

# EMITTANCE AND TEMPORAL RESPONSE MEASUREMENTS OF NEA GaAs PHOTOCATHODES

Shunya Matsuba <sup>#A)</sup>, Tsukasa Miyajima<sup>B)</sup>, Yosuke Honda<sup>B)</sup>, Masahiro Yamamoto<sup>B)</sup>, Takashi Utiyama<sup>B)</sup>

Yoshikazu Takeda<sup>C)</sup>, Xiuguang Jin<sup>C)</sup>,

<sup>A)</sup> Hiroshima University

2-313 Kagamiyama, Higashi Hiroshima, Hiroshima, 739-0046

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801 <sup>C)</sup> Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603

## Abstract

A high voltage DC gun with Negative Electron Affinity (NEA) photocathode was known as high brightness electron source. Beam emittance and response time of such gun were affected physical property of cathode material. We have measured emittance and response about various active layer thickness of GaAs photocathode. Solenoid scan was used for emittance measurements. Initial emittance depends on laser wavelength, but change of cathode thickness and quantum efficiency has no influence. Response time was evaluated using a deflecting cavity. At laser wave length of 530 nm, cathode response is fast, but beam have a long tail when laser wave length of 785 nm and active layer is thick.

## NEA-GaAs フォトカソードのエミッタンス及び時間応答の測定

### 1. はじめに

エネルギー回収型リニアック (Energy Recovery Linac) をベースとした X 線放射光源では、超低エミッタンス、短パルス光が実現可能であり、KEK では ERL の技術実証機として小型の ERL (Compact ERL) の建設が進められている。

ERL の電子源には低エミッタンス、大電流のビームが要求されるため、NEA (Negative Electron Affinity) 表面を持つ半導体フォトカソードと直流高電圧加速を組み合わせた電子銃の開発が進められている。

カソードから生成された直後のビームがもつ初期エミッタンスは、ERL を用いた放射光源で達成可能なビーム輝度の限界を決める。またビームのテイルはビームロスによる放射線の問題などにも影響する。これらはカソードの物性や構造を反映する。たとえばカソードの厚みを変えると時間応答や量子効率が変化することが知られている [1][2][3]。

我々は GaAs カソードに対する初期エミッタンスと時間応答について調べるため、バルクの GaAs と GaAs 活性層の厚みを 100 nm, 300 nm, 1000 nm に調整したサンプルに対してそれらの測定を行った。

### 2. 実験のセットアップ

実験装置は、名古屋大学で開発された光電陰極高電圧 DC 電子銃に ERL 入射部のビームラインが接続され、その後、ビーム診断用のライン、偏向電磁石、ビームダンプという構成になっている。ビームプロファイルは Ce:YAG スクリーンの発光を 8 bit の CCD カメラで撮影しており、スクリーン上での 1 pixel あたりの分解能は 0.1 mm 程度である。フォトカソード

は p 型の GaAs 基盤 (Zn ドープ密度  $1.4 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ) を化学洗浄したものと、名古屋大学工学研究科の MOCVD 装置で作成した厚み調整サンプルがあり、GaAs 基板上に障壁層  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  500nm を積み、その上に Zn ドープ密度  $1.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  GaAs を積んで厚み調整している。さらに表面には 5 nm Zn ドープ密度  $6 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  の GaAs 層が積まれている。

エミッタンス測定、時間応答性の測定ともに、電圧 100 kV、電流数 nA 程度で行っており、ビーム電流が十分小さいため空間電荷効果は無視できる。

レーザーはピンホールでカットされ、カソード上で円形に投影される。エミッタンス測定では波長 544 nm、785 nm の CW レーザーを用いており、時間応答測定は Ti-Sa レーザーと Yb ファーバーレーザーを用いている。

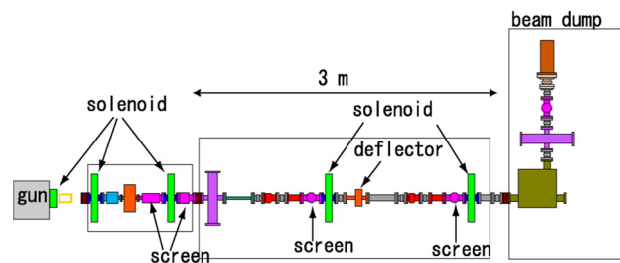


図 1: ビームラインの概要

### 3. エミッタンス測定

#### 3.1 規格化エミッタンスと横方向運動エネルギー

規格化エミッタンス $\epsilon_{n,rms}$ は電子の持つ平均横方向運動エネルギー $\langle E_k \rangle$ を用いて、次のように書ける。

$$\epsilon_{n,rms} = x_{rms} \sqrt{\frac{2\langle E_k \rangle}{m_0 c^2}} \quad (1)$$

$x_{rms}$ は RMS ビームサイズ、 $m_0 c^2$ は電子の静止エネルギーである。エミッタンスはレーザー径と $\langle E_k \rangle$ で決まるが、 $\langle E_k \rangle$ はカソード固有の量であり、各カソード毎に測定したエミッタンスと式(1)から $\langle E_k \rangle$ を算出している。

#### 3.2 方法

エミッタンスはソレノイド磁場とそのソレノイドからある一定の距離進んだ位置のビームサイズとの関係から求められる。ビームサイズ $\sigma_{rms}$ はソレノイドの  $K$  値に対して次式のように書ける。

$$\sigma_{rms}(K) = \sqrt{A(K - B)^2 + C} \quad (2)$$

ここで、 $A, B, C$ は適当な係数である。 $K$  値はソレノイド磁場とビームの運動量から決まる量であり、磁石の焦点距離の逆数である。 $\epsilon_{n,rms}$ は式(2)の係数  $A, C$  を用いて次の関係がある。

$$\epsilon_{n,rms} = \gamma\beta \times \frac{\sqrt{AC}}{L^2} \quad (3)$$

ここで、 $\gamma$ はローレンツ因子で、 $\beta$ は速度と光速の比である。式(3)を用いることで、ビームサイズのソレノイドスキャンデータより規格化エミッタンスを求めることができる。

測定は独立した2つのスクリーンで実施し、式(2)、(3)からエミッタンスを決めている。さらに、同一カソードで再度ヒートクリーニング、活性化を行い同様の測定をすることで再現性を確認している。また、測定前にスリットスキャン法とソレノイドスキャン法で測定されたエミッタンスが一致することを確認している。

#### 3.3 結果

図2に励起レーザー波長 544 nm の測定結果、図3に 785 nm の測定結果を示す。横軸のレーザースポット径はカソード面上に投影したときの直径であり、RMS 値の4倍となる。QE 依存性を見るために活性化後と QE が下がった状態とで測定を行ったが差は見られなかったため、異なる QE での測定結果を平均した値をプロットしている。

図4に式(1)から計算した平均横方向運動エネルギー $2\langle E_k \rangle$ と励起光のエネルギーとバンドギャップの差 $(h\nu - E_{gap}) \cdot 2/3$ をプロットした。測定したカソードについて平均をとると 544 nm で $2\langle E_k \rangle = 0.117 \pm 0.008$  meV, 785 nm で $2\langle E_k \rangle = 0.070 \pm 0.005$  meV となる。この比はエミッタンスに対して1.3倍程度の違いになる。

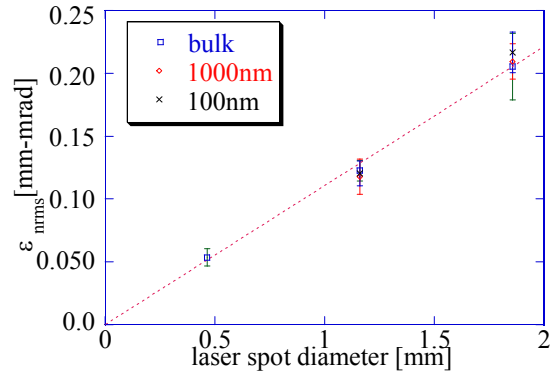


図2: 励起レーザー波長 544 nm 時のエミッタンス

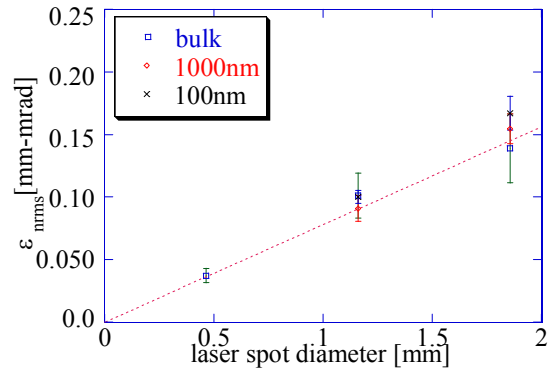


図3: 励起レーザー波長 785 nm 時のエミッタンス

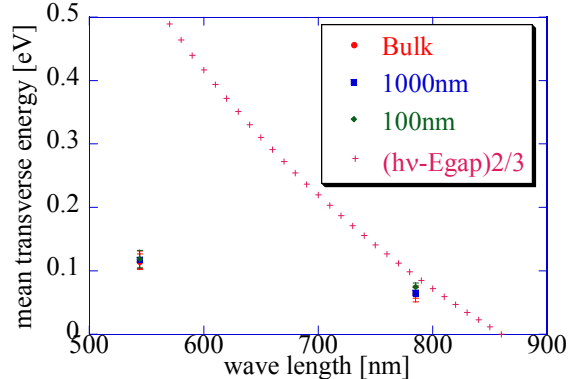


図4: 平均横方向運動量の測定値と、バンドギャップとレーザーエネルギーとの差

## 4. 時間応答測定

### 4.1 方法

時間応答測定では偏向空洞用いて、レーザーパルスと同期した電磁場を発生させ、縦方向の分布を横方向に投影しスクリーンでその信号を取得する。偏向空洞は周波数 2.6 GHz で運転しピーク蹴り角は 100 kV ビームに対して ±7 mrad 程度である<sup>[4]</sup>。

図 5 に測定される画像データの典型例について乗せる。

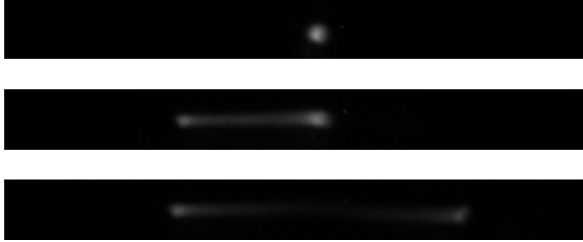


図 5: 上段：偏向空洞未使用時。中段：偏向空洞使用時。中心がパンチの先頭で左方向がテイル部。下段：CW レーザーで偏向空洞使用時のビームプロファイル。

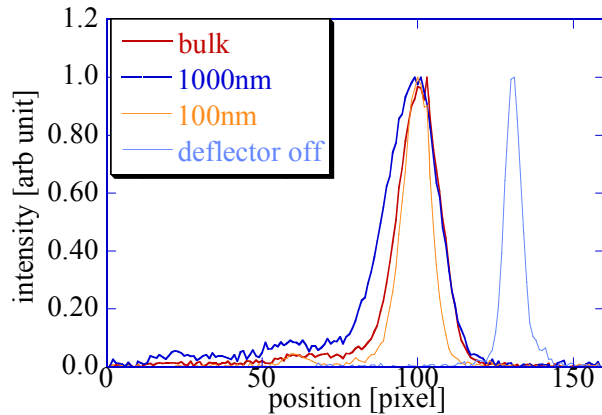


図 6: レーザー波長 530 nm の測定結果

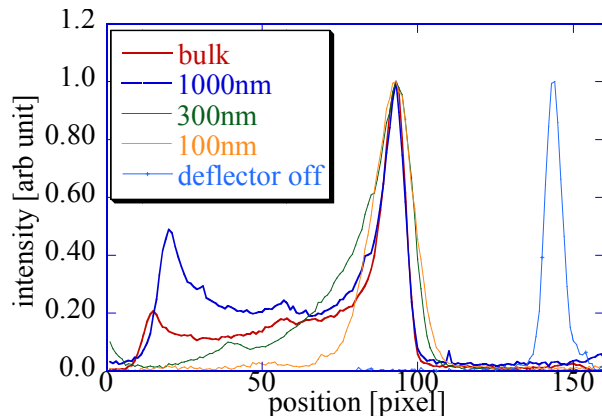


図 7: レーザー波長 785 nm の測定結果

### 4.2 解析、結果

励起レーザー波長が 530 nm の時の測定結果を図 6 に示す。図 6 のデータは、図 5 に示したような画像データを横軸に射影したもので、偏向空洞未使用時

に比べてレーザーパルス幅やジッターによりビームが太くなっているが、長いテイルは見えていない。レーザーのパルス幅はオートコリレータで測定しており、bulk と 1000 nm の測定時は 20 psec 程度、100 nm では 10 psec 程度であった。ビームはできる限りスクリーン上で収束させており、rms で 3 pixel 程度になっている。励起レーザー波長 785 nm の測定結果を図 7 に示す。レーザーのパルス幅は常に 3 psec 程度であった。

100 nm ではほとんどテイルは見えていないが 300 nm 以上の厚みではテイルが見られ、1000 nm やバルクでは偏向空洞の RF の 1/4 周期(96 psec)を超えてテイルを引いている。このため、96 psec 以上のテイルは実空間では折り返されることになる。この折り返しを解くために時間応答関数を仮定して、パラメータフィッティングを行った。

仮定した関数  $S(t)$  は、ガウシアン形で立ち上がり、遅い減衰  $S_s(t)$  と早い減衰  $S_f(t)$  を持つような関数とした。  $S_f(t)$  は次の関数である。

$$S_f(t) = \frac{A_f}{2\tau_f^2} \exp\left(-\frac{\sigma_t^2}{2\tau_f^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau_f}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\sigma_t}{\sqrt{2}\tau_f} - \frac{t-t_0}{\sqrt{2}\sigma_t}\right) \quad (4)$$

$S_s(t)$  は上記の関数の係数と時定数が  $A_s, \tau_s$  となる関数である。時間応答関数はこれらの和として、

$$S(t) = S_f(t) + S_s(t) \quad (5)$$

とした。

この関数は時間応答の拡散モデルとよく一致している。フィッティングにより得られた時間応答関数形を図 8 に示す。応答時間を表す指標としてパルス電荷の 90% が入る時間を  $t_{90}$  と定義し結果を QE と共に表 1 に示した。

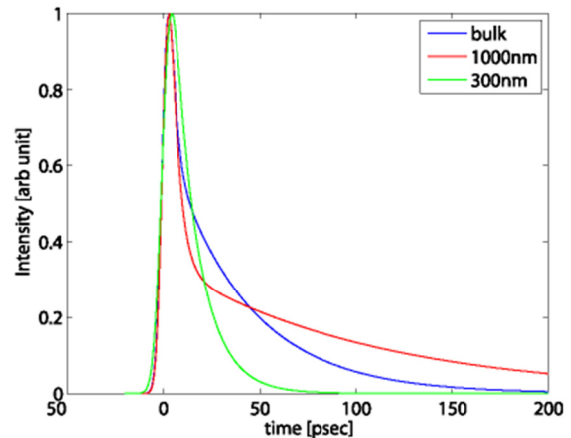


図 8: 785 nm 結果より得られた応答関数

表 1: レーザー波長 785 nm 時の  $t_{90}$  と QE

カソード厚	QE	$t_{90}$
300nm	2.1%	29.1 psec
1000nm	5.0%	224.1 psec
バルク	2.8%	80.6 psec

## 5. 考察およびまとめ

活性層厚みの異なる GaAs カソードのエミッタンスと時間応答の測定を行い、平均横方向運動量と応答時間を見積もった。

エミッタンスには厚み依存性や QE 依存性は確認できなかった。QE 依存性および $\langle E_k \rangle$ は Cornell 大学のグループの結果とも一致している。<sup>[3]</sup>波長依存性については確認できたが、単純にバンドギャップとレーザーのエネルギーの差で決まるわけではなく、カソード内でほとんどのエネルギーを失って出てくるようである。

時間応答は 530 nm のレーザーでは十分早くテイルは見えないが、785 nm では GaAs の厚みによっては 100 psec を超えるテイルが伸びることが確認できた。この波長と活性層厚み依存性はレーザーのカソードへの侵入長の変化による。厚み 1000 nm ではバルクよりも応答が遅くなっているのは、今回測定した 1000 nm カソードは、表面の活性層である GaAs 層の下地 (バッファ層) が GaAs よりもバンドギャップの大きい AlGaAs 層であることから、伝導帯に励起された電子がこの層で反射する影響、および 1000 nm カソードでは内部のドープ密度がバルクのそれと比べ 1 桁程度低いためにホールとの再結合が抑制される影響により、バルクと比較してテイルが長くなったと推測される。時間応答についてはさらなる調査が必要であろう。

今後は、Mainz 大学の測定結果<sup>[1]</sup>と同一条件で比較するために、バッファ層からの反射を無くしたカソードの時間応答を測定する予定である。

## 参考文献

- [1] K.Aulenbacher et. al., "pulse response of thin 3/5 semiconductor photocathodes" Journal of Applied Physics volume 92 number12.
- [2] Naoto Yamamoto et. al., "Thermal emittance measurements for electron beams produced from bulk and super lattice negative electron affinity photocathodes" Journal of Applied Physics 102,024904.
- [3] Ivan V. Bazarov et. al., "Thermal emittance and response time measurements of negative electron affinity photocathodes" Journal of Applied Physics 103,054901.
- [4] Shunya Matsuba et. al., "コンパクト ERL 電子銃におけるバンチ長測定用偏向空洞", Proceedings of the 7th Annual meeting of Particle Accelerator Meeting in Japan, Himeji Aug. 4-6, 2010.