

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23246065

研究課題名(和文)多段ゲート電界放出電子源を用いたマイクロカラムの開発と電子顕微鏡への応用

研究課題名(英文)Development of a novel micro-column using the multi-gated field emitter for SEM application

研究代表者

三村 秀典(Mimura, Hidenori)

静岡大学・電子工学研究所・教授

研究者番号：90144055

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,100,000円、(間接経費) 11,130,000円

研究成果の概要(和文)：多段ゲート電界放出微小電子源を用いて電子顕微鏡に利用できるマイクロカラムを開発した。マイクロカラムを設計し、実際に製作し、そのビーム特性を測定した。その結果、ほぼ設計通りの機能を持つマイクロカラムを製作できた。しかし、試作したマイクロカラムを電子顕微鏡に応用するには、エミッタティップから放出される電子ビームの初期角度をさらに狭くする必要があることがわかった。そこで、ウエネルト電極の効果調べた。その結果、開発したマイクロカラムにウエネルト電極を導入することにより、電子顕微鏡等に利用できるマイクロカラムを実現できることがわかった。

研究成果の概要(英文)：We have developed a novel micro-column using the multi-gated field emitter for scanning electron microscope (SEM) application. We designed and fabricated the micro-column, and measured the electron beam characteristics of the micro-column. We have successfully developed the novel micro-column as we designed. However, for the SEM application, the beam size emitted from the micro-column is still not sufficient. Reducing the initial beam angle from the micro-column is necessary. We considered to incorporate a well electrode with the micro-column, and investigated the effect of the well electrode. As a result, we have concluded that we can realize a multi-gated field emitter micro-column for SEM application by incorporating a well electrode with the micro-column.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：多段ゲート微小電子源 マイクロカラム 電子ビーム ビーム収束 収差 電子銃 静電レンズ

1. 研究開始当初の背景

熱電子源にない優れた特長（ナノ～マイクロンサイズ、低消費電力）を有し、半導体微細加工技術を用いて製作する電界放出微小電子源は、その構造よりアノードに到達する電子ビーム径が数百マイクロン以上の空間的広がりを持つという欠点がある。また、電子引き出し電極に加えて収束電極を加えたダブルゲート電界放出微小電子源が報告されていたが、この電子源では電子ビームを収束すると、収束電極に電子引き出しゲート電極より低電圧を印加するため、電子放出サイトの電界強度が収束電極の低い電圧の影響を受け低下し、放出電流量が著しく低下する（ μA オーダの電流が収束時には nA オーダに減少する）という問題があった。この問題を克服する電子源として、本研究では火山構造ダブルゲート電界放出微小電子源を開発した。この電子源の構造的特徴は、収束電極が電子引き出し電極の周りにあること、またその高さが電子引き出し電極より低いことである。これにより、電子ビーム収束時に、収束電極に印加される電子引き出し電極より低い電圧が電子引き出し電極によりシールドされ、電子放出サイトの電界強度の低下が抑えられた。これにより、世界で初めて、電子ビームの収束と μA オーダの電流の維持の両方が実現された。

しかし、火山構造ダブルゲート電界放出微小電子源でも、電子ビームを平行に近づけるのが限界で、さらに強収束し、電子ビームのクロスオーバー（焦点）を形成することは不可能であった。そこで、本研究ではゲート電極構造を4段（1つの電子引き出し電極と3つ電極からなる静電レンズ（アインツェルレンズ））、5段（1つの電子引き出し電極と4つ電極からなる静電レンズ（アインツェルレンズ））と増し、世界初の静電レンズ一体形成多段ゲート電界放出微小源を開発した。ここに至り、5段ゲート電極微小電子源で、明確な電子ビームのクロスオーバーの形成を確認した。

2. 研究の目的

上記の背景の下、研究の目的は、多段ゲート電界放出微小電子源を用いて、走査電子線顕微鏡や電子線描画装置に利用できるマイクロカラム（電子光学鏡筒）を開発することである。また、学術的には、マイクロカラムにおける電子ビーム光学の問題点を明らかにすることである。

3. 研究の方法

(1) 従来の5段ゲート電極微小電子源の電子軌道解析を詳細に行い、5段ゲート電極微小電子源をマイクロカラム応用する際の問題点を明らかにする。

(2) 電子軌道解析によりマイクロカラム用の多段ゲート微小電子源の最適設計を行う。

(3) 実際にマイクロカラム用の多段ゲート

微小電子源を製作し、その電子光学特性を測定する。

4. 研究成果

(1) 図1に従来の5段ゲート電極微小電子源のクロスオーバーを生じる電圧における電子軌道解析の結果を示す。図1に示すように、5段ゲート電極微小電子源の中心を通る電子はクロスオーバーを形成していない。また、クロスオーバーを形成している電子は大きな球面収差のため、発散している。このため、従来の5段ゲート電極微小電子源では、走査電子線顕微鏡や電子線描画装置に利用できるマイクロカラムを実現することが難しいことが分かった。この理由は、微小電子源にレンズを一体形成するマイクロカラムにスケールング則を適用すると、マイクロカラムの構造がサブミクロンのため各電極に印加する電圧が数V以下と小さくなりすぎ、実際にカラムとして動作しないためである。

(2) 上記(1)の結果を受け、電子ビーム軌道解析により、従来の5段ゲート微小電子源より、より収差が少なくなる4段ゲート型微小電子源でマイクロカラムの設計を行った。設計の要点は、①静電レンズに入る電子ビームのエネルギーを10~30eV程度に低速に、②収束電極によりレンズ開口径の1/3以下のビーム径に、③エミッタンス20mrad程度の平行ビームに、④より収差の少ない加速型の単孔レンズを用いる、ことである。図2に、設計したマイクロカラムの構造を示す。電子銃部の電極は3段からなり、エミッタティップから順に、電子引き出し電極、収束電極、くびれ電極である。また、対物レンズはより収差の少ない加速型の単孔レンズを用いている。

(3) 図3に、実際に製作したマイクロカラムの電子顕微鏡写真を示す。ほぼ設計通りの構造が実現されていることが分かる。

そこで、実際に製作したマイクロカラムの電子光学特性を測定した。①静電レンズに入る電子ビームのエネルギーは、約20eVまで低速にできることがわかった。②収束電極に適切な電圧を印加することにより、ほぼすべてのエミッタティップからの放出電子ビームをくびれ電極を通過してアノードに導くことができることが分かった。アノードに入射する電流は2nA以上で、これは走査電子線顕微鏡応用として十分な電流量である。③マイクロカラムに適切な電圧を印加することにより、ほぼ並行な電子ビームが実現できることがわかった。④単孔加速レンズを動作させアノードでのビーム径を本研究者が開発したスリット走査法により評価した。図4にその結果を示す。各電極の電圧は、図4(a)の通りである。40 μm のスリットを持つアノードをマイクロカラムの上を走査して、アノード電流とスリットを通過した電子ビームをファラデーカップで測定した。マイクロカラムとアノードの距離は2mmとし、マイクロカ

ラムとアノードは無電界として、電子ビームが400倍び発散する条件でビーム径を測定した。測定結果を、図4(b)に示す。 I_A はアノード電流、 I_C はファラデーカップの電流である。 $I_A/(I_A+I_C)$ と $I_C/(I_A+I_C)$ は対称形を示し、山や谷の幅は $80\mu\text{m}$ となった。これより、実際のビーム径は $40\mu\text{m}$ と計算できる。以上のことよりほぼ設計度通りの値が得られていることが分かった。この測定系では400倍のビーム発散があるため、クロスオーバー点におけるビーム径は 100nm 程度と考えられる。しかし、このマイクロカラムを実際の走査電子線顕微鏡に应用するためには、エミッタチップからの放出電子ビームの初期の発散角をさらに抑制する必要があることが分かった。そこで、より小さなビーム径を得るためにウエネルト電極の検討を始めた。ウエネルト電極の効果の検討は、エミッタチップ、ウエネルト電極、電子引き出し電極の2段ゲート電界放出電子源構造を、電子ビーム軌道解析により設計して行った。電子源から放出される電子ビームの初期放出角度分散をできるだけ小さくするために、ウエネルト電極の高さをエミッタチップより 100nm 低くした。実際にこの2段ゲート電界放出電子源を製作し、この電子源の電子放出特性とウエネルト電極の効果測定した。その結果、ウエネルト電極に印可する電圧を変化させることにより、初期の角度分散を制御することができることがわかった。これにより、開発したマイクロカラムにウエネルト電極を一体形成することにより、電子顕微鏡等に利用できるマイクロカラムを実現できることがわかった。

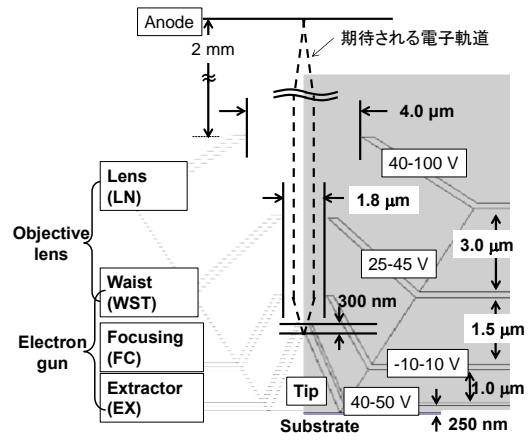


図2 設計したマイクロカラムの構造

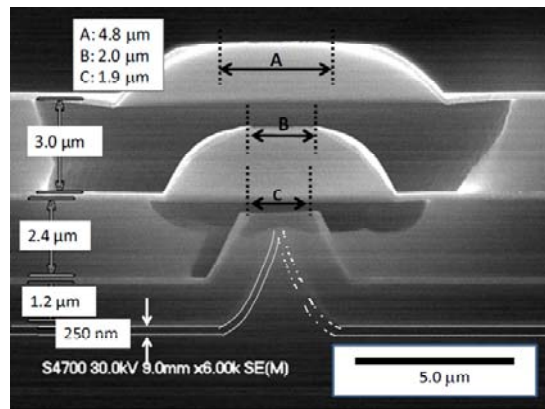


図3 実際に製作したマイクロカラムの電子顕微鏡写真

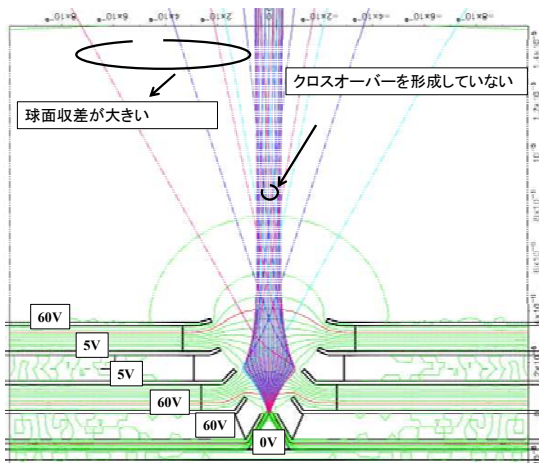
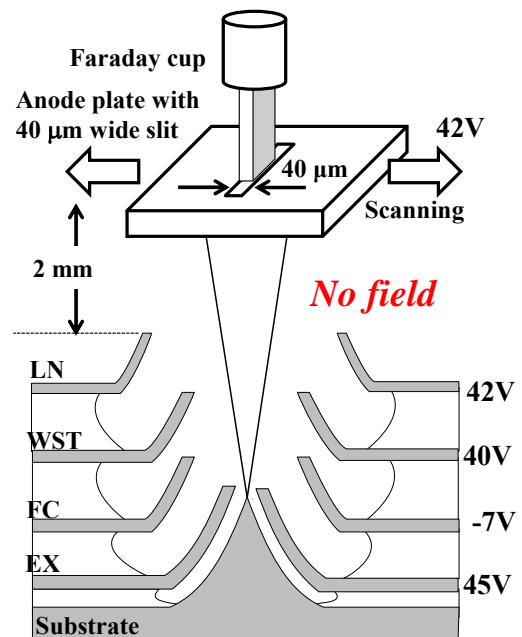
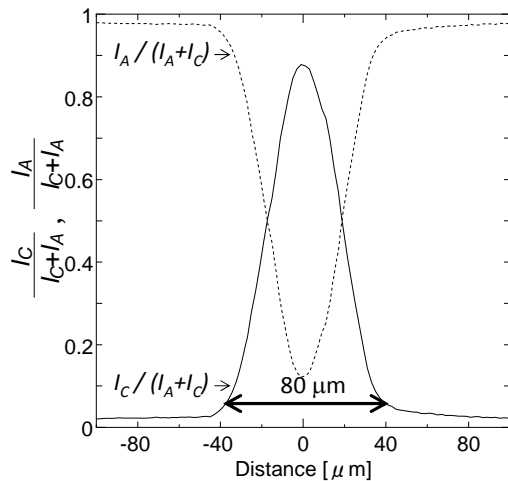


図1 従来の5段ゲート電極微小電子源のクロスオーバーを生じる電圧における電子軌道解析の結果



(a)



(b)

図4 アノードでのビーム径の測定。(a)測定方法、(b)測定結果。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2件)

1. Y. Neo, A. Koike, T. Fujino, H. Mimura, H. Murata, T. Yoshida, T. Nishi, M. Nagao, Electron Optical Properties of Microcolumn with Field Emitter, Jpn. J. Appl. Phys.、査読有、Vol.52、2013、036603-1-5、doi: 10.7567/JJAP.52.036603
2. A. Koike, Y. Neo, H. Mimura, H. Murata, T. Yoshida, T. Nishi, and M. Nagao, Field Emitter Equipped With a Suppressor to Control Emission Angle、IEEE Electron Device Letters、査読有、Vol.34、2013、704-706、doi: 10.1109/LED.2013.2252598

[学会発表] (計 12件)

1. Y. Neo, A. Koike, H. Mimura, H. Murata, T. Yoshida, T. Nish, and M. Nagao, Performance of Microcolumn for Fine Electron Beam Applications、20th International Display Workshop、December 6、2013、Sapporo Convention Center、Sapporo
2. 村田英一、下山宏、根尾陽一郎、三村秀典、吉田知也、長尾昌善、静電レンズ一体型 Field Emitter Array の電子軌道解析、電子情報通信学会技術報告、2013年10月22日、北海道大学
3. 根尾陽一郎、小池昭史、三村秀典、村田英一、西孝、吉田知也、長尾昌善、多段ゲート型マイクロカラムの開発、第74回応用物理学会学術講演会、2013年9月18日、同志社大学、京都
4. H. Mimura, Y. Neo, T. Aoki, T. Yoshida and M. Nagao, Novel Micro Column Using

Multi-gated Field Emitters、2nd International Conference Materials, Energy and Environments、August 8、2013、Kanto Gakuin University、Yokohama

5. H. Mimura, Y. Neo, T. Aoki, T. Yoshida and M. Nagao, Development of Multi-gated Field Emitters、13th International Conference on Quality in Research、June 26、2013、Sheraton Mustika Resort & Spa、Indonesia

6. H. Mimura, Y. Neo, T. Aoki, Novel Micro Column Using a Multi-gated Field Emitter、2nd International Conference on Nanotechnology and Biomedical Engineering Energy and Environments、April 18、2013、Technical University of Moldova、Moldova

7. H. Mimura, Y. Neo, T. Aoki, T. Yoshida and M. Nagao, Multi-gated Field Emitters for Nanovision Science、2012 Symposium on Nanovision Technology、October 19、2012、National Taipei University of Technology、Taiwan

8. H. Mimura, Field Emitter Technology for Nanovision Science、25th International Vacuum Nanoelectronics Conference、July 12、2012、Hyatt Regency Jeju、Korea

9. H. Mimura, Y. Neo, T. Aoki, T. Yoshida and M. Nagao, Electron Emission Characteristics of Multi-gated Field Emitters、4th International Conference on Radiation Interaction with Material and its Use in Technologies、May 14、2012、Hotel Daniela、Lithuania

10. H. Mimura, Si Multi-gated Field Emitters with a Built-in Electrostatic Lens、1st International Conference on Materials, Energy and Environments、May 10、2012、Park Inn Hotel Toledo、USA

11. 三村秀典、根尾陽一郎、小池昭史、村田英一、西孝、吉田知也、長尾昌善、マイクロサイズ電子管筒の開発、第10回真空ナノエレクトロニクスシンポジウム、2012年3月6日、大阪大学中ノ島センター

12. A. Koike, Y. Takagi, T. Fujino, T. Aoki, Y. Neo, H. Mimura, T. Yoshida, M. Nagao, H. Murata, A functional tiny electron gun for a true microcolumn、24th International Vacuum Nanoelectronics Conference、July 21、2011、Wuppertal University、Germany

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三村 秀典 (Mimura Hidenori)
静岡大学・電子工学研究所・教授
研究者番号：90144055

(2) 研究分担者

根尾 陽一郎 (Neo Yoichiro)
静岡大学・電子工学研究所・准教授
研究者番号：50312674

長尾 正善 (Nagao Masayoshi)
独立行政法人産業技術総合研究所・研究員
研究者番号：80357607

吉田 知也 (Yoshida Tomoya)
独立行政法人産業技術総合研究所・研究員
研究者番号：80462844

(3) 連携研究者

()

研究者番号：