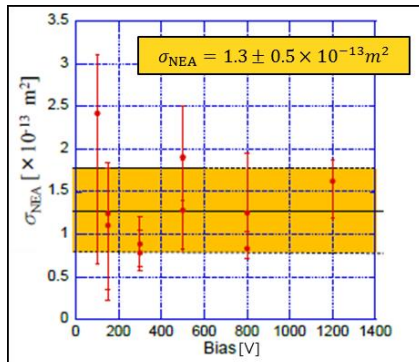


図 1 : σ_{NEA} の解析結果。横軸は引出電圧、縦軸はその電圧条件における実験結果とシミュレーション結果から算出した σ_{NEA} 。

図 1 では横軸に引出ビーム電圧をとり、縦軸に σ_{NEA} を示している。この測定結果から σ_{NEA} は誤差範囲内で電場依存性を持っていないが、誤差はよいとは言えず、その改善が望まれる。誤差が大きい原因は、ビーム引出時の真空度の変化によって IBB 以外の劣化プロセスの影響の排除が十分でなく、保守的に過剰な系統誤差を考慮しているためである。そこで、後述する試験装置の改造を行うことで系統誤差の縮小を目指している。

3. 光陰極試験装置

本研究の NEA-GaAs 光陰極試験装置は、Zn-dope された清浄 GaAs 表面に Cs と O₂を蒸着し NEA 表面の形成を行うカソード準備チャンバーと光陰極の性能試験を行う試験チャンバーで構成されている。両チャンバー間はゲートバルブで仕切られており、蒸着ガス等による真空度悪化を防ぎ、実験チャンバー内において 10⁻¹⁰Pa 台の極高真空状態を実現している。カソードは両チャンバー間をロードロック機構により輸送される。また、この装置での量子効率測定はカソード上のレーザーの照射範囲の量子効率を測定している。

実験用チャンバーの内部を図 2 に示す。カソードを囲む形で電極を設置し、それぞれの電極に独立に電圧を印加できる構造にすることでカソードから発生する電子ビームの軌道およびその軌道上で発生するイオンの軌道を制御が可能である。また、図 2 に

示されているように、電子ビームコレクタとして働く正面電極及び上部電極には、加工面と熱伝導性から銅を用いて、それぞれにヒーターを設置して高温ベーキングを行うことで電子ビームの衝突による真空度の悪化を抑制する。

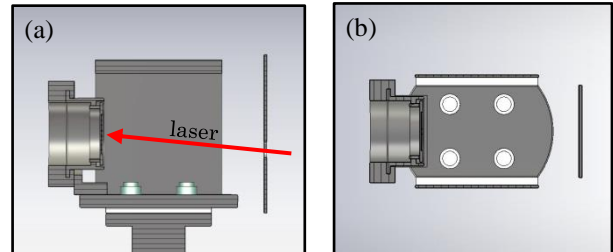


図 2 : コレクター電極とイオンの逆流を切り替える構造を取り入れた光陰極試験装置の概略図。コレクター電極の穴はレーザーを入射するためのもの。

4. シミュレーション

3.1 電子ビームおよびイオンの軌道シミュレーション

本研究では、電場および電子ビームとイオンの軌道を各々 CST STUDIO^[8]と GPT^[9]を用いてシミュレーションを行った。実際の装置と同様にカソードに引き出し電圧を印加し、チャンバーを 0V に設定し、電子ビームの軌道シミュレーションを行った。初期ビーム径 r_0 、印加電圧 V および引き出し電子ビームの電流値 I はそれぞれ $r_0=1$ [mm]、 $I=1$ [μ A]に設定した。カソードから発生する電子ビームの初期分布については Gaussian 分布で設定し、 2σ まで電子を分布させた。また、残留ガスと電子ビームの衝突により発生したイオンとして、通常残留ガスの主成分は水素分子であることからシミュレーションにより求めた電子軌道上に H₂⁺イオンを分布させた。イオンの初期運動量はゼロとした。

本研究では、IBB を意図的に起こすパターン (IBB on) と IBB を抑制するパターン (IBB off) の電圧印加条件についてシミュレーションを行った。図 3 は、それぞれの電圧印加条件及びカソード付近の等電位面のシミュレーション結果である。

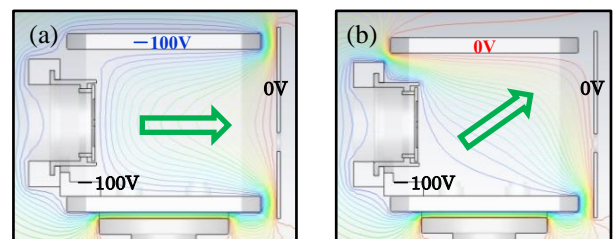


図 3 : IBB on (a) と IBB off (b) の電圧印加条件及びカソード付近の等電位面のシミュレーション結果。矢印は電場の向きを示す。

また、図 4 には電子ビームおよび H_2^+ イオンの軌道シミュレーションの結果を示す。逆流イオンのシミュレーション結果(赤)はカソードから 10mm の位置に発生したイオン軌道を一例として示す。この結果より、2 種類の実験条件における測定結果を比較することで IBB 以外の劣化プロセスの十分な排除が期待できる。

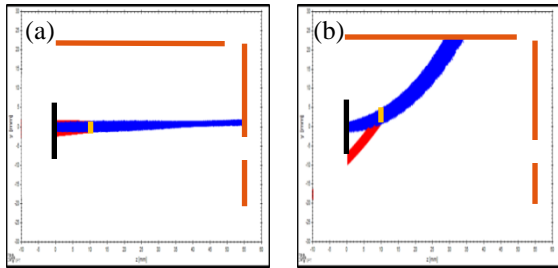


図 4 : z-y 平面の電子ビーム(青)および H_2^+ イオン(赤)の軌道シミュレーション結果。(a) は IBB on、(b)は IBB off。

3.2 逆流イオンの衝突分布

Eq.1 の IBB による量子効率の時間変化の式に電子発生領域への衝突イオン密度が含まれている。Eq(2) は IBB による劣化が量子効率を測定している範囲において一様に起こっていると仮定しているため、非一様な劣化が起きている場合にはその影響を含んだ σ_{NEA} になってしまう。より定量的な解析を行う上で逆流イオンの衝突分布を把握および対策を行う必要がある。

逆流イオンのカソードへの衝突時の分布は、電子ビームの軌道上にカソードから 5mm 間隔に発生したイオンをドリフトさせて求めた。また、それぞれの位置における電子ビームのエネルギーとトムソンの電離断面積から発生イオン数は考慮した。

図 5 は前項のシミュレーション結果の IBB on における逆流イオンの衝突分布である。この時の側面電極への印加電圧は 0V である。

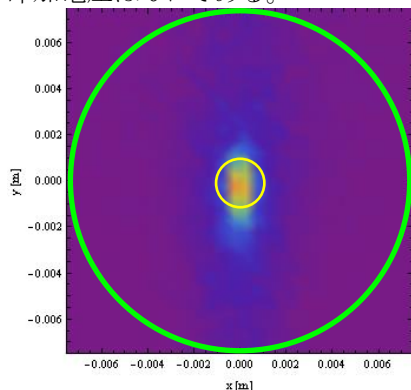


図 5 : 逆流イオンの衝突分布。緑円はカソード全体 ($r = 7.5\text{mm}$)、黄円は電子発生領域($r_0 = 1\text{mm}$)。

図 5 より、この条件では横方向への収束力が大き

いことから電子発生領域においてイオン衝突分布に偏りが発生することが考えられる。

そこで、図 6 に示すように側面電極の電圧を調節することで偏りの解消が可能であるかシミュレーションを行った。電圧印加条件は、カソード部及び上部電極を-100V、正面電極を 0V に固定し、側面電極への印加電圧を 0V から-100V まで 10V ずつ変えて解析を行った。

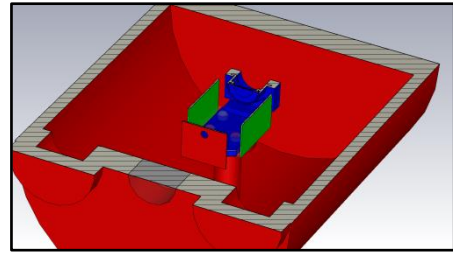


図 6 : イオン衝突分布の偏り解消のための電圧印加条件。側面電極(緑)の電圧を変える。

解析結果の一例を図 7 に示す。図 7(a)は 0V、図 7(b)は-50V、図 7(c)は-70V の電子発生領域付近のイオン衝突分布である。これらの結果から、側面電極の電圧を変化させることで衝突分布の偏りの解消がみられる。しかし、側面電極への印加電圧が増加に従って、衝突イオンの総数が減少している。これは、側面電極への印加電圧の増加に伴ってカソード直前での電場が減少し、電子ビームによるイオン化領域が少なくなることに起因する。

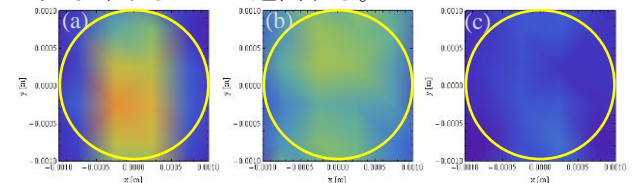


図 7 : (a)0V、(b)-50V、(c)-70V の衝突分布。黄円は電子発生領域($r_0 = 1\text{mm}$)。

また、レーザースポット径を小さくして電子発生領域の縮小することで衝突分布の偏りの解消が可能かどうかについてもシミュレーションを行った。シミュレーション条件は、カソード部と上部電極に-100V、正面電極に 0V、側面電極に 0V の電圧を印加し、電子発生領域を $r_0=0.5\text{mm}$ 、 1mm 、 1.5mm とした。図 8 にその解析結果を示す。

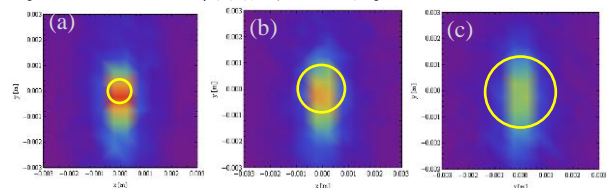


図 8 : (a) $r_0=0.5\text{mm}$ 、(b) $r_0=1\text{mm}$ 、(c) $r_0=1.5\text{mm}$ の衝突分布。黄円は電子発生領域。

この解析結果から、イオン衝突分布はスポット径の変化に対して同様の拡がりを示さなかった。これ

は、図 8-(b)、(c)のようにスポット径がある程度大きい場合では電場形状が主な要因であるのに対して、図 8-(a)のようにスポット径が小さい場合では電場形状より空間電荷効果による電子ビームの拡がりの影響が大きくなるためであると考えられる。この結果から、電子ビームスポット径を小さくすることでイオン衝突分布の偏りの解消が期待できる。ただし、スポット径の縮小に伴って、空間電荷効果の影響で引き出せるビーム電流が制限される。対策として、バイアス電圧を増加させて制限電流の上限値を増加させることが考えられる。

[9]http://www.aetjapan.com/software.php?Accelerators_Design=GPT.

4. まとめ

本研究では、現在改造を行っている光陰極試験装置においてより定量的な実験を行うために装置内の電場および電子ビームとイオンの軌道を各々 CST STUDIO と GPT を用いてシミュレーションした。また、シミュレーション結果を用いてカソード上での衝突イオン分布の解析を行い、電極への印加電圧を制御することで衝突分布の偏りが解消されることを確認した。また、入射レーザーのスポット径を小さくして電子発生領域のサイズを縮小することでも、衝突分布の偏りの解消が可能であることも確認できた。

今後は、現在調整を進めている光陰極試験装置で実験を行うことで IBB の詳細な理解を進めたい。また、これまでの研究ではイオンの衝突数から IBB による寿命への影響を考えていたが、イオンの衝突エネルギーの影響も当然あるため、それについても今後は考慮したい。

謝辞

本研究の一部は、KEK 大学等連携支援事業、科研費基盤 C (25390126) および光量子融合連携研究開発プログラム「小型加速器による小型高輝度 X 線源イメージング基盤技術開発」により行われた。

参考文献

- [1] ILC Reference Design Report
- [2] KEK Report No.2012-4, edited by High Energy Accelerator Research Organization
- [3] H. Iijima, et al., Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan
- [4] C. Shonaka, et al, Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009
- [5] 正中智慧, “高輝度電子源のための GaAs 光陰極寿命の温度依存性についての研究”;2009 年度広島大学先端物質科学研究科修士論文
- [6] M. Kuriki, et al., Proceedings of International Particle Accelerator Conference (IPAC13), MOPFI012
- [7] L. Guo, et al., Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan
- [8] http://www.aetjapan.com/software.php?CST_STUDIO_SUITE.