

LIFETIME IMPROVEMENT OF NEA-GaAs PHOTOCATHODE FOR A HIGH FIELD-GRADIENT ELECTRON GUN

M.Yamamoto^{1,A)}, N.Yamamoto^{A)}, T.Nakanishi^{A)}, S.Okumi^{A)}, F.Furuta^{A)}, M.Miyamoto^{A)}, M.Kuwahara^{A)},
K.Naniwa^{A)}, K.Yasui^{A)}, O.Watanabe^{B)}, Y.Takeda^{B)}, H.Kobayakawa^{B)}, K.Takashima^{B)}

A) Department of physics, Nagoya University, Nagoya 464-8602

B) Department of engineering, Nagoya University, Nagoya 464-8603

Abstract

A high field-gradient electron gun using GaAs photocathode with a negative electron affinity (NEA) surface is a promising candidate to produce a low emittance beam. However, the NEA surface is degraded easily by both mechanism of adsorption of residual gases (H_2O, CO_2) and ion back-bombardment. In order to improve the lifetime of this NEA surface, non-evaporable getter (NEG) modules were used to surround the cathode area. As preliminary results, a total vacuum pressure of 5.7×10^{-10} Pa was achieved and a base-lifetime was improved from 40 to 150 hours.

NEA-GaAs

1. はじめに

フォトカソードとして負の電子親和性 (Negative Electron Affinity) を持たせたGaAs表面を用いる利点は、スピン偏極が得られるとともにビームの初期エミッタンスを低く抑えられることにある。バンドギャップエネルギーを持つ光子により価電子帯から伝導帯へ励起された電子は伝導帯の最低準位に位置し、ほとんど運動量をもっていない。NEA表面は、このような電子でも真空中へ取出すことを可能にするので (図1)、初期エミッタンスは非常に小さく抑えられる。高電界電子銃でこの小さな初期エミッタンスを維持して加速することにより原理的には超低エミッタンスビームを得ることができる。

上記の方法で常温のNEA-GaAsカソードから引出される ϕ 1mm程度のサイズを持ったビームの初期エミッタンスは $0.1 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 程度であると推定されており^[1]、次世代放射光源のERL (Energy Recovery Linac^[2])の電子源の有力候補とみなされている。

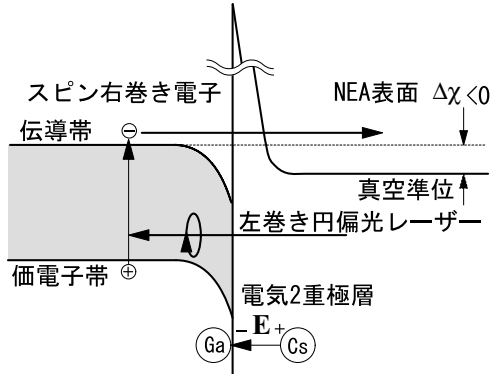


図1 : NEA表面からの電子放出

しかしながらGaAs型半導体のNEA表面を長期間保ち高量子効率を維持し続けるには、超高真空 ($< 10^{-9}$ Pa) と低暗電流 (< 1 nA) を同時に満たす環境を実現することが不可欠であり、実用化にはこの課題を解決する必要がある。

我々は従来よりリニアコライダー用スピン偏極電子源としてGaAs型半導体のNEA表面よりスピン偏極した電子ビームを生成する200keV電子銃 (図2) の開発を行ってきた^[3]。ここでは特に高電界中でのNEA表面の長寿命化実験の現状について報告する。

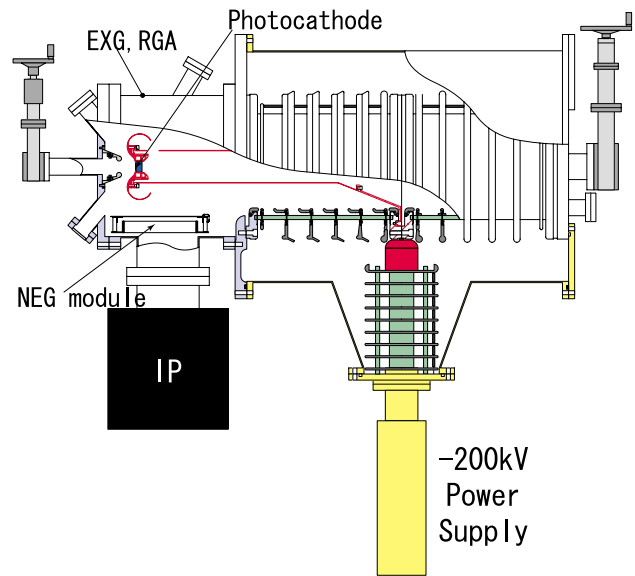


図2 : 200keV電子銃の断面模式図

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

2. NEA表面の長寿命化対策^[4]

NEA状態は、GaAs表面のGa原子と添加するCs原子がGa(-)-Cs(+)の電氣的2重極層を形成することにより実現される。この表面に不純物原子(分子)が吸着したり、電子ビームによってイオン化された残留ガス分子が逆流すると、この電気2重極層が破壊され量子効率の低下を招く。したがってNEA表面の維持には、質の良い超高真空の実現が不可欠である。

さて、従来の装置では真空度 2×10^{-9} Paにおいて残留ガス吸着による寿命 $\tau_{1/2}$ (量子効率が1/2となる寿命)は40時間弱であり、数日毎にCsの再添加によるNEA表面の再活性化が必要であった。そこで、より良い真空環境の実現を目指して以下の改良を行った。

- ① チェンバーを構成する部品のうちで熱的に最も弱いバルブ類をバイトンシールからオールメタルシールのものへ交換し、より高い温度でのベーキング(最高300°C)を可能とした。
- ② 超高真空下においても高い排気速度を有する非蒸発型ゲッター(NEG)ポンプをカソード近傍に配置し、排気速度を増強した。

②のためにNEGモジュール(WP950 : Saes Getters)を8本(合計排気速度 : 3440 l/s)追加した。それらに無酸素銅で作製したステージに4並列2直列で配置し、2本の電流導入端子よりステージ両端へ電流を流して抵抗加熱することによってモジュールを活性化する方式を採った(写真1)。ステージ内側には、円筒状のステンレスメッシュが装着されており、NEGモジュールへ直接高電界がかからないように設計した。また、ステージは電子銃の前面フランジに絶縁固定されており、高電圧印加時には、電流導入端子とアース間で流れる電流をモニターすることによりメッシュへ流れる暗電流の測定を可能にした。

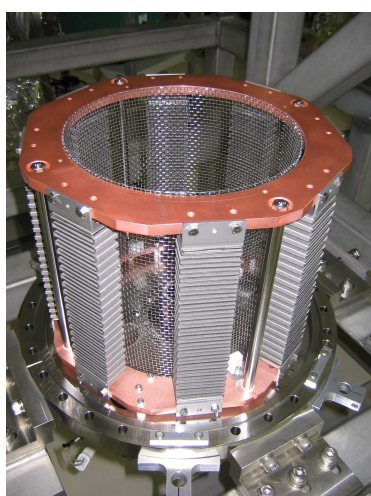


写真1 : NEGモジュール装着時の写真

3. 予備的実験結果

3.1 真空試験

NEGモジュール装着後に真空試験を行った予備的結果を図3に示す。真空度測定には、冷陰極真空計(CCG)を粗引き系に設置し、電子銃内の測定にはエクストラクター真空計(IE514:Leybold)、および残留ガス分析器(TH200:Leybold)を使用した。

装置全体を200°Cで100時間のベーキングを行った後、NEG活性化を行った。この時残念ながら、モジュール活性化途中で電流経路が断線するトラブルが発生し、活性化を十分行うことができなかった。しかし、このトラブルにも関わらずベーキング終了後数日間の本排気を経て得られた到達真空度は従来の 3.2×10^{-9} Paから 5.7×10^{-10} Paへと改善された。

ベーキング中の残留ガス分析を行った結果を図4に示す。NEG活性化前は水素とメタンが主要成分である。NEG活性化時において、NEG温度が低温時(<250°C)ではメタンの放出が起こり、およそ250°C以上でメタンが減少し始め、水素が残留ガスの大部分を占めるように分圧が変化した。

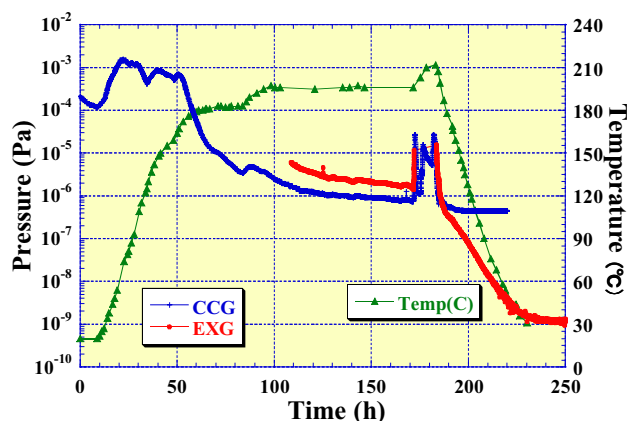


図3 : ベーキング中の真空度

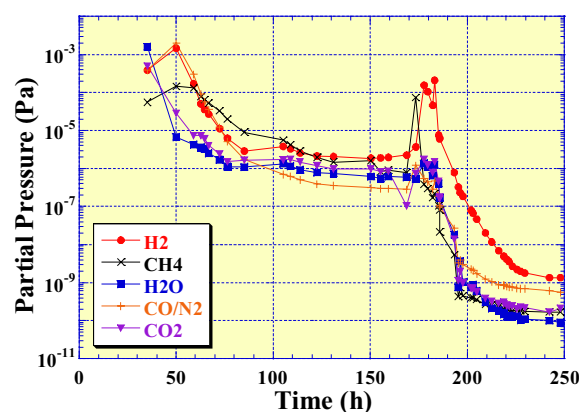


図4 : ベーキング中の残留ガス分析

3.2 予備的寿命試験

NEA表面の残留ガス吸着による寿命の測定を行った、まず、測定時のみレーザーを照射し電子ビームを引出す形でのbase-lifetime測定を行った。比較のため改良前と同じ寿命測定の条件を採用した。すなわち、励起レーザーはHe-Ne (633nm) を使用し、電子ビームの引出し印加電圧は-5kVとした。

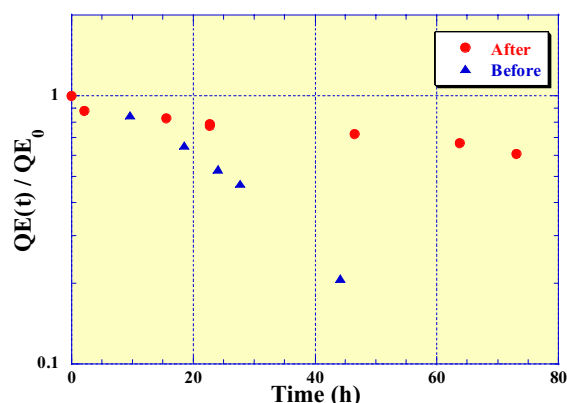


図5 : base-lifetime測定結果

base-lifetimeは40時間から約150時間へ改善されたことを確認した。この結果を図5に示す。この時、NEA表面に悪影響を与えるとみなされるH₂O, CO₂の分圧の比率は改良前と変わらず、全圧の約1割を占めた。しかしながら到達真空度の改善によりこれら分子の絶対数が減ったため寿命が改善したと考えられる。

	到達真空度	H ₂ O	CO ₂
改良前	3.2 × 10 ⁻⁹ Pa	1.1 × 10 ⁻¹⁰ Pa	2.3 × 10 ⁻¹⁰ Pa
改良後	5.7 × 10 ⁻¹⁰ Pa	2.6 × 10 ⁻¹¹ Pa	5.1 × 10 ⁻¹¹ Pa

表1 : 改良前後の真空度と残留ガス比較

3.3 予備的高電圧印加試験

改良以前は、カソード-アノード間においてカソード電極表面電界強度は7.8MV/mが最大であり-200kV印加による暗電流は1nA以下に抑えることができた。しかしカソードを囲むNEGモジュール装着後は、シールドメッシュに向きあうカソード表面電界が最大8.1MV/mと増加し、暗電流の抑制の観点からは厳しい状況になることが予想された。

実際の高電圧印加試験では予想通り、これまでより低い印加電圧-100kV領域で電源からアースへ流れる暗電流(数nA)が確認され、そのほとんどがNEGモジュールのシールドメッシュへ流れることを確認した。

4. 今後の課題

長寿命化のためにNEGモジュールを装着し、不完全な活性化にも関わらず5.7 × 10⁻¹⁰Paと従来の1/5の超高真空度を実現した。その結果、寿命も約150時間へと改善された。今後、NEGモジュールが十分活性化された条件で更なる寿命の改善ができることを確認する予定である。

逆の課題として、NEGモジュールを装着した結果-100kV印加時においてカソード電極とモジュールステージ間に1nA以上の暗電流が確認された。これを克服し、さらに高電界を目指すため、現在以下の対策を立て作業を進めている。

①シールドメッシュの改良

アノードに相当するシールドメッシュを、現在のステンレスからチタンへ変更することにより、暗電流のゲインとなる電子衝撃時の2次イオンの生成を抑制し、メッシュ-カソード間の暗電流を抑制する。

②電極の改良

電界放出暗電流を抑制するため、現在は超清浄ステンレス材(NK-CleanZ)を電解複合研磨により表面粗さを0.12 μm以下に抑えた電極を使用している。

このステンレス鋼より優れた材料としてアノード材料に純チタン、カソード材料にモリブデンを用いることにより現在より数倍高い電界を印加可能にすることを計画している。将来的には作製を予定している500keV電子銃にはこの電極を用いることが必須と考えられる。

上記①②は我々のグループが行った暗電流抑制の基礎研究^[5]から得られた成果を応用するものである。

現在、電極を交換する準備を進めており、チタン製アノード電極の加工をすでに進めている。一方、モリブデン電極はφ80mmのサポートチューブ固定端より約500mm離れた先端に装着される。このためたわみを抑えるためできるだけ軽くする必要がある。例えば現在のステンレス鋼カソード電極は厚さを薄くして総重量650gまで軽量化している。これと同様にモリブデンを削る場合に問題となるのは、切削の困難性と肉薄に加工する場合の割れの可能性である。現在モリブデン製カソードの製作方法について検討中である。

参考文献

- [1] S. Pastuszka et al., J. Appl. Phys. 88, 6788 (2000).
- [2] S.M.Gruner and M.Tigner, eds., "Study for a proposed Phase I Energy Recovery Linac Synchrotron Light Source at Cornell University, CHESSTechnical Memo 02-003, JLAB-ACT-01-04(2001)
- [3] T.Nakanishi et al., KEK Report 97-01 (1997) p.36-48
- [4] M.Yamamoto et al., Proceedings 28th Linear Accelerator Meeting (2003) p.99-101
- [5] F.Furuta et al., Proceedings 28th Linear Accelerator Meeting (2003) p.99-101 and this proceedings.