

A STUDY OF LIFETIME DEGRADATION OF GaAs PHOTO-CATHODE BY HEATING

C. Shonaka^{*,A)}, M. Kuriki^{A)}, H. Iijima^{A)}, D. Kubo^{A)}, Y. Masumoto^{A)}, H. Okamoto^{A)}, H. Higaki^{A)}, K. Ito^{A)}, M. Yamamoto^{** ,B)}, T. Konomi^{***,B)}, M. Kuwahara^{B)}, S. Okumi^{B)}, T. Nakanishi^{B)},

^{A)} Grad. Advanced Sciences of Matter, Hiroshima Univ., Higashi-hiroshima

^{B)} Faculty of science, Nagoya Univ., Nagoya

Abstract

The Beam Physics Laboratory of Hiroshima University has studied GaAs photo-cathode for a high brightness electron source. It aims to develop a cathode with the higher quantum efficiency and longer-lifetime. The Negative Electron Affinity (NEA) surface is essential for GaAs to activate as an electron source. By artificial treatments, NEA surface is made on GaAs cathode, so that electron beam can be extracted to vacuum with a laser pulse, whose energy corresponds to the band gap. NEA surface is made by Yo-Yo method, alternating deposition of Cs and O₂ to a GaAs surface. In this article, we study thermal property of lifetime of the GaAs cathode. In the high brightness electron source based on photo-cathode, heating by the drive laser is expected. We evaluated that the temperature rise depends on the laser spot size and laser power: it is 40K for 6mm with 15W laser. We observed a significant degradation of lifetime and it was shorter as temperature went higher. To confirm the effect of the vacuum, we simulated the lifetime degradation only with vacuum deterioration and we found that the lifetime degradation cannot be explained by the vacuum deterioration. As a result, the cathode lifetime is strongly influenced by the temperature. Some active temperature control is necessary to obtain an enough operation lifetime for high brightness electron source.

GaAs光カソード加熱によるダーク寿命の低下についての研究

1. はじめに

現在計画中の加速器プロジェクト、ILC^[1]、CLIC^[2]、ERL^[3]、FEL^[4]等において、電子源は加速器全体の性能を決定する重要な役割を担っている。そのうち、ERLにおける電子ビームへの要求は厳しいものであり、低エミッタンス(0.1-1.0 π mm \cdot mrad)、大電流(10-100mA)、高量子効率(1%程度)、長寿命(数日間以上)、等が挙げられる。またILCおよびCLIC等の高エネルギー物理学における電子・陽電子衝突実験においては、以上の性能に加え、高い偏極度が要求される。これらの要求を満たす電子源として、NEA-GaAsカソードが最も有力とされている^[5]。

我々はこのGaAs光カソードの基礎研究をおこなっている。本実験では、カソード温度と寿命の依存性についての実験をおこなった。実際に光カソードから高輝度電子ビームを取り出すためには、大パワーレーザーを照射しなければならない。ERLの場合には15W程度のレーザーを用いる予定である^[3]。レーザーのエネルギーのうち、表面での反射や光電効果における電子励起に使われた残りは熱になり、GaAs表面の温度上昇が生じる。そこで我々はGaAsカソードの寿命の温度依存性を調べ、実際の運転条

件における寿命を測定し、課題を明らかにするとともに、その解決を目指している。

図1(a)のようなカソードとサポートロッドのモデルによりレーザーによる上昇温度を見積もった。カソードは厚み0.5mmの円盤として、それが厚み0.5mmのワッシャーを介して長さ315mm、直径50mm、肉厚1.5mmのサポートロッドに接続されているとした。ロッド右側は熱的に固定されているとして、レーザーを照射した時の温度上昇を見積もった。レーザーパワーはERLのパラメーターである15Wとし、GaAs表面での反射率を40%とした。この反射率は実験に使用したGaAsウエハーを用い空气中で測定した。以上の条件のもとで、レーザー径と表面の上昇温度の関係を計算した。その結果を図1(b)に示す。

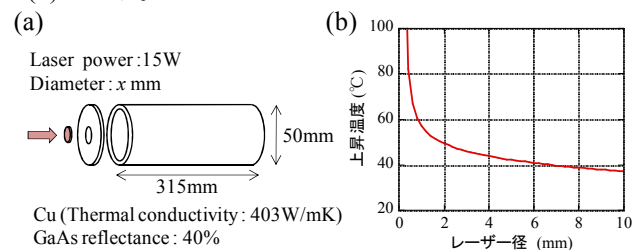


図1 レーザーによる表面温度上昇計算

* E-mail: m082182@hiroshima-u.ac.jp

** Current affiliation: High energy accelerator research organization, accelerator lab.

*** Current affiliation: The graduate university for advanced studies

レーザースポット径が2-6mmで、上昇温度は40-60K程度になると予想された。ERLの運転条件は2mm径であり、この温度領域において十分な運転寿命が得られるかどうかは課題となる。以下、装置の説明の後、加熱時の寿命測定結果および考察について述べる。

2. 光カソードテストベンチの概略

カソードテストベンチの概略図を図2に示す。チャンパー本体はSUS製で、内部は化学研磨処理を施している。カソード部はセラミックにより本体と絶縁されており、光電流の測定時にはバイアスをかけてビーム引き出しをおこなう。160l/sのイオンポンプと310l/sのNEGポンプにより内部を 1.0×10^{-8} Pa以下の極高真空に保っている。

GaAsはMo製のカソードベッドに取り付けており、レーザー照射は正面のビューポートよりおこなう。また、カソード部にはGaAs加熱洗浄用にタングステンヒーターと、温度測定のための熱電対が内蔵されている。また、NEA活性化時に使用するCsディスペンサーとO₂導入用バリアブルリークバルブを取り付けている。装置立ち上げの際には、200~250°Cで3日間のベーキングとイオンポンプ、Csディスペンサー、ヌードイオンゲージ、カソードベッド、NEGポンプのガス出しをおこなっている。

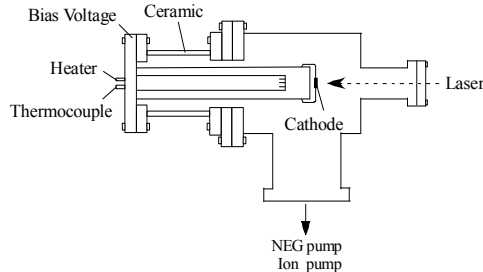


図2 カソードテストベンチの断面図

3. NEA-GaAsとNEA活性化

本研究では住友電工社製GaAs結晶(100)をカソードとして用いた。結晶の厚みはおよそ0.3mm。Znが $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ドープされている。カソード取り付け前には、表面にできた酸化膜を除去するために、硫酸、過酸化水素、蒸留水でのエッチングと、塩酸イソプロパノール溶液での表面処理をおこなった^[6]。

GaAsをテストベンチに設置した後、タングステンヒーターにより550°Cで1時間の加熱洗浄をおこなった。その後、カソード温度が常温に戻ってから、Yo-Yo蒸着法^[7]によりNEA活性化をおこなった。NEA活性化時はカソード正面のビューポートからHe-Neレーザー(633nm)を20μWの強度で照射し、光電流を測定しながらCsとO₂を交互に蒸着した。レーザーのスポット径は $\sigma = 280\mu\text{m}$ である。カソード側にかけた引き出し電圧は-100Vである。各々の蒸着時の真空度は、Csで 7.0×10^{-7} Pa程度、O₂で 1.0×10^{-7} Paであった。NEA活性化時の量子効率(以下、QE)

カーブを図3に示す。

NEA活性化の後、加熱時のカソード寿命を測定するため、カソードベッド全体を加熱し、ビーム引き出し測定をおこなった。カソード加熱には、GaAsの加熱洗浄用のヒーターを使用した。電気的に絶縁をするため、絶縁トランスを介してヒーターに電源を供給した。また、温度は熱電対によりモニターした。

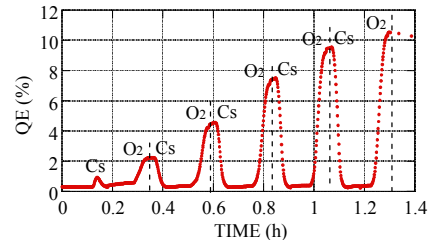


図3 Yo-Yo蒸着法によるNEA activation

4. ダーク寿命とビーム寿命

GaAsのQEが、時間的にある寿命 τ により減衰すると仮定した場合、その変化は次のように表される。

$$QE = QE_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1)$$

QEの変化が、時間のみ依存する成分(ダーク寿命 τ_d)と引き出し電荷量に依存する成分(ビーム寿命 Q)の二成分とからなるとしてモデル化すると、量子効率の時間変化は次のように表わされる。

$$QE = QE_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right) \cdot \exp\left(-\frac{\int I_0 dt}{Q}\right) \quad (2)$$

$\int I_0 dt / Q$ が十分に小さければ、QEの減衰はダーク寿命が支配的となり、この条件で寿命を測定することでダーク寿命を求めることができる。また、量子効率を引き出し電流の積分値の関数として測定することにより、ビーム寿命を測定することができる。本実験では非加熱時と加熱時でそれぞれ測定し、温度による寿命の変化を調べた。

5. 結果と考察

GaAsの活性化後、数時間はQEは減衰せず、一定の状態が続いた。その後、QEの減衰が観測された。本研究では、この減衰状態を対象として、寿命の測定をおこなった。まず、引き出し電荷量が極めて小さい状態(平均のレーザーパワー: 0.01-0.1μW)での光電流の測定によりダーク寿命を求めた。また引き出し電荷量を求め、ダーク寿命による補正をおこなった上で、ビーム寿命を求めた。室温での測定結果を図4に示す。図4の(a)は、測定開始後6hまでレーザーパワーを0.1μWとしてダーク寿命を測定し、その後、40、20、10、7μWとレーザーパワーを変えたときのQEの時間変化を示している。図4の(b)は、引き出し電荷量を横軸にしたときのQEの変化である。

このデータではダーク寿命による補正をおこなっており、傾きからビーム寿命は178mCとなった。

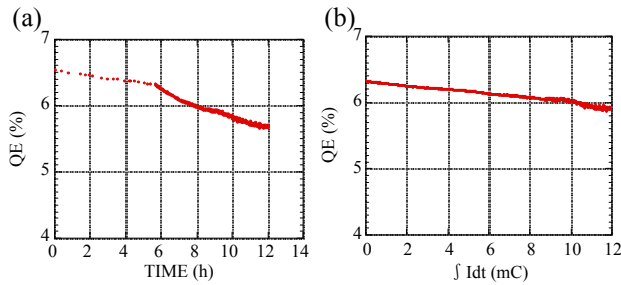


図4 室温でのQEの測定結果

同様の測定をGaAsの温度を40、50、60℃で一定に保った状態でおこなった。この結果を図5に示す。図5(a)と(b)は、各々のダーク寿命とビーム寿命の温度による変化を表している。測定は2回おこない、赤の実線データが1回目、青の破線データが2回目の結果である。ダーク寿命、ビーム寿命ともに、カソード温度の上昇とともに低下しているとみられる。

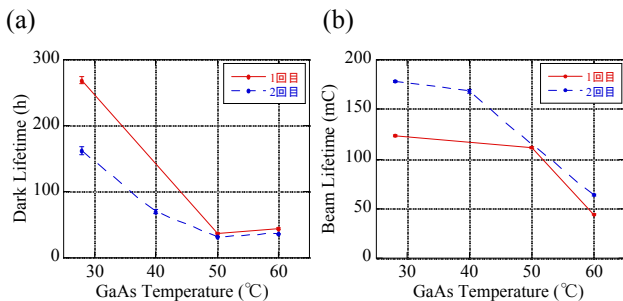


図5 GaAs加熱時の寿命の変化

カソード加熱時にはガス放出の増大により、真空度の悪化が生じる。本測定によるQEの劣化は真空度の悪化による影響も含んでいると考えられる。測定時の真空度は、蒸着で使用したCsとO₂の残留ガスが支配的であり、加熱による真空度の変化は観測不可能だった。そこで、加熱による真空度の変化を見るために、蒸着をおこなわずにカソードを加熱し、真空度の変化を測定した。

また、真空度の悪化による寿命の変化を見るために、真空容器下部を加熱して真空度を悪化させ、その時のダーク寿命を測定した。以上の結果を図6に示す。赤点のデータは、ダーク寿命の真空度による変化を表す。青の実線データはカソード加熱時に、同様の真空度の悪化をもたらす温度を表している。真空度の悪化に伴いダーク寿命の低下が観測された。

図6の青の実線データより、カソード温度を40、50、60℃に加熱すると、室温で 6.0×10^{-9} Paであった真空度は、 $6.4 \sim 6.9 \times 10^{-9}$ Paに変化した。 $6.4 \sim 6.9 \times 10^{-9}$ Paにおける室温のダーク寿命は図6の赤点データから175時間程度となる。図5(a)でのカソード加熱時のダーク寿命は、40℃で70時間、50℃、60℃では37時間ほどである。これに真空度の悪化によるダーク寿命175時間を差し引くと、カソード加熱によるダーク寿命は、40℃で116時間、50℃、60℃で47時

間と求められ、室温に比べて大きく低下している。

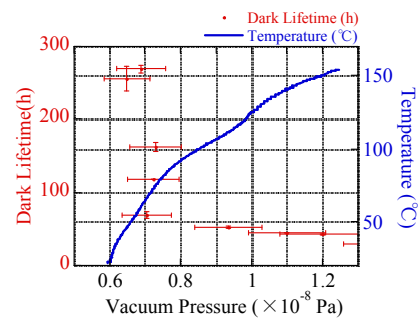


図6 真空度と非加熱時のダーク寿命関係

以上の結果より、カソードが加熱されることにより、ダーク寿命が大きく低下することが確認された。測定をおこなった温度領域は最も条件の厳しいERLでの運転条件に相当する。長時間のビーム取り出しをおこなうためには、表面温度の上昇を如何に抑えるかが重要課題となる。モデル計算の結果から、レーザースポット径を大きくすることでのカソード温度上昇および寿命低下の抑制は困難であると考えられるため、現状のGaAsカソードでは冷却することが不可欠であると思われる。

6. 今後の展望

GaAsの加熱によるQEの変化は、Csの蒸発など表面の何らかの変化が原因であると推測される。今後、QEの加熱時の変化を詳細に調べると同時に、冷却機構を追加してより広い温度領域で測定をおこなうことで理解を進めていきたい。また、表面分析をin-situでおこなうことも検討していく。

謝辞

本研究は文部科学省の量子ビーム基盤技術開発プログラム、および高エネルギー加速器研究機構の大学等加速器総合支援事業の支援によりおこなわれました。加速器研究施設の神谷所長、浦川教授、河田教授に感謝いたします。

参考文献

- [1] ILC Reference Design Report, ILC-Report-2007-1, 2007
- [2] CTF3 DESIGN REPORT, CERN/PS 2002-008(RF)
- [3] “Design Study of Compact ERL”, KEK Report 2007-7, 2007
- [4] “The European X-ray Free Electron Laser Technical Design Report”, DESY 2006-97, 2006
- [5] T. Rao et al., “Photocathode for the energy recovery linacs”, Nucl. Instr. and Meth. A 557 (2006) 124-130
- [6] O.E. Tereshchenko et al., “Atomic structure and electronic properties of HCl-isopropanol treated and vacuum annealed GaAs(100) surface, Appl. Surface Science” 142 (1999) 75-80
- [7] K. Togawa et al., “Surface charge limit in NEA super lattice photocathodes of polarized electron source”, Nucl. Instr. And Method A414 (1998) 431-445