

高耐久 NEA フォトカソードの研究

A STUDY ON ROBUST NEA PHTOCATHODE

内田和秀[#], 栗木雅夫, 清宮裕史

Kazuhide Uchida [#], Masao Kuriki, Yuji Seimiya

Hiroshima University / Advanced Science of Matter, Higashi-Hiroshima Japan

Abstract

Electron source is one of the most important components in the advanced linac based application such as linear colliders, next generation light sources like Free Electron Laser (FEL) and Energy Recovery Linac (ERL). They require polarized and very low emittance electron beam as the electron source. In general, there are strong demands on the high performance cathode giving high polarization, high brightness (high current density and low emittance), and short pulse. NEA (Negative Electron Affinity)-GaAs photocathode is a unique technology which is capable for generating high polarized and extremely low emittance beam. Quantum efficiency of the cathode is high even in near IR region, so it is favor to generate a beam with the high current density from this point of view. These advantages are originated from the NEA surface where the vacuum state is lower than the bottom of the conduction band. On the other hand, the NEA surface is easily damaged, and the extractable current density is limited from this fact. To overcome this disadvantage, a robust NEA surface on GaAs cathode as a replacement of the current Cs-O NEA surface is studied. According to the hetero-junction hypothesis, Cs-Te thin film deposited on GaAs surface forms the NEA surface state. We performed the Cs-Te evaporation experiment on a clean GaAs and photo-electron emission was examined in a wide range of wavelength. We succeeded the activation of GaAs with the Cs-Te evaporation and found a high quantum efficiency up to 900 nm wavelength which strongly suggested a NEA surface formation.

1. はじめに

NEA-GaAs フォトカソードは、高い量子効率、高偏極電子ビーム生成、低エミッタンスビーム生成等の特徴を持っているため様々な加速器で用いられている。これらの特徴はNEAという表面のために得られる。NEAとは、電子親和力が負の状態 (Negative Electron Affinity) のことであり、電子親和力は半導体の場合、伝導帯の底と真空準位との差で定義される。これまでの研究で NEA-GaAs 表面は Cs 熱脱離 [1]、残留ガス吸着 [2]、イオンバックボンバードメント [3] の効果により容易に表面が劣化することがわかっている。これらの効果により ERL や FEL 等の次世代放射光源での大電流利用を考えた場合、運転時間を十分に確保できない等の実用上の問題を生じる。これまでの研究によりある程度の長寿命化は得られるものの、次世代放射光源での利用に十分なほどの改善はなされていない。そこで NEA-GaAs の高耐久化のために通常の NEA 活性化で使用される Cs-O の代替手法により、NEA カソードの作成を検討した。GaAs 表面へ NEA 状態を作るには通常 Cs を蒸着し、その後、酸素またはフッ化水素の暴露を行う。Cs 蒸着と酸素暴露を繰り返すことにより量子効率が徐々に上昇してゆき、最終的に GaAs バンドギャップ付近で数%程度の量子効率を得られる。

一方、ヘテロ接合モデル [4] によると、下記で説明するように、適切な準位構造をもった薄膜材料を p 型 GaAs 表面に薄膜形成することで、NEA 状態を得ることができる。GaAs 表面に異種半導体を成長さ

せた順位を Figure 1 に示す。

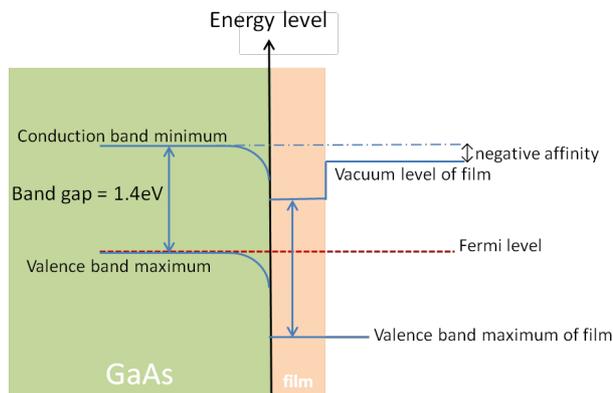


Figure 1: NEA-surface energy diagram. Horizontal axis is right direction to the GaAs cathode surface; GaAs is left side, hetero-semiconductor is in center and right side is vacuum. Vertical axis means energy.

半導体の表面に別の種類の半導体を作成すると、熱平衡になるように電子の分布が決定される。つまりバルクと薄膜でフェルミ準位が一致し、価電子帯と伝導帯の相対位置はその位置を基準として決まる。そのため Figure 1 に示したように適切なバンド構造を持つ半導体を選ぶことができれば NEA 状態を得ることができる。接合する半導体が安定であれば、高耐久かつ NEA 状態を持つフォトカソードが実現できると考えられる。

ヘテロ接合モデルをもとに高耐久 NEA フォトカソードを探す場合、接合する半導体のバンド構造と

[#] uchidakaz@gmail.com

耐久性を知る必要があるが、薄膜の場合バルクと性質が異なることや、成長方法によっても構造が変化することから、理論的に予測することは難しい。そこで、過去の研究から候補物質を選定する。選定した物質に対し、もっとも電子源性能のよい成膜条件を探してゆく。

2011年の杉山氏らの報告[5]によると GaAs 表面に CsTe を蒸着した場合 NEA 状態が得られている可能性が指摘されている。また、CsTe 半導体自体は比較的高耐久な半導体フォトカソードとして知られており、様々な加速器で使われている。これらの事実から我々は CsTe 薄膜を使ったフォトカソードが高耐久 NEA 表面を作る可能性があると考え、実際にいくつかの成膜条件で CsTe 薄膜を作成し、フォトカソードの性能を評価した。

2. 実験方法と実験装置

実験装置の構成と機能について説明する。

実験装置は一つの真空容器があり、真空ポンプ、蒸着源、GaAs 試料等が設置される。真空容器の断面図を Figure 2 に示す。

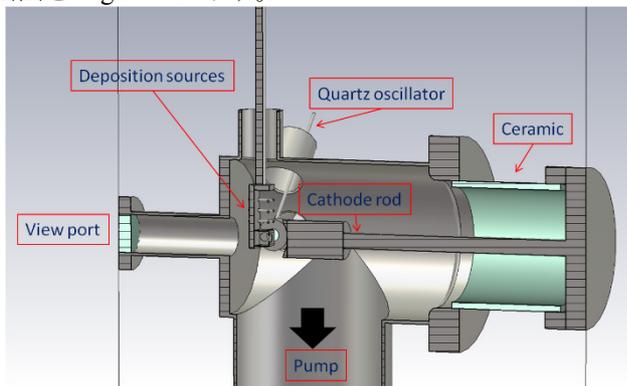


Figure 2: Cross sectional view of the vacuum chamber where the experiment was carried out.

真空容器は SUS 製で容器下にイオンポンプ(160 l/s)と NEG ポンプ(310 l/s)が取り付けられている。ベース真空度はおよそ $2e-8$ Pa であった。真空容器の背面にはセラミックで絶縁されたカソードロッドが取り付けられている。ロッドの先端には Mo 製の円筒ブロックが付いており、この上に GaAs ウエハー ($Zn\ 5e+19/cm^3$ doped, surface index (100))を取り付ける。Mo ブロック内部にはカートリッジヒーターと熱電対が埋め込まれており、GaAs の加熱と温度の計測に使用する。正面と側面にはビューポートが取り付けられており、このビューポートを通して GaAs へ光を入射する。真空容器上部は Cs とテルルの蒸着源があり、蒸着源の先端には SUS 製のプレートが取り付けられている。プレート上に Cs ディスペンサー (SAES Getters Co.)と Te 小片が入ったタングステンバスケットが設置されている。Figure 3 に蒸着源の写真を示す。蒸着源は z ステージ上に設置され上下に移動できる。蒸着時には GaAs 正面まで下げて、寿

命測定時には上げる。Cs と Te の蒸気は正面と横方向に出ており、GaAs 上への成膜と同時に水晶振動子により膜厚を計測行う。光源は Xe ランプからの光を回折格子型の分光器で分光したものをを用いる。光源のパワーは実験前に Si ダイオードを用いて測定した。スポットの形状は正確な測定は行っていないが、600nm の波長において一边数ミリの長方形をしており、カソード径に比べて十分に小さく、光はすべてカソード面に照射されている。分光の際に発生する高次光の影響を防ぐため、フィルタ(SCF 52Y,シグマ光機)により 500nm 以下の光を遮断した。

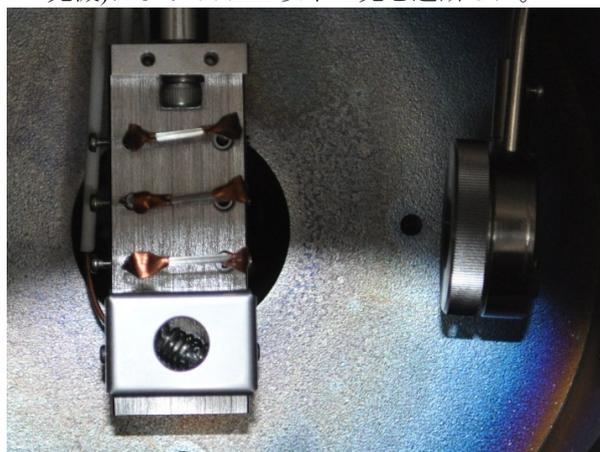


Figure 3: Cs and Te evaporation head is shown in the left. The round object in the right is the quartz oscillator for thickness monitoring. This three silver wires are Cs dispenser and the spiral wire is the tungsten basket contain Te beads.

実験方法について説明する。最初に清浄表面を得るために、GaAs 表面を $480^{\circ}C$ で数時間の加熱洗浄を行う。つづいて CsTe の成膜を行う。加熱洗浄と成膜は一つの GaAs 試料に対して繰り返し複数回行った。成膜したサンプルは 6 つあり、それぞれの成膜条件を以下の表 1 に示す。

Table 1: Parameters of Cs-Te Deposition

サンプル	基板温度 ℃	Te 膜厚 Å	Cs 膜厚 Å
A	25	9	225
B	120	9	205
C	120+25	9	205+8
D	110	76	198
E	110+25	76	198+176
F	25	6	255

サンプル C と E はサンプル B と D の成膜後に基盤を室温まで冷却し、Cs を追加蒸着している。成膜はサンプル A~C まで同一の基板で行い、基板を交換の後、サンプル D~F を同一の基板で行った。実験の時系列は記述の順番で行っている。基板交換時に、Cs、Te 蒸着源も交換している。

3. 活性化試験

6つのサンプルのうち、DとE以外では光電子を観測することができ、カソードとしての活性がみられた。サンプルD、サンプルEでは、300 nm以上の波長では観測することができなかった。

光電子が観測されたA、B、C、Fの4つのサンプルについて活性化直後の量子効率を、波長の関数として測定した結果（以下、量子効率スペクトル）をfigure3に示す。

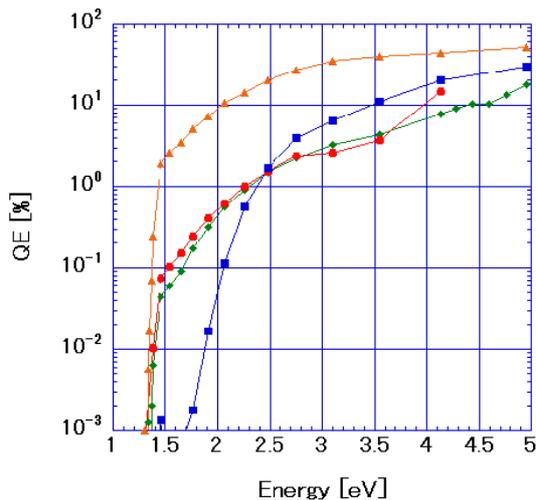


Figure 3: QE spectrum right after the NEA activation. Green diamond is sample A, Blue square is sample B, Orange triangle is sample C, and Red circle is sample F.

Csの追加蒸着も含め、室温基板上への成膜(サンプルA、C、F)においては、6-9ÅのTe膜厚に対して、およそ200ÅのCsを蒸着することにより、1.4eVのバンドギャップ付近で、鋭くQEが立ち上がるスペクトルがえられた。このことから、これらのサンプルにおいては、表面がNEA状態になっていることが期待される。また、サンプルAとサンプルFのスペクトルは良い一致を示しており、近い条件で作成したサンプルのQEスペクトルはおおよそ一致しており、成膜の再現性を確認することができた。

120°Cでのみ蒸着をおこなったサンプルBでは、1.8eV付近で量子効率が立ち上がっており、明らかにGaAsのバンドギャップエネルギーよりも大きく、NEA状態にはないと考えられる。一方で、高エネルギー側では室温成膜よりも量子効率は高いという結果が得られた。

サンプルCは、サンプルB(基板温度120°Cでの成膜)を数日真空槽に放置し、劣化した表面へ8ÅのCsを再蒸着したものである。サンプルBとサンプルCを比較することにより、室温でのCs蒸着により、大幅な量子効率の回復が得られたことがわかる。サンプルCはGaAsバンドギャップ付近で2%程度の高い量子効率を示しており、強くNEA状態を示唆している。

4. 寿命測定

サンプルFについて、量子効率のスペクトルを数時間おきに測定することにより、各波長における量子効率の時間的変化を測定した。各時間での量子効率スペクトルをFigure 4へ示す。

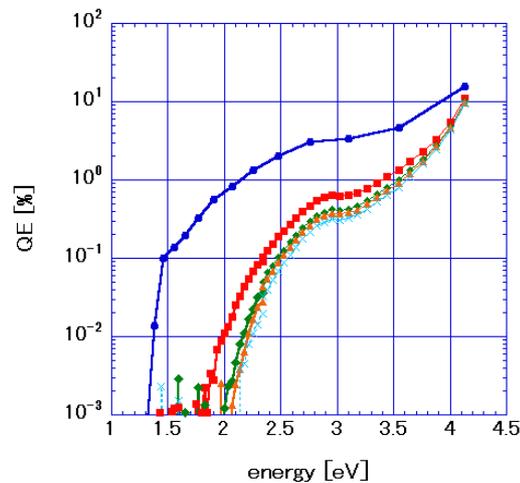


Figure 4: sample F QE spectrum time degradation. Blue circle is initial QE spectrum. Red square is spectrum after 15-18 hours. Green diamond is after 66 hours. Orange triangle is after 87 hours. Sky blue cross is after 118 hours

成膜後15時間経過した時点(青丸)で、QEの立ち上がりが1.4 eV近傍から1.8 eVへ上昇しており、PEA(Positive Electron Affinity, すなわち真空準位のほうが物質内部の伝導帯よりも高い状態)になっていることがわかる。

サンプルCについて各時間での量子効率をFigure 5に示す。成膜後28時間で量子効率の立ち上がりが1.7 eVまで上昇しており、PEAの状態になっていることがわかる。

サンプル C は 300 nm の波長に対して 600 時間という長い寿命が得られた。

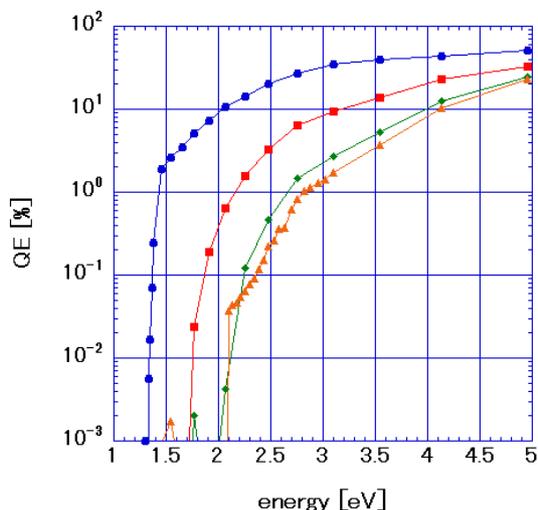


Figure 5: sample C QE spectrum degradation. Blue circle is initial QE spectrum. Red square is after 28 hours. Green diamond is after 50 hours. Orange triangle is after 72 hours

サンプル C と F の 30 時間以降の量子効率の減衰を指数関数でフィッティングし、各波長で 1/e となる時間を求めた。その結果を Figure 6 へ示す。

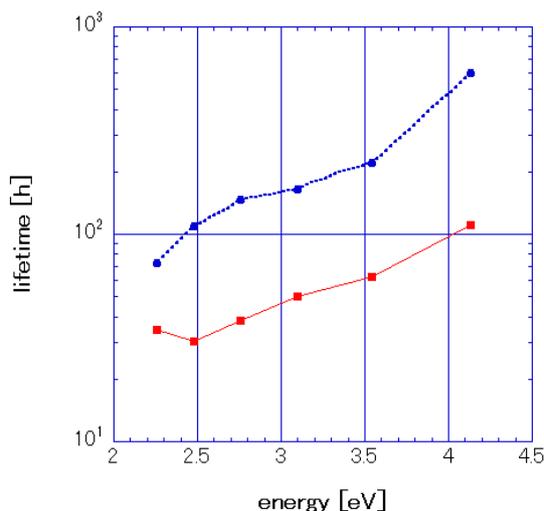


Figure 6: 1/e lifetime. Blue circle is sample F lifetime. Red square is sample C lifetime.

C と F とでは両方でエネルギーの増加に伴って寿命が延びることが確認できた。どのエネルギーに対しても室温で成膜を行ったサンプル F のほうが寿命が長いことがわかる。この結果から、室温で成膜を行ったサンプル F のほうが耐久性は高いといえる。

5. まとめ

半導体のヘテロ接合モデルをもとに NEA-GaAs 半導体フォトカソードの作成を行った。接合する半導体には比較的耐久の高い半導体フォトカソードとして知られている Cs-Te を用いて、基板温度を室温にした場合と 120°C にした場合での成膜を行い、それぞれの量子効率のスペクトルを測定した。室温基板上へ数 Å 程度の Te と 200 Å 程度の Cs を蒸着したサンプルにおいては、GaAs のバンドギャップ相当の波長で QE の立ち上がりがみられ、NEA 表面の生成を示唆する結果が得られた。IR 領域での耐久性については、これまでの成膜方法では、従来の Cs-O GaAs NEA カソードに比べて、大きな改善は見られなかった。今後は、高い耐久性の実現のため、Te 膜厚や蒸着温度など、系統的な蒸着条件依存性について、探っていく。

謝辞

この研究は部分的に科学研究費（挑戦的萌芽 24654054）および高エネルギー加速器研究機構、大学等連携支援事業の支援により行われた。

参考文献

- [1] M.Kuriki et al, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A 637 (2011) S87-S90.
- [2] N.Chanlek et al. J. Phys. 47 (2014) 055110.
- [3] J.Grames et al, "ION BACK-BOMBARDMENT OF GAAS PHOTOCATHODE INSIDE DC HIGH VOLTAGE ELECTRON GUNS" PAC05, WPAP045, p.2875-2877(2005).
- [4] H.Sonnenberg, Appl. Phys. Lett. 14, 289, (1969).
- [5] H.Sugiyama et al, J. Phys.: Conf. Series 298 (2011) 012014.