

## NEA-Photocathode with high brightness performance

Tomohiro Nishitani<sup>1,A)</sup>, Eisuke Minehara<sup>A)</sup>, Ryoichi Hajima<sup>A)</sup>, Yoshikazu Takeda<sup>B)</sup>, Toru Ujihara<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> FEL Lab., Advanced Photon Research Center, Kansai Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute

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

<sup>B)</sup> Department of Materials Science and Engineering, Nagoya University  
Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, JAPAN

### Abstract

An NEA-GaAs photocathode is expected as a high-brightness electron source satisfying the requirements of ERL-injectors. Although GaAs superlattice has been studied for polarized electron sources, the superlattice has never been applied to an ERL injector, which is usually equipped with GaAs in bulk. We propose GaAs superlattice as a photocathode for an ERL injector. The superlattice has larger NEA and larger joint density of state around band gap than bulk GaAs. These properties of GaAs superlattice will contribute to higher quantum efficiency and smaller emittance far beyond bulk GaAs. We present theoretical consideration based on a band gap model of the GaAs superlattice, and a future plan to develop the superlattice photocathode.

## 高輝度ビーム性能を持つ光陰極の開発

### 1. はじめに

次世代放射光源の一つであるエネルギー回収型リニアック (ERL) を用いた放射光源の実現には、特にコヒーレントX線を生成するためにはX線の回折よりも発散の小さな (小さいエミッタンス) 電子ビームの生成が不可欠である。この要求を満たすには、電子源での熱運動による揺らぎが極めて小さい大電流の電子ビームの生成が不可欠となる。このような電子源として、Negative Electron Affinity表面 (NEA表面) を形成したGaAs半導体光陰極 (NEA-GaAs) は有力な候補である。それは、励起レーザーをバンドギャップに近い波長を選択することで初期エミッタンスを小さくできる利点を持つからである<sup>[1]</sup>。近年、ERL放射光源を目指す研究を行うCornell大学によりNEA-GaAs電子源が用いられ<sup>[2]</sup>、その有用性が示されたが、ERL放射光源の要求性能を満たしていない。そこで、我々はこの要求に応える性能を持つNEA-GaAs電子源として、GaAs半導体そのものを改良した超格子構造を持つGaAs半導体の開発に着手した。

### 2. NEA-GaAs電子源

#### 2.1 偏極電子源

NEA-GaAs電子源は、1975年に高密度偏極電子ビーム生成<sup>[3]</sup>が初めて可能となり、1978年には高エネルギー実験用電子源としてパリティ破れの検証実験へ応用され<sup>[4]</sup>、後のWeinberg-Salam理論の確立に大きく貢献した<sup>[5]</sup>。その後、電子偏極度と励起レーザーによる電子の引き出し効率 (量子効率) の

高性能化を目指し、NEA-GaAs電子源に用いられるGaAs半導体そのものの開発が行われた。初めに名古屋大学-大阪府立大学-大同特殊鋼業共同グループとSLACで開発された歪み構造を持たせたGaAs薄膜 (歪みGaAs)<sup>[6, 7]</sup>では、偏極度50%の壁を突破し、次にKEK-名古屋大学-NEC共同グループで開発された超格子構造を持ったGaAs<sup>[8]</sup>薄膜では、50%を超える偏極度で歪みGaAsを遥かに超える高い量子効率を達成した。更に、これら両方の利点を生かした歪み超格子薄膜が開発され、歪みGaAsを遥かに超える量子効率で90%に迫る高い偏極度を達成しており<sup>[9]</sup>、次世代電子陽電子加速器 (ILC) の実用偏極電子源として有力視されている。

#### 2.2 NEA表面

NEA-GaAs電子源の最大の特徴は、NEA表面を利用しているところにある。

半導体光陰極から電子が真空中へ飛び出すには、真空準位よりも高いエネルギーを必要とする。伝導帯へ励起された電子は、正孔との再結合時間は、フォノン散乱によりエネルギーを失う時間よりも十分長い場合、NEA表面を持つ光陰極は正の電子親和力表面を持つ光陰極 (PEA光陰極) よりも電子を取り出すことができる領域が深い。NEA表面を持つ光陰極が高い量子効率を持つ理由はここにある。価電子帯電子の選択励起を必要とする偏極電子源が、バンドギャップエネルギーで励起する電子が真空中へ放出できるのはこのためである。

近年になり、NEA表面が持つこの特徴がERL放射光源用高輝度電子源としても有用であると注目されるようになった<sup>[1]</sup>。それは、NEA表面を持つ半導体から真空中へ放出する際の電子の熱振動を真空準位

<sup>1</sup> E-mail: nisitani@popx.tokai.jaeri.go.jp

と伝導帯準位の差分程度<sup>[10]</sup>にできる利点を持つからである。NEA表面を持つ光陰極は、先に示したPEA光陰極よりも高い量子効率性能に加え、この小さい熱振動性能を持つことで高輝度電子源として期待できる。

### 3. 超格子電子源で実現する高輝度性能化

#### 3.1 従来のNEA-GaAs電子源

ERL放射光源の実現には、X線の回折よりも発散の小さい電子ビームの生成が不可欠である。それには、電子源で、熱運動による揺らぎが極めて小さく且つ大電流の電子ビーム生成（高輝度性能）が必要である。

NEA表面を持つ半導体は、前節に示したように高輝度性能の利点を持つが、Cornell大学で用いられるような従来技術のバルク状のGaAs半導体（バルクGaAs）は、ERL放射光源の要求性能を満たしていない。我々はこの理由として、バルクGaAs電子源には、熱運動性能とNEA表面の寿命性能の間に、次に述べるジレンマを抱えているためであると考えた。電子の熱運動を極小化するバンドギャップエネルギーの電子励起では、量子効率（QE）が小さく（5%）、大電流引き出すために励起レーザーが高出力になり、NEA表面がレーザーで破壊される（表面短寿命問題）。反対により高いQEになるよう、バンドギャップより大きいエネルギーで電子励起すると、電子の熱運動が大きくなってしまう（大きい熱運動問題）。

#### 3.2 超格子構造が持つ高輝度性能への利点

我々は、従来技術を超える高いQEでの大電流引き出しと電子の熱運動極小化を同時実現のために、量子閉じ込め効果を高輝度性能に利用した超格子構造GaAs半導体（超格子GaAs）が有効的であると考えた。

ここでの超格子構造とは、エネルギーギャップの違う2つの異種半導体をナノサイズの厚さで量子井戸層、障壁層として繰り返し形成させ、周期ポテンシャル構造を持たせたものである。このように形成された超格子のポテンシャル構造は、周期構造軸方向の電子エネルギー状態を閉じ込める（量子閉じ込め効果）<sup>[11]</sup>。この超格子構造が持つ高輝度性能への利点は、図1にバルクGaAsと超格子GaAsの電子の吸収係数に対応する結合状態密度で説明できる。バルクGaAsでは、小さい熱運動性能になるようバンドギャップエネルギー付近で電子励起すると状態密度が小さく、状態密度が大きくなるよう励起エネルギーを選ぶと熱運動が大きくなる（ $\Delta E_{\text{バルク}}$ ）。一方、超格子GaAsでは、バンドギャップの励起エネルギーで、状態密度が増幅し（QE増幅）、そのエネルギー幅（ $\Delta E_{\text{超格子}}$ ）も小さくなるよう（熱運動の極小化）量子閉じ込め効果が働く。

このようなQE増幅と熱運動の極小化という高輝度性能の実現を超格子構造の量子閉じ込め効果に着

目した例は他に無く独自の着眼点である。

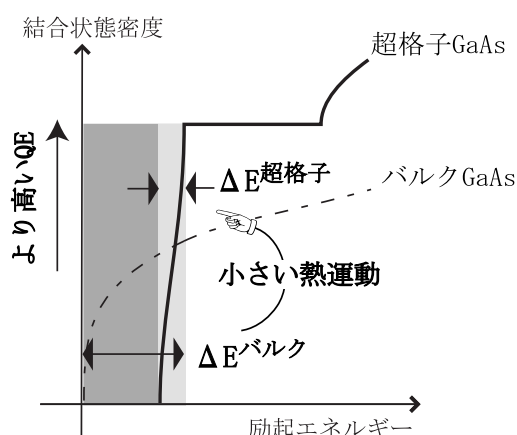


図1：バルクGaAsと超格子GaAsの結合状態密度

### 4. 高輝度電子源超格子の開発

本研究では、高いQE性能と小さい熱運動性能を持つ超格子として、最適結晶構造条件を追求したGaAs-AlGaAs超格子の作成をし、高い量子効率性能と小さい熱運動性能の実証、安定した大電流引き出しの実証を目指す。

超格子結晶の開発実施フローチャートを図2に示す。初めに実験装置の準備とバルクAlGaAs結晶の作成をし、このQE測定結果から最適Al混晶比の追及を行い、次にAlGaAs-GaAs超格子の作成とQE及びその励起エネルギースペクトラムの測定と大電流試験の実施を計画する。

#### 4.1 超格子結晶作成

高いQE性能と小さい熱運動性能を実現する超格子構造パラメータには、超格子に用いる材料とその混晶比、井戸障壁層の厚さがあり、最適なこれらのパラメータ選択方法を次のように考えた。

超格子材料としてバンドギャップがGaAsよりも大きなAlGaAsを選択することで、バルクGaAsよりも大きなバンドギャップを持つGaAs-AlGaAs超格子を作成する。これは、QEがバンドギャップにより高くなるという傾向を持つからである<sup>[12]</sup>。

Al混晶比の最適化は、バルクAlGaAs結晶を作成しその量子効率測定により行い、QEが高くなるAl混晶比を選択する。

超格子の井戸層と障壁層の層厚は、量子閉じ込め効果が、高い結合状態密度で小さい熱運動を持つ電子が得られる値をクローニヒ・ペニーモデルのバンド構造計算<sup>[13]</sup>により導出する。この層厚とバルクAlGaAs結晶で条件出しを行ったAl混晶比を設計構造としGaAs-AlGaAs超格子を作成する。

結晶作成には、名古屋大学工学研究科の竹田研究室が所有する結晶成長装置（Molecular Beam Epitaxy - MBE - 装置）を用いる。

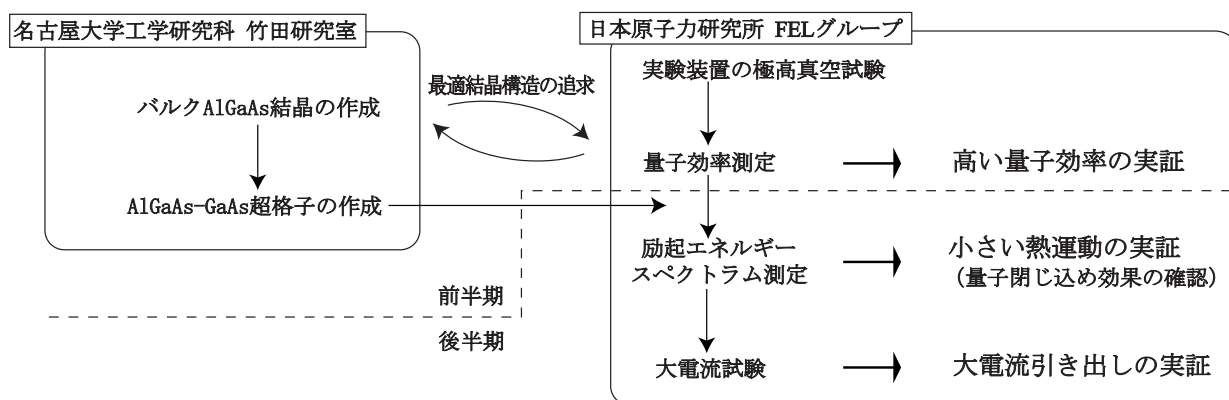


図 2 : 超格子結晶の開発実施フローチャート

#### 4.2 量子効率と熱運動性能の評価と大電流試験

NEA表面作成とQE測定、大電流引き出し試験は、図3に示す原研が所有する光陰極測定装置で行う。本装置は、NEA表面作成に不可欠な超高真空 ( $5 \times 10^{-9}$ Pa) を既に達成しており、NEA表面の構成元素であるセシウムと酸素の蒸着が可能であり、蒸着の面均一性のその場観察が可能な高速反射電子線装置 (RHEED) と水晶発振式膜厚計を装備している。

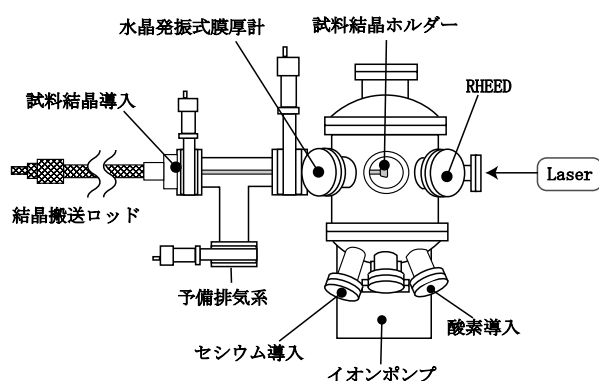


図 3 : 光陰極測定装置

超格子結晶の性能評価は、NEA表面活性化後、波長可変のチタンサファイアレーザーを励起レーザーとして用い、QE測定とその励起エネルギースペクトラムにより量子閉じ込め効果の評価を行う。更に、ミリアンペアオーダーでの電流引き出しを行い、NEA表面の寿命測定と大電流引き出しの安定性を確認する。

今後の予定として、本研究のGaAs超格子開発と並行し、GaAs超格子電子源のビームエミッタンス測定と原研が所有するJAERI-FEL入射器への導入を検討する。

## 5. 結び

ERL放射光源では電子源に高輝度性能が要求され、この有力候補としてNEA-GaAsが高輝度電子源として注目されるようになった。NEA-GaAs電子源はこれまで偏極電子源分野において、高い偏極電子源性能を目指し、歪みGaAsや超格子薄膜などGaAs半導体そのものの開発が盛んに行われ、高性能化を実現してきた。本研究のGaAs超格子電子源の開発は、ERL放射光源の要求性能を満たす鍵を、偏極電子源分野と同じように、GaAs半導体そのものの開発により切り開くアプローチである。

## 参考文献

- [1] S. M. Gruner and M. Tigner, eds., "Study for a proposed Phase I Energy Recovery Linac Synchrotron Light Source at Cornell University, CHSS Technical Memo 02-003, JLAB-ACT-01-04, 2001
- [2] Sol M. Gruner et al., Review of Scientific Instruments, Vol. 73, Issue 3, (2002) pp. 1402
- [3] D. T. Pierce et al., Appl. Phys. Lett. 26 (1975) 670
- [4] C. Y. Prescott et al., Phys. Lett. 77B (1978) 347
- [5] UA Collaboration, Phys. Lett. 122B (1983) 103
- [6] T. Nakanishi et al., Phys. Lett. A158 (1991) 345
- [7] T. Maruyama et al., Phys. Rev. Lett. 66 (1991) 2376
- [8] T. Omori et al., Phys. Rev. Lett. 66 (1991) 2351
- [9] T. Nishitani, et al., J. Appl. Phys. 97 (2005) 094907
- [10] A. S. Terekov and D. A. Orlov Proc. SPIE 2550 (1995) 157
- [11] 佐々木昭夫, 量子効果半導体, 電子情報通信学会
- [12] T. Nakanishi, et al., AIP Conference Proceedings 421 (1998) 300
- [13] G. Bastard, Phys. Rev. B24 (1981) 5693