

Degradation mechanism of NEA-GaAs photocathode surface analyzed by QE mapping data

Taro Konomi^{1,A)}, Masahiro Yamamoto^{A)}, Yasuide Nakagawa^{A)}, Hikaru Saito^{A)}, Shoji Okumi^{A)}, Tsutomu Nakanishi^{A)}, Masao Kuriki^{B)}, Chie Shonaka^{B)}, Daisuke Kubo^{B)}, Hiromi Okamoto^{B)}

^{A)} Department of Physics, Nagoya University, Furou, Chikusa, Nagoya, 464-8602, Japan

^{B)} Hiroshima University, Beam physics laboratory, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8530, Japan

Abstract

Spin-polarized and low-emittance electron beam can be produced by photoemission from a GaAs-based semiconductor photocathode with a negative electron affinity (NEA) surface. The NEA surface is prepared by small deposition of Cesium and Oxygen on to the Ga-rich surface-layer, but it is easily destroyed by small disturbances caused by residual gas attachments and ion back-bombardments. We have built a 200kV DC gun (NPES-3) and made efforts to maintain a long lifetime of NEA surface. As a result, the lifetime of 100 hours for average beam current of 50 μ A was obtained, and it satisfies the lifetime required for the ILC-polarized electron gun. However, it is not enough for the ERL-gun. Therefore the further studies of degradation mechanism of NEA surface have been still continued. As an example of such studies an analysis of the NEA-degradation observed by the quantum efficiency (QE) mapping is reported in this report.

量子効率マップから分析したNEA-GaAsフォトカソード表面の劣化機構

1. はじめに

大電流・マルチバンチビームを生成するスピン偏極電子源はリニアコライダー計画に不可欠な電子源である。我々はすでにGaAs-GaAsP歪み超格子フォトカソードの開発により高偏極度・高量子効率、マルチバンチビーム生成等に成功している^[1]。しかし、実用化への目処を付けるためには長時間の連続運転を実現しなければならない。

スピン偏極電子は、GaAs系半導体フォトカソードにバンドギャップ相当の円偏光レーザーを照射し、特定のスピン偏極電子を価電子帯から伝導帯へ励起することにより生成する。このときスピン偏極電子は伝導帯の底に存在するため、真空中に取り出すには負の電子親和性(NEA)表面が必要である。

NEA表面はフォトカソード表面にCsとOを交互に蒸着することによって得られる。ヒートクリーニングによりGa-richになったフォトカソード表面と、最初に蒸着するCsがGa⁻-Cs⁺の電気二重層を構成することが、NEA表面を形成するために不可欠だと考えられている。このため、高い量子効率を維持するためには原子レベルで清浄なフォトカソード表面と、わずか数原子層で構成された(Cs,O)層の維持が不可欠である^[2]。NEA表面の維持には、真空中の活性残留ガス、電極間暗電流、イオンの逆衝撃(Ion Back Bombardment)、などを引き起こさない清浄な環境を必要とするため、長時間のNEA-GaAs型電子銃の運転には困難が伴う。

我々はこれらを考慮し、200kV偏極電子銃(NPES-3)の開発に取り組み、Bulk-GaAsを使用した50 μ Aの

平均電流引き出しでNEA表面寿命100時間を達成した^[3]。50 μ Aの電流値はILCに要求される電流値程度あり、ILC電子源として実用化への目途が立ったと考えている。我々はフォトカソード上の量子効率の面分布(QE Mapping)を測定のデータをヒントにして、今後さらにNEA表面寿命を延ばすための方法を探っている。

2. QE Mapping

NPES-3ではフォトカソードをGunチャンバーとは別のNEA表面活性化チャンバーにてフォトカソード表面を処理した後、Gunチャンバーにトランスファーロードを用い移動する機能を備えている。活性化チャンバーでは直径20mmのフォトカソード全体にわたりほぼ均質にNEA表面が形成される設計になっている。

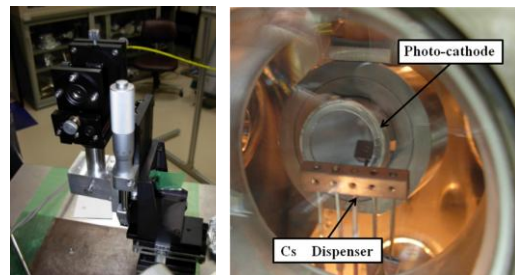


図 1 右)QE Mapping用のX-Yマイクロメーター左)Actチャンバー内のフォトカソードとCsディスペンサーの配置

¹ E-mail: konomi@spin.phys.nagoya-u.ac.jp

QE Mappingはフォトカソード上を直径0.1mm程度に絞ったレーザーを用い細かくスキャンするため活性化チャンバーにフォトカソードを移動して行った。このとき、フォトカソードはCsディスペンサーに隠れてしまい1/4程度の部分がスキャンできない状態であることをお断りしておく(図1)。

3. Ion Back Bombardment

ビームを引き出さず200kVを印加した状態でのNEA表面寿命(Dark Lifetime)は100時間を経過しても劣化は見られず、良好な状態であった。これにより真空度、電極間暗電流の問題は克服できていると考えられる。次に、引き出し電流が50μA一定状態でのNEA表面寿命(Operational Lifetime)では量子効率が半減するまでの時間で100時間であった。

このDark LifetimeとOperational Lifetimeの差はIon Back Bombardmentの影響であると考えられる。今後、更にNEA表面寿命を伸ばすためにはIon Back Bombardmentの影響を排除する必要がある。電子ビームによるイオンの発生原因として考えられていることは、1)真空中を浮遊している残留ガスとの衝突、2)アノードまたはビームパイプに表面吸着しているガスへの衝撃である。それぞれがフォトカソードに及ぼす影響の考察結果とQE Mappingから得られた情報を述べる。

4.1 残留ガスのイオン化

中性粒子のイオン化断面積は電子ビームの場合、電子ビームのエネルギー10~100eVをピークにして指数関数的に減少する。水素の場合の電離断面積 $\sigma(V)$ は電子ビームの衝突エネルギーをVとして次のような半実験式で表される。

$$\sigma(V) = \frac{6 \times 10^{-18}}{13.59V} \ln\left(\frac{V}{13.59}\right)$$

200kV電極の加速電圧は中心軸上で図2の実線のように変化しているため、上式にこの加速電圧を代入すれば点線のように電離断面積は変化する。ほとんどの電子がフォトカソード近傍で発生することがわかる。

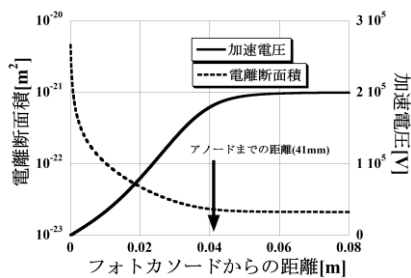


図2 電極中心軸上の電位と電離断面積の変化

NPES-3電極ではフォトカソード近傍では平行電

界となる設計であるので、電子ビームによりイオン化した残留ガスはその電子が放出された場所に逆衝撃を与える。残留ガスによるIon Back Bombardmentの影響は、量子効率の面分布の減少を見た場合、レーザー照射部分での急激な減少として確認できると考えられる。

4.2 表面吸着ガスのイオン化

ビームパイプなどに表面吸着しているガスがビームハローや軌道からずれたビームにより電離してイオン化した場合、そのイオンの運動エネルギーは入射電子のエネルギーにかかわらず、数100eVをピークにして減少するといわれている。これらのイオンはアノードより下流で発生するので、電極電場やソレノイド磁場の影響を受け軌道が変化した後フォトカソードに衝突する。フォトカソードから0.25m下流で水素イオンが発生した場合、フォトカソードにイオンが当たる部分の平均半径をシミュレーションした(図3)。この衝突半径は使用しているフォトカソードが半径10mmであるため、ほぼフォトカソード全体に衝撃を与えられると考えられる。

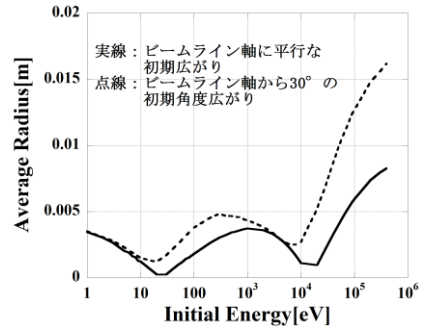


図3 イオン化した表面吸着ガスの衝突半径

また、この場合逆衝撃を与えるイオンは200keV以上のエネルギーをもってフォトカソードに入射するためフォトカソード表面付近の結晶構造を変化させ再度ヒートクリーニングを行ってもNEA表面を形成することができなくなる可能性も考えられる。

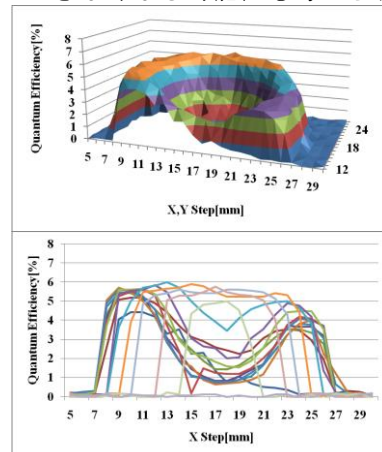


図4 電子ビームをアルミナ蛍光板当てた後に再度NEA活性化を行った後のBulk-GaAsのQE Mapping

この状況証拠は、フォトカソードから1mほど下流に設置したアルミナ蛍光板に数 μA の強い電流を当てることにより観測できた。アルミナ蛍光板から発生したイオンがIon Back Bombardmentを起こし、量子効率が減少した後に、再度ヒートクリーニングと(Cs,O)の蒸着を行ったところ量子効率の面分布(QE Mapping)は図4のようになった。ほぼフォトカソード中央に10mm程度の直径でヒートクリーニングでは回復不能なダメージを受けていることが確認でき、これは図3で示したものと良く合致する。

3. Operational Lifetime試験前後

上記のものとは別のBulk-GaAsを使用し、3回Operational Lifetime試験を行った。試験の度にヒートクリーニングと(Cs,O)の蒸着を行ったが、最大量子効率は初期の最大量子効率(図5)まで回復することにはなかった。

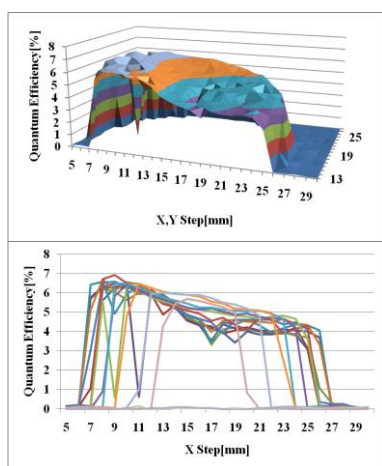


図5 最初のNEA表面活性化後のQE Mapping

また、2回目のOperational Lifetime試験前後のQE Mappingは典型的な様子を示した(図6,図7)。

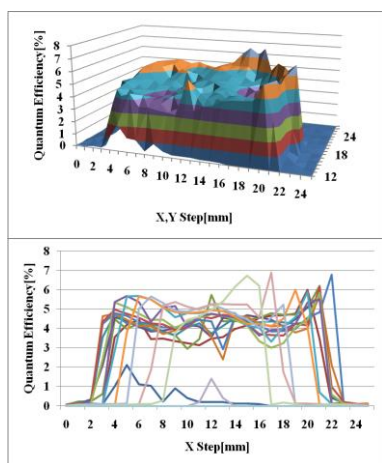


図6 2回目のNEA表面活性化後のQE Mapping

試験前はほぼ均一な量子効率であったが、試験後

には1)中心から直径15mm程度にわたる量子効率の減少と、2)中央から5mmほどずれた位置で直径10mm程度の面で量子効率が階段状に急激に減少していた。1)はアノードより下流で発生したイオンが逆流した図4と同じ現象であると考えられる。さらに急激に減少している2)の面が中央から5mmずれている原因としては、レーザーを照射している位置が5mm程度フォトカソード中央からずれていることが考えられる。このため、アノードなどフォトカソード近傍の構造物をビームハローがかすめ、中心軸から偏った位置でイオンが発生することによる影響なのではないかと推測される。

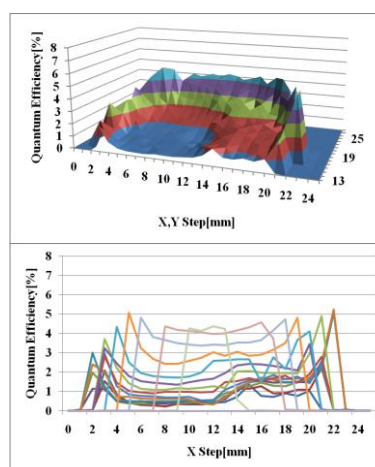


図7 2回目のOperational Lifetime試験後のQE Mapping

6. まとめと今後の課題

現状の200keV電子銃システムではビーム移送中に発生するイオンがNEA表面寿命を制限しているのが、QE Mappingと量子効率が再活性化後も完全に回復しないことから推測される。1m下流のアルミナ蛍光板からのイオンの発生がフォトカソードに回復不能な影響を与えたことから、NEA表面の長時間維持には電子銃のみならず、電子銃から1m程下流でも極高真空など極めて清浄な環境を必要とすると推測される。

また、NEA表面の更なる長寿命化には、ビームロスを徹底的に抑えビームハローまで考慮したビーム移送を実現すること、フォトカソード上にマスクを付け特定の部分からのみビームを引き出すこと、アノードより下流で発生したイオンをフォトカソードにまで逆流させないためにアノードに正電圧を印加すること、などが有効だと考えられる。

参考文献

- [1] T.Nakanishi, et al., NIM A 455 (2000) 109.
- [2] V.V.Bakin, et al., e-J. Surf. Sci. Nanotech. 5 (2007) 80-88.
- [3] M.Yamamoto, et al., in this meeting