

氏名・(本籍)	塩 澤 一 史(静岡県)		
学位の種類	博 士 (工 学)		
学位記番号	工博甲第 294 号		
学位授与の日付	平成 19 年 3 月 23 日		
学位授与の要件	学位規程第 5 条第 1 項該当		
研究科・専攻の名称	電子科学研究科 ナノビジョン工学		
学位論文題目	グラファイトナノニードルフィールドエミッタの開発と 電子線励起光源への応用に関する研究		
論文審査委員	(委員長)		
	教授 原 和 彦	助教授 青 木 徹	
	教授 永 津 雅 章	教授 三 村 秀 典	

## 論 文 内 容 の 要 旨

近年、半導体微細加工技術における露光用光源の短波長化及び光化学反応を利用したドライ洗浄、表面改質、光 CVD 等の研究の活発化から深紫外領域や真空紫外領域(200 nm 以下)の波長範囲に発光波長を持つ光源への要求は強まっている。本研究では低コストでコンパクトな紫外線光源の開発を目的として、グラファイトナノニードルフィールドエミッタ、Si 電子線透過膜を開発し、これらの素子を用いて 30 kV 以下の低エネルギー電子ビームでガスを励起発光する電子線励起光源の研究を行った。

初めに、低コスト、簡便プロセスで作製可能な微小冷陰極の開発を行った。汎用性があり操作が簡便なスパッタ装置を用いてカーボン基板を H<sub>2</sub> ガスでスパッタリングすることにより、基板表面に高密度な微小針構造を有するグラファイトナノニードルフィールドエミッタを開発することができた。このナノニードルは、スパッタリング中にカーボン基板を置くステンレス製のカソードプレートがスパッタされ、それにより生じた Fe や Ni 微粒子を触媒として、グラファイト層が成長して形成されたものである。最も優れたエミッション特性は、RF パワー 600 W、H<sub>2</sub> ガス圧 30 Pa のスパッタリング条件で作製したグラファイトナノニードルから得られた。閾値電界は約 4 V/μm、エミッション電流は 12 V/μm で約 1.1 mA (8.8 mA/cm<sup>2</sup>) であり、放出電流の安定性は 11 V/μm で約 2.7% であった。このようにグラファイトナノニードルフィールドエミッタは優れた電界電子放出特性を有している。

次に、30 keV 以下の低エネルギー電子を透過させることが可能な Si 電子線透過膜の開発を行った。モンテカルロシミュレーションを用いて Si 薄膜の電子線透過率を計算した結果、1.5 μm 厚の Si 薄膜では加速電圧 26 kV で、0.5 μm 厚の Si 薄膜では 15 kV で 80% 以

上の電子が膜を透過することが分かった。また、透過電子のエネルギー分布を計算した結果、 $1.5\mu\text{m}$ 厚のSi薄膜では26 kVで、 $0.5\mu\text{m}$ 厚のSi薄膜では14kVで80%以上の透過電子が入射エネルギー ( $E_i$ ) の8割以上のエネルギー ( $0.8E_i$ ) を持って膜を透過することが分かった。そこで、 $0.5\mu\text{m}$ 厚、 $1.5\mu\text{m}$ 厚のSi電子線透過膜をSOI基板をICPエッチング及びBHFエッチングすることにより作製した。透過膜は膜強度を保つため開口率75%のハニカム構造とした。作製したSi電子線透過膜の電子線透過率を測定した結果、 $1.5\mu\text{m}$ 厚のSi薄膜では27 kVで、 $0.5\mu\text{m}$ 厚のSi薄膜では15 kVで電子線透過率は60%であった。薄膜部分の開口率が約75%であることから、薄膜部に入射した電子の80%はこの加速電圧で膜を透過したことになる。また、透過電子のエネルギー分布を並行平板型電子エネルギー分析器を用いたRetarding法により測定した。これらの測定結果はモンテカルロシミュレーションより得られた計算結果とほぼ一致した。このように、良好な電子線透過特性を示すSi電子線透過膜を開発することができた。

最後に、電子線励起光源の開発を行った。まず、電子線励起ガス発光の原理を述べ、ガス原子の電子の阻止能の計算及びモンテカルロシミュレーションによりガス中における電子散乱について検討した。次に、開発したグラファイトナノニードルフィールドエミッタ、Si電子線透過膜を用いて作製した電子線励起ガス発光装置により $\text{N}_2$ ガス及び希ガス (Ne、Ar、Kr、Xe) の電子線励起発光実験を行った。 $\text{N}_2$ ガス励起では $\text{N}_2$ 分子第二正帯の紫外発光を観察することができた。Neガス励起では、Ne原子の赤色発光を観察し、モンテカルロシミュレーションにより得た電子散乱の軌跡と比較した結果、発光の様子と電子散乱の軌跡は良く一致した。Ar、Kr、Xeガス励起では、測定系のカットオフ波長が約200 nmであったため、波長200 nm以下の発光は観測できなかったが、エキシマ発光の特徴であるブロードな発光スペクトルを得た。また、希ガス (Ne、Ar、Kr、Xe) の発光強度のガス圧依存性を測定した結果、ガス圧を増加させると0.6 atm程度までは発光強度は増加したが、それ以上のガス圧 ( $\sim 1$  atm) では発光強度は飽和、減少する傾向が見られた。よって、それぞれの最適なガス圧は0.6 ~ 1.0 atmの範囲に存在することが分かった。

以上、本研究ではグラファイトナノニードルフィールドエミッタ、Si電子線透過膜を開発して、これらの素子を用いた電子線励起光源を開発することができた。

# 論文審査結果の要旨

近年、半導体微細加工技術における露光用光源の短波長化及び光化学反応を利用したドライ洗浄、表面改質、光CVD等の研究の活発化から深紫外領域や真空紫外領域(200nm以下)の波長範囲に発光波長を持つ光源への要求は強まっている。本論文研究では低コストでコンパクトな紫外線光源の開発を目的として、グラファイトナノニードルフィールドエミッタと、Si電子線透過膜を開発し、これらの素子を用いて30kV以下の低エネルギー電子ビームでガスを励起発光する電子線励起光源を実現するための研究を取りまとめたものであり、全5章よりなる。

第1章は緒言であり、本研究の背景と目的について述べている。第2章は、グラファイトナノニードルエミッタの開発である。スパッタ装置を用いてカーボン基板をH<sub>2</sub>ガスでスパッタリングすることにより、基板表面に高密度な微小針構造を有するグラファイトナノニードルフィールドエミッタを開発することができ、その特性は平均電界強度12V/μmで約1.1mA (8.8 mA/cm<sup>2</sup>)のエミッション電流、放出電流の安定性は11V/μmで約2.7%と、グラファイトナノニードルフィールドエミッタは優れた電界電子放出特性を示した。本章ではまたグラファイトナノニードルフィールドエミッタの形成機構を明らかにしている。第3章は30keV以下の低エネルギー電子を透過させることが可能なSi電子線透過膜の開発である。1.5μm厚のハニカム構造を有するSi電子線透過膜を、SOI基板をICPエッチング及びBHFエッチングすることにより作製した。透過膜の電子線透過率は60%である。また、透過した電子のエネルギーをシミュレーション及び実験から検討し、1.5μm厚のSi透過膜では26kVの加速電圧で、80%以上の透過電子が入射エネルギーの8割以上のエネルギーを保って膜を透過することを明らかにしている。第4章は、電子線励起光源の開発である。まず電子線励起ガス発光の原理を述べ、次に開発したグラファイトナノニードルフィールドエミッタとSi電子線透過膜を用いて作製した電子線励起ガス発光装置によりN<sub>2</sub>ガス及び希ガス(Ne、Ar、Kr、Xe)の電子線励起発光実験を行った。発光の様子とシミュレーションにより得た電子散乱の軌跡は良く一致することを明らかにしている。第5章は、結言であり本研究により得られた成果をまとめている。

以上のように本論文は、フィールドエミッタを用いた低コストでコンパクトな新しい真空および深紫外線光源の開発に寄与するものであり、本論文は博士(工学)の学位を授与するに十分な内容を有するものと認める。