

半導体電界電子放射陰極のエネルギー計測

嶋 脇 秀 隆*

Energy Distributions of Emitted Electrons from Semiconductor Field Emitters

Hidetaka SHIMAWAKI*

Abstract

The energy distributions of field-emitted electrons from single-tip n-type and p-type Si field emitters have been analyzed by using an electrostatic cylindrical sector analyzer. The energy distribution of an n-type Si field emitter suggests that electrons are emitted from near the Si conduction band under the influence of band bending, radial momentum due to the geometrical structure of a sharp needle and some of electron emission from the interface states. On the other hand, for a p-type Si field emitter, the energy distribution shows that electrons are mainly emitted through surface states, in which electron are supplied from the valence band of Si.

Keywords: Si field emitter, field emission, energy distribution, electron spectroscopy

1. はじめに

シリコンを始めとする半導体材料を用いた微小冷陰極は、製作の際に半導体プロセス技術がそのまま適応できるのみならず、半導体の電子物性を利用した電子放射 [1] や能動素子との一体集積化が可能であることから [2, 3], 真空デバイスと半導体デバイスの両者の特長および機能を融合させた新たなエレクトロニクスの展開に向けた基幹素子として期待されている。半導体微小冷陰極を高性能化・高機能化し、実用デバイスに応用するためには、電子放射機構を十分理解することが不可欠である。エミッタからの放射電子のエネルギーには、その起源に関する重要な情報が含まれているため、放射電子のエネルギー分析は、電子放射機構を理解する上で極めて有用な手段である [4, 5, 6]。これまで、

金属材料からなる電界電子放射陰極については詳細なエネルギー分析が行われているが、Si 電界電子放射陰極からの放射電子のエネルギー分析に関する研究は、あまり例がない [7, 8, 9]。これは、Si エミッタの表面は非常に活性であり、また、酸化膜の有無やエネルギーバンド構造等の影響によって、放射電子のエネルギー分布が複雑に変化するためである。これまでに、n 型 Si エミッタからの放射電子のエネルギー分布は、フェルミ準位以下に数 eV 程度まで広がっており、清浄な表面の金属エミッタに比較してかなり広い分散を持つこと、また、表面処理の違いによりマルチピークとなることなどが報告されている [8, 9]。

本稿では、127° 円筒型エネルギー分析器（最小分解能 8 meV）を用いた単一ティップの n 型および p 型 Si 電界電子放射陰極から電界放射された電子のエネルギー分析と Si 電界電子放射陰極からの電子放射機構について述べる。測定にあたっては、計測中の電流変動を避けるた

平成 17 年 12 月 16 日受理

* システム情報工学科・助教授

め、放射電流が安定するまで長時間のエイジングを行っている。

2. Si 電界電子放射陰極の電子放射特性

図 1 に、通常の反応性イオンエッチング (RIE) と熱酸化によるシャープニング法を用いて製作した Si 電界電子放射陰極の走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真を示す。エミッタのゲート孔径およびティップ高さは、それぞれ、 $1.5\ \mu\text{m}\phi$ および $1\ \mu\text{m}$ である。また、ゲート電極形状は、エミッタ近傍で、その非対称性に起因する電界の歪みが電子ビーム軌道に与える影響を抑えるため、直径 $1.6\ \text{mm}$ の比較的大きな円形とした。n 型および p 型 Si 電界電子放射陰極の製作にあたっては、比抵抗 $2\text{--}4\ \Omega\text{cm}$ の n 型 (100) Si および比抵抗 $10\text{--}15\ \Omega\text{cm}$ の p 型 (100) Si 基板をそれぞれ用いた。

図 2 および図 3 に、単一ティップの n 型および p 型 Si 電界電子放射陰極の I-V 特性と F-N プロットをそれぞれ示す。図より、n 型 Si 電界電子放射陰極では、放射電流はゲート電圧の増加と共に指数関数的に増加している。一方、p 型 Si 電界電子放射陰極の場合、高電圧側で放射電流の飽和傾向が見られる。これは、p 型 Si において、電子は少数キャリアであることから、高電圧側で電子の供給律速が生じているためと考えられる。しかしながら、飽和放射電流量は、バルク Si において、室温で少数キャリア濃度から予想される空乏層での電子の生成量 ($2 \times 10^{-7}\ \text{A}/\text{cm}^2$) と比べ、非常に大きい。p 型 Si エミッタの放射電流の飽和特性は、エミッタの表面処理の仕方 (酸化膜の有無など) によって異なることから、p 型 Si 電界電子放射陰極からの電子放射は、価電子帯から励起された電子が表面または界面準位を経由して行われると考えられる [10] [11]。したがって、飽和電流量は、エミッタ表面の表面準位あるいは酸化膜との界面準位と空乏層における電子の供給量により決まると考えられる。

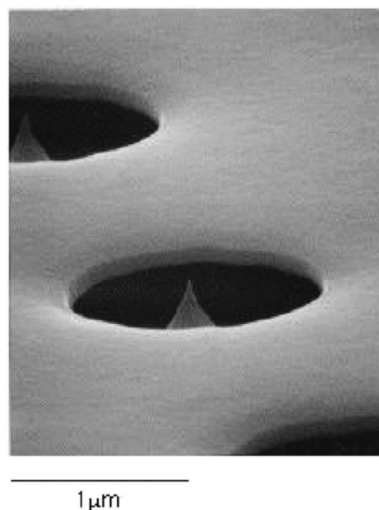


図 1 Si 電界電子放射陰極の SEM 写真

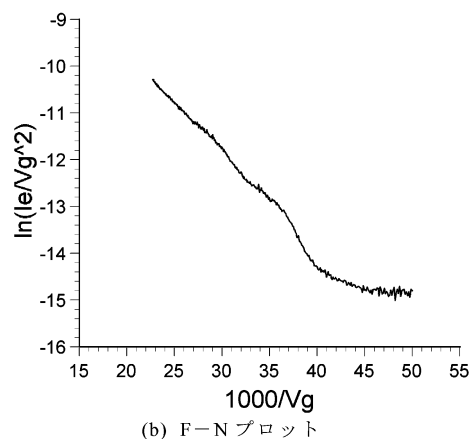
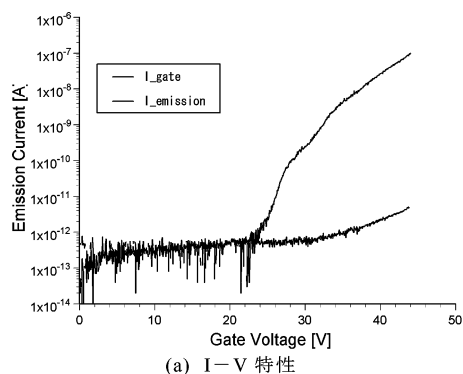
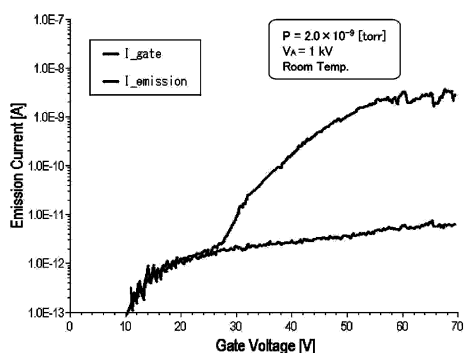
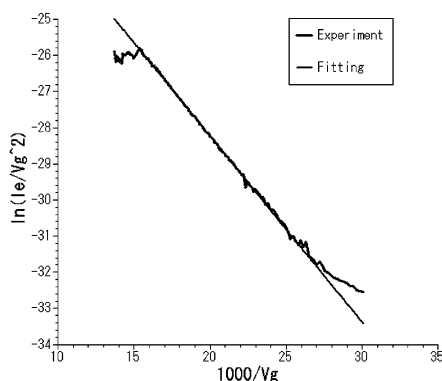


図 2 単一ティップ n 型 Si 電界電子放射陰極の電子放射特性



(a) I-V 特性



(b) F-N プロット

図3 単一ティップ p 型 Si 電界電子放射陰極の電子放射特性

3. Si 電界電子放射陰極の電界放射電子のエネルギー計測

製作した Si 電界電子放射陰極は、TO-5 トランジスタパッケージにマウントした後、サンプルホルダーに取り付けられ、超高真空チャンバー (1×10^{-7} Pa) 内に導入される。エネルギー計測中の電流変動を避けるため、nA オーダーの放射電流で数時間のエイジングを行っている。

図4に、 127° 円筒型エネルギー分析器（最小分解能 8 meV）の概要を示す。分析器は、入出力レンズとスリット付き同軸円筒偏向電極、検出部から成る。検出器には2次電子増倍管セラトロン（村田製作所）を用いている。また、分

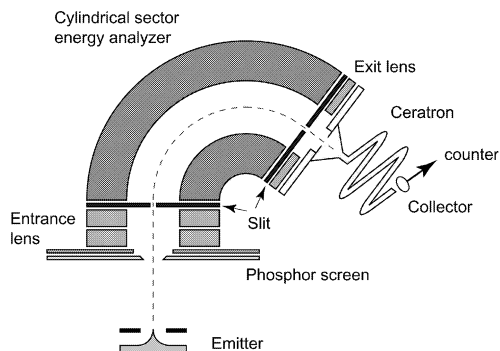


図4 エネルギー分析器の概要

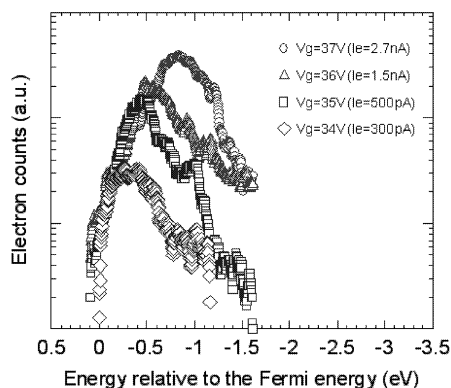


図5 単一ティップ n 型 Si 電界電子放射陰極からの放射電子のエネルギー分布

析器の電子ビーム入射側にはスリット付き蛍光板が設置されており、電子放射像を観測しながらアライメント調整や分析する部位の選択を行うことが可能である。ここで、放射電子のエネルギー計測にあたり、電子のパスエネルギーは 10 eV に設定した。

図5に、ゲート電圧を 34 V から 37 V まで変化した際の単一ティップ n 型 Si 電界電子放射陰極からの放射電子のエネルギー分布を示す。図中の電流値は、各ゲート電圧における全放射電流値である。ゲート電圧の増加に関わらず、いずれのエネルギー分布も、フェルミ準位付近にしきい値エネルギーを持つ単一ピークの分布となっている。このことは、n 型 Si エミッタの表面は蓄積あるいは空乏状態にあり、伝導

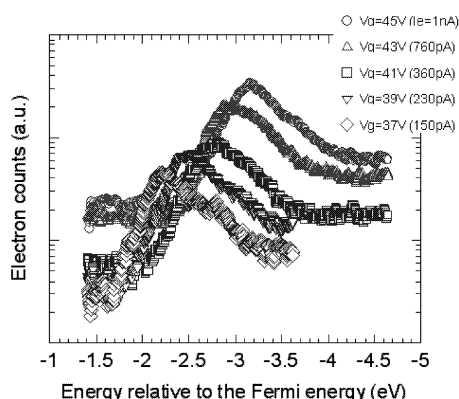


図6 単一ティップ p 型 Si 電界電子放射陰極からの放射電子のエネルギー分布

帯から供給された電子が Si のフェルミ準位近傍からエミッションされていることを示唆している。しかしながら、ゲート電圧の増加に伴い、ピーク位置が僅かに低エネルギー側にシフトしている。このことから、今回使用した n 型 Si 電界電子放射陰極においてはバンドベンディングが起きていると考えられる。また、エネルギー分散は、ゲート電圧 34 V において半値幅が 0.3 eV 程度と比較的広く、ゲート電圧の増加に伴い、エネルギー半値幅も増加している。エミッタ表面には多数の表面準位または酸化に伴う界面準位の存在が予想されるため、これら準位にトラップされた電子が、ゲート電圧を増加するにつれてエミッションに寄与してくるものと考えられる。

図6に、ゲート電圧を 37 V から 45 V まで変化した際の単一ティップ p 型 Si 電界電子放射陰極から電界放射された電子のエネルギー分布を示す。n 型 Si エミッタと同様、それぞれのエネルギー分布は、単一ピークの分布となっている。しかしながら、各々のしきい値エネルギーは、フェルミ準位より 1.5 eV 以上低く、ゲート電圧の増加と共に、0.1 eV/1 V の割合で低エネルギー側に移動している。それに伴い、ピーク位置も、同様に、低エネルギー側にシフトしている。また、エネルギー分散は、n 型の場合と比

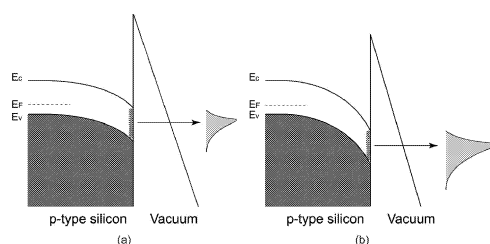


図7 p 型電界電子放射陰極からの電子放射のモデル

較してかなり広い。しかしながら、その半値幅は、ゲート電圧に依らずほぼ等しく (約 0.5 eV)、またエネルギー分布の形状も変化していない。これらの結果は、p 型 Si の場合、エミッタ表面に空乏層が形成され、価電子帯から励起された電子が表面または界面準位を介してエミッションされるということを示唆している。

図7に、p 型 Si エミッタからの電子放射のモデルを示す。ゲート電圧の増加に伴い、しきい値エネルギーが低エネルギー側にシフトしていくことから、ゲート電圧を増加するにつれ、エミッタの表面では電子の供給律速のより Si の表面近傍の空乏層幅が広がる。また、エネルギー分散の半値幅が n 型 Si の場合よりも広く、ゲート電圧を増加しても変わらないことから、低電圧においても、すでに真空障壁は表面準位からトンネル可能な状態にあり、価電子帯から励起された電子が表面準位を介して放射される。したがって、ゲート電圧を増加した場合、トンネル確率の増加により放射電流量は増加するが、エネルギー分布形状は変化しない。

以上の結果より、n 型 Si および p 型 Si 電界電子放射陰極からの電子放射は、表面準位が寄与していることが確認された。したがって、Si 電界電子放射陰極の放射電子の低エネルギー分散化には、表面処理・修飾によって表面準位を減らすことが重要となる。

4. む す び

単一ティップの n 型および p 型 Si 電界電子

放射陰極から放射された電子のエネルギー分析を行った結果，エミッタの表面または界面準位が放射に深く関与していることが明らかとなった。電子ビームの低エネルギー分散化のためには，表面改質・修飾により表面準位の低減化を図ることが重要である。

エミッタからの放射電子のエネルギー分析により，電子放射機構に対する理解が深まることで，真空・半導体機能融合デバイスの実現に向け，より高性能・高機能な微小冷陰極の開発が進展するものと期待される。

参考文献

- [1] H. Mimura, T. Ukeba, H. Shimawaki and K. Yokoo, Vac. Sci. Technol. B 22, 1218 (2004).
- [2] T. Hirano, S. Kanemaru, and J. Ito, Jpn. J. Appl. Phys., 35, L861 (1996).
- [3] H. Shimawaki, K. Tajima, H. Mimura, and K. Yokoo, IEEE Trans. Electron Devices, 49, 1665 (2002).
- [4] S.T. Purcell, Vu.T. Binh, and R. Baptist, J. Vac. Sci. Technol. B15, 1666 (1997).
- [5] J. Ikeda, A. Yamada, K. Okamoto, Y. Abe, K. Tahara, H. Mimura and K. Yokoo, J. Vac. Sci. Technol. B16, 81 (1998).
- [6] H. Mimura, K. Miyajima and K. Yokoo, J. Vac. Sci. Technol. B21, 1612 (2003).
- [7] J. Miller and R. Jhonston, J. Phys.: Condens. Matter 3, S231 (1991).
- [8] J. Shaw, J. Vac. Sci. Technol. B18, 1817 (2000).
- [9] J. Shaw and J. Itoh, chapter 5 in Vacuum Microelectronics, W. Zhu, Ed., New York: Wiley (2001).
- [10] K. Sawada, K. Ji, and T. Ando, Jpn. J. Appl. Phys., 33, L1345 (1994).
- [11] D.K. Schroder, R.N. Thomas, J. Vine, and H.C. Nathanson, IEEE Trans. Electron Devices, 21, 785 (1974).