

High-brightness electron source using NEA-AlGaAs photocathode

Tomohiro Nishitani^{1,A)}, Masao Tabuchi^{B)}, Yosuke Noritake^{C)}, Haruhiko Hayashitani^{C)}, Ryoichi Hajima^{A)}, Hokuto Iijima^{A)}, Ryoji Nagai^{A)}, Masaru Sawamura^{A)}, Nobuhiro Kikuzawa^{A)}, Nobuyuki Nishimori^{A)}, Eisuke Minehara^{A)}, Yoshikazu Takeda^{D)}

A) Japan Atomic Energy Agency

2-4 Shirakata-shirane, Tokai, Naka, Ibaraki 319-1195

B) Venture Business Laboratory, Nagoya University

Nagoya, Aichi 464-8603, JAPAN

C) Department of Materials Science and Engineering, Nagoya University

Nagoya, Aichi 464-8603, JAPAN

D) Department of Crystalline Materials Science, Nagoya University

Nagoya, Aichi 464-8603, JAPAN

Abstract

ERL light source and FEL require an electron beam of large current and small emittance. In order to realize an electron gun satisfying such requirements, we started developments of a new-type NEA-photocathode. We have suggested a superlattice photocathode as a new-type photocathode with higher performance than an existing technology. Up to now, we fabricated AlGaAs photocathode samples by molecular beam epitaxy and measured a quantum efficiency and Lifetime after NEA-surface activation.

高輝度NEA-AlGaAsフォトカソード電子源の開発

1. はじめに

電子源の高輝度性能化は、生体分子の観察や3次元構造解析可能な次世代電子顕微鏡の実現のみならず、次世代放射光源であるERL放射光源の実現の鍵となる不可欠な技術要素である。特にERL放射光源を実現するにあたって、電子源には、エネルギー幅が極めて小さく、大電流の高輝度性能が要求されている[1]。このような電子源として、GaAsフォトカソードが、負電子親和力の表面（NEA表面）を持つ利点から要求性能を満たす電子源として期待されている[2]。しかし、従来技術であるバルク状GaAsフォトカソード（バルクGaAs）は、大電流引き出しの際に、NEA表面の寿命問題と量子効率が5%程度と小さいため、励起レーザーの高出力問題を抱えている。

そこで我々は、バルクGaAsを遥かに越える量子効率で、室温レベルの極小エネルギー幅の電子ビームを実現し、実用的長寿命性能を持つ新型GaAsフォトカソードの開発に着手した。

2. 電子源の高輝度化の手だて

電子源の高輝度化、すなわちフォトカソード電子源の高量子効率化と放出電子のエネルギー幅の極小化、かつ次世代の放射光源や電子顕微鏡の実用に耐えうる長寿命化、これらを全て満たす高性能フォトカソード電子源として、我々は半導体結晶に超格子構造を取り入れた超格子フォトカソード電子源を独自に発想した[3]。

それは、超格子フォトカソードは高輝度性能、NEA表面寿命性能に対して、次の二つの利点を持つ

からである。

(1)大きなバンドギャップ、小さな電子親和力の物質選びが可能であり、これにより、真空準位を伝導帯に対して大きく下げることが可能になる。この利点は、量子効率の向上[4]かつNEA表面の長寿命化を兼ねる。(2)量子閉じ込め効果で励起電子のエネルギー状態密度の増幅が可能である。これは、放出電子が極小エネルギー幅のまま量子効率を向上させる利点となる。

3. NEA-AlGaAsフォトカソード開発

3.1 バルク状AlGaAsフォトカソード

我々は、超格子フォトカソードを開発するに先立って、高い量子効率性能を持つバルク状AlGaAsフォトカソードの開発を行った[5]。AlAs半導体は、GaAs半導体に比べ、バンドギャップが大きく（GaAs:1.42eV、AlAs:2.17eV）、電子親和力が小さい（GaAs:4.07eV、AlAs:3.5eV）[6]。この新型フォトカソードは、高輝度性能に最適な超格子の混晶物質比の追及、未だ系統的測定がなされていない量子効率とバンドギャップの相関確認という超格子開発に重要な役割を担う[5]。同時に、量子効率と寿命性能において、従来技術を超えるバルクフォトカソードの実現を目的としている。

3.2 サンプル結晶作成

我々は、量子効率の評価基準となるバルクGaAs結晶及びバンドギャップと量子効率、NEA表面寿命の

相関を系統測定するため、Al混晶比3水準のサンプル結晶を作成した。作成サンプル結晶を図1に示す。サンプル結晶は、真空チャンバーへ装着まで大気に曝される。このとき、良質なNEA表面を得るために深刻な悪影響を与える酸化物や炭化物などの不純物が結晶表面に形成することがわかっている。そこで、本サンプル結晶表面には、表面保護目的で砒素を堆積させている。これにより、真空チャンバー内で加熱洗浄し、保護膜除去することで、結晶成長時の清浄表面にNEA表面活性化ができる。本サンプル結晶作成と表面保護膜処理は、名古屋大学VBLの分子線ビームエピタキシー装置により作成した。



図1 . AlGaAsサンプル結晶

3.3 NEA-GaAs電子源装置

サンプル結晶の量子効率性能測定、寿命測定には、独自開発したNEA-GaAs電子源装置（図2）を用いた。この装置は、 3×10^{-9} Paの極高真空を実現しており、表面清浄化にはタングステン線をフィラメントとした放射加熱洗浄を用い、NEA表面活性化には、光電流が最大になるよう、最適のセシウム量と酸素量の添加によりNEA活性化を行っている。

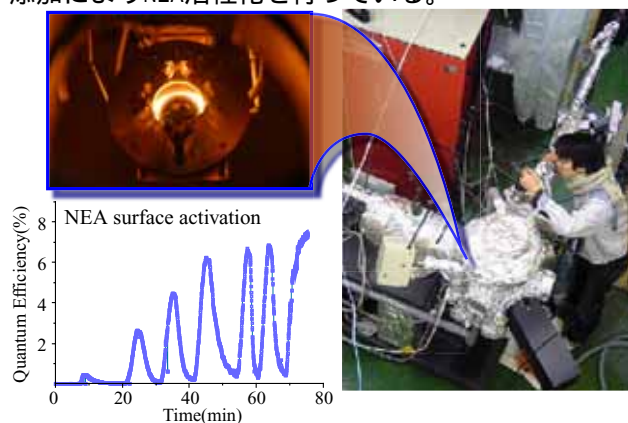


図2 . NEA-GaAs電子源装置

4 . 量子効率、寿命性能評価測定

これまでに、フォトカソード開発の基準サンプルとなるバルクGaAs結晶と作成した中でAl混晶比が最も大きく、大きなバンドギャップが期待できるバルクAlGaAs結晶について、量子効率測定と寿命測定を行った。

4.1 量子効率測定

図3と図4に、バルクGaAs結晶とバルクAlGaAs結晶の量子効率の測定結果を示す。この実験には、励起レーザーとして、720nm-870nmの波長域のTi:Sapphireレーザー（TSUNAMI、Spectra Physics社製）及びAlGaAsバンドギャップ相当の波長付近に対しては、He-Neレーザー（632nm）と670nmの波長のレーザーダイオードを使用した。

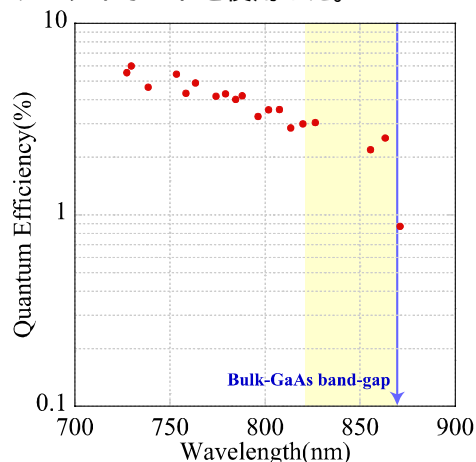


図3 . バルクGaAs結晶の量子効率

バルクGaAsのバンドギャップ相当の励起波長870nm付近に量子効率の肩（落ち）を確認できた。バンドギャップ（870nm）から0.1eV高いエネルギー（820nm）までの量子効率は、2~3%であり、バルクGaAsのバンドギャップ付近での性能としては、妥当な値である。[7]

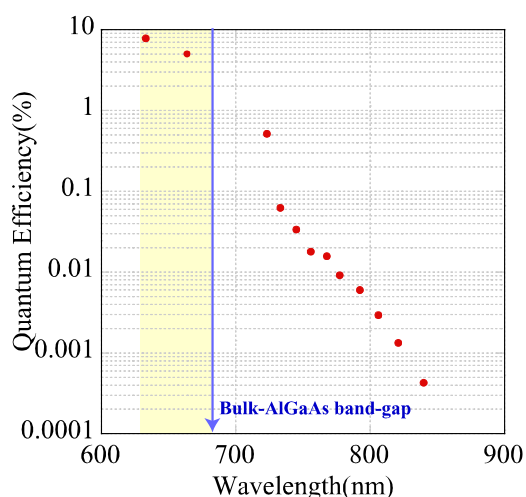


図4 . バルクAlGaAs結晶の量子効率

量子効率は、短波長側へ向かって励起波長720nmから立ち上がり、670nm以降は緩やかに上昇するというバルクGaAsサンプルのバンドギャップ付近と同様の傾向を示し、バルクAlGaAsのバンドギャップが、設計通り680nm付近であることが確認できた。更にバンドギャップ（680nm）から0.1eV高いエネルギー（632nm）までの量子効率は、5~8%とバル

クGaAsサンプルのバンドギャップ付近の量子効率をおおよそ2倍超える性能を持っていることがわかった。

4.2 寿命測定

寿命測定は、作成したサンプル結晶においてバンドギャップの違いによる寿命に対する効果の確認を目的とする。このため、実験条件として、引き出し電子のエネルギーや電流値に寿命が依存しないよう引き出し電圧200V、電流を100nAと小さく抑えた。

バルクGaAs結晶、バルクAlGaAs結晶の寿命測定結果を図5に示す。本測定では、それぞれのサンプル結晶のバンドギャップより0.1eV高いエネルギーの励起波長（バルクGaAs：804nm、バルクAlGaAs：632nm）を用いた。

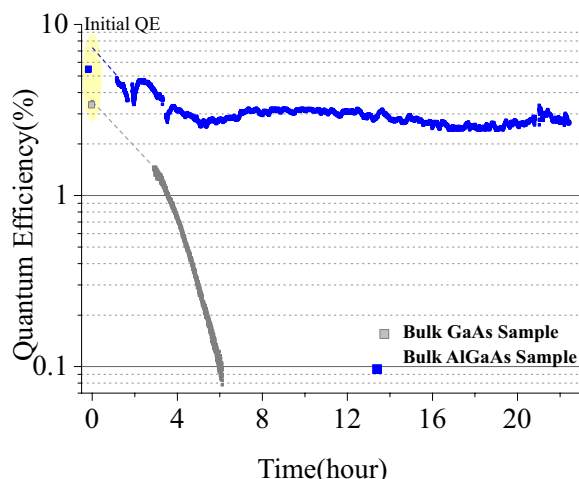


図5 . バルクGaAs, AlGaAs結晶の寿命測定

バルクGaAs結晶では、初期量子効率3.5%から4時間程度で量子効率1%以下になり、約6時間以降では電子が引き出せなくなった。

一方、バルクAlGaAs結晶は、初期量子効率8%から5時間後で量子効率3%まで落ちるものの、その後は、26時間後まで量子効率3-4%を維持した。

NEA表面寿命は、真空準位の上昇が原因と考えられている。バルクGaAsよりもバルクAlGaAsが、バンドギャップが大きく、電子親和力の小さいため、より大きく真空準位を下がる。今回の結果から、真空準位を大きく下げることが、NEA表面維持に有効であることがわかった。

5 . まとめ

これまで、既存技術であるバルクGaAsフォトカソード電子源の量子効率、放出電子のエネルギー幅、寿命の性能を遥かに超える電子源として、大きなバンドギャップ、小さな電子親和力表面、量子閉じ込め効果に着目した超格子フォトカソード電子源開発の提案を行ってきた。

今回、超格子フォトカソード電子源開発に必要な基礎データとして、大きなバンドギャップ、小さな電子親和力表面が、量子効率と寿命性能に有効であることを確認する目的でバルクAlGaAsフォトカソード電子源を開発し、この性能測定を行った。

バンドギャップが最も大きく、電子親和力が最も小さいと期待できるサンプル結晶で、従来技術のバルクGaAsフォトカソード電子源を大きく超える性能（量子効率性能で2倍、寿命性能で大幅な向上）を達成した。表1に性能比較を示す。

今後の予定として、Al混晶比の違うサンプル結晶について、バンドギャップ、電子親和力と量子効率、寿命性能を系統的に測定し、バルクAlGaAsサンプル結晶の測定結果を元に超格子結晶の設計、作成を行い、量子効率、寿命の性能、放出電子のエネルギー幅を行っていく。

6 . 謝辞

本研究は、一部、科学研究費補助金若手B（18740253）の援助を受けている。

参考文献

- [1] Sol M. Gruner, et al., Review of Scientific Instruments, Vol. 73 Issue 3 pp. 1402-1406, 2002
- [2] T. Rao, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A557 pp.124-130, 2006
- [3] Tomohiro Nishitani, et al., 6th Symposium on Advanced Photon Research pp. 212-215, 2004
- [4] T. Nakanishi, et al., AIP Conference Proceedings 421 300, 1998
- [5] Tomohiro Nishitani, et al., The Japan Society of Applied Physics and Related Societies pp. 798, 2006
- [6] Sadao Adachi, J. Appl. Phys. 58 (3), pp. R1-R12, 1985
- [7] T. Maruyama, et al., Appl. Phys. Lett. Vol82, 23, pp.4184-4186, 2003

表1 . バルクGaAs、バルクAlGaAsフォトカソードの性能比較

サンプル結晶	Band-gap energy	量子効率	寿命
バルクGaAs	1.42eV	2 ~ 3%	4時間で初期量子効率の1/3まで低下
バルクAlGaAs	1.80eV	5 ~ 8%	量子効率3-4%を26時間以上維持