

A STUDY OF BEAM LIFE TIME OF NEA-GaAs CATHODE

Lei Guo¹, Masao Kuriki¹, C.shonaka¹, Daisuke Kubo¹, Hokuto Iijima¹
 The Graduate School of Advanced Sciences of Matter Hiroshima University
 1-3-1, Hagamiyama, Higashihiroshima, Hiroshima

Abstract

We report property of the NEA (Negative Electron Affinity) GaAs photo-cathode regarding to the extracted beam charge, namely beam life time. NEA-GaAs photo-cathode has advantages on high quantum efficiency, generation of ultra-low emittance and polarized electron beams. On the other hand, quantum efficiency of NEA GaAs cathode is decreased after the activation. Especially, the beam life time regarding on the extracted beam charge, has become a major obstacle on the practical applications. We have measured the quantum efficiency of NEA GaAs cathode with a cathode test bench in Hiroshima university. The beam life time was analyzed in two different models. Any systematic property of the beam life time was not found yet.

NEA-GaAs カソードのビーム寿命特性についての研究

1. はじめに

高輝度、短パルス、偏極などの特性を有する高性能電子ビームは、高エネルギー物理学将来計画である国際リニアコライダー (International Linear Collider, ILC)、FEL (Free Electron Laser) やエネルギー回収型リニアック (Energy Recover Linac, ERL) 等の次世代放射光源、Laser-Compton X/γ線源、等の先進的な加速器計画において重要な役割を担っている。NEA (Negative Electron Affinity) GaAs フォトカソードは物質のバンド構造による光励起の選択性を利用した偏極電子ビーム生成、NEA という特殊な表面状態に由来する極低エミッタンスビームの生成、高い量子効率など、多くの特長を有しており、ILC や ERL を始めとする多くの計画における電子源として開発が進められている。NEA とは負の電子親和性を持つ表面であり、真空エネルギー準位が物質中の伝導帯の最低準位よりも低くなっている表面状態である。NEA 表面は清浄な p 型 GaAs 半導体表面に Cs と酸素を蒸着させることにより生成される。しかし使用中に NEA 表面が劣化し、光電子放出の量子効率が減少するという寿命問題が実用化の上で大きな障害となっている。

現在までの研究で、劣化プロセスには少なくとも三つのプロセスがあることが分かっている。一つは真空中の残留ガスの表面への吸着によるものである。二つ目は Cs 等の NEA 表面を形成している分子が熱脱離する現象である。そして三つ目は、発生した電子ビームによりイオン化された分子が表面にダメージを与えるイオン衝撃の効果である。これらの三つのプロセスのうち、吸着と熱脱離の効果は、真空度の向上とカソード温度の若干の冷却で克服可能なことが分かっている。大きな電流での連続ビーム取り出しのために残された課題は、イオン衝撃によると思われる、ビーム引出電流で定義される寿命の理解と克服である。以下、カソード寿命モデルの説明に続き、解析、そして結論の順で説明する。

2. 量子効率の劣化モデル

GaAs の量子効率は、時間あるいは引出電流量と

にも減少するという観測事実がある。それらは分子吸着、熱脱離、イオン衝撃という三つのプロセスにより説明可能であると考えられる。

吸着による寿命は、真空度と時間の積に比例すると考えられる。暴露量 L (単位はラングミュアで、 $L = P[\text{Pa}] \times t[\text{sec}] \times 133e - 6$) により吸着による量子効率の劣化は

$$\eta = \eta_0 \exp\left(-\frac{L}{L_0}\right) \quad (1),$$

と表される。 L_0 は暴露量で定義される寿命である。熱脱離による寿命は、以下のように記述される。

$$\eta = \eta_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \quad (2),$$

ここで τ_1 は熱脱離による寿命 (単位 sec) で、活性化エネルギー E 、は頻度因子 ν 、ボルツマン定数 k 、温度 T により

$$\tau_1 = \frac{1}{\nu \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)}$$

と表すことができる。ここで一次の脱離プロセスを仮定している。

イオン衝撃による寿命劣化は、

$$\eta = \eta_0 \exp\left(-\frac{Q}{\theta}\right) \quad (3),$$

のように表される。ここで Q はビーム電荷量で、引き出されたビーム電流を積分して得られる。また θ はビーム寿命と呼ばれる定数で、物理的には

$$\theta = e / (\rho \sigma p_i d)$$

と与えられる。 e は素電荷、 ρ は残留ガスの密度 [$1/\text{m}^3$]、 σ はイオン化断面積 [m^2]、 p_i はカソードに逆流してきたイオンが NEA 状態を壊す確率、 d は有効長を表している。

実際の実験においては、 $\eta(t)$ は以上の三つのプロセスにより変化しているものと考えられる。

3. 測定と解析

物理的観点からみると、ビーム寿命は残留ガスの

密度のみに依存し、カソードの表面温度等には依存しないと考えられる。しかし、過去に広島大学で行われた測定において、ビーム寿命が温度依存性をもつ兆候が見られた。そのビーム寿命特性を再考するため、本稿では、以下の二つの方法で解析を試みた。

モデル1：表面吸着とイオン逆流というふたつのプロセスを仮定し、解析を行う方法である。量子効率の時間変化は次式で表される。

$$\eta = \eta_0 \exp\left(-\frac{t}{L_0}\right) \exp\left(-\frac{Q}{\theta_1}\right) \quad (4)$$

この解析の長所としては、ビーム電流ゼロリミットでの測定から L_0 を、そしてビーム電流が有限の測定から Q を、得ることができることである。他方、欠点としては、熱脱離の効果が L_0 に繰り込まれており、真空度の時間変動が大きい場合などでは、データとの乖離が大きくなる可能性がある。

モデル2：表面吸着、熱脱離、イオン逆流という三つの効果を含めている。量子効率の時間変化は

$$\eta = \eta_0 \exp\left(-\frac{t}{L_0}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \exp\left(-\frac{Q}{\theta_2}\right) \quad (5)$$

のように表される。吸着による項、熱脱離による項は、真空度の変化が大きくなれば双方とも時間の指数関数として振る舞うので、実質上の区別は困難である。しかし過去の測定から NEA 表面の熱脱離による活性化エネルギーは 1.2eV と見積もられている。この値を用いて、実験条件での熱脱離による寿命劣化成分を見積ることが可能となる。

下の二つの測定方法で測定した。

測定は、カソード活性化の後、ビーム引出条件のことなる二つをセットとして行った。

測定 A では 40 μ W 程度のレーザーを 15 分間隔で 2 秒間だけ照射して量子効率の時間変化を測定した。この場合のビーム電流はほぼ 0 であると考えられるので、量子効率の劣化は吸着と熱脱離によるもののみであると推測される。

測定 B ではレーザーを連続的に照射して、量子効率を測定する。この場合の量子効率の時間変化は三つのプロセスすべてを含んでいるものと考えられる。

測定に用いたレーザーは HeNe レーザーで、波長は 633nm である。スポット径は RMS でおよそ 300 μ m である。

モデル1に従い、以下のように解析をおこなった。測定 A によるデータはビーム寿命による劣化を含んでいないと考えられるため、このデータを指数関数に回帰解析することで吸着（熱脱離の効果もくりこまれている）による寿命 L_0 を求める。測定 B によるデータはすべての効果を含んでいるので、上で求めた L_0 を用いて補正を行う。補正した測定 B による量子効率のデータは、イオン衝撃による効果のみにより変化していると推測されるので、そのデータをやはり指数関数で回帰解析を行うことで、 θ を求める。

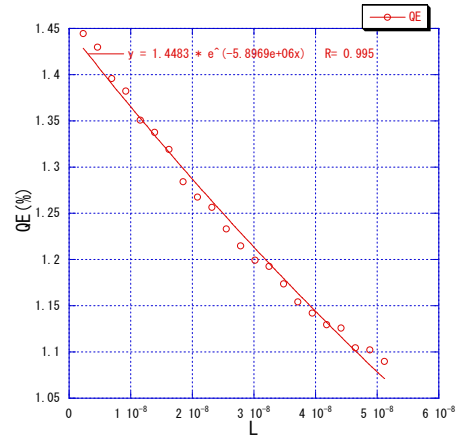


図 1: 横軸は暴露量、縦軸は量子効率である。カソード温度は 60 度での測定。

図 1 に測定法 A により得られた量子効率 η (%) を暴露量を横軸にとり表している。このデータはカソード温度 60 度で測定されたものである。曲線は指数関数による回帰曲線であり、これより L_0 を求めると、 $L_0 = 1.70 \times 10^{-7}$ という値をえる。

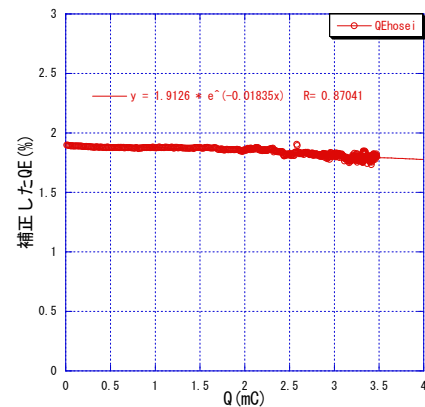


図 2: 横軸は電荷量、縦軸は補正した量子効率である。カソード温度は 60 度での測定。

図 1 より求められた暴露量の寿命 L_0 を用いて測定 B により得られた量子効率を補正し、吸着による寄与を取り除く。具体的には測定された量子効率 η に対して補正量子効率 η' を

$$\eta' = \frac{\eta}{\exp\left(-\frac{L}{L_0}\right)} \quad (6)$$

のように求める。図 2 はそのように求めた η' をビーム電荷 Q の関数として表したものである。式 (6) により η' は

$$\eta' = \eta'_0 \exp\left(-\frac{Q}{\theta_1}\right) \quad (7)$$

に従って変化するものと考えられるので、 θ_1 を求めると、56mC という値を得る。

次にモデル 2 に従った解析について説明する。測定時のカソード温度から τ_1 を次式に従い求める。

$$\tau_1 = 10^{(-13)} \exp\left(\frac{1.2 \cdot 16000}{1.38 \cdot (273 + T)}\right) \quad (8)$$

ここで、頻度因子 ν を 10^{13} 、活性化エネルギー E を 1.2eV としている。

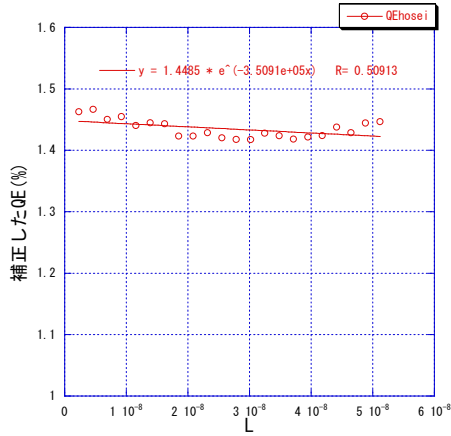


図 3: 横軸は暴露量、縦軸は補正した量子効率である。カソード温度は 60 度での測定。

測定 A により求められた量子効率 η を次式に従い補正して、熱脱離の効果を除く。

$$\eta'' = \frac{\eta}{\exp\left(-\frac{L}{\tau_1}\right)} \quad (9)$$

図 3 は補正量子効率 η'' を暴露量の関数として表したものである。このデータはカソード温度 60 度で測定されたものである。 η'' は吸着による効果のみにより変化していると考えられ

$$\eta'' = \eta''_0 \exp\left(-\frac{L}{L_0}\right) \quad (10)$$

という式に従って変化するものと考えられる。これより L_0 を求めると、 2.85×10^{-6} という値を得た。

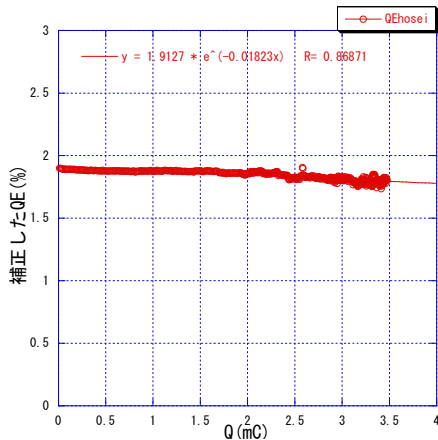


図 4: 横軸は電荷量、縦軸は補正した量子効率である。カソード温度は 60 度での測定。

熱脱離の寿命 τ_1 と図 3 より求められた暴露量の寿命 L_0 を用いて

$$\eta''' = \frac{\eta}{\exp\left(-\frac{L}{L_0}\right) \exp\left(-\frac{L}{\tau_1}\right)} \quad (11)$$

のように測定 B により得られた量子効率 η を補正して、補正量子効率 η''' を求めた。図 4 は η''' をビーム電荷 Q の関数として表したものである。 η''' はイオン衝撃以外の効果を取り除かれているはずであるから、

$$\eta''' = \eta'''_0 \exp\left(-\frac{Q}{\theta}\right) \quad (12)$$

に従って変化するものと考えられる。これより θ を求めると、 56mC という値を得た。

4. 結果と考察

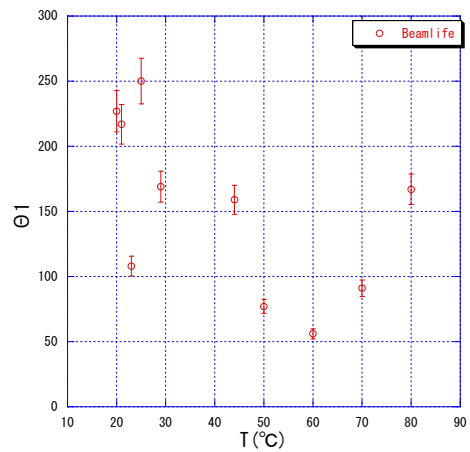


図 5: モデル(1)によるビーム寿命の温度依存性

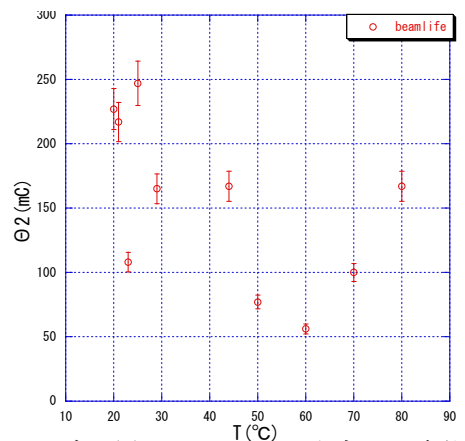


図 6: モデル(2)によるビーム寿命の温度依存性

図 5、図 6 はそれぞれモデル(1)、モデル(2)によるビーム寿命を温度の関数として表示したものである。これらの結果から、モデル 1 による解析とモデル 2 による解析で大きな差はないことがわかる。誤差は統計誤差のみを含んでおり、実験条件の揺らぎなど系系統的な誤差は含まれていない。また、ビーム寿命は有意な温度依存性を示していないことがわかる。

以前の解析[2]ではビーム寿命が有意に温度依存性を持つことが指摘されたが、今回の解析では否定された。文献[2]での解析では測定中に真空度は一定である、という仮定のもとで解析がなされたが、今回は暴露量を変数としてもちいることで、真空度が変動してもその効果を適切に含めるようにしたのが大きな変更点である。したがって、文献[2]で得られたビーム寿命が温度に依存するという特性は、真空度の時間変動により生じた可能性が高いと推測される。

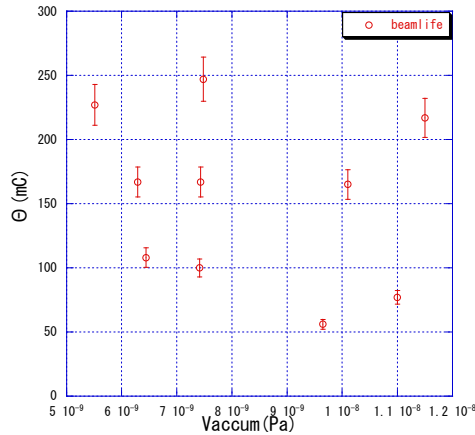


図 7: ビーム寿命の真空度依存性

イオン衝撃による寿命 Θ は真空度に強く依存するものと思われる。図 7 はビーム寿命を真空度の関数として表したものである。ビーム寿命は真空度に対

して明確な依存性を示していない。この理由については、いくつかのことが考えられる。真空度の変化は実験装置の一部を加熱することで結果的に生じさせたものであり、一定の真空度であってもガス種が変化している可能性が高い。ガス種によりイオン化断面積と、イオンが NEA 状態を壊す確率等は異なるため、ビーム寿命への寄与は真空度のきれいな関数とはならない可能性がある。

5. まとめ

NEA GaAs フォトカソードのビーム寿命特性について、量子効率の測定結果を複数のモデルにより解析を行った。その結果、複数のモデルによる解析はほぼ同じ値を示すことがしめされた。また、以前の解析で見られたビーム寿命の明確な温度依存性は本解析では観測されなかった。また、ビーム寿命は真空度に対しても、明確な依存性を示していない。今後、実験条件の精密な制御を通じて、ビーム寿命特性の理解を深めていく。

参考文献

- [1] M. Kuriki, C. Shonaka, etc; Nucl. Inst. Meth A 637 (2010) S87-S90;
- [2] 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;
- [3] “Design Study of Compact ERL”, KEK Report 2007-7, 2007;
- [4] 栗木雅夫, “粒子源の設計と現状” OH0’ 06