

Nanopartikel aus der Gasphase: Depositionsmechanismen und strukturierte Anordnung auf glatten Substratoberflächen

Vom Fachbereich Elektrotechnik
der Gerhard-Mercator Universität Duisburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

von

Thomas J. Krinke

aus Neuss

Referent: Prof. Dr.-Ing. Heinz Fißan
Korreferent: Assoc. Prof. Dr. Knut Deppert

Tag der mündlichen Prüfung: 06. November 2001

meinen Eltern Ingeburg und Claudio Krinke gewidmet

Danksagung

Diese Arbeit ist im Rahmen einer Kooperation zwischen dem Fachgebiet für Prozess- und Aerosolmesstechnik des Fachbereichs Elektrotechnik der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg und der Abteilung für Festkörperphysik der Universität Lund in Schweden entstanden. Während in Duisburg die theoretischen Arbeiten und die Simulation des Depositionsprozesses erfolgten, sind in Lund die experimentellen Untersuchungen durchgeführt worden. Den Menschen, die es mir ermöglichten, einen Einblick in das spannende und zukunftsweisende Gebiet der Nanotechnologie zu erlangen, mich bei meiner Arbeit unterstützten und dazu beitrugen, dass ich mich sowohl in Duisburg als auch in Lund zu Hause fühle, möchte ich an dieser Stelle meinen herzlichen Dank aussprechen:

PD Dr.-Ing. Frank Schmidt vom Fachgebiet Verfahrenstechnik des Fachbereichs Maschinenbau möchte ich dafür danken, dass er mir den Einstieg in diese Arbeit ermöglichte und mich in der Anfangsphase meiner Doktorandenzeit betreute. Durch ihn lernte ich meinen Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Heinz Fißan in Duisburg und Assoc. Prof. Dr. rer. nat. Knut Deppert in Lund, kennen. Beiden möchte ich für ihre Unterstützung, ihre engagierte Betreuung und die optimalen Arbeitsbedingungen danken. Heinz Fißan danke ich dafür, dass er es mir ermöglichte, diese Arbeit durchzuführen und mir die ingenieurwissenschaftliche Arbeitsweise beibrachte. Seine konstruktive Kritik war stets eine große Hilfe. Knut Deppert danke ich dafür, dass er mir immer wieder seine Versuchsanlage zur Verfügung stellte, mir die wissenschaftliche Arbeitsweise beibrachte, mir Freiraum für die Entwicklung eigener Ideen schaffte und gute Ideen erkannte und förderte.

Vielen Dank an Dr.-Ing. Frank Jordan, der sein fundiertes Fachwissen gerne teilte. Er half mir sehr beim Verständnis der Brownschen Bewegung und bei Fragen bezüglich ihrer Beschreibung in der Computersimulation. Außerdem war seine Idee zur Messung des Stromes bei der Kontaktaufladung einfach gut. Desweiteren möchte ich PD Dr.-Ing. Einar Kruis danken für anregende Diskussionen und seine Hilfe bei der Erstellung des Strömungsprofils des verwendeten ESPs, Thomas Engelke vom Fachgebiet Verfahrenstechnik für seine schnelle Hilfe bei der Berechnung des Strömungsfeldes, Frank Otten für zahlreiche Diskussionen und seine sprichwörtliche Hilfsbereitschaft, Peter Müschenborn für die gute Zeit im gemeinsamen Büro und hervorragenden Kaffee, Heidi Giesen für ihre Hilfe bei der Bürokratie und die Übermittlung aller wichtigen Dinge während ich in Lund war, Klaus Kubernus-Perscheid für seine Unterstützung bei Computerfragen, Andreas Trampe für seine zuverlässige und reibungslose Hilfe in administrativen Dingen und allen anderen Kollegen der AMT für das angenehme Arbeitsklima.

Bei Klaus Tüber möchte ich mich für seine engagierte Mitarbeit im Rahmen seiner Projektarbeit in Lund bedanken. Er hat neue Impulse gesetzt und viel zum Verständnis der Partikeldeposition beigetragen.

Prof. Dr. Lars Samuelson is the head of the division of Solid State Physics and head of the Nanometer Structure Consortium. His enthusiasm inspired me and I am grateful for the opportunities I had to work as an engineer in his division. Special thanks go to Dr. Martin Magnusson for his help, long discussions and for improving most of the English manuscripts I wrote and Dr. Ivan Maximov, who has been my teacher on scanning electron microscopy (my most important tool for the investigation of the particle distribution on substrate surfaces) and e-beam lithography. Thanks to Martin Persson for showing me how to use the ray-tracing program "Pov-Ray", which made the visual presentation of particle trajectories possible, Magnus Borgström, being a PC-island in an ocean of MACs for his support, Lars-Göran Wennerberg for his help with the computers, Mariusz Graczyk for providing me with substrates, Eva-Lena Sarwe and Lena Timby for their help with high vacuum evaporation, Søren Jeppesen for tips and tricks on technical solutions, Thord Stjernholm and Jens Henriksen for creating beautiful(ly working) devices, Mona Hammar for their help in all bureaucratic matters, Assoc. Prof. Dr. Günter Grossmann and Prof. Dr. Werner Seifert for their interest in my work and all other colleagues especially the FTF-innebandy-team and the "Lunch?"-group for the good times I had in Lund.

Ein herzliches Dankeschön geht auch an meinen langjährigen Freund Wolfgang Bausch, der das Manuskript dieser Arbeit gegenlas und dessen durchdachte Anmerkungen beim Schritt von der Rohfassung zur endgültigen Form eine wertvolle Hilfe waren.

Meinen Eltern Ingeburg und Claudio Krinke danke ich von ganzen Herzen für ihre Liebe und die Unterstützung, die viele Dinge erst möglich machte. Meiner Mutter gelingt es durch ihre ruhige Art und weisen Erkenntnisse immer wieder die Enden kleiner und großer Tunnel zu erleuchten. Mein Vater hat mich von klein auf für die Lösung technischer Fragestellungen begeistert. Die Zeit, die er mit mir in der Werkstatt verbrachte, schulten meine handwerklichen Fähigkeiten und Kreativität, die mir bei dieser Arbeit sehr zugute kamen. Meinen Schwestern Monika und Christina danke ich, dass sie für mich da sind, wann immer ich sie brauche.

Finanzielle Unterstützung wurde mir in Form von Stipendien durch das ESF program NANO und das EU-TMR project CLUPOS sowie ein Abschlussstipendium der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg zuteil, wofür ich mich an dieser Stelle ebenfalls bedanken möchte.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Problemstellung	1
2	Belegung von Substraten mit Nanopartikeln aus der Gasphase	7
3	Theoretische Beschreibung der Deposition von Nanopartikeln	10
3.1	Diskussion der Kräfte am Einzelpartikel	14
3.2	Einordnung der Kräfte nach ihrer Reichweite und ihrem Einfluß auf die Partikelbewegung	24
4	Modellbildung	34
4.1	Aufbau der Computersimulation	36
4.2	Verifikation der Computersimulation	50
4.3	Darstellung der Partikelbewegung im Nahbereich der Substratoberfläche	54
5	Deposition von Nanopartikeln im homogenen elektrischen Feld	62
5.1	Aufbau der Versuchsanlage	62
5.2	Bestimmung der Depositionswahrscheinlichkeit aufgrund der Brownschen Bewegung	64
5.3	Abhängigkeit der Deposition vom Partikeldurchmesser	67
6	Mikroskopische Betrachtung der Deposition	70
6.1	Experimentelle Durchführung	70
6.2	Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit den Trajektorienrechnungen	72
6.3	Vermeidung von Agglomeration durch Mehrfachladungen – theoretische Ergebnisse	87
7	Nanostrukturierte Anordnung von Partikeln durch Deposition in inhomogenen elektrischen Feldern	91
7.1	Erzeugung inhomogener elektrischer Felder mittels Kontaktaufladung	91
7.1.1	Experimentelle Bestimmung der Ladungsdichte in Linienladungen	92
7.1.2	Experimentelle Durchführung der Kontaktaufladung von Substratoberflächen	94
7.2	Experimentelle Untersuchung der Deposition auf aufgeladenen Siliziumoxidoberflächen	96
7.3	Theoretische Betrachtung der Deposition – Wechselwirkungen mit Oberflächenladungen	108
8	Zusammenfassung und Ausblick	113
9	Literaturverzeichnis	118
10	Nomenklatur	124