

# GENERATION OF LOW EMITTANCE AND HIGH BRIGHTNESS ELECTRON BEAM BY USING NEA-GaAs PHOTOCATHODES

N. Yamamoto\*†<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>Synchrotron radiation Research center, Nagoya University  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aich 464-8603

## Abstract

The fundamental study for low emittance beam generation and some developments for high brightness polarized electron source were made at Nagoya University. For low emittance beam generation, we measured the emittance of the beam extracted from Bulk GaAs and GaAs-GaAsP strained superlattice photocathodes by using Pepper-pot systems and 200kV electron gun. Then the emittance of  $\sim 0.15 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$  for the beam radius of 1.0 mm was obtained and by comparing for the bulk-GaAs and GaAs-GaAsP photocathodes, it is demonstrated that superlattice photocathodes suppress the emittance growth. For high brightness beam generation, we developed a transmission type photocathode and high brightness electron gun, and the beam brightness of  $\sim 2 \times 10^7 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$  and the charge density lifetime of  $1.8 \times 10^8 \text{ C/cm}^2$  were obtained.

## NEA-GaAs フォトカソード電子ビームの低エミッタンス化、高輝度化に関わる技術開発

### 1. はじめに

GaAs 型半導体の表面に極微量のセシウムを付与することにより、負の電子親和性 (Negative Electron Affinity: NEA) が得られ、この状態を NEA-GaAs と呼ぶ。NEA-GaAs は光陰極 (フォトカソード) タイプの電子源として利用可能であり、高スピン偏極度の電子源として改良・応用され続けてきた。NEA 表面とは真空と試料との界面において真空準位が伝導帯の最低準位より低い状態を意味するが、これを有効利用することで電子線の低エミッタンス化や高輝度化が実現できる。ちなみに、NEA-GaAs フォトカソードがスピン偏極電子源となるのは、GaAs 型半導体が NEA 表面の得られる材料であることに加えそれ自身がスピン選択励起可能な特有のバンド構造を持つからである。

NEA-GaAs フォトカソードを用いたスピン偏極電子源は、名古屋大学を中心とするグループにより 20 年以上継続し開発が行われており、2002 年には GaAs-GaAsP 歪み超格子薄膜においてスピン偏極度 90% 以上、量子効率 0.5% の性能<sup>[1]</sup> が、2005 年にはナノ秒オーダーのマルチバンチビームが生成可能であることが報告された<sup>[2]</sup>。

これらの結果に続き、我々名古屋大学のグループは NEA-GaAs フォトカソードのエミッタンス測定を行った。測定は当時開発中であった 200kV 電子銃と Pepper-Pot システムを用いて、バルク GaAs と GaAs-GaAsP 歪み超格子フォトカソードについて行われ、低電流のビームにおいては  $0.15 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$  程度のエミッタンスを実現可能なことなどが確かめられた<sup>[3]</sup>。

さらに、我々は NEA-GaAs フォトカソードをより実用的なものにするため透過光型フォトカソードの開発を行った。この結果開発された電子源システムは、LaB<sub>6</sub> 電

子源などと比べ桁高いビーム輝度 ( $10^7 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ) を示し、さらには平均  $1 \mu\text{A}$  を生成した状態でも連続使用で一週間以上の長寿命を維持することが確認された<sup>[4]</sup>。

本プロシーディングスではエミッタンス測定と透過型フォトカソードについて簡単にレビューする。

### 2. 低エミッタンスに関する研究

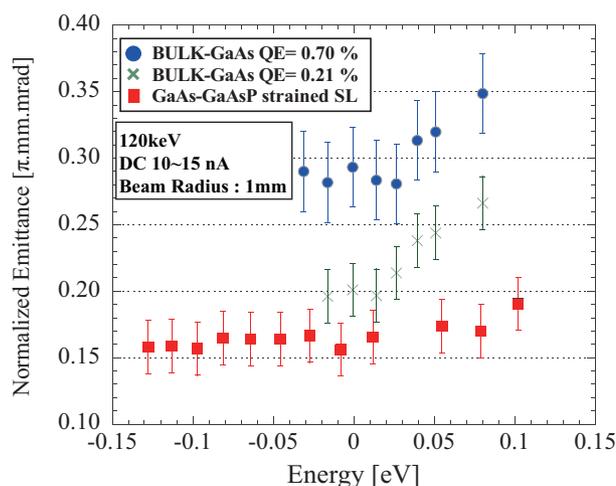


図 1: エミッタンスの励起レーザーエネルギー依存性。超格子薄膜試料の量子効率は 0.026%。<sup>[3]</sup> より転載

エミッタンス測定は当時リニアコライダー用として開発中であった 200kV 仕様の直流型電子銃<sup>[5]</sup> を 120kV で運転し行った。電子ビーム生成は DC 出力のチタンサファイアレーザー (Spectra-Physics:Model3900) をフォトカソード表面で半径約  $0.5 \sim 0.7 \text{ mm (rms)}$  になるよう調節し、ビーム電荷量を  $10 \sim 15 \text{ nA}$  とした。Pepper-Pot システムは電子銃に差動排気チャンバーを介して直接

\* naoto@nagoya-u.jp

† The results reported in this paper were made with the collaboration of Nagoya University PES development group.

フォトカソードを望める配置で接続し、約 1m ドリフトした電子ビームを直径  $40\mu\text{m}$  のマスクにより一軸辺り 20 個ほどに分割した。計測は分割されたビームレットが数 cm 下流のシンチレータ上につくるプロファイルを長距離顕微鏡とイメージインテンシファイアで撮影し、この像を解析することで行った。

得られたデータの一例を図 1 に示す。縦軸が実際に得られたエミッタンスをビーム半径 1mm の場合に換算した値であり、横軸は励起レーザーのエネルギーと試料のバンドギャップとの差で表している。この図は GaAs-GaAsP の超格子歪み薄膜で  $0.15\pi\text{.mm.mrad}$  が得られること、励起レーザーのエネルギー増加に対するエミッタンス劣化の割合は超格子薄膜試料の方が優れていることを示している。

ただし、本測定により得られたエミッタンスにはシンチレータでの像の滲みや画像処理時のバックグラウンド処理など系統的なエラーが含まれており、解析の過程で実際より大きめの値を算出している可能性がある。また、この結果は電荷量  $10 \sim 15\text{nA}$  という空間電荷効果がほとんど無視できる理想的な環境での測定であるため、実用的な環境で超格子薄膜の有効性を活かすには、高電界の電子銃開発などさらなる R&D が必要だと考えられる。

### 3. 高輝度化に関する研究

本研究では電子源の高輝度化を行うため従来の電子源を見直し、背面透過光型の電子源開発を行った。従来型と背面透過光型の概念図を図 2 に示す。図 2(a) ではビームと光学系の干渉がありレーザー光を絞ることが困難であるが、図 2(b) では光学系をフォトカソードのすぐ近くに配置できるためレーザー光を回折限界近くまで絞ることが可能となる。

#### 3.1 透過光型フォトカソードの開発

図 3 に透過光型フォトカソードの模式図を示す。透過光型フォトカソードは従来のフォトカソードのうち最も性能が高い GaAs-GaAsP 歪み超格子薄膜を元に、基板材料を GaAs から励起レーザーを透過できる GaP に変更することで実現した<sup>[7]</sup>。開発の初期においては従来型の基板に穴を空けるなど幾つか試験を行ったが、試料の耐久性の問題などがありうまくいかなかった。また基板材料を変える方法も当時は GaP 上に超格子薄膜を成長した実績が無く比較的挑戦的な課題であったが、従来のフォトカソード製作環境である成膜装置を利用できるなど試料製作上のメリットがあった。このメリットは後の開発においても重要となり、将来的にもフォトカソード設計パラメータ探求による性能向上の可能性が残っている。

透過光型フォトカソードは励起レーザーの入射方向を選ばないという従来型と比べ非常に大きい特徴を有している。その特徴とは電子銃設計の自由度を高めることと、励起レーザーによるフォトカソードの温度上昇を抑制することである。NEA-GaAs フォトカソードから電子ビームを生成するためには電子励起用のレーザーを照射する必要があるが、実際にビームとなる電子を生成するのに用いられるレーザーは、全体の数%にも満たない。このため、従来型のフォトカソードでは照射

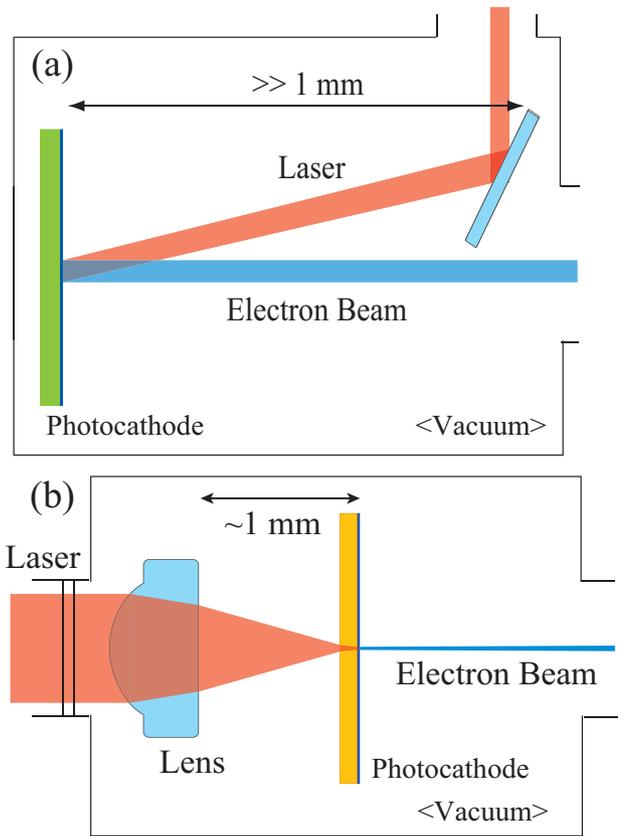


図 2: 従来型 (a) と背面透過光型 (b) のフォトカソードの概念図

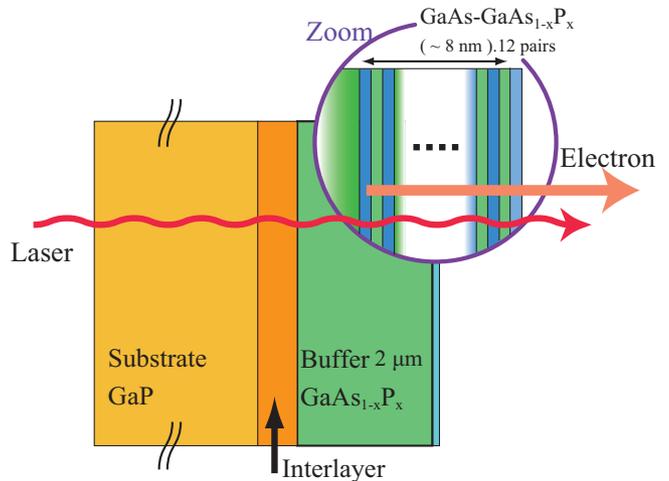


図 3: 透過光型フォトカソードの模式図

されたレーザーのほとんどが基板等で吸収され熱になってしまうのである。フォトカソードの温度上昇は NEA 表面の寿命問題に密接に結びつくことため<sup>[6]</sup>、超格子薄膜層以外ではレーザーを吸収しないという透過型フォトカソードの性質は従来型と比べ本質的に優れていると考えられる。また、フォトカソード背面に反射防止膜を適用したり、レーザーの抜け光を再利用するなどこれまで考えられなかったような応用も期待できる。

透過光型フォトカソードの開発は未だ継続中である

が、現時点ではスピン偏極度及び量子効率において、それぞれ 90% 以上、0.4% と従来とほぼ同等の性能を達成している。

### 3.2 高輝度電子源の開発

図 4 に高輝度電子源の模式図を示す高輝度電子源は透過光型フォトカソードの性質を活かし、電子銃カソード電極と距離約 1mm の距離に集束レンズを設け励起レーザーを回折限界まで絞れるように設計した。また、これにより生成される電子ビーム径も数ミクロンにまで抑えられるためアノード電極直径を 1mm とし、電子銃チャンバーのアノードより下流を真空中に切り離すことにより電子銃直下の空間に差動排気機構を設けた。これによりフォトカソード付近の真空度を運転中においても  $10^{-9}$  Pa 台に保つことに成功し、結果として NEA 表面のビーム寿命を大幅に改善することに成功した。

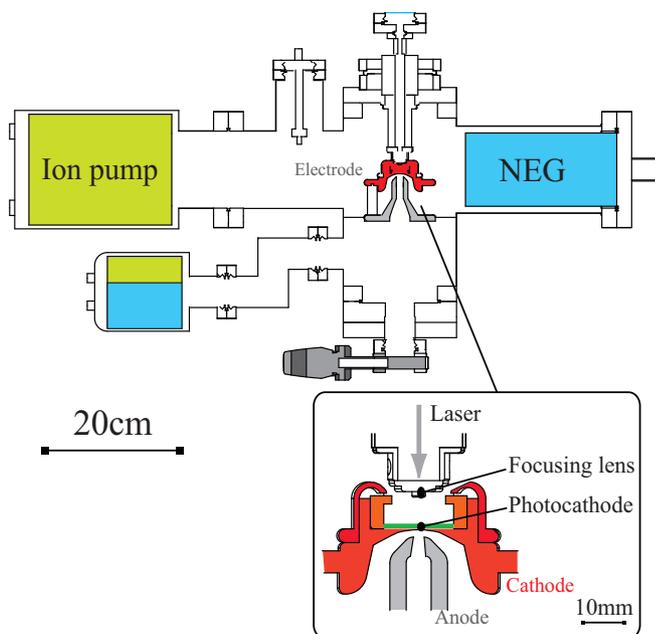


図 4: 高輝度電子源の模式図

電子銃は直流 20kV の印加を定格とし、カソード材料はモリブデン、アノード材料にはタンを採用した。電極間距離は 4mm とし、Poisson による計算ではカソードに掛かる最大電界は  $4.7\text{MV/m}$  (20kV 印加時) であった。また、カソード側に  $-30\text{kV}$  を印加した高電圧試験での暗電流は数 nA、 $-20\text{kV}$  を印加した場合は  $0.1\text{nA}$  以下であることが確かめられた。

本電子銃に透過型フォトカソードを組み合わせた試験では、フォトカソード表面でのレーザー半径を  $0.65\mu\text{m}$  (半値) まで絞ることに成功し結果として  $\sim 2 \times 10^7\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$  のビーム輝度を得た。また、 $3\mu\text{A}$  の電子ビームを連続的に引き出したビーム試験では、量子効率が  $1/e$  なるまでに  $1.8 \times 10^8\text{C}/\text{cm}^2$  の電荷を得ることに成功した。

### 4. まとめ

本報告では、NEA-GaAs フォトカソードを用い生成した電子ビームの低エミッタス化及び高輝度化に向けた

研究を簡単に紹介した。

特に高輝度化に向け開発した透過光型フォトカソードは現在も開発中であり、量子効率のさらなる向上を目的に基礎研究を続けている。また、近い将来において透過光型フォトカソードのビーム性能評価を分子科学研究所 UVSOR において計画している。

### 5. 謝辞

本研究において名古屋大学理学研究科中西グループの先輩・後輩に多大のご協力を頂き感謝します。本研究は中西グループで長年培われてきた技術をもとに行われたものであり、私にこれら研究に取り組む機会を与えてくださった中西先生には心より感謝します。

エミッタンス測定については KEK の蒲川先生・小林仁先生・諏訪田剛先生、現広島大学の栗木先生など数多くの方々の協力により実現しました。

高輝度化については、透過光型フォトカソードは金助教をはじめ名古屋大学工学研究科竹田グループの全面的な協力のもと大阪府立大の堀中先生、大同特殊鋼(株)の加藤氏、大同工業大の坂先生の御助力により実現できました。高輝度電子銃については日立中央研究所の大嶋氏、孝橋氏の貴重な御助言により実現しました。また、高輝度化に向けチャレンジする機会を下された大阪電通大の越川先生及びグループの皆様にも感謝しています。

最後に名古屋大学工学研究科の竹田先生、高嶋先生、保坂先生、分子科学研究所 UVSOR の加藤先生には、私のシンクロトロン光研究センター着任後も電子源に関する研究を続けることを許して頂くだけでなく、バックアップまでして頂き真に感謝しています。

### 参考文献

- [1] T. Nakanishi, *The XXI International LINAC Conference*, (1998)
- [2] T. Nishitani, T. Nakanishi, M. Yamamoto, S. Okumi, F. Furuta, et al., *Journal of Applied Physics*, Vol. 97, No. 9, pp. 94907-94907, (2005)
- [3] N. Yamamoto, M. Yamamoto, M. Kuwahara, R. Sakai, T. Morino, et al., *Journal of Applied Physics*, Vol. 102, No. 2, p. 024904, (2007)
- [4] N. Yamamoto, T. Nakanishi, A. Mano, Y. Nakagawa, S. Okumi, et al., *Journal of Applied Physics*, Vol. 103, No. 5, p. 064905 (2008)
- [5] 和田公路, 200keV スピン偏極電子ビーム源の開発. 名古屋大学 大学院理学研究科 修士論文 (1998)
- [6] H. Iijima, M. Kuriki, D. Kubo, Y. Masumoto, *Proc. of the 7th Annual Meeting of PASJ*, p.815 (2010)
- [7] X.G. Jin, N. Yamamoto, Y. Nakagawa A. Mano, T. Kato, et al., *Applied Physics Express*, 1 045002 (2008)