ウェットエッチング法によって作製した p 型 GaAs 陰極からの電界放射特性*

吉本 智巳^{*1}・紙丸 大^{*1}・菊池 悟^{*2}・横川 直博^{*2}・岩田 達夫^{*1}

(受理2002年4月8日, 掲載決定2002年8月3日)

Field Emission Properties from p-Type GaAs Emitter
Fabricated by Wet Etching Process*

Tomomi YOSHIMOTO^{*1}, Dai KAMIMARU^{*1}, Satoru KIKUCHI^{*2},
Naohiro YOKOGAWA^{*2} and Tatsuo IWATA^{*1}

^{*1}School of Engineering, Hokaido Tokai University, 5-1-1-1 Minamisawa Minami-ku Sapporo 005-8601

^{*2}Eniwa Development Center, Kyoto Semiconductor Corporation, 385-31 Toiso Eniwashi Hokkaido 061-1405

(Received April 8, 2002, Accepted August 3, 2002)

The field electron emission properties from a p-type GaAs emitter fabricated by wet etching process is investigated. Since the emission pattern doesn't show any symmetry, the surface of the emitter isn't completely clean. The nonlinear Fowler-Nordheim (F-N) plots are obtained. The emission current at gentle slope region in the F-N plots shows strong light intensity and temperature dependence. Therefore, it is found that the emission current is restricted by electron generation ratio in the conduction band. The estimated activation energy of emitted electron is 0.31 eV. The most probable conclusion is that the Fermi level is pinned below 0.31 eV from bottom of the conduction band and electrons generated from the surface state to the conduction band is emitted.

1. はじめに

p 型 Si 陰極からの電界放射電流が定電流特性を示す領域を持つことに興味を持たれている¹⁻³⁾. この定電流動作は電界放射電子の生成律速に起因する. この定電流動作で見られる F-N プロットの非線形特性は清浄表面を有する p 型 GaAs 陰極でも観測されている⁴⁾. p 型 GaAs は非磁性体で励起電子のスピン制御が容易であることから, スピン偏極走査トンネル顕微鏡 (STM) の探針としての応用が進められている⁵⁻⁷⁾. STM 探針では探針先端の清浄度合いをかならずしも確認できない. また, 電子放射プロセスにおける表面準位の重要性も指摘

されている⁸⁾. したがって, p 型 GaAs 探針を用いたスピン STM の実現においては, 必ずしも清浄でない種々の表面状態における p 型 GaAs 陰極からの電界放射特性の情報を得ることに興味を持たれる.

本論文ではウェットエッチング後, 超高真空中で熱処理を行った p 型 GaAs 陰極の電界放射特性を調べ, 電界放射電流が Fowler-Nordheim 則に従わない電圧領域 (非 F-N 領域) が観測されることを示す. また, 非 F-N 領域における電界放射電流の光照射強度と温度の依存性を明らかにする. さらに, 非 F-N 領域は電子の生成律速で説明できることを示すとともに, 電界放射電子の活性化エネルギーを測定し, 電界放射プロセスに表面準位が深く関与していることを示す.

2. 実験および検討

p 型 GaAs 基板 (面方位<100>, $p = 1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) か

* 2002年 第49回応用物理学関係連合講演会で発表

^{*1} 北海道東海大学工学部 (〒005-8601 札幌市南区南沢 5-1-1-1)

^{*2} 京都セミコンダクター恵庭開発センター (〒061-1405 北海道恵庭市戸歳385-31)

Fig. 1 Field emission image. The emission image doesn't show any symmetry.

Fig. 2 Fowler-Nordheim (F-N) plots. The nonlinear F-N plots are obtained. I: gentle slope region, II: steep slope region.

ら先端方向が $\langle 110 \rangle$ になるように棒状 ($0.3 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$) の試料を切り出した。硫酸系エッチング液 ($\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 5 : 1 : 1$) を用い、試料の先端部をエッチングし針状の陰極に整形した。エッチング後、この陰極を純水洗浄し電界放射顕微鏡 (FEM) に導入した。タングステン支持ループ上に点溶接された管状のタンタルホルダーに陰極を保持した。陰極の昇温は通電加熱により行われ、温度はタンタルホルダーに点溶接された $\text{W5\%Re-W26\%Re}$ 熱電対によって測定した。陰極の直上に view port を設けて、陰極に光を照射できる構造とした。陰極-陽極 (蛍光スクリーン) 間距離は

Fig. 3 Light Intensity dependence of the emission current at the gentle slope region in F-N plots. P_0 : light intensity without ND filter. I_0 : emission current at P_0 . The emission current shows strong light intensity dependence.

50 mm である。陰極をアースとし蛍光スクリーンに正電圧を印加し、電界放射電流は陰極側で測定した。排気系はターボ分子ポンプとスパッタイオンポンプからなり、FEM 全体を 120°C で 300 分のベーキングを行った後の到達圧力は $3 \times 10^{-8} \text{ Pa}$ であった。

無処理の p 型 GaAs 陰極からの電界放射電流は極めて変動が大きく、安定した電界放射電流を得ることは困難であった。電界放射電流の安定化のために 250°C で 45 分間の陰極の熱処理を行った。Fig. 1 に熱処理後の電界放射像を示す。GaAs の結晶方位 $\langle 110 \rangle$ を示すような明確な対称性のある電界放射像は得られず、再現性のある清浄面を定義することは出来なかった。この電界放射像から電界放射は陰極先端の面積から比較すると小さな限られた領域から行われていることが分かる。これは電界放射が表面の突起部や仕事関数の小さな特定領域から優先的に行われていると考えられる。この状態は 450°C までの熱処理でも基本的に変化はなかった。Fig. 2 に 250°C で 45 分間の熱処理を行った後に室温まで温度を下げて測定した Fowler-Nordheim (F-N) プロットを示す。Fursey の報告と同様に非線形な F-N プロットが確認できた⁴⁾。印加電圧が小さく電界放射電流も小さい場合 (領域 I)，電圧の変化に対して電界放射電流の変化は小さい。また、印加電圧が大きく電界放射電流も大きい場合 (領域 II)，電圧の変化に対して電界放射電流の変化は急峻である。 450°C までの加熱では、表面状態の変化にともなって F-N プロットの領域 I、II の傾きの大きさは

Fig. 4 I - V characteristics for various temperatures at the gentle slope region in F-N plots. The emission current shows strong temperature dependence.

変化するが、二つの領域に分かれる非線形性はいぜんとして観測された。この温度範囲では、電界放射像の輝点の位置が大きく移動することや輝点の径も大きく変化しなかった。したがって、熱処理によるF-Nプロットの変化は形状因子よりは、陰極表面のGa, Asのストイキオメトリの変化あるいは残留不純物の脱離、移動の影響が大きいのではないと思われる。Fig. 3は領域I（印加電圧4.0 kV）における電界放射電流の光強度依存性を示す。光源はタングステンランプで、光照射強度はニュートラル・デンシティ（ND）フィルタを用いて調整した。これより照射光強度の増加とともに電界放射電流も比例して増加することが確認できる。この結果から電界放射電流は電子の生成速度で制限されることが決定される。電界放射電流は領域IIでは温度依存性がなく、領域IではFig. 4に示すように大きな温度依存性を示した。これより温度の上昇にともなって電界放射電流は増加することがわかる。F-Nプロットで傾きの小さい領域では、p型Siの場合と同様に、表面への電子の供給量が十分でないことにより放射電流が制限されてゆるやかな傾きになるものと考えられる。Fig. 5に印加電圧4.0 kV一定での電界放射電流のアレニウスタイププロットを示す。電圧一定でトンネリング確率は変化しないから、電界放射電流が熱的に励起されたキャリア密度に比例するとすれば、この結果は放射電子の活性化エネルギーを与える。グラフの傾きから求めた活性化エネ

Fig. 5 Arrhenius type plots of $\ln I$ against $1/T$. The estimated activation energy is 0.31 eV.

ルギーは0.31 eVである。この値はGaAsのバンドギャップ1.42 eVと比較して非常に小さく、電界放射電子の励起プロセスに表面準位が関与しているものと考えられる。したがって、本研究で用いたp型GaAs陰極の表面ではフェルミ準位は伝導帯の下端から0.31 eV程度付近で固定されていると考えられる。電界が比較的小さい領域では、表面準位から伝導帯に励起された電子のトンネル電流が支配的と考えられる。電界が大きくなり伝導帯の電子のトンネリング確率が1に近づき、電界依存性が小さくなると、電界放射電流は電子の生成速度で制限されるため、F-N則から外れ放射電流の増加がゆるやかになる特性を示すと考えられる。電界を更に増加させると、表面準位付近のバリアもトンネリングに寄与できる程度に薄くなり、直接表面準位から電子がトンネリングできようになり電界放射電流がF-N式に従って増加するものと説明できる。

3. まとめ

実表面を有するp型GaAs陰極からの電界放射特性を評価した。その結果、非線形なF-Nプロットが得られること、すなわち低電界領域では電界放射電流の変化が少ないことおよび高電界領域では放射電流が急激に増加することが分かった。電界放射電流の変化が少ない領域では放射電流は光強度および温度依存性を示し、伝導帯への電子の生成速度で制限されることが明らかになった。電界放射電流の温度依存性から求めた電子の活性化エネルギーは0.31 eVであった。この値はGaAsのバン

ドギャップと比較して非常に小さく、電界放射電子の励起プロセスには表面準位が関与することが示唆された。

謝 辞

実験に協力頂いた卒業研究生の鶴田洋紹君に感謝する次第である。また、本研究の一部は松前重義記念基金および東海大学総合研究機構の助成によって行われた。関係各位に感謝する。

〔文 献〕

1) 伊藤, 金丸, 松川: 信学論 (C-II), Vol. J82-C-II,

No. 5, pp. 247-257 (1999).

2) K. Sawada, K. Ji, and T. Ando: Jpn. J. Appl. Phys., 33, pp. L1345-L1347 (1994).

3) T. Yoshimoto, T. Iwata, K. Kikuchi and N. Yokogawa: Jpn. J. Appl. Phys., 33, pp. L4197-L4198 (2001).

4) G. Fursey: Applied Surface Science, 94/95, pp. 44-59 (1996).

5) K. Sueoka, A. Subagyo and K. Mukasa: STM'99 July 18-23, Seoul Korea (1999).

6) 篠原, 山口: 信学論 (C), Vol. J83-C, No. 9, pp. 835-841 (2000).

7) S. Hattori, K. Sueoka, Y. Ohdaira, H. Hori and K. Mukasa: Jpn. J. Appl. Phys., 40, pp. 4337-4339 (2001).