

機関番号：31103

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560333

研究課題名(和文) シリコン微結晶平面型冷陰極の高指向化および低エネルギー分散化に関する研究

研究課題名(英文) Study on nanocrystalline silicon planar cathodes with low emission divergence and narrow electron energy spread

研究代表者

嶋脇 秀隆 (SHIMAWAKI HIDETAKA)

八戸工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80241587

研究成果の概要(和文)：本研究では、シリコン微結晶系平面型冷陰極の放射電子の発散角およびエネルギー分散が大きい要因を明らかにすべく、放射電子の面内分布計測およびエネルギー分析を行った。その結果、ゲート電極の薄膜化に伴う電圧降下に起因して電子放射領域内のポテンシャル分布が中心部ほど弱くなり、不均一となることが主因であることを明らかにした。平面型冷陰極の高指向化および低エネルギー分散化に向けて、電子放射領域を小さく分割したアレイ構造を提案し、その有効性を実験的に示した。

研究成果の概要(英文)：We investigated emission uniformity from the planar cathodes based on nc-Si prepared by pulsed Nd:YAG laser ablation. Distributions of electron emission showed strong dependence on thin metal morphology. The emission occurred at limited parts of the emission area for the cathode with discontinuous metal and the whole for the cathode with continuous metal due to series resistance effects. Continuity and conductivity of thin metal film are important for uniform and high directional emission from the planar cathodes.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：微小冷陰極、トンネル電子放射、エミッションプロファイル、エネルギー分析、シリコン微結晶、真空ナノエレクトロニクス

1. 研究開始当初の背景

微小冷陰極には、Spindt型に代表されるゲート電極付き電界電子放射陰極とMOS(Metal-oxide-semiconductor)型に代表される平面型冷陰極があり、種々材料および構造からなる冷陰極の開発が国内外で盛んに行われている。しかしながら、電界電子放射陰極の場合、構造上、放射電子の発散角が広

く(～30°)、電子ビームの指向性を上げるには収束レンズ用の電極が必要となるため、製作プロセスが複雑化する。また、吸着ガス等によるエミッタ表面の仕事関数の変化が電流変動と直結するため、安定化が本質的に困難であるなど欠点を有する。近年、高輝度・低電圧駆動微小電子源材料としてカーボンナノチューブが期待されているが、形成位

置および形状・構造制御技術がまだ確立されておらず、電界電子放射陰極として十分な性能を得るに至っていない。一方、MOS 構造平面型冷陰極は、シンプルな構造で製作が容易、面放射型であるため放射電子ビームの指向性がよい、駆動電圧が数V程度と低い、低真空動作可能など優れた特長を有し、ほぼ理想的な電子源といえる。一方で、酸化膜およびゲート電極走行時のエネルギー散乱が大きいため、電子のほとんどはそのエネルギーを失ってゲート電極の仕事関数以下に分布し、電子の放射効率（全電流に対する放射電流の割合）が1%以下と著しく低いことが欠点である。酸化膜層を SiO_x 膜や多孔質シリコンなどのシリコン微結晶層で置きかえることで、1%を大幅に超える電子放射効率が報告されているが、微結晶系平面型冷陰極では、微粒子構造に起因して、通常、放射電子の発散角が十数°と比較的大きく、また、エネルギー幅が非常に広いいため、真空ナノエレクトロニクスデバイスへの応用に向け、高指向化、低エネルギー分散化が急務な課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、均一性・指向性に優れエネルギー分散の小さい高品質な電子ビームの形成を目的として、シリコン微結晶層を用いた MOS 構造平面型冷陰極を製作し、放射電子の面内均一性・指向性およびエネルギー分散について検討を行った。

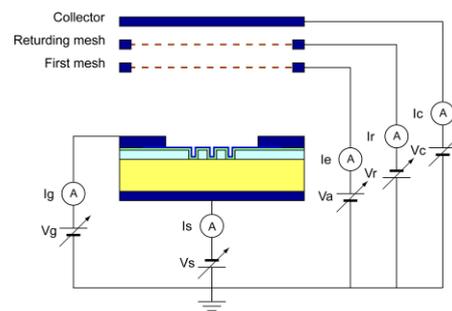
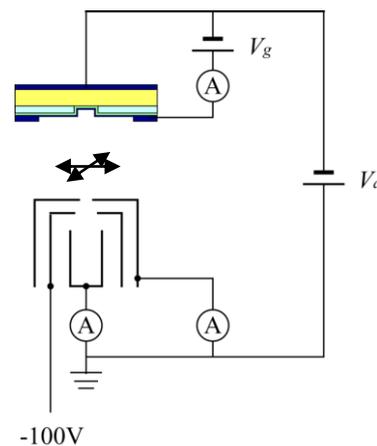
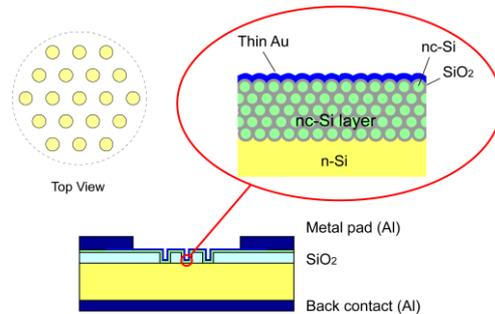
3. 研究の方法

ナノ・微結晶構造を有する平面型冷陰極からの放射電子の発散角およびエネルギー分散が大きくなる主な要因として、ナノ構造に起因して内部ポテンシャル分布の歪みが生じること、上部ゲート電極の薄膜化に伴う電圧降下の影響によって電界が不均一となることなどが挙げられる。本研究では、シリコン微結晶層からなる MOS 構造平面型冷陰極および電子放射部をアレイ状に分割した構造を製作し、電子放射特性、エネルギー分布計測、面内分布計測を行った。

図1に、試作したシリコン微結晶膜からなる MOS 構造平面型冷陰極アレイの断面構造の概略を示す。n 型 Si 基板（電子供給源）と上部 Au 薄膜電極（引き出しゲート電極）との間に、極薄酸化膜で被覆されたナノ結晶シリコン層を挟んだ薄膜ダイオード構造となっている。シリコン微結晶膜の形成は、Nd:YAG レーザ（4 倍波：266nm, 13ns, 10Hz）を光源としたパルスレーザアブレーション法を用いた。その際、酸素ラジカル雰囲気中で成膜を行い、個々のシリコン微結晶の表面を極薄酸化膜によって被覆した。MOS 型冷陰極においては、上部ゲート金属を数 nm 程度まで薄膜

化する必要があるため、電子放射特性は金属薄膜の形態の影響を受けることが予想されることから、ゲート電極材料として島状の不連続膜となりやすい Au と連続膜となる Pt を用いた素子について評価した。

放射電流の面内均一性の評価は、図2に示すように、素子から約 2mm の距離に 20μm 径のピンホール付き Faraday cup をセットし、電子放射領域を走査してエミッション量の



面内分布を計測した。

放射電子のエネルギー分布の計測は、図3に示す平行メッシュ型エネルギー分析器を用いて評価した。

4. 研究成果

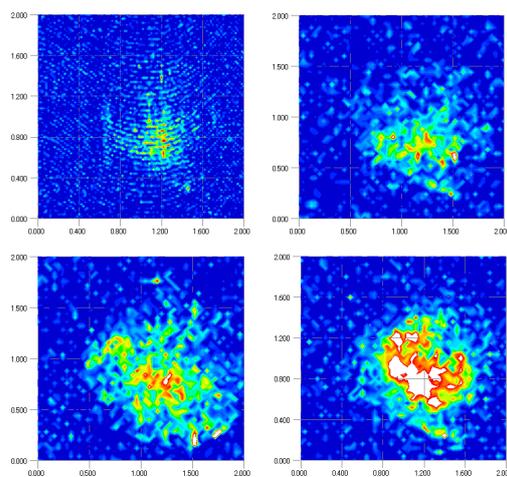
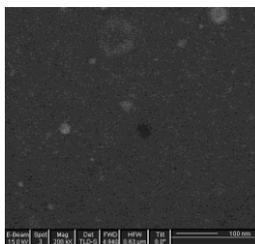
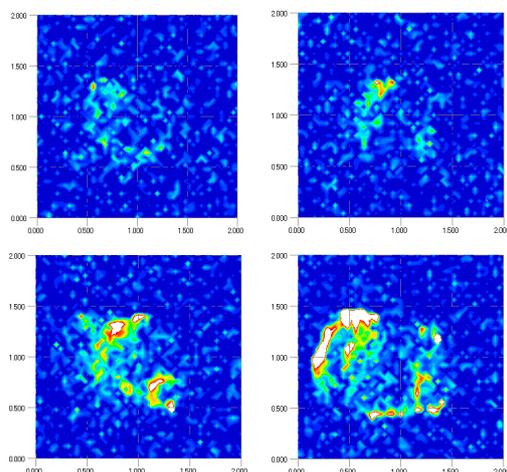
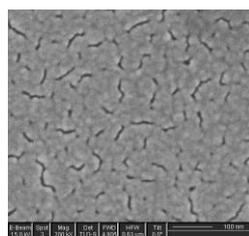
図4に、ゲート電極として膜厚 5nm の Au 薄膜を用いた素子のゲート電極表面 SEM 像と素子から放射された電子量の面内分布を示す。図4(a)のSEM像からAu薄膜内には無数の亀裂が存在し、不連続膜となっていることがわかる。電子放射は、電子放射領域の周辺部分から始まり、ゲート電圧を増加させるにつれて強度が増大していく。しかしながら、中央部ではほとんど観測されておらず、不均一な分布となっている。

図5に、膜厚 3nm の Pt 薄膜を用いた素子の電極表面 SEM 像と放射電子の面内分布を示す。Pt 薄膜の場合、3nm にもかかわらず滑らかな連続膜となっている。電子放射は、ゲート電圧の増加とともに電子放射領域全体から観測された。

不連続膜の場合、薄膜の直列抵抗に起因する電圧降下の影響とナノホールの存在により電子放射領域の中心部ほど電界が弱まり、電子放射領域内の電界分布が不均一となる。したがって、Au 電極を用いた素子では、主に電子放射領域の周辺部から放射されるものと考えられる。一方、連続膜では、導電性がよく電圧降下の影響が小さいため、電界の面均一性が向上する。

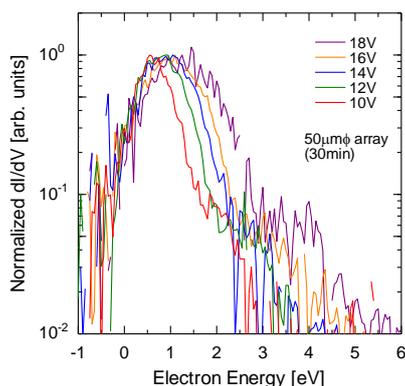
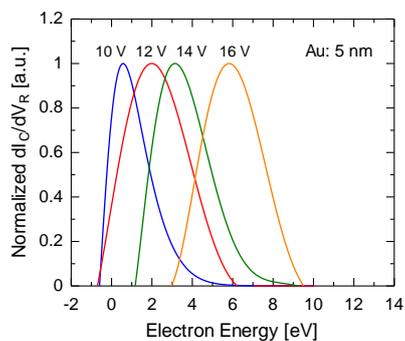
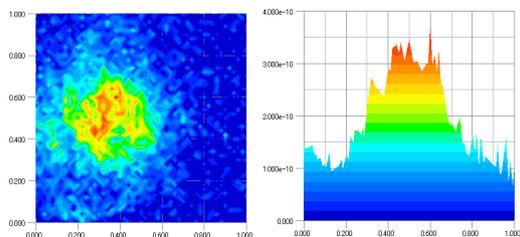
図6に、薄膜電極部での電圧降下を低減するため電子放射領域をアレイ状に分割した素子からの放射電子の面内分布を示す。プローブの走査ピッチの都合上、個々のアレイに分離できていないが、ほぼ均一な電子放射分布が得られた。

製作したシリコン微結晶 MOS 型冷陰極およびアレイ素子からの放射電子のエネルギーを分析した結果を図7、図8に示す。横軸は、ゲート金属の仕事関数に対する相対値である。アレイ化していない素子の場合、放射電子のエネルギーは、FWHM が $2\sim 4\text{eV}$ と広い分散を持ち、ゲート電圧に強く依存して広がる。また、エネルギー分布は、ゲート電圧の増加と共に、高エネルギー側に移動している。一方、電子放射部を小さくアレイ化した素子では、放射電子のエネルギー分散は、ゲート電圧の増加とともに高エネルギー側に広がるが、FWHM は $0.5\sim 1.5\text{eV}$ 程度と小さい。低エネルギー側のしきい値は、ゲート電圧に依らずゲート電極の仕事関数で制限されており、また、ゲート電圧に依存したエネルギー分布の高エネルギー側へのシフトは見られない。アレイ化により電子放射面内の電界の均一性が向上し、放射電子の均一



性・指向性が向上したためと考えられる。

従って、電子放射領域内の電界が均一となる構造設計および導電性・平坦性に優れた電極材料の選択により、均一性・指向性の向上および低エネルギー分散化が可能となる。



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 8 件)

- ① H. Shimawaki, K. Murakami, Y. Neo, H. Mimura, F. Wakaya, and M. Takai, "Evaluation of emission uniformity of nanocrystalline silicon planar cathodes", J. Vac. Sci. Technol. B 28, 査読有, pp. C2C49-C2C52, 2010.
- ② H. Shimawaki, Y. Neo, H. Mimura, F. Wakaya, and M. Takai, "Enhanced Electron Emission from nc-Si MOS Cathode by Laser Irradiation", Proc. of the 17th Int. Display Workshops, 査読無, Fukuoka, Japan, 2010, pp. 2001-2004.
- ③ H. Shimawaki, Y. Neo, H. Mimura, F. Wakaya, and M. Takai, "Photo-assisted Electron Emission from MOS-type Cathode Based on Nanocrystalline Silicon", Tech. Digest of the 23rd Int. Vacuum Nanoelectronics Conf., 査読有, Palo Alto, California, USA, 2010, pp. 74-75.
- ④ H. Shimawaki, K. Murakami, Y. Neo, H. Mimura, F. Wakaya, and M. Takai, "Electron Emission from Planar-type Cathodes based on Oxidized Nanocrystalline Silicon", Proc. of the 34th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits, 査読無, Darmstadt/Seeheim, Germany, 2010, pp. 67-68.
- ⑤ H. Shimawaki, K. Murakami, Y. Neo, H. Mimura, F. Wakaya, and M. Takai, "Intensity Distribution of Electron Emission from nc-Si MOS Cathode", Proc. of the 16th Int. Display Workshops, 査読無, Miyazaki, Japan, 2009, pp. 2001-2004.
- ⑥ H. Shimawaki, K. Murakami, Y. Kida, Y. Neo, H. Mimura, F. Wakaya, and M. Takai, "Emission uniformity of nanocrystalline silicon based metal-oxide-semiconductor cathodes", Tech. Digest of the 22nd Int. Vacuum Nanoelectronics Conf., 査読有, Hamamatsu, Japan, 2009, pp. 309-310.
- ⑦ H. Shimawaki, Y. Kida, Y. Neo, H. Mimura, K. Murakami, F. Wakaya, and M. Takai, "Electron emission from nanocrystalline silicon based metal-oxide-semiconductor cathode arrays", Tech. Digest of the 21st Int. Vacuum Nanoelectronics Conf., 査読有, Wroclaw, Poland, 2008, 128-129.
- ⑧ 嶋脇秀隆, 木田 庸, 根尾陽一郎, 三村秀典, 村上勝久, 若家富士夫, 高井幹夫, "シリコン微結晶面放射型冷陰極の電子放射特性", 信学技報, 査読無, 108, 177, ED2008-12, 2008.

〔学会発表〕（計 5 件）

- ① 嶋脇秀隆, 根尾陽一郎, 三村秀典, 若家富士夫, 高井幹夫, “nc-Si MOS 冷陰極の光照射特性”, 第 71 回応用物理学会学術講演会, 2010 年 9 月 14 日, 長崎大学.
- ② 嶋脇秀隆, 根尾陽一郎, 三村秀典, 村上勝久, 若家富士夫, 高井幹夫, “nc-Si MOS カソードアレイのエミッション均一性の評価”, 第 7 回真空ナノエレクトロニクスシンポジウム, 2010 年 3 月 3 日, 静岡大学浜松キャンパス.
- ③ 嶋脇秀隆, 村上勝久, 木田 庸, 根尾陽一郎, 三村秀典, 若家富士夫, 高井幹夫, “nc-Si MOS カソードのエミッション均一性の評価”, 第 70 回応用物理学会学術講演会, 2009 年 9 月 10 日, 富山大学.
- ④ 嶋脇秀隆, 根尾陽一郎, 三村秀典, 村上勝久, 若家富士夫, 高井幹夫, “nc-Si MOS カソードアレイの諸特性”, 第 6 回真空ナノエレクトロニクスシンポジウム, 2009 年 3 月 4 日, 大阪大学中之島センター.
- ⑤ 嶋脇秀隆, 木田 庸, 根尾陽一郎, 三村秀典, 村上勝久, 若家富士夫, 高井幹夫, “nc-Si MOS 冷陰極アレイの電子放射特性”, 第 69 回応用物理学会学術講演会, 2008 年 9 月 2 日, 中部大学.

〔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：現在準備中

6. 研究組織

(1) 研究代表者

嶋脇 秀隆 (SHIMAWAKI HIDETAKA)
八戸工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：80241587

(2) 研究分担者

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