

CsTe 薄膜による GaAs フォトカソード NEA 活性化の研究

STUDY FOR ACTIVATION OF NEA-GaAs PHOTO-CATHODE WITH CsTe THIN FILM

根岸健太郎 *A)、内田和秀 A)、栗木雅夫 A)

Kentaro Negishi*^{A)}, Kazuhide Uchida^{A)}, Masao Kuriki^{A)}

^{A)}Hiroshima University / Advanced Science of Matter, Higashi-Hiroshima Japan

Abstract

NEA-GaAs photo-cathode can generate highly spin polarized electron and high current beam. On the other hand, NEA-GaAs has a vulnerability issue. In this study, we evaporated CsTe semi-conductor thin film on GaAs surface and obtained a result which suggest NEA surface on GaAs wafer. This could be another technique for the NEA activation with Cs-O/F.

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が可能であり、これらの特徴のため様々な加速器で利用が広がる事が期待される。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、伝導帯の束縛エネルギーの最小値と真空準位の差で定義される。また NEA-GaAs 表面は Cs の熱脱離 [1]、残留ガス吸着 [2]、イオンバックボンバードメント [3] などの効果により、フォトカソードとしての性能が劣化することが解っている。これにより次世代放射光源 (ERL, FEL 等) 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可能性がある。これまでの研究からある程度の長寿命化の見通しが得られたものの、まだ次世代放射光源での利用に十分であるとは言えない。そこで本研究は、NEA-GaAs の高耐久化のために、従来の Cs-O による GaAs 表面修飾で NEA 活性化手法に替え、CsTe を使用し、高耐久 NEA 表面を得ることを目的とした。

Cs-O による GaAs 表面修飾による NEA 活性化手法は、GaAs に Cs を蒸着し、その後、酸素もしく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で量子効率が徐々に上昇し、最終的に GaAs バンドギャップ付近 (~1.4 eV) で 0.5 – 1.5 % 程度の量子効率を得る。これに対し、他にも適切な準位構造をもった薄膜半導体を、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と示唆されている。GaAs 表面に異種半導体で表面修飾した場合のエネルギー順位を Figure. 1 に示す。

半導体表面に別種の半導体を接合すると、両半導体間で熱平衡になるように電子の分布が決定される。つまり両半導体間でフェルミ準位が一致し、価電子帯と伝導帯の相対位置が、フェルミ準位を基準として決定される。そのため、適切なバンド構造を持つ半導体を選ぶことによって、NEA 状態を得ることができると考えられる。この時、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

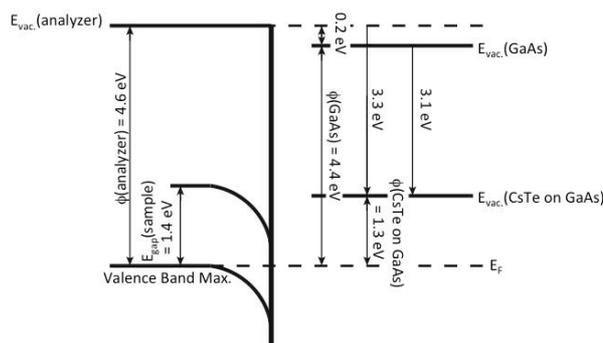


Figure 1: Energy states.

られる。

以上のヘテロ接合モデル [4] をもとに高耐久 NEA フォトカソードを作成する場合、接合する半導体のバンド構造と耐久性を知る必要があるが、薄膜を蒸着することで接合を作成する場合、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、理論的に作成されたフォトカソードの性能を予測することは難しい。

また GaAs 表面に Cs-Te を蒸着した場合 NEA 状態が得られる可能性が指摘されている [5]。Cs₂Te 半導体は、比較的高耐久なフォトカソードとして知られており [6]、様々な加速器で使われている。これらの事実から、我々は GaAs 基板上 Cs₂Te 薄膜修飾によって、フォトカソードが高耐久 NEA 表面を作る可能性があるかと予想し、実際にいくつかの成膜条件で GaAs 基板上に Cs-Te 薄膜を作成し、作成フォトカソードの性能を評価した。 [7]

2. 実験方法

実験装置のセットアップについて説明する。実験装置は一つの真空容器があり、真空ポンプ、蒸着源、GaAs 基板、膜厚計が設置される。真空容器内の略図を Figure 2 に示す。

真空容器は SUS 製で、容器下方にイオンポンプ (0.16 m³/s) と NEG ポンプ (0.31 m³/s) が取り付けられている。ベース真空度は 1 × 10⁻⁸ Pa 程度であった。

*knegishi@hiroshima-u.ac.jp

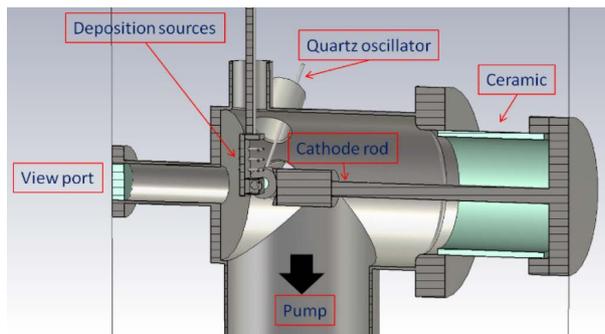


Figure 2: Cross sectional view of the vacuum chamber where the experiment was carried out.

真空容器の背面にカソードロッドが取り付けられ、ロッドと真空容器とはセラミック管で絶縁されている。ロッドの先端に Mo 製の円筒が付いており、この上に GaAs 基板 ($Zn\ 5 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ ドープ, (100) 表面) を取り付ける。カソードからの電子放出量はカソードに流れる電流量として測定する。Mo 円筒の内部には加熱洗浄用のカートリッジヒーターと基板温度測定用の熱電対が取り付けられている。

側面に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 基板へ光を入射する。真空容器上部に Cs と Te の蒸着源が設置されたロッドが導入されており、先端の SUS 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 W バスケットが設置されている。蒸着源ロッドは可動ステージ上に設置され、蒸着時には GaAs 基板正面まで下げて、寿命測定時には正面ビューポートから導入する光との干渉を防ぐため、ロッドを上げる。Cs と Te の蒸気は基板正面と 90° 横方向に出ており、GaAs 基板上への成膜と同時に水晶振動子を使用し、膜厚計測も行う。

次に実験方法について説明する。最初に清浄表面を得るため、GaAs 表面を $\sim 480^\circ\text{C}$ で数時間の加熱洗浄を行う。続いて Cs-Te の成膜を行う。成膜後の加熱洗浄で清浄表面が得られると仮定し、成膜は一つの GaAs 試料に対して繰り返し複数回行った。Cs 蒸着時に Xe ランプの光を回折格子型分光器で分光した光を導入し、GaAs 基板にバイアス (-100 V) をかけ、光電流を測定することで、成膜と同時に QE 測定を行う。500 nm 以上の波長の長い光を導入する場合、分光の際の高次光の影響を防ぐため、フィルタ (SCF 52Y, シグマ光機) を使い、500 nm 以下の光は遮断した。導入した光は、典型的には波長幅 $\sim 7\text{ nm}$ 、スポットサイズ $\sim 4\text{ mm}^2$ の矩形、パワー $\sim 10\ \mu\text{W}$ 程度。Cs 蒸着は膜厚に対する、波長 350 nm を用いて測定した QE 飽和を観測した点を QE 最大値であると仮定し、その時点で蒸着を終了する。

3. 結果

3.1 蒸着条件

Figure 3 に Te 厚と Cs 厚の関係性を示した。Te 蒸着厚の関数として、Cs 蒸着時に QE 最大値になる Cs 蒸着厚との関係性を観測した。ここに 1 次の相関が見て取れる。このことから、GaAs 基板上に Cs-Te の何らかの化合物が生成されていることを示していると考えられる。

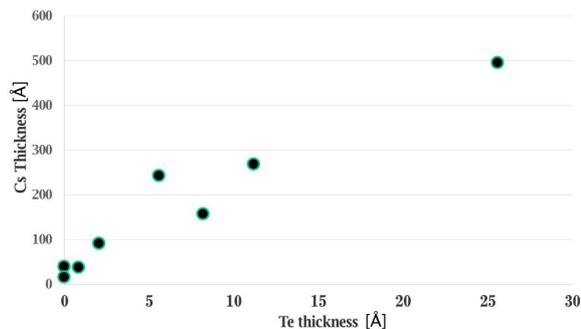


Figure 3: The relation of Cs thickness and Te thickness in the experiment. These data are in linear relation.

3.2 性能評価

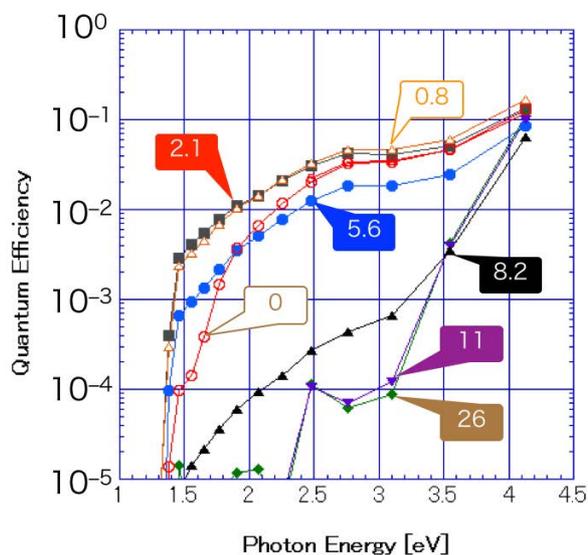


Figure 4: QE spectrum of CsTe-GaAs for various thickness conditions as shown in the legend. The first digit is Te thickness in Angstrom.

Figure 4 に様々な Te 厚により活性化したカソードの QE スペクトルを示した。Te 厚はオングストロームで表示した。薄い Te 厚 (0.8, 2.1, 5.6 Å) QE スペクトルでは、GaAs のバンドギャップ相当である 1.4 eV まで低エネルギー領域に伸びている。(8.2, 11, 26 Å) の Te 厚では低エネルギー領域で大きな QE の減少を観測した。Te 蒸着していない (Te 蒸着厚が 0 Å) QE スペクトルでは薄く Te 蒸着したスペクトルと同様であるが、低エネルギー領域での QE 振る舞いが異なっている。薄い Te 厚のサンプルで、GaAs バンドギャップ程度のエネルギーの光によって光電効果を観測していることから、この結果は Cs-Te による NEA 活性化が現実していることを示唆している。また、 Cs_2Te の仕事関数相当である 3.5 eV より高エネルギー領域で高い QE を観測している。このことは、基板表面に Cs_2Te 薄膜が生成され、フォトカソードとして機能していることを示唆している。

Figure 5 に Te 厚と QE の関係性を示した。QE は様々な波長の光で測定している。300 nm 波長での QE 測定は Te 厚とはほぼ独立であることが解る。一方、その他の

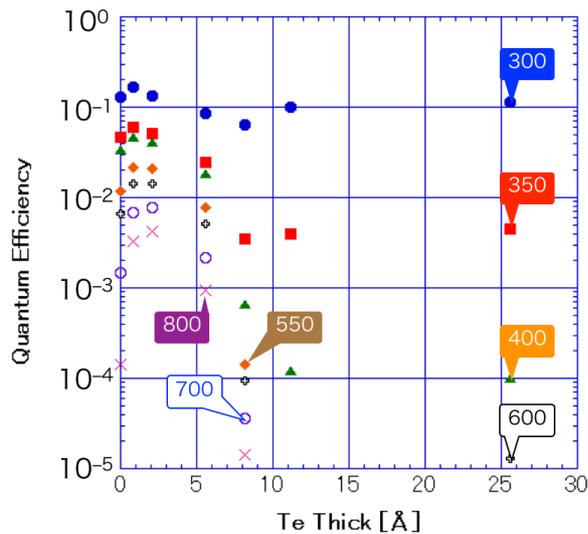


Figure 5: QE as a function of Te thickness in Angstrom. The data for different wavelength in nm are shown.

波長では Te 厚との依存性が見て取れる。Te 厚 5 – 10 Å にかけて急な QE 変化が観測できる。これは、表面 Te 厚 < 5 Å 領域では NEA-GaAs カソードとして機能するが、表面 Te 厚 > 10 Å 領域では表面の Cs₂Te により減衰されている、と説明できる。同様に、Te 厚 > 10 Å の場合、350 nm 以上の波長で Cs₂Te カソードが QE ~ 0 である事が解る。

これらの測定から、この実験で GaAs 基板上に Cs₂Te (もしくはそれ以外の Cs-Te 化合物) が生成され、実効的な仕事関数を低下させ、GaAs 表面に NEA 活性を現実化する事ができたと思われる。Te 厚の薄さに関し、物理的な解釈は難しい。GaAs 上の厚さと膜厚計の測定値は吸着率の違いによって異なるので、実際の厚さが異なっている可能性がある。膜厚計の測定値を正しいと仮定すると、Te 原子の半径は 1.4 Å なので、表面修飾層の厚さは非常に薄い。Te 厚 < 5.6 Å で GaAs バンドギャップ付近で有限の QE が観測されるが、Te 厚 0.8 Å とは表面に単原子分の被覆に足りていないと解釈できる。しかし、Fig. 4, Fig. 5 から Te 厚 > 10 Å の場合、低エネルギー領域で QE ~ 0 である事が解る。ここから、Te 厚 > 10 Å で 1.4 eV の光を十分吸収もしくは反射させてしまう、または電子脱出長により、表面 Cs₂Te 層を通過できない事が考えられる。

3.3 寿命測定

Figure 6 に QE のスペクトルの時間発展を示した。サンプルは Te 厚 5.6 Å のものである。QE スペクトルは蒸着直後 (0 時間後)、15, 66, 87, 120 時間後で取得した。寿命は QE が 1/e になる時間と定義し、2.0 eV の励起光で ~ 100 時間、3.5 eV の光で ~ 1000 時間となった。これは一般的な Cs-O によって NEA 活性された GaAs カソードの寿命と比較し、特別に長くはない。また、寿命は真空度やガスの種類に強く依存するので^[8]、この観点から、理想的な実験環境ではなかったと言える。定量的な比較を行うために、真空の状況をより厳密に制御す

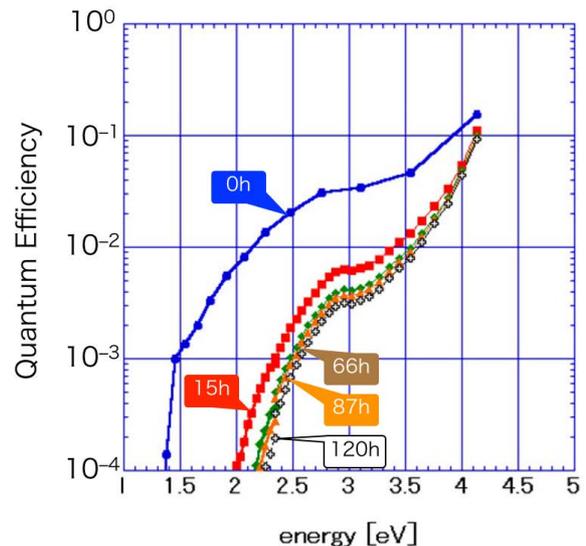


Figure 6: QE spectra temporal evolution is shown. QE (5.6 Te thickness) was measured as a function of photon energy in several times. Each spectra shown with the solid circle, square, diamond, triangle, and open cross were taken at 0 hour, 15 hours, 66 hours, 87 hours, and 120 hours after the activation, respectively.

る必要がある。

4. まとめ

Cs₂Te 薄膜を有する GaAs の NEA 活性化を実験的に検討した。洗浄した GaAs 表面上に Te と Cs を吸着させた。最大 QE を与える Cs-Te 厚の比率は様々な Te 厚でほぼ一定だった。この結果は、Cs-Te の化合物が GaAs の上に形成したことを示唆している。Cs-Te により活性化された GaAs 表面で、GaAs バンドギャップ付近に有限の QE が観測された事から、NEA 表面が形成されたことが強く示唆される。CsTe-GaAs は 3.5 eV 以上の高エネルギーの光には CsTe カソードとして、2.5 eV 以下の低エネルギーの光には NEA-GaAs カソードとして働くことが解った。Cs-Te 厚によって低エネルギー領域 QE が減少することから、光が表面で強く吸収または反射されている可能性を示唆する。もし、GaAs 表面に NEA を作る透明な層を開発できれば、強固な NEA-GaAs カソードを作成できる可能性が有る。

参考文献

- [1] M. Kuriki et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **637**, S87 (2011), The International Workshop on Ultra-short Electron amp; Photon Beams: Techniques and Applications.
- [2] N. Chanlek et al., Journal of Physics D: Applied Physics **47**, 055110 (2014).
- [3] J. Grames et al., Ion back-bombardment of gaas photocathodes inside dc high voltage electron guns, 2005, Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee, PAC05, WPAP045.
- [4] H. Sonnenberg, Applied Physics Letters **14**, 289 (1969).

PASJ2015 WEP039

- [5] H. Sugiyama et al., Journal of Physics: Conference Series **298**, 012014 (2011).
- [6] R. A. Loch, High harmonic generation and ion acceleration with high-intensity laser pulses, Master's thesis, University of Twente, 2008.
- [7] K. Uchida, GaAs フォトカソードの CsTe 薄膜による NEA 活性化の研究, Master's thesis, Hiroshima University, 2015.
- [8] K. Uchida, 2013, Bachelor thesis, Hiroshima University.