

THERMAL DEGRADATION STUDY OF THE NEA-GaAs SURFACE AT HIGH TEMPERATURE

Hokuto Iijima¹, Masao Kuriki, Daisuke Kubo, Yuki Masumoto
Graduate School of Advanced Science of Matter, Hiroshima University,
1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8530

Abstract

We report that a thermal property of GaAs photocathode activated the surface to negative electron affinity (NEA) at various temperatures. An electron source with the NEA-GaAs photocathode is an important device for high-average-current electron accelerators, such as a next-generation light source based on an energy recovery linac, in which a high power laser is illuminated to the photocathode for generation of the electron beam of 100mA. Consequently the high power laser causes to rise the GaAs temperature. The achievable temperature estimated by numerical calculations is 72 °C for the laser power of 7.5W. We have measured the cathode lifetime at various temperatures to evaluate the thermal property of the NEA surface. The degradation of photo emission from the cathode is enhanced by a thermal desorption of Cs/O adlayer due to the temperature rise, even if the beam is not extracted.

高温下におけるNEA-GaAs表面劣化の研究

1. はじめに

真空準位が伝導帯の準位よりも低い状態である負電子親和力 (NEA) 表面を持つGaAsは、入射レーザーの波長をGaAsのバンドギャップに合わせることでエミッタンスの小さいビームの引出しが可能である。このため、電子源として開発研究が精力的に行われている。エネルギー回収型線形加速器 (ERL) を利用した次世代放射光源では100mAの大電流と0.1mm-mradの低エミッタンス電子ビームが要求されているが、こうした性能の電子ビームを実現するためにNEA-GaAsカソードを用いたDC電子銃の研究開発が進められている^[1,2]。

NEA表面はセシウム (Cs) と酸素 (O₂) を交互に蒸着する、いわゆるyo-yo法で作成される。Yo-yo法直後のカソードの量子効率 (QE) は、波長633nmの光に対して10%程度を実現している。表面をNEA化したカソードのQEは、時間とともに、またビームを引出すことによって劣化していく。これは、残留ガスの吸着、引出したビームが残留ガスをイオン化し、これがカソード表面をたたくion back-bombardmentが原因と考えられる。次世代放射光源での運用では当然ながら、適当な運転時間が求められる。1日程度で急激な量子効率の劣化があるようでは望ましくない。残留ガスの吸着やion back-bombardmentによるQEの劣化は10⁻¹⁰Pa台の極高真空を達成することで抑制され、必要なカソード寿命を得られると考える。こうしたことから開発中の電子銃は主要部にガス放出係数の小さいチタン(Ti)を使用し、複数のNEGポンプをカソード近傍に設置するなどの工夫がなされている。

真空度による寿命への影響はかなり考察されている一方、カソードの温度上昇に伴う量子効率の劣化

に関してはあまり研究がなされていない。例えば、QE 1%を仮定して100mAを実現するためには波長800nmのレーザーで15Wのパワーが必要となる^[1]が、こうした高出力のレーザーを照射すると、カソード表面の温度が上昇する。このためNEA表面を形成しているCs/Oが熱脱離し、結果カソードの寿命が短くなると考えられる。

こうしたことから、温度上昇による熱脱離の、寿命に対する効果を定量的に調べることは重要である。今回我々は、CST Studioによるカソード温度上昇の計算と、カソード寿命の温度依存性の測定を行った。

2. 温度分布と上昇の計算

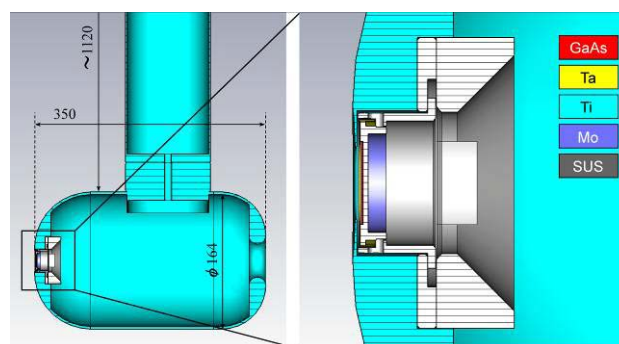


図1：計算に用いた電極形状の断面図 (左) とカソード付近の拡大図 (右)。

これまでレーザーパワーによるカソードの温度上昇は電極形状を簡単なモデルに置き換えて計算してきた^[3]が、この計算はカソードの温度上昇のみの計

¹ E-mail: hokuto@hiroshima-u.ac.jp

算で電極全体の温度分布は解らなかった。また実際の形状は複雑であるため、熱伝導の悪さからより温度上昇が起こる可能性がある。そこで熱伝導方程式を数値計算するCST Studioを用いて、実際の形状に対する温度上昇と、定常状態における温度分布の計算を行った。

計算には日本原子力研究開発機構（JAEA）で開発が進められている500kV電子銃の形状を用いた^[2]。図1は計算に用いたJAEA500kV電子銃の電極形状の断面図である。この電極はTi製でφ164、長さ350mmの円筒形状をしている。電極はセラミック管中心を通る、φ102、長さ約1mのTi製ロッドにより高電圧を絶縁するためのSF6タンクから吊り下げられている。電極内にはカソードをマウントするパックおよびこれを固定するホルダー等が設置されている。温度分布の計算では、これらの形状と材質ごとの熱伝導率を考慮した。ただし各材質が接している箇所の接触熱抵抗の効果は考慮していない。計算に用いた熱伝導率の値は表1にまとめる。

表1：計算に用いた各材質の熱伝導率。

	GaAs	Mo	Ti	SUS	Ta
使用箇所	カソード	カソードパック	電極ロッド	ホルダー	キャップ
熱伝導率 [W/Km]	55	138	17.1	16.7	57.5

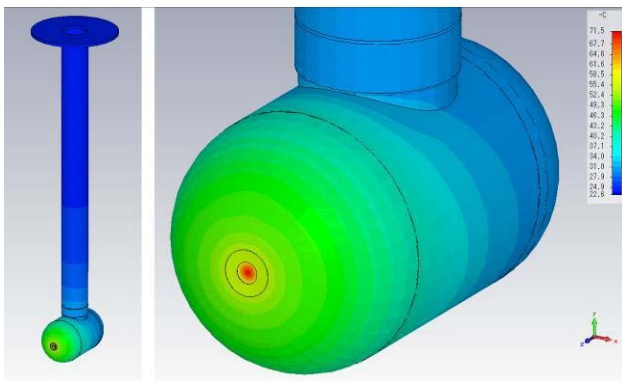


図2：パワー7.5W、放射率0.5の時のカソード温度と温度分布の計算結果。カソード中心の温度は72℃。

電極とロッドは超高真空中に収納されているので表面からの熱伝達は起こり得ないが熱放射の効果は考慮した。計算では電極形状を含む有限の空間を設定するが、この境界での温度は室温（23℃）を仮定した。熱放射は電極表面の温度とこの境界上での温度の差で決まる。表面からの熱放射を計算する際は、その放射率が必要となる。一般に酸化面の放射率は高くなり、表面をよく磨いた材質の放射率は低くなる傾向がある。電極やこれを支えるロッドは高電圧印加時の放電を抑制するため表面を研磨している。このため放射率は低いと考えられるが、実際の値はよく解らない。そこで今回の計算では放射率を変化させて計算した。

図2は電極表面の放射率を0.5、レーザーパワーの半分がGaAs表面で反射し、7.5Wが熱に変わるとしたときの温度分布を示す。レーザーはカソード中心φ2の範囲に照射されるものとした。電極付近での熱放射の効果が大きく、ロッドの上端ではほぼ室温となっているが、構成している材質の熱伝導率が悪く、カソード表面の温度は72℃に達している。パワーがそれぞれ7.5、10W時のカソード表面の到達温度の放射率依存性を図3に示す。仮に表面の放射率が1だったとしてもカソードの温度は64℃に達する。

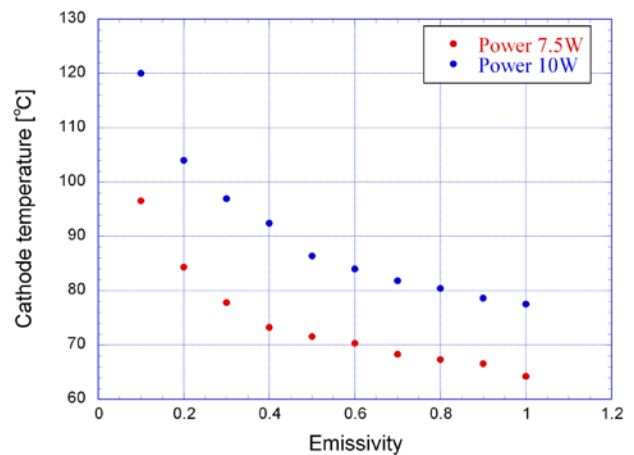


図3：電極表面の放射率に対するカソード到達温度。赤点はパワーを7.5W、青点は10Wとした時の結果。

3. 高温下におけるカソード寿命

3.1 寿命測定

温度上昇の計算結果を踏まえ、高温下におけるカソードの寿命測定を広島大学の装置^[3,4]を用いて行った。GaAsはMoブロックにマウントされ、間にはインジウムを挟んでいる。これをTaキャップで押さえ、全体はSUSの電極に囲まれている。Moブロックの背後には加熱洗浄用のカートリッジヒーターが設置され、寿命測定時の温度はこのヒーターによって調節した。また、カソード温度はMoブロックの内側に設置した熱電対によってモニターしている。レーザーの照射は10分毎に1秒程度に抑え、その時の電流量からQEを測定した。

図4はカソード温度22.8、58.6、71.9、84.5、97.1℃での寿命曲線の測定結果である。測定中の真空度は $(5.5 \pm 0.2) \times 10^{-9}$ Paでそれぞれの温度の揺らぎは±0.7度であった。カソード温度が揺らぐ主な要因は環境温度の変化によるものである。

室温（22.8度）のQEは指数関数的に劣化し、その寿命は203時間であった。この結果は以前に行った測定^[3,4]とほぼ同じである。カソード温度が高い（58.6℃以上）の寿命は明らかに室温の時の寿命よりも短く、QEは指数関数的に劣化していないのが

わかる。第2章で述べた計算結果から得られた温度上昇(72°C)での寿命(測定の71.9°C)は20時間でQEが1%まで劣化している。

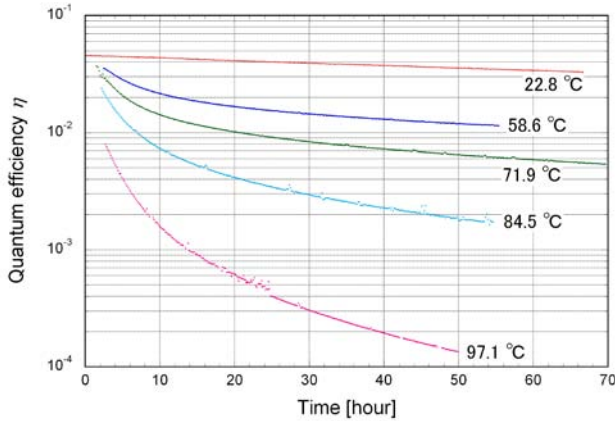


図4：各カソード温度における寿命曲線。

3.2 解析

高温でのQEの劣化は、CsやOの熱脱離による効果が大きいと考えられる。この場合の寿命曲線をPolanyi-Wignerの式を用いて以下のように解析した。Polanyi-Wignerの式

$$\frac{d\theta}{dt} = -\nu_n \theta^n e^{-\frac{E_a}{RT}} = -k_n \theta^n \quad (1)$$

は表面被覆率 θ の時間変化を、活性化エネルギー E_a 、表面温度 T と化学反応の次数 n の関数として表している(ν は頻度因子)。QEが表面被覆率に比例すると仮定すると、QEの時間変化を表す式は

$$\eta(t) = \left\{ \eta_0^{1-n} - (1-n)\gamma^{1-n} k_n t \right\}^{1/(1-n)} \quad (2)$$

となる^[5]。ここで γ は θ の η に対する比例定数である。この式を用いて58.6°C以上の実験データにfitさせた。図5は71.9°Cの測定データ(赤点)に対する式(2)のfittingの結果(青波線)である。式(2)は実験データによく一致した。71.9°Cのfittingにおける χ^2 は 1.8×10^{-5} であった。また式(2)のfittingはいずれの温度のデータにたいしてもよく一致した。fittingの結果から得られた各温度での反応次数 n と χ^2 は表2にまとめる。

式(1)での反応次数が1より上であることは、CsがGaAs表面から単体では脱離せず、何らかの化合物として脱離している可能性を示唆する。一方反応次数は温度の上昇とともに線形に小さくなっている。このことがなぜ起こるのかその詳細は分かっていない。一つの可能性としてはGaAsに蒸着したCs-Cs間の相互作用の温度依存性が考えられる^[5-7]。

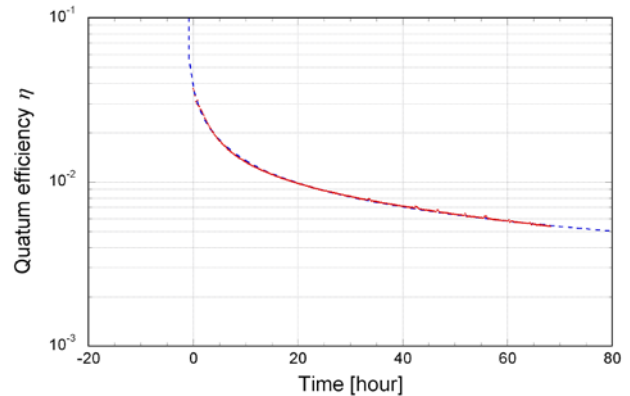


図5：カソード温度71.9度の測定結果(赤)と式(2)によるfittingの結果(青波線)。

表2：各温度のデータに対するfittingの結果

温度	反応次数 n	残差 χ^2
58.6 °C	3.7	6.4×10^{-6}
71.9 °C	3.0	1.8×10^{-5}
84.5 °C	2.1	1.9×10^{-6}
97.1 °C	1.6	2.3×10^{-7}

5. まとめ

CST Studioを用いてレーザー照射によるカソードと電極周りの温度上昇を計算した。ERLの目標である100mAの電流を引出すには15Wのレーザーパワーが必要であるが、この時のカソード温度は72°Cに達した。広島大学の測定装置を用いてこの温度に対するカソードの寿命を測定し、量子効率が20時間で1%まで下がることを確認した。ERLの運転を考えた場合、あまりにも短い寿命であるといえる。このため何らかのカソード冷却機構を考える必要がある。

また、高温下における寿命は指数関数的に劣化しなかった。この振る舞いはCs/Oの熱脱離の反応次数が高次(1次以上)であると考えたと説明ができそうである。このことはCsがカソードから脱離するとき何らかの化合物となって脱離することを示唆する。

参考文献

- [1] KEK Report No. 2007-7/JAEA Research 2008-032 (2008), edited by R. Hajima, N. Nakamura, S. Sakanaka, and Y. Kobayashi.
- [2] R. Nagai, et al., Rev. Sci. Instrum., 81, 033304 (2010).
- [3] C. Shonaka, et al., Proc. of Particle Accelerator Conf. (PAC'09), MO6RFP069, 2009.
- [4] M. Kuriki, et al., Nucl. Instrum. Meth. A, (in press).
- [5] H. Iijima, et al., Proc. of International Particle Accelerator Conf. (IPAC 2010), TUPE086, 2010.
- [6] J. Topping, Proc. Roy. Soc. London Ser. A, 114, 67(1927).
- [7] A. R. Miller, Math. Proc. Cambridge Philosophical Soc., 42, 292(1946).