



Title	Elastic emission machining を用いた極端紫外光ミラー表面平滑化技術の確立
Author(s)	金岡, 政彦
Citation	大阪大学, 2012, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/59200
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

氏 名	金 岡 政 彦
博士の専攻分野の名称	博 士 (工学)
学 位 記 番 号	第 2 5 4 8 6 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 24 年 3 月 22 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第 4 条第 1 項該当 工学研究科精密科学・応用物理学専攻
学 位 論 文 名	Elastic emission machining を用いた極端紫外光ミラー表面平滑化技術 の確立
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 山内 和人 (副査) 教 授 森田 瑞穂 教 授 安武 潔 教 授 桑原 裕司 教 授 森川 良忠 教 授 渡部 平司 教 授 遠藤 勝義 准教授 佐野 泰久

論 文 内 容 の 要 旨

半導体集積回路は、あらゆる産業分野において不可欠な存在になっているが、その誕生当時から現在に至るまで回路の高集積化が不断に行われてきた。これまで、高集積化に必要な微細加工技術は、半導体露光装置いわゆるステッパーによって牽引されてきたが、露光に使用する光の波長を短くすることでより高い分解能の実現を可能にしてきた。当初436 nmの水銀灯の輝線を用いていたものが、現在では193 nmのArFエキシマレーザとなり、将来的にさらなる微細加工を実現するために13.5 nmの極端紫外光(EUV)の適用が期待されている。これに伴い、露光装置に使用される光学素子表面に要求される精度が極めて高くなったため、硬X線集光ミラーの作製において大きな実績を持つ、高精度表面加工技術であるelastic emission machining (EEM)の適用を試みた。

本論文では、EEMを用いたEUVミラー表面平滑化技術を確立することを目標に行われた研究および開発の成果を記した。

第1章では、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では、EEMの平滑化技術としてEUVミラー表面への適用に至る背景について、EEMの特徴から説明を行った。さらに、これらの特徴を活かし、X線集光ミラーの分野において大きな実績をもたらしてきた回転球を用いたEEM（以下、回転球EEM）の装置構成について述べた。

第3章では、光学素子に適用される低熱膨張材料に対し、回転球EEMの適用可能性について評価を行った。用いた低熱膨張材料はULE (Corning Inc.)およびZerodur (SCHOTT AG)であり、これらに対する回転球EEMの平滑化特性、加工除去速度およびその安定性、除去深さと表面粗さの関係、平滑化性能の時間安定性そして改善できる表面粗さの空間周波数領域特性について評価を行った。さらには除去速度の加工条件依存性を明らかにし、それらに対する考察を行った。

第4章では、前章にて考察した、回転球EEMと一般研磨で加工条件と除去速度の関係が異なる3つの原因（潤滑作用による加工点での高いせん断速度流れの発生、これによる粉末粒子に作用する揚力の発生、粉末粒子どうしの衝突による内部摩擦力の発生）の検証を、粉末粒子の挙動の観点より行った。

第5章では、加工点における流体潤滑膜厚の観点から、回転球EEMの曲面加工における適正加工条件の提案を行った。さらにその提案された適正加工条件に従った検証実験を行い、回転球EEMの曲面への適用可能性を明ら

かにした。

第6章では、曲面加工に対応可能な5軸の加工装置の機構について提案を行った。さらに、これを実際に開発し、曲面を加工した結果を報告した。

第7章では、EUV露光システムの実現に不可欠となる、非球面形状に対する回転球EEMの適用の可能性について検証を行った。加工前後の表面粗さおよび形状（低空間周波数成分）の変化を計測した結果を述べた。

第8章では本論文の総括を行った。

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

半導体集積回路の高集積化の要求に応えるために露光装置いわゆるステッパーにおいて使用される光の短波長化が進められてきた。現在、波長 13.5 nm の極端紫外光すなわち EUV (Extreme ultraviolet) 光を用いた露光が次世代技術として注目されており、そこで使用される光学素子表面に要求される精度は 0.1 nm rms と極めて高い。本研究では、硬 X 線集光ミラーの作製において大きな実績を持つ、超高精度表面加工技術として知られる elastic emission machining (EEM) の適用を試みている。

硬 X 線集光ミラーの作製においては、単結晶シリコンを基板材料とし、曲率半径が非常に大きな形状をしていることから平面として加工している。しかし、EUV 露光システムにおいては、これまでに知見のない低熱膨張材料が基板として用いられ、その表面は非球面形状をしている。さらには将来的に、開口数 (N.A.) を大きくするために表面の光学有効領域が大きくなることが予測される。これらを背景として、以下に示す3つの研究項目が認められる。

① EEM の加工特性解明、 ② EEM の曲面への適用、 ③ EEM の非球面加工の可能性評価。

以下、それぞれの内容とその新規性について述べる。

① EEM はこれまで、その高い平滑化性能を可能にする化学的現象について数多く論じられてきたが、ここでは機械的あるいは物理的な観点から平滑化作用を明確にしている。また、2 種類の低熱膨張材料 (Zerodur, ULE) の平面に対し、この高い平滑化性能 (0.1 nm rms) を得ることに成功している。さらに、EEM は金属酸化物などの粉末粒子を加工物表面に作用させることで除去加工を進行させるが、この粉末粒子の挙動を数値計算によって明らかにし、除去速度が粉末粒子の挙動に強く依存していることを実証している。

② 加工時に加工物表面上で生じる流体現象の観点から、流体力学計算によって曲面に適用できる加工条件を抽出している。この抽出された適正加工条件の妥当性については、加工検証実験によって明らかにされており、曲面の加工が原理的に可能であることを実証している。さらに、曲面に対応できる 5 軸で構成された装置を開発し、これによって曲面加工を行い、要求値である 0.1 nm rms を得ることに成功している。

③ ②で開発した加工装置を用いて非球面の加工を行い、平滑化性能と低空間周波数成分の変化（加工安定性）について評価を行った。その結果は、EEM が非球面形状を加工するのに十分な能力を備えていることを明らかにしている。

以上のように、本研究は EEM を、EUV ミラー表面の平滑化技術として適用できるレベルにまで到達させたものであり、これによってこれまでにない高い分解能を備えた露光技術の確立を可能にすることから、さらなる産業および科学技術の発展に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。