

# BEAM TRACKING SIMULATION OF PHOTOCATHODE TEST BENCH

K .Miyoshi #, M .Kuriki, H .Iijima, L.Guo

Graduate School of Advanced Science of Matter, Hiroshima University

1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8530

## Abstract

We study GaAs photo-cathode with NEA (Negative Electron Affinity) surface for polarized and high brightness electron source for International Linear Collider and Energy Recovery Linac. The NEA surface is made by artificial treatment, so that an ultra-low emittance and polarized electron beam can be extracted to vacuum by photo-electron effect with laser photon whose energy corresponds to the band gap. The surface is so sensitive to pollution of residual gas and impact to the cathode surface of ions generated by ionization of residual gas molecule with electron beam. The latter effect is called as Ion Back-Bombardment (IBB) and limits the effective operational lifetime of the cathode. The electrons and generated ions orbits in the photo-cathode test bench of Hiroshima University are simulated by GPT to qualify the effect of IBB. We also consider modifications of the electrode shape to control the effect of IBB in our test bench.

## 光陰極試験装置におけるビームトラッキングシミュレーション

### 1. はじめに

本研究室では ILC(International Linear Collider)<sup>[1]</sup>および ERL (Energy Recovery Linac)<sup>[2]</sup>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<sup>[3]</sup>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ている<sup>[4][5]</sup>が、③についてはビーム引き出しによる真空度の悪化やカソード劣化の要素の分離が不十分であったため、定量的評価には至っていない。本研究では、光陰極試験装置内の電場解析および電子ビームと電離により発生するイオンの軌道シミュレーションを行うことで③についてのより定量的な評価を試みた。電場解析については CST STUDIO、粒子トラッキングシミュレーションについては General Particle Tracer (GPT) を用いた。

また、これら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をおこなった。これらの実装により電子

ビームの真空容器に衝突した時に発生するガスによる真空度の悪化を防ぎ、またカソードへのイオン逆流の制御が可能となる。電子ビームの引き出し時にカソードへのガス吸着の影響を低減するとともに、イオンの逆流を制御することで③による影響を定量的に評価できる。

### 2. 光陰極試験装置の概要と問題点

本研究室の NEA-GaAs 光陰極試験装置は、Zn-dope された清浄 GaAs 表面に Cs と O<sub>2</sub> を蒸着し NEA 表面の形成を行うカソード準備チェンバーと光陰極の性能試験を行う試験チェ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、実験チェンバー内において 10<sup>-10</sup>Pa 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。

図 1 に示されるように、実験チャンバー中央部にはカソードホルダーが設置されており、正面のビューポートからレーザーを照射して、電子ビーム生成試験を行う。図 2 に試験装置内の電場を CST STUDIO により求めた結果の一例を示す。カソードはテーブル上に設置されており、電場はカソードから斜め上方に向かって勾配をつくっている。後述するように、この電場により発生した電子ビームはビューポート上方のチェンバー壁に衝突し、それによりガスが発生して真空度の悪化が起きていると予想される。本研究では高温ベーキングが可能なコレクター電極を設置して、電子ビーム衝突による真空悪化を防止することが一つの目的である。

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

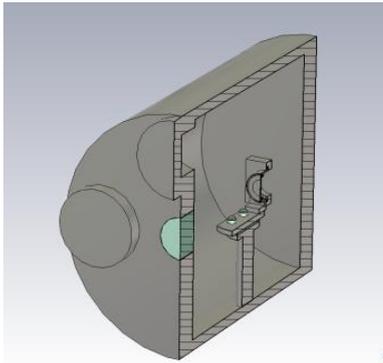


図 1 : シミュレーションに用いた光陰極試験装置の実験チャンバの概略図。装置中央のパーツがカソード部で、チャンバの水色部分がビューポートである。

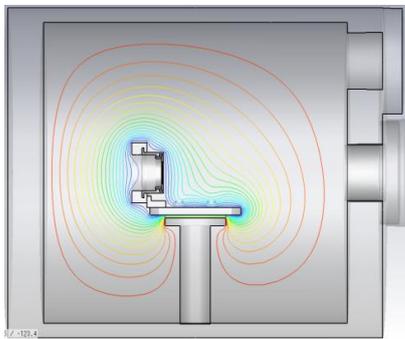


図 2 : 光陰極試験装置内の等電位面。カソード部への印加電圧は-100V。図の線は等電位面を表し、青色から赤色の変化に伴って電位が高くなる。

### 3. シミュレーション

#### 3.1 電子ビームの軌道シミュレーション

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  $r$ 、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  $r=1[\text{mm}]$ 、 $I=1 [\mu\text{A}]$  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、 $2\sigma$  まで電子を分布させた。

図 3 はカソードから発生した電子ビームの軌道シミュレーション結果である。座標の定義は  $z$  方向を電子ビームの進行方向とし、 $x$ 、 $y$  は  $z$  軸に垂直な平面上の成分でそれぞれ水平方向、垂直方向とする。発生した電子ビームが L 字型のカソードテーブルの作る電場の影響で上方向に偏向されてビューポート上方のチャンバ壁に衝突していることが分かる。以上のことから、電子ビームによるビューポートの破損は防ぐことができているが、ビューポート上方の電子が衝突しているチャンバ壁よりガスが発生していると考えられる。

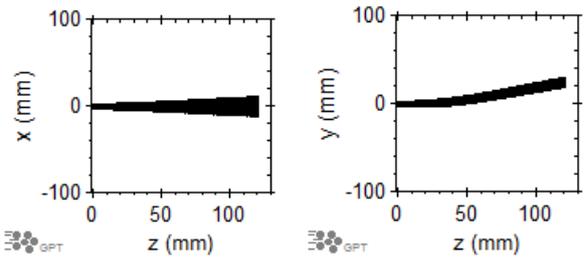


図 3 : 実際の装置における  $z$ - $x$  平面(左)と  $z$ - $y$  平面(右)の電子ビームの軌道シミュレーション結果。縦軸と横軸の範囲はそれぞれ容器内の大きさとカソードからチャンバ壁までの距離である。

現在の装置で起こっている問題であるチャンバ内壁への電子ビームの衝突によるガスの発生をできる限り抑えるために図 4 で示すようなコレクター電極を考えた。コレクター電極にはヒーターを取り付けて十分高温でベーキングすることで、電子ビーム生成時のガスの発生を抑える。また、カソードテーブルの両端と上部に電場整形用の電極を設置してカソードへのイオン逆流を制御する構造を考えた。

本研究のシミュレーションで用いた 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は図 5 に示す。

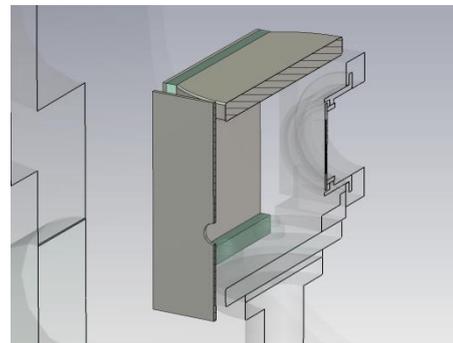


図 4 : コレクター電極とイオンの逆流を切り替える構造を取り入れた光陰極試験装置の概略図。コレクター電極の穴はレーザーを入射するためのものである。

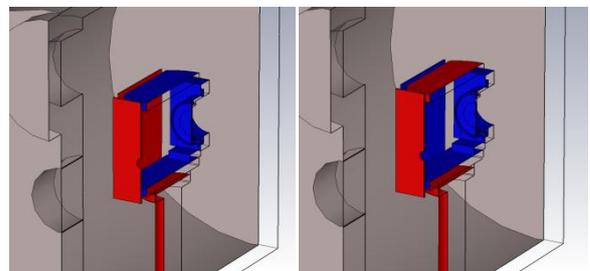


図 5 : IBB on(左)と IBB off(右)の電圧印加条件。赤色の部分を 0V、青色の部分に電圧を印加する。

図 6 と図 7 にそれぞれ電場のシミュレーション結果と電子ビームの軌道シミュレーション結果を示す。図 7 から、電子ビームは正面、あるいは上方の電極により収集されており、新たに設置したコレクター

電極に高温ベーキングを施すことにより装置内の真空度悪化の改善が期待できる。

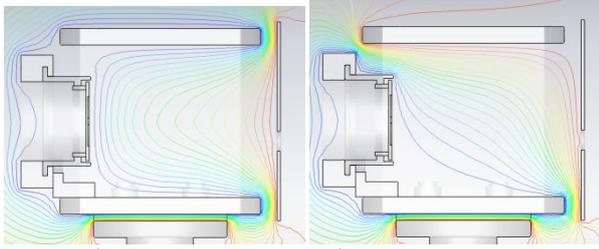


図 6：印加電圧が-100V の場合の IBB on(左)と IBB off(右)のカソード付近での z-y 平面の等電位面。

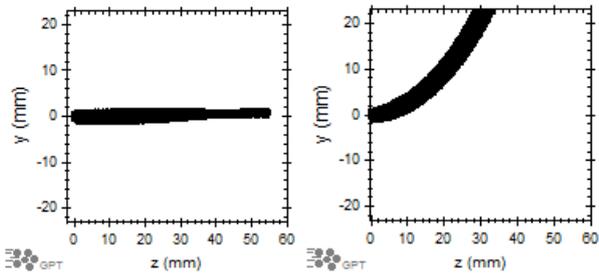


図 7：IBB on(左)と IBB off(右)の z-y 平面の電子ビームの軌道シミュレーション結果。縦軸と横軸の範囲はそれぞれ構造内の大きさとカソードからコレクター電極までの距離である。

### 3.2 イオンの軌道シミュレーションおよび衝突イオン数の計算

はじめに IBB のシミュレーション条件について説明する。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  $H^+$  イオンを分布させた。イオンの初期運動量はゼロとした。イオンの軌道シミュレーション結果からビームスポット(レーザーの入射によってカソード上で電子が発生する領域)へのイオンの衝突率  $R$  を  $z$  の関数として以下のように定義する。

$$R(z) = \frac{\text{ビームスポットに衝突したイオン数}}{\text{発生イオン数}}$$

この  $R$  によりカソードからの距離が  $z_1$  から  $z_2$  の領域で発生した水素イオンの単位時間当たりのビームスポットへの衝突数は以下のように表わされる。

$$N[1/s] = \int_{z_1}^{z_2} \frac{z_2 I}{e} \cdot \sigma \cdot n_R \cdot R dz.$$

ここで、 $I$  は電子ビームの電流値[A]、 $e$  は素電荷量で  $1.6 \times 10^{-19}$ [C]、 $\sigma$  は水素分子の電離断面積[ $cm^2$ ]、 $n_R$  は真空容器内の残留ガス密度[ $cm^{-3}$ ]で装置内の真空度を  $10^{-9}$ Pa と仮定して理想気体の状態方程式から  $n_R = 2.42 \times 10^{11}$ [ $m^{-3}$ ]と設定した。 $R$  はカソードからのビームの進行方向に  $z$  だけ離れた位置で発生したイ

オンのビームスポットへの衝突率である。

表 1 には、現状の装置においてカソードに-100V を印加した場合、コレクター電極を取り付けた場合におけるビームスポットへのイオンの衝突を抑制する条件(IBB off)で-100,-1000V を印加した場合、およびイオンの衝突を促進させる条件(IBB on)でカソードに-100、-500、-1000V を印加した場合のビームスポットへのイオンの衝突数を示す。IBB off の衝突イオン数の計算結果から印加電圧が大きい場合には IBB が起きることが予想される。これは、印加電圧の増大に伴って電子ビームのもつエネルギーが増大して残留ガスのイオン化エネルギーに達するまでの距離が小さくなり、カソードのごく近傍でもイオンが発生してしまうためである。しかし、IBB on と IBB off では衝突イオン数に有意な差があり、光陰極試験装置内にコレクター電極を取り付けて IBB を制御することでそのカソード寿命への影響の評価が行えると期待できる。

表 1：衝突イオン数の計算結果。

シミュレーション条件	衝突イオン数 (1/s)	発生総イオン数 (1/s)	
現状の装置	-100V	114.4	1514.0
IBB off	-100V	0	348.4
	-1000V	45.7	178.0
IBB on	-100V	155.9	908.7
	-500V	135.5	305.2
	-1000V	86.7	188.9

印加電圧を高くするに従ってイオンの衝突数が減少している。これは電離断面積が高いエネルギーでは減少するのが原因である。図 8 はそれぞれの電圧におけるカソードからの距離  $z$  での電離断面積をプロットしたもので、印加電圧の上昇と共に電離断面積の積分値が減少していくことが分かる。そのためイオンの総発生数が減少するとともにビームスポットへのイオンの衝突数も減少している。

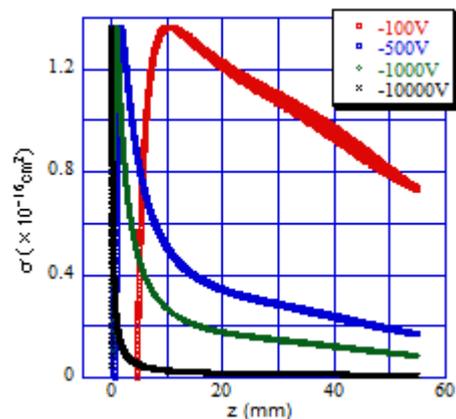


図 8：印加電圧を変化させたときのカソード表面からの距離  $z$  と水素分子の電離断面積の一例。

#### 4. まとめ

光陰極試験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電子ビームのチェンバー内壁への衝突による真空度の悪化を抑制するためのコレクター電極、およびイオン逆流の切り替えによる IBB の定量的な研究を行えるような構造を考えて同様のシミュレーションを行った。ビームスポットへの衝突数の計算結果からも、印加電圧条件の切り替えによって IBB の on と off の切り替えが可能であることが示された。

今後は今回考えたコレクター電極等を実機に組み込んで実験を行い、IBB の詳細な理解を進めたい。また、今回のシミュレーションではイオンの逆流数の違いから IBB への影響を考えたが、衝突するイオンの種類や衝突エネルギーの影響もあると考えられるのでそれについても考える必要がある。

#### 謝辞

本研究は量子ビーム基盤技術開発プログラム「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビームの開発」により行われた。

#### 参考文献

- [1] ILC Reference Design Report
- [2] KEK Report No.2007-7/JAEA Research 2008-032 (2008), edited by R.Hajima, N.Nakamura, S.Sakanaka, and Y. Kobayashi
- [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