

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	原子間力顕微鏡法を用いた基板表面における微粒子の付着力に関する研究
Title(English)	Study on adhesion forces of small particles on substrates using atomic force microscopy
著者(和文)	三羽貴文
Author(English)	Takafumi Miwa
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12164号, 授与年月日:2022年9月22日, 学位の種別:課程博士, 審査員:橋詰 富博,齋藤 晋,平山 博之,藤澤 利正,納富 雅也
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12164号, Conferred date:2022/9/22, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名		三羽 貴文	
論文審査 審査員		氏 名	職 名		氏 名	職 名
	主査	橋詰 富博	特任教授	審査員	納富 雅也	教授
	審査員	斎藤 晋	教授			
		平山 博之	教授			
		藤澤 利正	教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「Study on adhesion forces of small particles on substrates using atomic force microscopy」と題され、最近、産業界で重要になっている微粒子の付着力について、特に、付着基板の表面粗さの影響と、高真空下での低温基板の温度の影響を原子間力顕微鏡 (AFM) により実験的に調べた研究について記述されている。

第1章 Introduction では、本研究の背景と目的が示されている。まず、微粒子が引き起こす問題として半導体デバイス製造分野での例が取り上げられ、半導体デバイス製造装置の壁面から飛散した微粒子により半導体デバイスの欠陥が発生して、デバイスの製造歩留まりが下がるという課題が説明されている。その課題解決に向けた、壁面における微粒子の付着力を向上するための指針を提案するという目的が説明され、個々の微粒子の付着力の評価の重要性が示されている。次に、微粒子の付着力の評価に関する過去の研究例がまとめられ、それらに対する本研究の位置付けが示されている。さらに、半導体デバイス製造装置、および、製造プロセスを特に意識して、基板の材質としてはアルミ材、微粒子としてはシリカを設定して評価を行ったことが述べられている。

第2章 Methods and Principles では、AFM の原理、および、基板表面での微粒子の付着力を評価するための AFM を用いた実験方法が説明されている。特に、直径がマイクロメートルオーダーからサブマイクロメートルオーダーの微粒子に対応した AFM プローブを作製する方法について説明されている。また、実験結果を理論的に解析するために、球体と平面試料の接触において両者の相互作用領域を解析するための原理、および、微粒子の付着力の主要因となるファンデルワールス力、および、水の液架橋力についての理論背景が記述されている。さらに、液架橋力に影響すると予想される、基板表面における水分子の吸着と表面拡散に関する説明が述べられている。

第3章 Effect of surface roughness on adhesion force of small particles では、室温大気下において、微粒子の大きさ、および、基板の表面粗さを変化させたときの付着力の測定結果と考察が記述されている。多数回の測定から付着力の分布が得られ、その結果が、微粒子の大きさと基板の表面粗さの幾何学的な関係で説明できることが示されている。また、表面粗さがサブナノメートルの基板表面では、付着力の主たる要因がファンデルワールス力ではなく液架橋力によることが示されている。さらに、付着力のばらつきは、従来定義による表面粗さを用いて予測することは不可能で、新たな表面粗さの解析方法が提案されている。それは、接触理論に基づき、粒子が基板表面と相互作用する面積を算出し、その面積で分割した範囲の局所表面粗さを用いて解析する手法である。この手法による局所表面粗さと付着力のばらつきを示す変動係数との間には、一定の相関を見出すことができると示されている。変動係数および局所表面粗さはいずれも微粒子の大きさを考慮したパラメータであるため、より適用範囲が広い解析手法になっていると説明されている。本章の纏めとして、基板表面の表面粗さをサブナノメートルオーダーに改善することが、基板から飛散する微粒子を防ぐための有効な手段である可能性が述べられている。

第4章 Adhesion force on low temperature surface under high vacuum では、高真空下で基板の温度を室温以下にしたときの付着力を評価した実験結果と考察が述べられている。まず、基板の温度を下げたときの基板表面での突起の成長と、高真空中での残留ガスの主成分が水であることから、水分子の基板表面への吸着と表面拡散が生じていたと解釈できることが示されている。また、接触時間の増加に伴う付着力の増加を示す実験結果が示され、水分子の拡散による液架橋力の増加が示唆され

ている。さらに、水分子の拡散を仮定して、基板の表面粗さがサブナノメートルで基板の温度が 273-213K のとき付着力の温度依存性を解析して、その活性化エネルギーが 96 meV であることが述べられている。この値は、氷の表面における水分子の表面拡散の活性化エネルギーの報告例とほぼ等しく、基板表面上に形成された氷の表面上を水分子が表面拡散したと解釈できることが示されている。表面拡散した水分子の一部が液架橋に取り込まれて成長し、接触時間の増加に伴い付着力が増加するという液架橋の成長モデルが成立して、水分子が取り込まれる割合（吸着確率）がこれまでに報告されている真空槽内壁への水分子の吸着確率とオーダー的に一致していることが説明されている。これらの議論により、表面拡散する水分子が液架橋に取り込まれて付着力が増加する機構が世界で初めて結論できたと説明されている。本章の纏めとして、基板表面をサブナノメートルオーダーの表面粗さに改善することは、高真空下で基板表面が低温の場合にも、基板から飛散する微粒子を防ぐための有効な手段である可能性が述べられている。

第 5 章 Conclusion and Future work では本研究の結果の要点と、今後の研究に対する展望が記述されている。

以上のように、本論文では、基板表面における微粒子の付着力を測定して、その結果を理論的に解析することにより、基板表面の表面粗さをサブナノメートルオーダーに改善することが、基板から飛散する微粒子を防ぐ手法として有効であることを示した。付着力の挙動を理解するために、局所表面粗さを用いた解析法を新たに提案した。また、表面拡散する水分子が液架橋に取り込まれて付着力が増加する機構を世界で初めて明らかにした。これらの成果は学術的に価値があり、本論文は博士（理学）の学位論文としてふさわしいものと認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

（博士課程）