

## Initial beam emittance measurements for electron gun with NEA-GaAs type photocathodes

Naoto Yamamoto<sup>1,A)</sup>, Masahiro Yamamoto<sup>A)</sup>, Ryosuke Sakai<sup>A)</sup>, Tsutomu Nakanishi<sup>A)</sup>, Shouji Okumi<sup>A)</sup>, Makoto Kuwahara<sup>A)</sup>, Kuniaki Tamagaki<sup>A)</sup>, Takanori Morino<sup>A)</sup>, Akira Utsu<sup>A)</sup>, Atsushi Mano<sup>A)</sup>, Masao Kuriki<sup>B)</sup>, Toru Ujihara<sup>C)</sup> and Yoshikazu Takeda<sup>C)</sup>

A) Graduate School of Science, Nagoya University  
Furo-cho, Nagoya, Aichi, 464-8602

B) High energy accelerator Research Organization  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

C) Graduate School of Engineering, Nagoya University  
Furo-cho, Nagoya, Aichi, 464-8602

### Abstract

Extremely low emittance electron beams are necessary for new generation accelerators. The required emittances is as low as  $0.1 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$  and NEA-type photocathodes have an intrinsic advantage of generating such a low emittance. In this paper, emittance measurements of photoelectrons extracted from two kinds of NEA photocathodes are described. The measurement were carried out using a 200kV polarized electron source at Nagoya University. The normalized vertical emittances of Bulk-GaAs and GaAs-GaAsP starined-layer superlattice photocathodes are as low as  $0.12\text{-}0.18 \pm 0.03 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$  and  $0.09 \pm 0.01 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$  near the bandgap energy in the case of 0.7 mm beam radius, respectively. These results showed the advantage of using NEA-GaAs type photocathodes for the generation of low emittance beams.

## NEA-GaAs型フォトカソードの初期エミッタンス測定

### 1. はじめに

高輝度・低エミッタンスを実現する電子源の開発は近年ますます重要視されている。その用途は次世代の高エネルギー電子線加速器である国際リニアコライダー(ILC)計画<sup>[1]</sup>、究極の短波長・干渉性の高い放射光生成を目指す電子エネルギー回収型リニアック(ERL)計画<sup>[2]</sup>、さらに加速器以外では電子顕微鏡への応用と多岐にわたる。例えば、ERL計画では生成した電子ビームをそのままリニアックに入射し光源として利用するため $0.1 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 以下の超低エミッタンスが必要であり、スピン偏極を用いた投影型表面電子顕微鏡(SPLEEM)<sup>[3]</sup>では像の実時間観測には少なくとも従来の2桁高い電子線輝度が必要である。

エミッタンスに関する最近の研究では、NEA(Negative Electron Affinity)表面が低エミッタンスビーム生成に有効であると示唆されている。イリノイ大学とCEBAFのグループは100kV電子源を用いてNEA-GaAsのエミッタンス測定を行い、その結果からバンドギャップ付近のエネルギーで生成された光電子の持つ熱エネルギーが34meV程度まで抑えられることを示した<sup>[4]</sup>。また、Heidelbergのグループは特別に開発した装置を用いNEA-GaAsから得られた光電子エネルギー分析を行い、その熱エネルギーが25meVに抑えられることを示した<sup>[5]</sup>。これらの結果はNEA表面を利用することで初期のエミッタンスを

極端に低くできることを示しており、仮りに熱エネルギーの値を25meV程度に抑えられたすると得られるエミッタンスは $0.1 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ となり、先の要求を満たすビーム生成へ大きな前進となる。

本報告では、BulkのGaAsとGaAs-GaAsP歪み超格子フォトカソードを用いたエミッタンス測定の結果を示す。

### 2. 実験装置

名古屋大学で開発中である直流型200kVスピン偏極電子源を用いて実験を行った<sup>[6]</sup>。装置は電子源(電子銃槽、活性化槽、ローディング槽)、レー

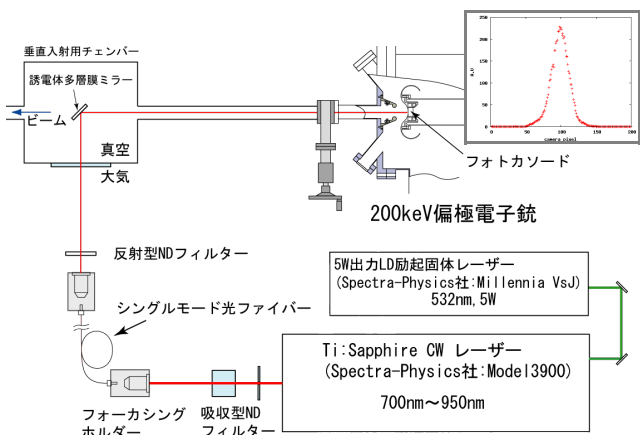


図2. 1: 光学系模式図

<sup>1</sup> E-mail: naoto@spin.phys.nagoya-u.ac.jp

ザ垂直入射系、エミッタンス測定系、偏極度測定装置で構成されている。

## 2.1 半導体フォトカソード

測定はBulk-GaAsとGaAs-GaAsP歪み超格子フォトカソードを用いて行った。Bulk-GaAsは市販されているp型のGaAs基板( $Zn; 1.4 \times 10^{19}/cm^3$ )であり、化学洗浄により表面の酸化膜を除去した後電子源にインストールした。GaAs-GaAsP歪み超格子は名古屋大学工学研究科のMOCVD装置により作製された。このサンプルはILC計画に向けて開発されたものであり、スピン偏極度90%以上、量子効率0.5%の性能を達成したものと同一構造である<sup>7)</sup>。これらのフォトカソードを電子源活性化層内にインストールし450度において50分間加熱洗浄した。その後CsとNF<sub>3</sub>を用いた"Yo-Yo"法によってNEA表面形成を行った。この結果得られたNEA表面の量子効率はそれぞれバンドギャップ付近でBulk-GaAsで $2 \times 10^{-2}$ 、歪み超格子で $4.8 \times 10^{-4}$ であった。

## 2.2 光学系

光学系の模式図を図2.2に示す。レーザ発振は700nmから950nmまで波長可変なTi-Sa CWレーザ(Spectra Physics社)を用いた。このレーザをシングルモード光ファイバで実験装置直前まで運び、ここから真空内に設置したミラーを使い電子銃にほぼ垂直に照射した。設計においてレーザとフォトカソードの間に生じる角度は1.1度である。フォトカソード位置でのレーザ空間プロファイルはガウス分布をとっており、この時のスポットサイズは $2\sigma$ の範囲をとると直径1.0mmであった。

## 2.3 エミッタンス測定

上記により得たレーザをフォトカソードに照射し10nA程度の連続ビームを生成、さらに電子銃によりすぐに120keVに加速した。加速電界に対しビーム電流密度は非常に小さくして空間電荷効果をできる限り抑えた。ビームは約1m下流に設置されたペーパーポット装置に入射し<sup>8)</sup>、厚さ20 $\mu$ mのTi薄膜上に配置された直径約40 $\mu$ mのピンホールによって細かいビームレットの集まりとして切り出された。この切り出したビームレットの広がりマスク後方にあるシンチレータとCCDカメラを使い精密測定することでエミッタンスを求めた。ペーパーポット装置内において切り出し前の電子ビームはほぼガウス分布をとり、その直径は $1.4mm \pm 0.2mm$ であった。

エミッタンスは最終的に画像処理によって導出した。本測定では各点において30枚連続で撮影した画像を重ね合わせ処理した。ビームスポットの大きさは全強度の95%を占める領域と定義した。スポットサイズ決定に生じる誤差は画像処理時のCCDカメラ解像度が主たる原因であった。エミッタンス測定に用いた画像は1pixelあたり実際の8 $\mu$ m前後の大きさに対応し、各スポットにおいて1pixelの誤差が生じると見積り測定誤差とした。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 Bulk-GaAs

エミッタンス測定はNEA表面作成2日後と6日後に行った。測定時での量子効率はバンドギャップ付近でそれぞれ $7.0 \times 10^{-3}$ 、 $2.1 \times 10^{-3}$ であった。測定によって得られた垂直方向の規格化エミッタンスを図3.1に示す。横軸に照射したレーザ波長を縦軸に得られた規格化エミッタンスを示している。それぞれ青色が量子効率 $7.0 \times 10^{-3}$ 、赤色が $2.1 \times 10^{-3}$ の時のデータである。

図3.1で示したエミッタンスの値は量子効率の低い方が良く、レーザ波長においては短波長側が劣化している。ただし、バンドギャップ(890nm)少し手前からの長波長側でのエミッタンスはほぼ一定となりそれ以上の変化はみられない。この値はそれぞれ $0.18 \pm 0.03 \pi \cdot mm \cdot mrad$ 、 $0.12 \pm 0.02 \pi \cdot mm \cdot mrad$ である。量子効率の違いによるエミッタンスの変化はNEA表面の値の変化による影響であり、波長に依存するエミッタンスの変化は電子自身が伝導体に励起される際に受けるエネルギーの違いに起因する影響であると考えられる。

ここで平面上の一軸の規格化エミッタンスの値( $\epsilon$ )は空間電荷効果を考慮しない場合に、電子の余剰エネルギー(E)とビーム半径(R)を用いて次のようにかける<sup>9)10)</sup>。

$$\epsilon = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{2E}{3m_e c^2} + \frac{2k_B T}{m_e c^2}}$$

ただし、 $m_e c^2$ は電子の質量エネルギー、 $k_B T$ は熱平衡状態におけるエネルギーを表している。この式は電子ビームが生成時から既に持っているエミッタンスを表しており、その意味から初期エミッタンスとも呼ばれている。

先の測定結果において電子の余剰エネルギーを単にNEA表面の値にレーザエネルギーとバンドギャップエネルギーの差(電子が伝導体に励起される際に得るエネルギー)を加えたものとし、 $k_B T$ を室温と仮定する。この仮定のもとで波長減少に依存するエミッタンス劣化をレーザからの余剰エネルギー増大として上式をフィットすると、エミッタンスがほぼ一定となる長波長側では余剰エネルギーが量子効率 $7.0 \times 10^{-3}$ 、 $2.1 \times 10^{-3}$ についてそれぞれ120meV、10meV

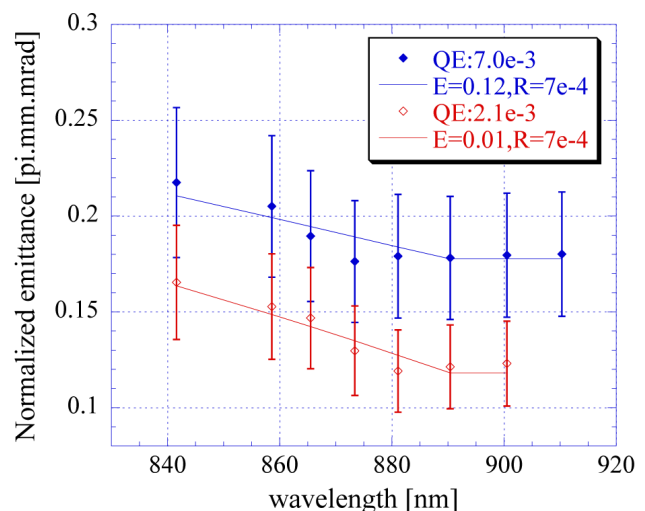


図3.1: Bulk-GaAsの規格化エミッタンス

と求められる。バンドギャップ以上の長波長側ではレーザーによるエネルギーはほぼゼロであるため、余剰エネルギーはNEAの値のみによって決まる。一般にNEA表面の値はNEA表面形成直後に数百meVであることを考えるとこれらの評価は矛盾せず、今回の測定結果は妥当であると考えられる。さらに、図3.1ではバンドギャップより短い波長の880nm付近からエミッタンスが一定になっている、これはこの波長での余剰エネルギーは14meVと熱振動エネルギーよりも低いことがその理由である。

### 3.2 GaAs-GaAsP歪み超格子フォトカソード

測定により得られた結果を図3.2で示す。図3.1と同様に横軸に照射したレーザー波長を縦軸に得られた規格化エミッタンスを示している。測定はNEA表面形成後数日後に行われており、その量子効率率は $4.8 \times 10^{-4}$ であった。

図3.2に示すエミッタンスはBulk-GaAsと同じくバンドギャップ(770nm)付近の波長からほぼ一定であり、その値は  $0.096 \pm 0.015 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$  とBulk-GaAsよりも低く抑えられている。また、短波長域(720-770nm)でのエミッタンス劣化もBulk-GaAsの結果と比べ緩やかである。このため、図3.2に示される波長依存性を3.1節で示した式でフィットするとうまくいかず、このモデルを使うことは好ましくない。

今回の歪み超格子フォトカソードは、基板となる結晶上にGaAsとGaAsPを交互に成長させることにより超格子構造を形成している。このため光電子生成にかかわる部分のバンド構造はBulk-GaAsと異なり図3.3に示すようにミニバンドが形成される。これは伝導体に励起された光電子はミニバンドの閉じ込め効果により、それ以上のエネルギーをとることができないことを示している。このミニバンドの幅は35meVであるため、今回測定したのレーザー波長域では伝導体においてこれ以上の値をとることができない。以上の理由から超格子型フォトカソードではエミッタンス劣化が抑えられると考えられる。

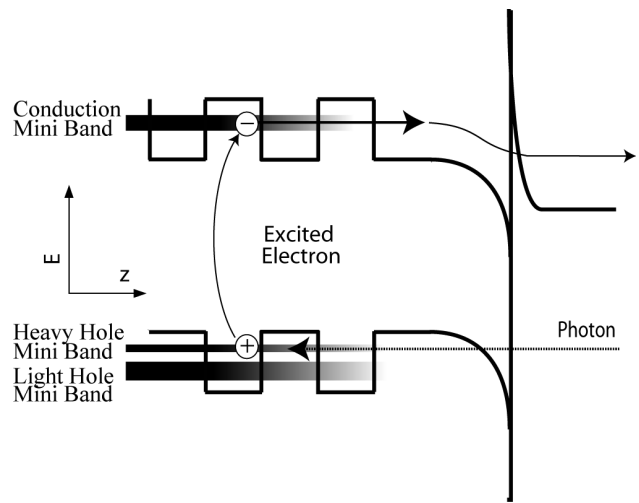


図3.3: GaAs-GaAsP歪み超格子のバンド構造

## 5. まとめ

Bulk-GaAs及びGaAs-GaAsP歪み超格子フォトカソードを用いて、空間電荷効果を抑えた状態におけるエミッタンスを測定した。特に量子効率の低い状態ではあるがGaAs-GaAsP歪み超格子フォトカソードではバンド構造による利点もあり最も低いエミッタンス ( $0.096 \pm 0.015 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ ) を得ることができた。この結果はフォトカソードのNEA表面をうまく利用することで超低エミッタンスビーム生成が可能であることを示している。ただし、その応用には高い電界に耐える電極開発<sup>[11]</sup>や電子ビーム形状整形<sup>[12]</sup>などを利用した空間電荷効果抑制、そして低い量子効率を補うレーザー系の開発が重要である。

## 参考文献

[1] International linear collider web page  
<http://www.linearcollider.org/cms/>.  
[2] T.Suwada, et al.,(2005) Nucl. Instr. and Meth. A 557 (2006) 131.  
[3] 中西 彊, “投影型表面電子顕微鏡 (LEEM) に用いる偏極電子源の開発”, 日本物理学会 第61回年次大会 29pRG  
[4] B.M.Dunham, et al.,(1996) PAC 95 and IUPAP, Dallas, Texas, 1-5 May 1995. In Dallas 1995, PAC, vol. 2 1030-1032.  
[5] S.Pastuzka, et al., J of Applied Phys. 88 (2000) 6788  
[6] M.Yamamoto, et al., this proceedings  
[7] T.Nishitani, et al., J.Appl.Phys. 97, 094907 (2005)  
[8] N.Yamamoto, et al., 第一回加速器学会、第29回リニアック研究会プロシーディングス  
[9] K.Flottmann, DESY-TESLA-FEL-97-01, Feb 1997. 7pp.  
[10] 栗木雅夫. "電子源", OHO'02 高エネルギー加速器セミナー講義用テキスト  
[11] F. Furuta, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 538 (2005) 33.  
[12] H. Tomizawa, et al., Proc. of workshop ERL2005

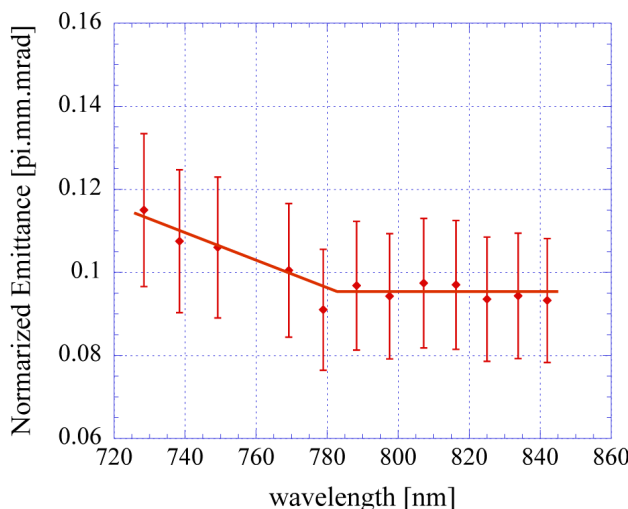


図3.2: GaAs-GaAsP歪み超格子の規格化エミッタンス