

ANALYSIS OF TEMPORAL VARIATION OF QUANTUM EFFICIENCY SPECTRUM OF NEA-GaAs PHOTOCATHODE

Y. Masumoto^{*A)}, M. Kuriki^{A)}, H. Iijima^{A)}

Grad. Sch. for Advanced Sciences of Matter, Hiroshima Univ, Higashi-hiroshima

Abstract

We study Negative electron affinity (NEA) GaAs photo-cathode for a high brightness electron source. Electrons from NEA GaAs photo-cathode have good quality for lots of advanced techniques. On the other hand, emission from the cathode is decreased in time and extracted beam current. We have measured temporal evolution of quantum efficiency (QE) spectrum of NEA-GaAs photo-cathode after activation. In the result, we have revealed that electron affinity did not vary (at least, stay at negative during experiment), but the spectrum shape was changed. To study the evolution, we analyze the spectrum by assuming a photo-electron emission model, where the NEA surface is represented with a potential wall defined by the height and thickness. We found that the spectrum evolution can be interpreted as increasing the potential wall thickness.

NEA-GaAs フォトカソードにおける量子効率スペクトルの時間変化の解析

1. はじめに

Energy Recovery Linac (ERL)等の先進的加速器開発において、電子源は加速器全体の性能を決定する重要な役割を担っており性能向上の研究が急速に進められている。ERLに求められる電子ビーム性能は、電子源において低エミッタンス(0.1 ~ 1.0 π mm \cdot mrad)、大電流(10 ~ 100 mA)、高量子効率(1%あるいはそれ以上)、長寿命(数日間以上)、などが挙げられる。ERLではこれら性能を満たすビームを発生させるために、NEA GaAs 光陰極を用いた高電圧 DC 電子銃開発がおこなわれている。^[1]

NEAとはNegative Electron Affinity、負の電子親和性と呼ばれる表面状態である。通常物質では真空ポテンシャルは伝導帯の底よりも高くなっており、電子親和性は正である。NEAでは真空準位が伝導帯の底よりも低い状態になり、バンドギャップ(GaAsの場合1.42 eV:300K)程度の光で伝導帯に電子を励起することで初期エミッタンスの小さい電子ビームを得ることができ、その高性能から加速器のみならず電子顕微鏡への応用も検討されている。

NEA表面は極高真空中において清浄化したp型GaAsの表面にセシウム(Cs)と酸素(O₂)を蒸着することで得られる。NEA表面形成直後は633 nmの光に対して10%程度の量子効率(QE)であるが、時間の経過やビームの引き出しとともに減少してしまい、寿命問題として認識されている。これは真空中の活性ガスとの反応やビームにより発生した正イオンの逆流によりNEAが破壊されていくと考えられている。この問題は実用化に際し解決すべき大きな問題である。QEの低下の原因を表面状態の側面から考察すると、活性化によって引き下げられた真空準位が時間とともに徐々に上昇していると考えられるが、それを裏付ける研究はあまりなされていない。そこ

で、我々はこのQEとNEA状態の関連を明らかにすることを目的として研究をおこなった。本実験ではカソードに波長の異なる光を照射してQEスペクトルを計測し、その時間変化を測定した。また、スペクトルを再現するような光電放出モデル、具体的にはNEA表面ポテンシャルの形状を検討し、そこから表面状態についての考察を行った。

2. 実験装置

図1に活性化・ビーム引き出しのための真空チャンバー、および光学系の概略図を示す。真空チャンバー内には光電陰極となるZnドープのp型GaAs基板がマウントされ、放出電流を計測することでQEを測定する。光電効果を生じさせるための励起光は、外部からビューポートを通じて導入される。本研究では住友電工社製GaAs結晶をカソードとして用いた。結晶にはZnが 5.0×10^{19} /cm³ドープされており、不対電子の内部への拡散によるバンドベンディングにより、実効的な仕事関数を下げている。光学系はXeランプと分光器、光の輸送や整形のためのレンズ、ミラー等からなる。本実験では650 ~ 1000 nmの範囲で量子効率の測定を行った。光学系には二次光を防ぐため、透過限界520 nmのフィルターを配置している。

*E-mail: m106105@hiroshima-u.ac.jp

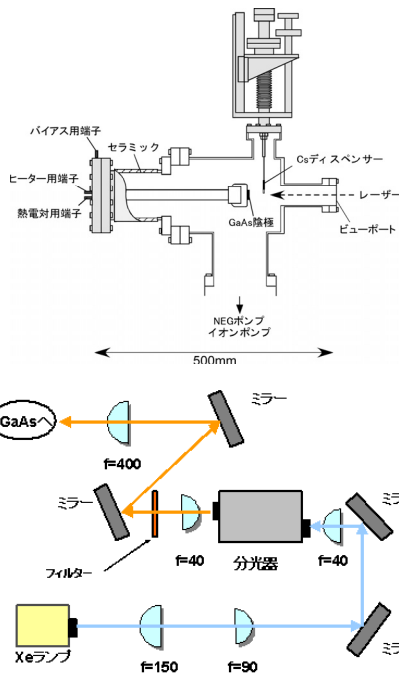


図 1: 真空チェンバー断面図 (上)、光学系 (下)

3. 量子効率スペクトルの測定

実験は GaAs 表面の加熱洗浄、Cs と O₂ を交互に 5 回ずつ蒸着し活性化した後、QE スペクトルの測定を開始した。633 nm の光を 10 分照射し 5 nm 毎に 650 ~ 1000 nm の光を照射、暗電流測定を 1 秒行う。これらの測定を繰り返し測定して量子効率スペクトルの時間変化を観測した。図 2 は 633 nm の光に対する QE の時間変化を示したグラフである。

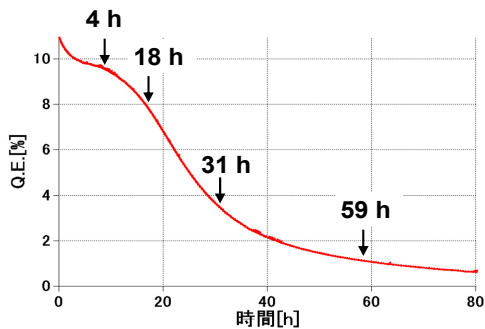


図 2: QE の時間変化

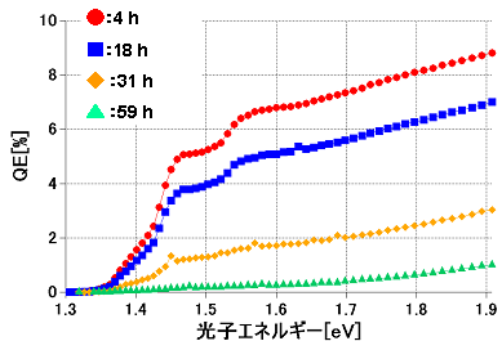


図 3: 時間ごとの QE スペクトル

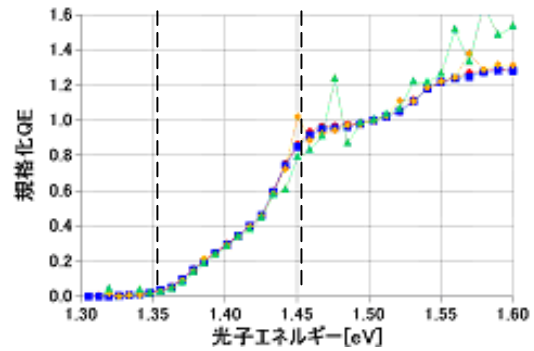


図 4: 1.5 eV での QE で規格化を行った。

図 3 に活性化終了してから 4, 18, 31, 59 時間後に計測した QE スペクトルを示す。全ての測定領域において時間とともに量子効率が低下するとともに、スペクトル形状の変化がみられた。このスペクトル形状の変化を単純な真空準位の上昇だけで説明することは困難である。図 4 に 1.5 eV の QE で規格化した QE スペクトルの時間変化を示す。使用した GaAs には高濃度の Zn ドープを施しているためバンドギャップ 1.42 eV よりも低いエネルギーで光電流が観測された。これまでは活性化により PEA(Positive Electron Affinity)から NEA になることから QE の低下にも真空準位の変化が大きく影響すると考えられていた。しかし、図 4 内の破線部で示した範囲での QE スペクトルはほとんど時間変化していないことが分かる。これは時間による真空準位の変化が QE に影響していないことが示唆される。これらのことから QE の低下は真空準位の上昇ではなく、別の要因が大きく影響していると考えられる。そこで NEA によって GaAs 表面にポテンシャル障壁が形成されると仮定し、NEA-GaAs からの電子放出の計算式を算出した。一般的な光電子放出式 (光が入射してから電子が放出されるまで、光による電子の遷移、励起した電子の角度分散、表面に到達するまでの再結合) に加えて表面ポテンシャル障壁の透過確率を考慮して式の構築をおこなった。

4. 光電子放出

NEA 表面の形成によって GaAs 表面に図 5 のようなポテンシャル障壁が生成され、伝導帯に励起された電子はポテンシャル障壁を透過して真空中に放出されると仮定した。計算を簡単にするため、NEA 表面のポテンシャル障壁は図 5 のように矩形の障壁を仮定し、そこでの透過確率を計算した。^{[2],[3]}

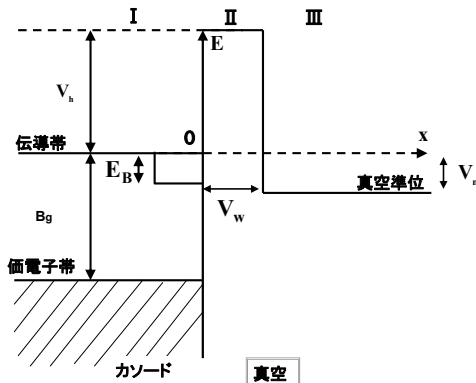


図 5: NEA-GaAs のバンド構造

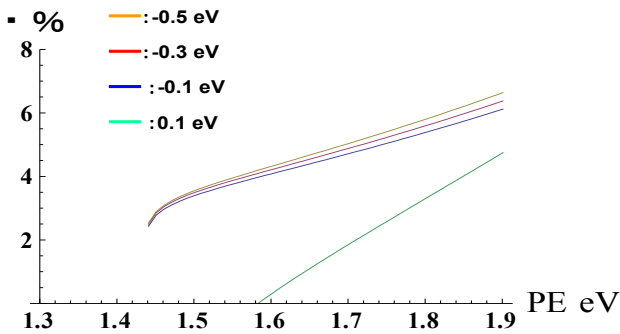


図 6: 真空準位 V_n を変化させたときの計算値。黄, 赤, 青, 緑の線が $V_n = -0.5, -0.3, -0.1, 0.1$ に相当

図 6 は真空準位の大きさを変化させたときの QE の計算結果である。 $V_n = 0$ eV が伝導帯の最低準位と同じレベルに相当する。 NEA 状態である $V_n < 0$ の範囲において V_n を変化させても QE スペクトルの形状にほとんど影響しない。 一方、 $V_n > 0$ ではスペクトルの閾値光子エネルギー（光電子が露に観測され始める光子エネルギー）が高エネルギー側に移動している。 今回得られた実験結果においては光電子放出の光子の波長における閾値の変化は観測していないことから、 V_n はすくなくとも測定中は負の値にとどまっていることが結論される。 そこで、以降の解析では $V_n = 0.1$ eV に NEA の値を固定した。 ポテンシャル障壁の高さ及び厚さをモデルのパラメーターとして、 QE スペクトルの時解析を行った。

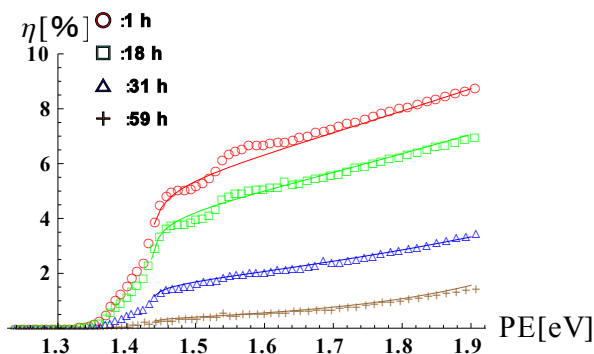


図 7: QE スペクトルの時間経過の実験値と計算値

図 7 にその結果を示す。 記号は各々の時間における量子効率の測定値をあらわしており、 曲線はモデルによる理論曲線を表している。 図 8 にフィッティングにより決定された障壁の高さ及び厚さを時間の関数として示す。 障壁の高さは 30 時間程度まではほぼ一定にたもたれており、その後二割程度減少しているように見える。 また厚さは時間と共に上昇し、30 時間以降はその変化が急激になっている。

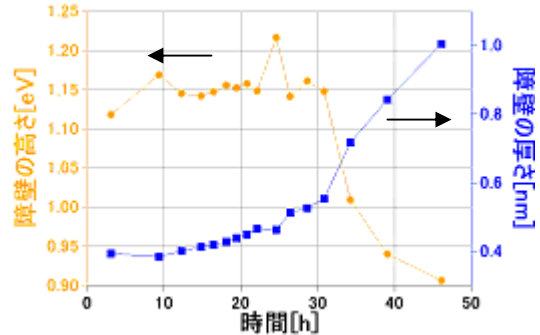


図 8: 障壁の高さ及び厚さの時間変化

物理的に考えれば、障壁の高さが時間とともに低くなるということは考えにくい。 障壁の減少の大きさが相対的に二割程度であることから、今回の結果より得られた障壁の高さの減少は、モデルの持つ決定不全性の問題である可能性が高い。 すなわち、障壁の高さが不変な場合でも、データの変化の一部をモデルが障壁の高さの変化として解釈してしまうという可能性である。

他方、厚みの変化はおよそ 2.5 倍と決して小さくない。 したがってこの変化がモデルのパラメーター間の決定不全の問題からみえているということは考えにくい。 したがって今回の結果からは、量子効率のスペクトル形状および絶対値の変化は、厚みの増加をおもな要因として生じている可能性がきわめて高いと結論できる。

5. まとめ

高品質電子ビーム源として有望な NEA GaAs 光陰極の実用化において、最大の問題となっている寿命問題への理解を深めるために、QE スペクトルを NEA 活性化時において測定した。 QE は時間とともに全波長域において減少した。 NEA 表面を矩形波ポテンシャルで表したモデルとの比較から、スペクトル形状の変化はポテンシャル厚みの増加を主な要因として生じており、NEA から PEA に変化していないことが分かった。 NEA の大きさはほとんど変化していないことが示唆される。 これらの詳細は明らかにされておらず、ぜひとも表面状態の定量的な理解を目指すべきと考える。

参考文献

- [1] T. Rao et al., "Photocathode for the energy recovery linacs", Nucl. Instr. and Meth. A 557 (2006) 124-130
- [2] H.Rougeot and C.Baud, (1979)."Negative Electron Affinity Photoemitters" (L.Marton ed.), vol.48.Advances in Electronics and Electron Physics
- [3] "半導体中における光過程"Jacwues I. Pankove 著, 西沢潤一 他 訳 (近代科学社出版)