

新博士紹介

氏名 松葉 俊哉* (原子力機構)
 論文提出大学 広島大学
 学位種類 博士 (理学)
 取得年月日 2012年3月23日
 題目 Investigation of initial emittance and temporal response of negative electron affinity GaAs-based photocathode DC gun (NEA GaAs ベースフォトカソード DC 電子銃のエミッタンスおよび時間応答性に関する研究)

1. はじめに

高エネルギー加速研究機構では、放射光研究施設の将来計画として Energy Recovery Linac (ERL) をベースとした次世代放射光源を検討している。ERL 放射光源の実現には多くの加速器技術の開発が不可欠であり、その技術開発や実証を目的とした試験加速器として小型の ERL (Compact ERL) が建設中である¹⁾。

ERL の実現に向けた開発要素の中でも、電子源は重要なものの一つである。電子源には大電流、低エミッタンス、そして時間構造を制御できることが要求される。それらを満たす電子源の候補として負の電子親和性 (NEA) 表面を持たせたガリウム砒素ベースの光陰極と DC 加速を組み合わせた電子銃が挙げられる。この電子銃では励起レーザーの波長やその光陰極の構造にエミッタンスや電子放出の時間的な応答が影響を受ける^{2,3)}。

博士課程においてはこれらの影響を明らかにするため、電子ビームの測定装置の開発やビームテストを行った。本記事ではそれらの結果を簡単に紹介する。

2. 実験のセットアップ

2.1 ビームライン

実験は電子ビームのエミッタンス測定⁴⁾と時間応答測定⁵⁾の二つからなっている。エミッタンス測定はウェストスキャン法で行っており、時間応答測定では偏向空洞法を使用している。偏向空洞は時間応答測定のために開発したものである。形状は直方体で、TM₁₂₀モードを用いてビームを掃引している。周波数は 2.6 GHz

であり 100 kv のビームに最大 ± 10 mrad 程度の蹴りを与える⁵⁾。ビームプロファイルの取得には Ce:YAG スクリーンの発光を CCD カメラで撮影することで得ている。図 1 にビームラインの写真、図 2 にその概要を示す。詳細は文献 4 に記述している。

2.2 レーザー

エミッタンス測定には He-Ne レーザーと半導体レーザーを使用しており、波長はそれぞれ 544 nm と 785 nm である。

時間応答測定にはモードロックされた Ti:Sa レーザーを用いている。繰り返しが 81.25 MHz、測定を行った波長は 850 nm、パルス幅は 2 psec 程度である。

2.3 光陰極

光陰極の作製は名古屋大学に依頼した。光陰極の構造を図 3 に示す。表面の 5 nm が Zn をドーピングした GaAs で濃度が $6 \times 10^{-19} \text{ cm}^{-3}$ 、その下の有効層が $1.5 \times 10^{-18} \text{ cm}^{-3}$ のドーピング濃度になっている。有効層の厚

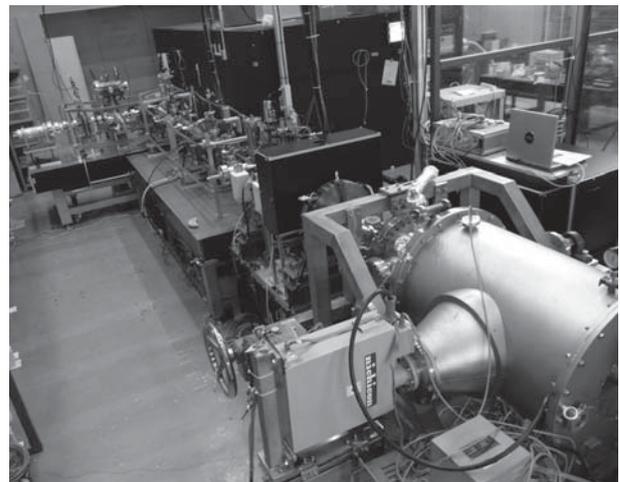


図 1 ビームラインの写真

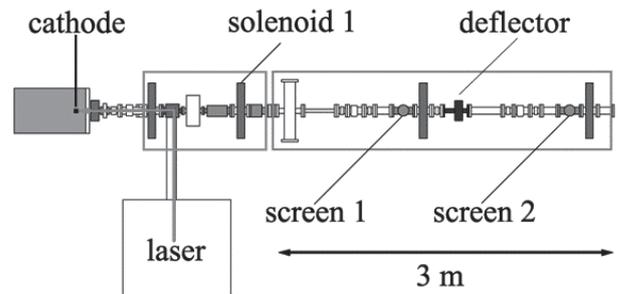


図 2 ビームラインの概要

* 日本原子力研究開発機構 Japan Atomic Energy Agency (E-mail: matsuba.shunya@jaea.go.jp)

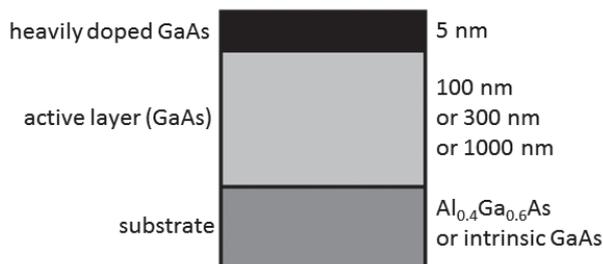


図3 光陰極の結晶構造

さは 100 nm, 300 nm, 1000 nm である。基板は AlGaAs とドーピング無し GaAs がある。このほか市販のバルク GaAs を用意した (Zn ドープ $1.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 厚さ $350 \mu\text{m}$)

3. エミッタンス測定

電子ビームの規格化エミッタンスを次のように定義している。

$$\epsilon_{n,rms} = \frac{1}{m_e c} \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle p_x^2 \rangle} = \sigma_x \sqrt{\frac{2 \langle E_{kx} \rangle}{m_e c^2}}$$

σ_x は照射したレーザーの RMS サイズ, m_e は電子の質量で c^2 は高速である。エミッタンスはレーザー径と $\langle E_k \rangle$ で決まり, 測定したエミッタンスと式から $\langle E_k \rangle$ を算出している。 $\langle E_k \rangle$ は Mean Transverse Energy (MTE) と呼び, レーザーのサイズに依存しないので, カソードのエミッタンス特性を表す量として用いている。

MTE は放出電子の横方向運動エネルギーの平均値であり, 光陰極内で電子がサーマライズされ, そのままのエネルギーで放出されるとすれば室温相当のエネルギーとなる ($2 \langle E_{kx} \rangle$ で約 25 meV)。その過程はフォノンとの散乱によっておこるので, 電子の光陰極内部での移動距離に依存すると考えられ, カソードが薄い場合に MTE が増加する可能性がある。

エミッタンスの測定結果を図4に示す。MTE を得るため原点を通る直線でフィットしている。これより得られた MTE を図5に示す。MTE はレーザー波長には依存するが厚さに対する依存性は誤差の範囲では見られていない。

4. 時間応答測定

光陰極の時間応答は内部で励起された電子が真空表面に到達するのに必要な時間で決まると考えられる。励起された電子はレーザーの侵入する深さや光陰極の厚さによって決まる深さ方向の分布を持っており, 表面への移動は拡散によって起こる^{3,6)}。拡散過程は次

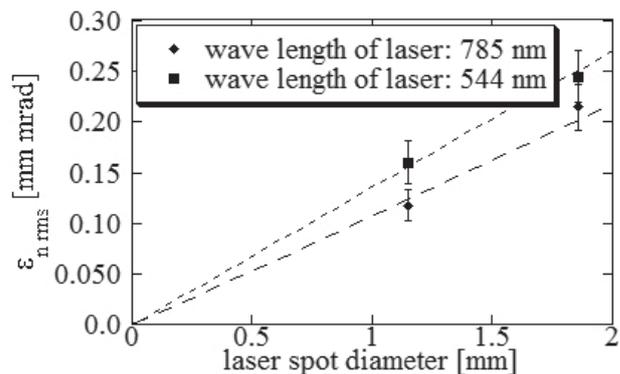


図4 エミッタンスのレーザー径依存性

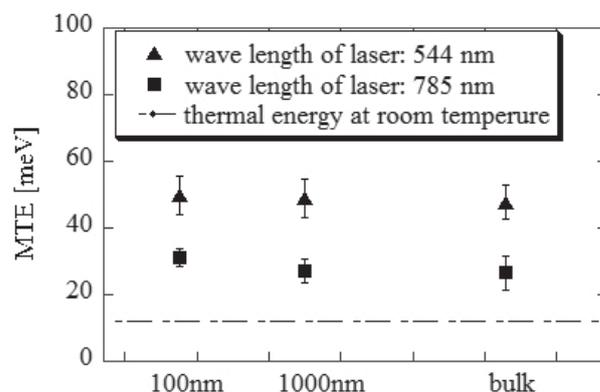


図5 エミッタンスから求めた MTE. AlGaAs 基板のものとはバルクの GaAs。バルクの厚さは約 $350 \mu\text{m}$ 程度である。

の式で表される。

$$\frac{\partial c(z, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c(z, t)}{\partial z^2}$$

$c(z, t)$ は電子の密度分布で z は光陰極の真空面から内部に向かう方向でカソード厚さが境界になる, 拡散係数 D は温度や不純物ドーピング濃度に依る。境界条件は基板の材質で決まる。基板はそのバンド構造から, 有効層の電子が通過できるものと反射されるものに大別でき, AlGaAs は電子を反射し, 真性 GaAs は電子を通過させる境界条件となる。電子を反射する条件では, 電子の移動距離がその分長くなり時間応答は遅くなると考えられる。

図5に時間応答の厚さ依存性の一例を示す。測定を行ったレーザー波長 850 nm では GaAs への侵入深さは 1000 nm より十分深く⁷⁾, 電子の密度分布はカソード厚さで決まる。カソードが厚くなると応答が遅くなることがわかる。図6に基板材質を変えた時の時間応答を示す。予想通り AlGaAs では時間応答が遅くなっ

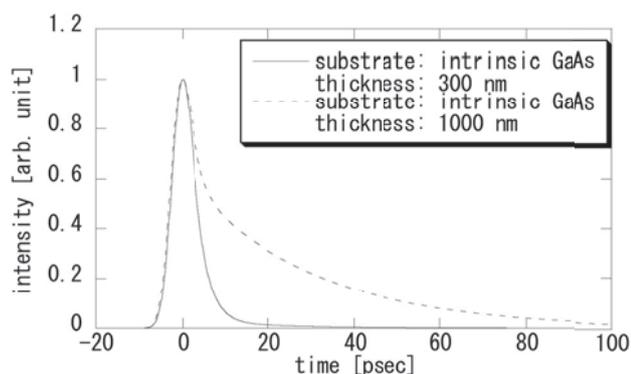


図6 真性 GaAs 基板の有効層厚さ 300nm と 1000nm の時間応答の比較.

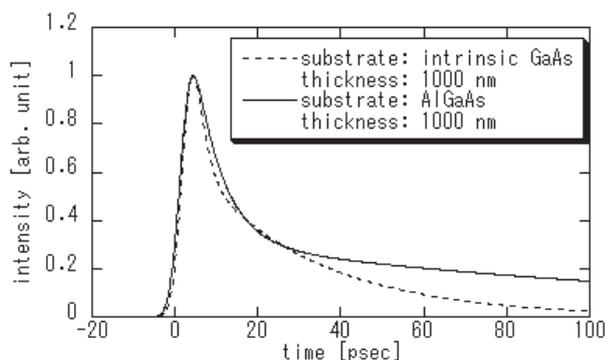


図7 時間応答の基板側境界条件に対する依存性

ていることがわかる.

5. まとめと考察

GaAs 光陰極の厚さに依存するエミッタンスと時間応答特性の評価を行った. エミッタンス測定の結果が

ら電子が熱電子化されて真空中に引き出されるので MTE は室温相当になるという単純なモデルは否定されたが, 表面粗さの影響を考察することでこの結果を説明した (詳しくは文献 4 に譲る). 時間応答測定の結果からは厚さ依存性と境界条件依存性を測定が明らかになり, 拡散モデルと粗く一致することを確認した. この結果により GaAs 光陰極の時間応答を以前よりよく予想できるようになるなど光陰極の設計において重要な知見を得ることができた.

6. 今後の抱負など

現在, 日本原子力研究開発機構の博士研究員として働いている. ガンマ線核種分析研究グループに所属し, これまで同様電子銃開発に携わることができた. 原子核物理や原子力関連などの話題は初めて耳にすることがほとんどで, 日々新しい刺激がある. 去年度は卒業も危ぶまれていたが, 多くの方々に助けられて現在の状況がある. お世話になった方々にはとても感謝している. 今はまだ独自の研究テーマというものを見つけきれていないが, 装置の立ち上げや勉強をしながら探していきたい.

参考文献

- 1) S. Sakanaka, et al. IPAC Louisiana 2012 to be published
- 2) I. V. Bazarov, et al, J. Appl. Phys. **103** (2008) 054901
- 3) K. Aulenbacher, et al. J. Appl. Phys. **92** (2002) 7536.
- 4) Shunya. Matsuba, et al. Jpn. J. Appl. Phys. 51 (2012) 04602.
- 5) S. Matsuba, et al. Proc. 1st IPAC. Kyoto, 2010, p. 2335
- 6) P. Hartmann, et al. J. Appl. Phys. 86 (1999) 2245.
- 7) S. M. Sze and K. K. Ng: Physics of Semiconductor Devices (Wiley, New York, 2006) 3rd ed., p. 53.