集束イオンビームプロセスを用いて製作した Si エミッタの電界放射特性*

吉本 智巳^{*1}・岩田 達夫^{*1}・末岡 和久^{*2}・武笠 幸一^{*2}

(受理2000年4月11日, 掲載決定2000年6月3日)

Field Emission Characteristics from Si Emitter Formed by Focused Ion Beams

Tomomi YOSHIMOTO^{*1}, Tatsuo IWATA^{*1},
Kazuhisa SUEOKA^{*2} and Koichi MUKASA^{*2}

^{*1}(Department of Electronic and Information Engineering, Hokkaido Tokai University,
5-1-1-1 Minamisawa inami-ku Sapporo 005-8601)

^{*2}(Nanoelectronics Laboratory, Faculty of Engineering, Hokkaido University,
Kita-13 Nishi-8 Kita-ku Sapporo 060-8621)

(Received April 11, 2000, Accepted June 3, 2000)

The field emission characteristics from an n-type Si field emitter formed by focused ion beams (FIB) milling process were investigated. The n-type Si emitter was sharpened by circularly scanned Ga⁺ ions to reduce the radius apex to about 10 nm. The emission characteristics from the emitter were strongly affected by the annealing temperature. The slope of Fowler-Nordheim (F-N) plots and pre-exponential factor of F-N equation were small without annealing process. Both of them increased remarkably with increases in the annealing temperature. The F-N plots of the emitter annealed at 670°C showed slight saturation tendency at high applied voltage region, which was commonly observed from p-type Si emitter. After field evaporation of the emitter surface, the slope of the F-N plots had an inclination to become a linear.

1. はじめに

近年, Si エミッタからの電界放射の研究は, 急速に発展したフィールドエミッションディスプレイ (FED) 用の電子源として注目されている¹⁾. この Si エミッタ製作のキーテクノロジーの一つはエミッタ先端の先鋭化である. 現在までに我々は集束イオンビーム (FIB) プロセスを用い走査プローブ顕微鏡用の探針の製作を行ってきた^{2,3)}. このプロセスは Ga イオンビームをプローブ先端方向から円走査することにより物理的にエッチング

し, 鋭くかつ再現性良く先端半径を小さくするものである. 電界放射エミッタにおいてもその先端半径が小さいことは, 低い引き出し電圧で電子放射が可能である点から重要である.

本論文では Ga イオンを用いた FIB プロセスにより Si エミッタ先端の先鋭化の方法について述べ, その電界放射特性を評価する.

2. 実験および検討

FIB 装置はエリオニクス社製 FIB 装置 (EIP-3300) で, 電子線描画システムを付加したものである. この描画システムによりイオンビームのベクトル走査を行う. ビームの細小移動量は 0.02 nm である. イオンビームのスポット径は可動絞りにより 4 段階に調整でき, 最小イオンビームスポット径は約 50 nm である. また, 二つの

* 21th International Vacuum Microelectronics Conference, 6th-9th July 1999 Darmstadt Germany にて発表

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

^{*2} 北海道大学大学院工学研究科ナノエレクトロニクス分野 (〒060-8621 札幌市北区北13条西8丁目)

Fig. 1 Focused ion beams (FIB) milling process for fabrication of Si emitter. (a) chemical etching, (b) coarse sharpening, (c) fine sharpening.

Fig. 2 SEM image of n-Si emitter after FIB process. The radius of apex of the emitter is about 10 nm.

二次電子検出器を設置して実験中にその場で凹凸二次電子像を観察できる。

Fig. 1 に FIB を用いた加工方法を示す。n 形 Si ウェーハ (5 Ωcm) を先端方向 $\langle 110 \rangle$ になるようにロッド状に切り出し、ウェットエッチング (HF:HNO₃=1:4) によって先端部を針状に整形する (Fig. 1(a))。次にこの整形した試料を 30 KV で加速された Ga イオンを用いて先端の先鋭化を行う。最初に 200 pA のイオン電流で半径 1 μm の円走査を行い、エミッタの外側を大まかに削り落とす (Fig. 1(b))。さらに、走査する円の半径を次第に小さくし、50 pA のイオン電流で半径 10 nm の円走査を 4 分間行い最終形状を得た (Fig. 1(c))。FIB プロセス後の Si エミッタの走査電子顕微鏡 (SEM) 写真を Fig. 2 に示す。この写真のエミッタは Ga イオンミリング前のエミッタの最も先鋭な部分を狙って加工したため対称性を犠牲にした。先端半径は装置の分解能に近い 10 nm 程度と見られる。この値は以前に我々が報告した SPM 用の W 探針の場合とはほぼ同じと推定される³⁾。この先端の加工の再現性は FIB 装置の二次電子像によ

Fig. 3 Fowler-Nordheim plots for fabricated n-Si emitter annealed at different temperatures. The emission characteristics are strongly affected by the annealing temperature.

る SEM モードでの形状検出能力によって制限される。

製作した Si エミッタは U 字形の W フィラメントに点溶接した Ta チューブ内に固定され、電界放射顕微鏡 (FEM) に設置される。エミッタの熱処理はこの W フィラメントの通電加熱で行った。熱処理温度は Ta チューブに取り付けた W5%Re-W26%Re 熱電対を用いて測定した。真空装置はターボ分子ポンプとイオンポンプで排気され、電界放射特性測定中の真空度は 10^{-7} Pa 以下であった。

Fig. 3 に FIB プロセスによって製作したエミッタの電界放射特性 (Fowler-Nordheim: F-N プロット) を示す。製作したエミッタに対して電界放射特性の測定前に熱処理を行わない場合と超高真空中で 315°C, 500°C, 670°C でそれぞれ 10 分間熱処理を行った場合の特性を示している。熱処理を行わない状態では F-N プロットの傾きと F-N 式の指数前項はともに小さいことがわかる。熱処理によって F-N プロットの傾きと指数前項はともに大きくなった。Ga イオンビームによる処理に起因するこの電界放射特性について我々は二つの原因を考えている。(1) Ga イオンによるエミッタ表面の結晶欠陥の発生にともなうもので、この結晶欠陥によって高抵抗層が形成され、F-N プロットの傾きが小さくなると考えられる。また、表面には多くの表面単位が存在するので、低い電圧領域ではこの表面単位を介した電界放射が支配的になると予想される。熱処理温度が増加するにしたが

Fig. 4 Fowler-Nordheim plots from fabricated n-Si emitter annealed at 670°C before and after field evaporation. Before field evaporation, a slight saturation tendency is observed at high applied voltage region. The slope tends to be linear after field evaporation at 15 kV for 5 minutes.

って、表面の結晶欠陥の回復がおこり、放射電流が増大する。(2)表面およびサブサーフェイス領域にGaが残留することの影響で、この場合エミッタ表面に仕事関数が小さいGa層が形成され、F-Nプロットの傾きが小さくなり、また低い電圧領域で電界放射が起ると予想される。熱処理によって表面のGaが蒸発あるいはエミッタ内部に拡散することによって、エミッタ表面状態が変化しF-Nプロットも変化するものと考えられる。電界放射像は熱処理前後で殆ど変化なく、エミッタ毎に位置は異なるが、一つか二つの小さな輝点からの放射像が得られ、放射電流を決めている。結晶の対称性を反映したパターンは観測されなかった。そのため、エミッタ表面構造の詳細な検討は行えなかった。いずれにしても、F-Nプロットの熱処理依存性から、エミッタの表面状態が電界放射電流に大きな影響を与えることは明らかである。可能な限り低い引き出し電圧で動作させる目的であれば、FIBプロセス後の熱処理は不要で、有効なエミッタが得られる。また、熱処理によって高電圧領域で放射電流が二桁以上増加するので、大電流動作には熱処理が特性を改善する。670°Cの熱処理後では、n形Siで観測される直線状のF-Nプロットと比較して高電圧領域

で低電流側にずれる傾向が認められる。これは、p形Siで観測されるF-Nプロットに類似している⁴⁾。このことから、Gaイオンによってエミッタ表面がp形に変化したことが考えられる。

FIBプロセス後に670°Cで10分間熱処理をしたエミッタに対して、電界蒸発による表面の清浄化を試みた。電界蒸発前よりも多くの輝点からなる電界放射像が得られた。これは電界放射が起きていた主要な突起が電界蒸発で除去されたためと考えられる。しかし、Si<110>方位の3回対称性を示すような電界放射パターンは得られなかった。

電界蒸発前後のF-NプロットをFig. 4に示す。電界蒸発前後でF-Nプロットが大きく変わり、放射電流が2桁程度減少した。また、F-Nプロットの直線性が改善され、清浄なn形Siからの電界放射特性に近づいたものと考えられる。

3. まとめ

FIBプロセスを用いてSiエミッタを製作した。FIBプロセスによって製作されたSiエミッタの電界放射特性は熱処理によって大きく変化し、エミッタの表面状態の重要性が確認された。FIBプロセス後に熱処理を行わないエミッタの場合、低い引き出し電圧での動作に有効性を持っており、また670°Cまでの熱処理後は、高電圧領域で電界放射電流が二桁以上も増加することから、高電流動作に適していることがわかった。いくぶん飽和傾向を示すF-Nプロットは、エミッタ先端の電界蒸発により直線的なF-Nプロットに近づいた。

謝辞

実験に協力頂いた真藤大和氏、有益な助言を頂いた京都セミコンダクター恵庭開発センターの横川直博氏ならびに菊池悟氏に感謝します。本研究は松前重義記念基金の助成によって行われました。関係各位に感謝します。

【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) 佐々木, 亀井, 吉本, 岩田, 鈴木, 末岡, 武笠: 真空, 第38巻, 第3号, pp. 285-287 (1995).
- 3) 森林, 末岡, 棚橋, 武笠: 表面科学, 第18巻, 第8号, pp. 485-489 (1997).
- 4) G. N. Fursey and N. V. Egorov: Phys. stat. sol., 32, pp. 23-29 (1969).