

UHV–STM–Schreiben von Nanostrukturen in
selbstorganisierte Monoschichten und Ätzübertragung
in einkristallines Silizium sowie Cr– und Au–Schichten

Dissertation zur
Erlangung des Doktorgrades
der Fakultät für Physik
der Universität Bielefeld

vorgelegt von
Michael Sundermann
aus Bielefeld, Deutschland

Bielefeld, Juli 2002

Betreuer: Prof. Dr. U. Heinzmann
Priv. Doz. Dr. U. Kleineberg

Gutachter: Prof. Dr. U. Heinzmann
Prof. Dr. G. Reiss

Tag der Disputation: 09.09.2002

Teile der Arbeit sind veröffentlicht in:

- STM Writing of Artificial Nanostructures in Alkanethiol-Type Self-Assembled Monolayer
J. Hartwich, M. Sundermann, U. Kleineberg, U. Heinzmann
Appl. Surf. Sci. 144–145 (1999) 538–542
- Nanopatterning of Au absorber films on Mo/Si EUV multilayer mirrors by STM lithography in self-assembled monolayers
M. Sundermann, J. Hartwich, K. Rott, D. Meyners, E. Majkova, U. Kleineberg, M. Grunze, U. Heinzmann
Surf. Sci. 454–456 (2000) 1104–1109
- STM Lithography in an Organic Self-Assembled Monolayer
U. Kleineberg, A. Brechling, M. Sundermann, U. Heinzmann
Adv. Funct. Mater. (2001) Vol. 11, No. 3 208–212

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	9
1 Einleitung	13
2 Grundlagen	17
2.1 Rastersondenverfahren	17
2.1.1 Rastertunnelmikroskop	18
2.1.2 Rasterkraftmikroskop	19
2.2 Self-Assembled Monolayer (SAM)	21
2.2.1 Hexadecanthiol HDT	22
2.2.2 N-Biphenylthiol N-BPT	24
2.2.3 Octadecyltrichlorsilan OTS	25
2.2.4 Octadecyltrimethoxysilan OTMS	27
2.2.5 Hydroxybiphenyl HBP	27
2.2.6 Ethoxybiphenylsilan EBP	28
3 Mikroskope zur Charakterisierung, Strukturierung und Analyse	29
3.1 Kontaktwinkelmeßgerät G10	29
3.2 Micro-STM-Aufbau	31
3.3 Digital Instruments Nanoscope IIIa	37
3.4 Rasterelektronenmikroskop LEO 1530 Gemini	37
4 Präparation der Substrate und der SAM-Resistfilme	39
4.1 Substratpräparation	39
4.2 SAM Präparation	41
4.2.1 Hexadecanthiol (HDT) auf Gold	42
4.2.2 N-Biphenylthiol (N-BPT) auf Gold	42
4.2.3 Octadecyltrichlorsilan (OTS) auf Silizium (100)	43
4.2.4 Octadecyltrimethoxysilan (OTMS) auf Chrom	44
4.2.5 Hydroxybiphenyl (HBP) auf H-terminiertem Silizium (111)	45
4.2.6 Ethoxybiphenylsilan (EBP) auf Silizium (111)	45
4.3 Charakterisierung der SAM-Schichten nach der Präparation	45

5	Naßchemische Ätzprozesse für den Strukturübertrag	47
5.1	Strukturübertragung in polykristalline Gold-Schichten	47
5.2	Strukturübertragung in Silizium (100) und (111)	48
5.3	Strukturübertragung in Chrom	50
5.4	Kurze Zusammenfassung der Ätzprozesse	51
6	Analyse der geschriebenen Strukturen nach dem Ätzübertrag	53
6.1	Hexadecanthiol (HDT) auf Gold	53
6.2	N-Biphenylthiol (N-BPT) auf Gold	59
6.3	Octadecyltrimethoxysilan (OTMS) auf Chrom	67
6.4	Octadecyltrichlorsilan (OTS) auf Silizium (100)	69
6.5	Hydroxybiphenyl (HBP) auf H-terminiertem Silizium (111)	75
6.6	Ethoxybiphenylsilan (EBP) auf Siliziumoxid auf Silizium (111)	79
6.7	Kurze Zusammenfassung der Ergebnisse	88
7	Interpretation der Ergebnisse	91
7.1	Vergleich der Systeme HDT und N-BPT auf Gold	91
7.1.1	2D Strukturierbarkeit des Resists	92
7.1.2	Minimale erreichte Strukturgrößen	92
7.1.3	Modell der Strukturierungsprozesse	93
7.2	Vergleich der Systeme OTMS auf Chrom und OTS auf Silizium (100)	96
7.2.1	Funktionsweise des Resists	96
7.2.2	Minimale erreichte Strukturgrößen	99
7.3	Vergleich der Systeme OTS und HBP bzw. EBP auf Silizium	100
7.3.1	Minimale erreichte Strukturgrößen	100
7.3.2	Modell der Strukturierungsprozesse	100
8	Zusammenfassung und Ausblick	105
	Literaturverzeichnis	107
	Danksagung und Eidesstattliche Erklärung	121
	Lebenslauf	123

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematischer Aufbau einer SAM-Schicht.	21
2.2	Strukturmodell einer Hexadecanthiolmonolage auf Gold	22
2.3	Modell der Überstruktur einer Hexadecanthiolmonolage auf Gold	23
2.4	Strukturmodell einer nitroterminierten Biphenylthiolmonolage auf Gold.	24
2.5	Schematische Darstellung einer Organosilanmonolage.	25
2.6	Schematische Darstellung der möglichen Bindungsplätze für die H ₂ O Adsorption an einer Organosilanmonolage.	26
2.7	Schematische Darstellung einer Hydroxybiphenylmonolage.	27
2.8	Schematische Darstellung einer Ethoxybiphenylsilanmonolage.	28
3.1	Das Kontaktwinkelmeßgerät G10.	30
3.2	Definition des Kontaktwinkels.	31
3.3	Der Micro-STM-Aufbau.	31
3.4	Das Omicron UHV-Micro-STM.	32
3.5	SEM-Aufnahme einer defekten STM-Spitze.	34
3.6	SEM-Aufnahme einer typischen eingesetzten STM-Spitze (Teil 1).	35
3.7	SEM-Aufnahme einer typischen eingesetzten STM-Spitze (Teil 2).	36
3.8	Das Digital Instruments Nanoscope IIIa.	37
4.1	Schematische Darstellung des in Kooperation hergestellten Schichtsystems.	40
4.2	Schematische Darstellung einer EUV-Reflexionsmaske mit strukturierter Absorberschicht.	41
4.3	Schematische Darstellung der Präparation der SAM-Resistfilme durch Immersionsbeschichtung	42
4.4	Schematische Darstellung der Präparation von OTS auf Silizium.	43
4.5	Schematische Darstellung der Präparation von OTMS auf Chrom.	44
5.1	Schematische Darstellung des isotropen Ätzens.	48
5.2	Schematische Darstellung des anisotropen Ätzens in Si(100), justiert bezüglich der $\langle 110 \rangle$ -Richtungen.	49
5.3	Schematische Darstellung des anisotropen Ätzens in Si(111).	50
6.1	Schema des STM-Lithographieprozesses in HDT/Au.	54

6.2	3D-Darstellung der AFM-Aufnahme einer ins Gold übertragenen Rechteckstruktur.	54
6.3	SEM-Aufnahme einer in HDT geschriebenen und in die Goldschicht geätzten Kreisstruktur.	55
6.4	Plot eines programmierten Kreismacros.	55
6.5	AFM-Aufnahme eines Ausschnittes einer in die Goldschicht geätzten Kreisstruktur.	56
6.6	AFM-Aufnahme mit Linescan einer ins Gold geätzten Linie.	57
6.7	AFM-Aufnahme einer Spiralstruktur mit Linescan.	58
6.8	Schema des STM-Lithographieprozesses in N-BPT/Au.	59
6.9	AFM-Aufnahme dreier Rechteckstrukturen, die das Übertragsverhalten des Resits bei kleinen Gapspannungen zeigen.	60
6.10	Kombinierte SEM- und AFM-Aufnahme dreier Rechteckstrukturen, die das Übertragsverhalten des Resits bei größeren Gapspannungen zeigen.	61
6.11	AFM-Aufnahme mit Linescan eines Bereiches, der mit 10 V und 10 nA geschrieben wurde.	62
6.12	SEM-Aufnahme einer in N-BPT geschriebenen und in die Goldschicht geätzten Kreisstruktur eines Kreuzgitters.	63
6.13	AFM-Aufnahme eines Ausschnittes einer in die Goldschicht geätzten Kreuzgitterstruktur.	64
6.14	3D-Darstellung einer AFM-Aufnahme einer erzeugten Kreuzgitterstruktur.	64
6.15	3D-Darstellung einer AFM-Aufnahme einer Spiralstruktur.	65
6.16	AFM-Aufnahme eines Ausschnitts einer Spiralstruktur mit Linescan.	66
6.17	Schema des STM-Lithographieprozesses in OTMS/Cr.	67
6.18	AFM-Aufnahme dreier quadratischer Strukturen, die das Übertragsverhalten des Resists bei unterschiedlichen Gapspannungen zeigen.	67
6.19	Detailaufnahme der mit 5 V geschriebenen quadratischen Struktur aus Abbildung 6.18.	68
6.20	SEM-Aufnahme von parallelen Linien einer Periode von 220 nm.	69
6.21	Schema des STM-Lithographieprozesses in OTS/Si(100).	70
6.22	AFM-Aufnahme eines Si-Quadrates geschrieben in OTS/Si(100).	70
6.23	SEM-Analyse von vier quadratischen Strukturen, die das Übertragsverhalten des Resists bei unterschiedlichen Tunnelströmen zeigen.	71
6.24	SEM-Analyse von vier quadratischen Strukturen, die das Übertragsverhalten des Resists bei unterschiedlichen Gapspannungen zeigen.	72
6.25	3D-Darstellung einer AFM-Aufnahme von parallelen Linien einer Periode von 65 nm.	73
6.26	AFM-Aufnahme mit Linescans zur Analyse der Höhe und Breite der in Abbildung 6.25 in 3D-Form dargestellten parallelen Linien.	73
6.27	SEM-Aufnahme von parallelen Linien eines Abstandes von 90 nm.	74
6.28	Schema des STM-Lithographieprozesses HBP/Si(111).	75

6.29	SEM- und AFM-Aufnahmen dreier Rechteckstrukturen, die das Übertragsverhalten des Resists bei unterschiedlichen Gapspannungen und Tunnelströmen bei einer Scangeschwindigkeit von 6000 nm/s zeigen.	77
6.30	SEM- und AFM-Aufnahmen dreier Rechteckstrukturen, die das Übertragsverhalten des Resists bei unterschiedlichen Gapspannungen und Tunnelströmen bei einer Scangeschwindigkeit von 12000 nm/s zeigen.	78
6.31	Schema des STM-Lithographieprozesses EBP/Si(111).	80
6.32	AFM-Aufnahme eines Ausschnitts eines Si-Quadrates geschrieben in EBP/Si(111).	80
6.33	SEM-Aufnahme von vier Rechteckstrukturen, die das Übertragsverhalten des Resist bei unterschiedlichen Gapspannungen und Tunnelströmen zeigen.	82
6.34	AFM-Aufnahme der Struktur Nr. 4 aus Abbildung 6.33, die mit 10 nA und unterschiedlichen Gapspannungen geschrieben wurde.	83
6.35	SEM-Aufnahme von in Silizium übertragenen Linien einer Breite von ca. 15 nm.	84
6.36	AFM-Aufnahme mit Linescan eines Bereiches, der mit 10 nA Tunnelstrom und 10 V Gapspannung geschrieben wurde.	86
6.37	SEM-Aufnahme einer Sternstruktur, die das Übertragsverhalten ins Si(111) bezüglich der Schreiborientierung zeigt.	87
6.38	3D-Darstellung einer AFM-Aufnahme eines ins Si(111) übertragenen Ausschnitts eines Kreuzgitters.	87
7.1	Schematisches Modell für den Strukturierungsprozeß in NBPT.	95
7.2	Schematisches Modell für den Strukturierungsprozeß in HDT.	96
7.3	SEM-Aufnahme von parallelen Linien, geschrieben mit einer Pt/Ir Spitze in OTS, nach dem Ätzübertrag.	98
7.4	Schematisches Modell für den Strukturierungsprozeß in OTS/OTMS.	99
7.5	Schematisches Modell für den Strukturierungsprozeß in HBP.	102
7.6	Schematisches Modell für den Strukturierungsprozeß in EBP.	103

Tabellenverzeichnis

5.1	Zusammenfassung der Ätzprozesse	51
6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse des Systems HDT/Au.	59
6.2	Zusammenfassung der Ergebnisse des Systems NBPT/Au.	65
6.3	Zusammenfassung der Ergebnisse des Systems OTMS/Cr.	69
6.4	Zusammenfassung der Ergebnisse des Systems OTS/Si.	75
6.5	Zusammenfassung der Ergebnisse des Systems HBP/Si.	79
6.6	Zusammenfassung der Ergebnisse des Systems EBP/Si.	85
6.7	Zusammenfassung der Ergebnisse aller untersuchten Systeme: Teil 1. . . .	88
6.8	Zusammenfassung der Ergebnisse aller untersuchten Systeme: Teil 2. . . .	89

Verwendete Abkürzungen

AES	Auger Electron Spectroscopy Auger-Elektronenspektroskopie
AFM	Atomic Force Microscope Rasterkraftmikroskop
EBP	Ethoxybiphenylsilan
HBP	Hydroxybiphenyl
HDT	Hexadecanthiol
IR	InfraRed Infrarot
MOCVD	MetalOrganic Chemical Vapor Deposition Metallorganische Gasphasenabscheidung
N-BPT	N-Biphenylthiol
NEMS	Nano-Electro-Mechanical Systems Nanoelektromechanische Systeme
NEXAFS	Near Edge X-ray Adsorbtion Fine Structure Röntgenabsorptionsspektroskopie
MFM	Magnetic Force Microscopy Magnetkraftmikroskopie
OTMS	Octadecyltrimethoxysilan
OTS	Octadecyltrichlorsilan
PVD	Physikal Vapor Deposition Physikalische Gasphasenabscheidung

PMMA	PolyMethylMethAcrylat
QMA	Quadropole Mass Analyzer Quadrupol–Massenspektrometer
RIE	Reactive Ion Etching Reaktives Ionenätzen
SAM	Self–Assembled Monolayer Selbstorganisierte Monolagen
SEM	Scanning Electron Microscope Rasterelektronenmikroskop
SET	Single–Electron–Transistor Ein–Elektronen–Transistor
SNOM	Scanning Near–field Optical Microscopy Optische Nahfeld–Mikroskopie
SPM	Scanning Probe Microscopy Rastersondenmikroskopie
SThM	Scanning Thermic Microscopy Raster–Wärmestrahlungsmikroskopie
STM	Scanning Tunneling Microscope Rastertunnelmikroskop
UHV	Ultra High Vacuum Ultrahochvakuum
XPS	X–ray Photoelectron Spectroscopy Röntgenphotoelektronenspektroskopie

Kapitel 1

Einleitung

Seit der Entwicklung des Rastertunnelmikroskops durch Binnig, Rohrer und Gerber [1,2] im Jahre 1982 sind Rastersondenmikroskope nicht nur zur mikroskopischen Analyse künstlicher lateraler Strukturen im Sub-Nanometerbereich eingesetzt worden, sondern auch als Werkzeug zu deren Erzeugung [3–13]. Es wird zwischen zwei Klassen von Strukturierungsmethoden unterschieden: Bei der direkten Strukturierung werden nanoskopische Bereiche oder einzelne Atome/Moleküle der Probenoberfläche z.B. auch Adatome, manipuliert (hinzugefügt, verschoben oder entfernt). Dieses kann z.B. bei tiefen Temperaturen [14–17], durch Anlegen eines Spannungspulses [4,18,19], mechanisch [3] oder laserunterstützt [20–23] geschehen. Bei der lithographischen Strukturierung werden die Strukturen in eine geeignete Resistschicht geschrieben, die auf der eigentlich zu strukturierenden Oberfläche aufgebracht worden ist. Anschließend wird diese Maskenstruktur mittels physikalischer oder chemischer Ätzverfahren, wie z.B. dem reaktiven Ionenätzen oder naßchemischen Ätzverfahren, in das Substrat übertragen [24–27].

Aufgrund der immer weiter fortschreitenden technologischen Miniaturisierung geraten nanostrukturierte Materialien mehr und mehr in den Blickpunkt der aktuellen Forschung. Für die lithographische Erzeugung von Nanostrukturen mit Strukturgrößen < 70 nm könnte neben den existierenden Nano-Lithographieverfahren (Elektronen-, Atomstrahl-, Ionenstrahl- und EUV-Lithographie sowie der Röntgenlithographie) [28–33] die SPM-Lithographie eine interessante Erweiterung für die Erzeugung kleinster Strukturen darstellen.

Im Bereich der Nanotechnologie, also in der Nanomechanik, Nanoelektronik, Nanooptik, usw., sind Nanostrukturen häufig in Kombination mit Nanometerschichtsystemen zu finden, z.B. bei diffraktiven Röntgenoptiken oder Reflexionsmasken. Hierzu zählen z.B. die in Bielefeld mittels UHV-PVD- [34–39] und MOCVD-Verfahren [40,41] hergestellten Multischichtsysteme, die im Bereich der Röntgenoptiken eingesetzt werden [42]. Durch Lateralstrukturierung dieser Multischichten können sie als komplexe röntgenoptische Komponenten, wie Röntgenreflexionsgitter, Bragg-Fresnel-Zonenplatten oder Reflexionsmasken für die EUV-Projektionslithographie verwendet werden [29,42–45]. Weitere Anwendungsbeispiele dreidimensionaler Nanostrukturen von großem physikalischen und

technischen Interesse erstrecken sich vom Ein-Elektronen-Transistoren (SET) [46,47] über Nanoelektromechanische-Systeme (NEMS) [48–50] bis hin zu Nanofluiden-Systemen [51] für biologische Anwendungen. Viele dieser Systeme beruhen auf Nanostrukturen in Silizium, so dass eine Integration in die bestehende Siliziumtechnologie ermöglicht wird. Daher steht die Herstellung und Charakterisierung von Nanostrukturen in einkristallinem Silizium auch im Zentrum dieser Arbeit.

Für die lithographische Erzeugung von Nanostrukturen wird in den letzten Jahren eine neue Klasse von Resistmaterialien untersucht, die auf geordneten, monomolekularen Schichten beruhen [52,53]. Ein Vorteile dieser so genannten SAM-Schichten (Self-Assembled Monolayer), die als ultradünne (1–3 nm) Resistschichten eingesetzt werden können, gegenüber z.B. PMMA-Resist ist, dass theoretisch in SAM kleinere Strukturen erzeugt werden können. SAM-Schichten haben gegenüber Polymerlacken ferner den Vorteil, dass das Aspektverhältnis – das Verhältnis von Höhe zu Breite der Strukturen – selbst bei kleinen Strukturbreiten aufgrund der geringen Schichtdicken gering ist. Außerdem sind sie für STM-Messungen und –Strukturierungen aufgrund der geringen Schichtdicken besser geeignet. Der Einsatz von SAM-Resistschichten für die Nanostrukturierung von unterschiedlichen Materialien ist u.a. im Bereich der Niederenergie- als auch Hochenergie-Elektronenstrahlolithographie bzw. der Elektronen-Projektionslithographie [54–61], der chemischen Nanolithographie [62,63], der Softlithographie (Microcontact Printing) [64–71], UV-Photolithographie [72–76], Atomlithographie [77,78] oder Micromachining mittels STM-Spitzen [79], scharfen Nadeln [80] oder Kapillaren [81], sowie der Rastersondenlithographie [82–85] in der Literatur bekannt.

Neben diesem Einsatzgebiet stehen SAM-Filme im Mittelpunkt zahlreicher Forschungsaktivitäten aufgrund ihrer einzigartigen Eigenschaften [86,87]. Hierzu zählen die spontane Ordnung durch Selbstaggregation oder die sehr genaue Kontrolle über die Eigenschaften der Filme durch Wahl der Kopfgruppe, der Kettenlänge bzw. Kettenart und der Endgruppe der Moleküle. Es können z.B. durch die Wahl der Endgruppe spezifisch Bio-Moleküle adsorbiert werden oder deren Adsorption verhindert werden. Dies ist für biotechnologische Anwendungen und für die Grenzfläche zwischen anorganischen und biologischen Materialien von großem Interesse [88–91].

Die Aufgabe dieser Arbeit liegt in der Untersuchung des STM-Schreibens in SAMs, gefolgt von dem naßchemischen Ätzübertrag in verschiedene Substratmaterialien und schließlich die Charakterisierung der lateralen Nanostrukturen. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage, welche SAM-Resists am besten geeignet sind, mittels UHV-STM-Schreibens strukturiert zu werden und als Maske für den naßchemischen Strukturübertrag in das jeweilige Substrat zu dienen. Wichtig sind hierbei die minimal zu erreichenden Strukturgrößen sowie die genaue, strukturgetreue Übertragung der Maskenstruktur in das Substrat. Des weiteren ist von Interesse, ob eine Abhängigkeit des Ätzübertrags von den Parametern des Schreibprozeß festzustellen ist, um somit Rückschlüsse auf den Strukturierungsprozeß zu erhalten. Hierbei wird auch auf den Vergleich mit Ergebnissen aus der Literatur eingegangen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden sechs unterschiedliche Systeme untersucht. Dabei handelt es sich um: Hexadecanthal (HDT) bzw. N-Biphenylthiol (N-BPT) auf Gold, Octadecyltrimethoxysilan (OTMS) auf Chrom, Octadecyltrichlorsilan (OTS) auf Silizium-(100) und Hydroxybiphenyl (HBP) bzw. Ethoxybiphenylsilan (EBP) auf Silizium-(111).

Kapitel 2

Grundlagen

In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über die Grundlagen für die Herstellung und Charakterisierung künstlicher lateraler Nanostrukturen gegeben. Es wird dabei auf die für die Herstellung und Analyse verwendeten Rastersondenverfahren eingegangen. Hierbei wird die Strukturierung der SAM-Filme mit dem Rastertunnelmikroskop veranschaulicht. Insbesondere werden die unterschiedlichen untersuchten SAM Resistmaterialien, die sich durch Rastersondenverfahren strukturieren lassen und für den anschließenden Ätzprozeß als Maske dienen, vorgestellt.

2.1 Rastersondenverfahren

In den Jahren 1979 bis 1982 brachten Binnig und Rohrer der Oberflächenphysik durch die Entwicklung des Rastertunnelmikroskops [1,2,92] einen entscheidenden Fortschritt. In den folgenden Jahren entwickelte sich eine ganze Klasse von dem Rastertunnelmikroskop ähnlichen Rastersondenmikroskopen [93]. Zu dieser Familie von Mikroskopen gehören unter anderem neben dem Rastertunnelmikroskop (STM), das Kraft- (AFM) [94,95], das Magnetkraft- (MFM) [96], das Wärmestrahlungs- (SThM) [97] sowie das optische Rasternahfeldmikroskop (SNOM) [93,98]. Diese Mikroskope dienen zur Analyse von z.B. topographischen, elektronischen und magnetischen Oberflächenstrukturen auf einer Größenskala, die bis in den Bereich atomarer Abstände hinab reicht [92,93,99–101]. In den letzten Jahren werden sie allerdings verstärkt auch als Werkzeug zur Erzeugung von künstlichen lateralen Strukturen verwendet [3–13].

Im Folgenden wird nur auf die in dieser Arbeit eingesetzten Rastersondenmikroskope (Rastertunnelmikroskop, Rasterkraftmikroskop) eingegangen. Hierbei liegt der Schwerpunkt beim STM auf dem „Schreiben“ und beim AFM auf dem „Abbilden“, da diese Mikroskope zu diesen Zweck eingesetzt wurden.

2.1.1 Rastertunnelmikroskop

Der Rastertunnelmikroskopie liegt das Tunneln von Elektronen zwischen einer leitfähigen Festkörperoberfläche und einer Metallspitze zugrunde [102,103]. Die Probe und Spitze werden bis auf ≈ 1 nm angenähert, so dass bei geeigneter Potentialdifferenz ein Tunnelstrom zwischen Spitze und Probe detektiert werden kann. Der zugrunde liegende quantenmechanischen Tunneleffekt wird schon seit mehr als einem halben Jahrhundert untersucht [104]. Die Literatur liefert verschiedene Modelle und Möglichkeiten, durch Messen des Tunnelstroms Informationen über die elektronische Struktur der Probenoberfläche und deren Topographie zu erhalten [105–108]. Messungen mit atomarer Auflösung sind möglich.

Ausgangspunkt der Überlegungen ist die eindimensionale Schrödingergleichung

$$-\frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t) = \left[\frac{p^2}{2m} + V(x) \right] \Psi(x, t). \quad (2.1)$$

Man betrachtet die Leitungselektronen als ebene Wellen und berechnet die Aufenthaltswahrscheinlichkeit $|\Psi(x, t)|^2$ innerhalb der Potentialbarriere der Breite d . Die Transmissionswahrscheinlichkeit der Elektronen zwischen Spitze und Probe und damit der Tunnelstrom, ergeben sich nach [106] mit der effektiven Austrittsarbeit $\phi = \frac{1}{2}(\phi_P + \phi_S)$, wobei ϕ_P die Austrittsarbeit der Probe, ϕ_S die Austrittsarbeit der Spitze und m_e die Elektronenmasse ist, zu

$$I \propto U e^{-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m_e \phi} d}. \quad (2.2)$$

Daraus ergibt sich eine exponentielle Abhängigkeit zwischen dem Tunnelstrom I und dem Abstand d zwischen Spitze und Probe. Um Tunnelmikroskopiebilder exakt auszuwerten, ist diese Näherung allerdings unzureichend. Sie reicht in diesem Zusammenhang jedoch aus, um die Verknüpfung der Schreibparameter (Tunnelstrom und Gapspannung) mit dem Abstand zwischen Spitze und Probenoberfläche zu verdeutlichen. Eine detailliertere Beschreibung findet man z.B. in [109].

Neben der Möglichkeit des Abbildens läßt sich das STM auch zur Erzeugung künstlicher lateraler Strukturen im Mikrometer- und Nanometerbereich einsetzen [3,7–13]. Es wird zwischen zwei Klassen von Strukturierungsmethoden unterschieden: Bei der direkten Strukturierung werden Bereiche oder einzelne Atome der Probenoberfläche oder aber auch Adatome manipuliert (hinzugefügt, verschoben oder entfernt). Dieses kann z.B. bei tiefen Temperaturen [14–17], durch Anlegen eines Spannungspulses [4,18,19], mechanisch [3] oder laserunterstützt [20–23] geschehen. Bei der indirekten Strukturierung, die in dieser Arbeit als STM–Lithographie bezeichnet wird, werden die Strukturen in eine geeignete Resistenschicht geschrieben (z.B. PMMA [110,111] oder wie in dieser Arbeit SAM–Filme) die auf der eigentlich zu strukturierenden Oberfläche aufgebracht worden sind. Dies geschieht durch Abrastern der Oberfläche mit der STM–Spitze im Konstantstrom Modus. Hierbei erfolgt die Regelung des Abstandes der Spitze von der Oberfläche durch Konstanthalten des Tunnelstroms. Da sich im allgemeinen die Struktur von SAM–Filmen bei moderaten Spannungen von ≈ 1 V nur mit Tunnelströmen < 10 pA abbilden lassen [112],

ist davon auszugehen, dass sich die STM-Spitze bei den verwendeten Tunnelströmen ($0,1 \text{ nA} - 50 \text{ nA}$) in der SAM-Schicht befindet. Die Modifikation einer SAM-Schicht wird somit aus einer mechanischen Komponente und ähnlich wie bei der Bestrahlung mit niederenergetischen Elektronen (typische Liniendosen $0,1 \text{ mC/cm}$ bis 10^5 mC/cm [113]) aus einer elektrochemischen Komponente bestehen [79,82,83,111]. Das STM-Schreiben läßt sich somit als die niederenergetische Anbindung an die Elektronenstrahlolithographie plus eine mechanische Strukturierung betrachten. Anschließend wird diese Maskenstruktur mittels physikalischer oder chemischer Ätzverfahren, wie z.B. dem reaktiven Ionenätzen, in das Substrat übertragen [24–27]. Die in dieser Arbeit verwendeten naßchemischen Ätzprozesse sind in Kapitel 5 beschrieben.

Ein Problem welches sich ergibt, wenn man die Parameterabhängigkeit des Strukturierungsprozesses untersucht, ist, dass es nicht möglich ist, einzelne experimentelle Parameter der STM-Strukturierung zu variieren, während man die anderen konstant hält, da Tunnelstrom, Gapspannung und Abstand von Spitze und Probe über Gleichung 2.2 verknüpft sind. Des Weiteren läßt sich die STM-Strukturierung nicht nur auf den Einfluß von der Spannung sowie eine Abhängigkeit von der Elektronendosis, wie beim Schreiben mit einem Elektronenstrahl, reduzieren, da die Elektronendosis durch die Parameter wie Tunnelstrom, Scangeschwindigkeit und Anzahl der Abrasterungsvorgänge gegeben ist. Durch die Position der Tunnelspitze, die während des Scans (bei den verwendeten Tunnelströmen) leicht in die SAM-Schicht eintaucht, lassen sich diese Parameter aufgrund des mechanischen Anteils nicht nur auf die Elektronendosis reduzieren. Deshalb ist die Elektronendosis in Kapitel 6 nicht explizit bei jeder Messung angegeben worden. Die Liniendosis D_L läßt sich jedoch durch Gleichung 2.3 einfach berechnen.

$$D_L = \frac{aI}{v} \quad (2.3)$$

Wobei I der Tunnelstrom, a die Anzahl der Abrasterungsvorgänge und v die Scangeschwindigkeit ist. Die Flächendosis D_F ist durch Gleichung 2.4 gegeben.

$$D_F = D_L n_L \quad (2.4)$$

Hierbei ist n_L die Anzahl der Linien pro Fläche.

2.1.2 Rasterkraftmikroskop

Das Kernstück dieser Mikroskopie ist ebenfalls eine feine Spitze. Sie ist in diesem Fall an einem Ausleger (Cantilever) befestigt. Die Probe wird an die Spitze herangeführt und der Cantilever verbiegt sich entsprechend der Kräfte, die auf die Spitze wirken [92,114]. Wie beim STM der Tunnelstrom, werden beim AFM die Wechselwirkungskräfte zwischen Spitze und Probe detektiert.

In der Rasterkraftmikroskopie spielen im allgemeinen immer mehrere Kräfte zwischen Spitze und Oberfläche eine Rolle. Dazu zählen die immer vorhandenen van-der-Waals-Kräfte, die auch noch über Abstände von einigen 10 nm wirken [115]. Diese schließen

Induktionskräfte (Wechselwirkungen zwischen permanenten und induzierten Dipolen), Orientierungskräfte (Wechselwirkungen zwischen zwei permanenten Dipolen) und Dispersionskräfte (Wechselwirkungen zwischen zwei induzierten Dipolen) ein [114]. Letztere werden auch als Londonsche Dispersionskräfte bezeichnet und dominieren in vielen Fällen. Sie sind anziehend und fallen mit $\frac{1}{d^6}$ ab [116]. Beim Abrastern der Oberfläche treten zusätzlich Reibungskräfte auf, die mit Adhäsions- und chemischen Bindungskräften verknüpft sind. Bei Abständen von einigen zehntel Nanometern kommen quantenmechanische Austauschwechselwirkungen zur Geltung. Ist die Spitze mit der Probe in mechanischem Kontakt, so dominieren Coulomb- und Pauliabstoßungskräfte zwischen den Atomrümpfen der Probe und denen der Spitze.

Berechnet man die relevanten Kräfte theoretisch [114], erhält man eine Abhängigkeit der repulsiven Kraft F vom Abstand d zwischen Spitze und Probe:

$$F = \sqrt{K^2 R d^3}. \quad (2.5)$$

Hierbei ist K das effektive Elastizitätsmodul und R der theoretisch angenommene Radius des Kontaktbereichs.

Die Kraft zwischen Spitze und Probe läßt sich mit dem Rasterkraftmikroskop in zwei Betriebsarten detektieren: durch eine quasistatische Kraftmessung über den direkten Nachweis der Auslenkung des Cantilevers (*contact mode*) oder durch eine dynamische Kraftgradientenmessung (*tapping mode, noncontact mode*) [117,118].

Im quasistatischen Modus (*contact mode*) regelt das Ausgangssignal des Verbiegungssensors den Abstand. Dabei kommt die Spitze der Oberfläche sehr nahe, wodurch ein hohes laterales und vertikales Auflösungsvermögen ermöglicht wird.

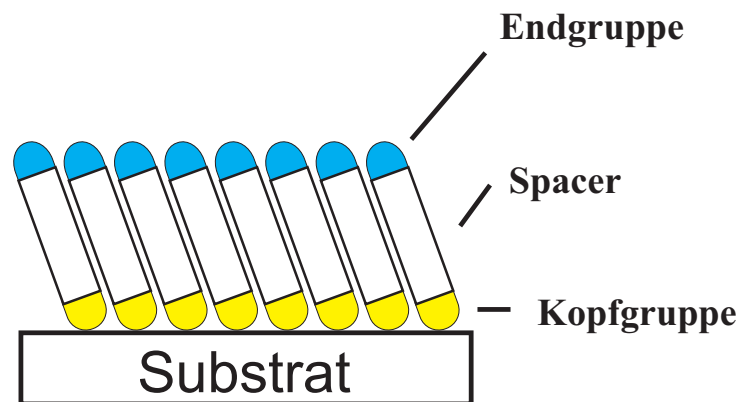
Bei der Simulation des Kontaktmodus werden Reibungskräfte auf atomarer Größenskala untersucht. Dazu wird neuerdings ein Federmodell verwendet, welches die Wirkung der Kräfte auf den Cantilever für alle drei Raumrichtungen berücksichtigt [119–122].

Bei der dynamischen Kraftgradientenmessung (beim *tapping mode*) wird der Cantilever meist mit einem Piezotranslator nahe der Resonanzfrequenz angeregt. Dadurch berührt er beim Abrastern der Probe in einem kleinen Abstand regelmäßig die Probenoberfläche. Eine Verschiebung der Resonanzfrequenz durch die Wechselwirkung mit der Probe verändert die Schwingungsamplitude. Die Abstandsregelung erfolgt über die Schwingungsamplitude, die mit dem optischen Verbiegungssensor detektiert wird. Dabei wird die Amplitude auf einen einstellbaren Wert geregelt und so die Federkonstante, d.h. der Kraftgradient, konstant gehalten. Außer dem *tapping mode* existiert noch ein weiterer dynamischen Modus, welcher vor allem zur Analyse sehr weicher Proben eingesetzt wird, der so genannte *noncontact mode*. In diesem Modus, auf den hier nicht näher eingegangen werden soll, schwingt ebenfalls der Cantilever mit seiner Eigenfrequenz und wird beim Annähern an die Probe dem Kraftfeld ausgesetzt, welches im noncontact Bereich anziehend wirkt. Detektiert wird hierbei die Frequenzmodulation. Es handelt sich um einen berührungsfreien Meßmodus bei dem der Abstand zur Probenoberfläche zwischen 1 nm

und 100 nm beträgt. Wie im Kontaktmodus kann im dynamischen Modus mit dem AFM atomare Auflösung erreicht werden [123–125].

2.2 Self-Assembled Monolayer (SAM)

Als selbstorganisierte Monolagen (Self-Assembled Monolayers, SAMs) bezeichnet man dünne, geordnete organische Molekülfilme, die sich z.B. spontan beim Eintauchen eines geeigneten Substrates in einer Lösung der entsprechenden Substanz auf der Oberfläche bilden [52,126] bzw. durch Wachstum aus der Gasphase [127]. Die Moleküle aller selbstorganisationsfähigen chemischen Verbindungen weisen einen einheitlichen Aufbau auf. Sie lassen sich in drei Teile gliedern (siehe Abbildung 2.1): Kopfgruppe, Spacer und Endgruppe. Verantwortlich für die Bindung (meist durch Chemisorption) des Moleküls an die Substratoberfläche ist die Kopfgruppe.



Aufbau: allgemein 3-teilig

Kopfgruppe: $-\text{SH}$, $-\text{SiCl}_3$, $-\text{Si}(\text{CH}_2\text{OH})_3$, ...

Spacer: $-(\text{CH}_2)_x-$, $-(\text{C}_6\text{H}_4)_x-$, ...

Endgruppe: $-\text{CH}_3$, $-\text{NH}_2$, $-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, NO_2 , ...

Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau einer SAM-Schicht.

Schon im Jahre 1983 konnte gezeigt werden, dass Dialkyl-Disulfide auf einer Goldoberfläche eine orientierte Monolage bilden [128]. Des Weiteren konnten deren Eigenschaften charakterisiert [129,130] und weitreichende Einsatzmöglichkeiten demonstriert werden [131,132]. An dünnen organischen Filmen, insbesondere an geordneten Monolagen, besteht seit einigen Jahren in der Mikroelektronik [133], bei der Untersuchung von photochemischen [134] und elektrochemischen [135] Prozessen reges Interesse. Im Bereich der Mikro- und Nanotechnologie eröffnen SAMs, aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften,

vielfältige neue Anwendungsmöglichkeiten z.B. als Resistschicht für den Strukturübertrag [66,112,136,137]. Da ein zusätzlicher Entwicklungsschritt, wie bei Polymerlacken notwendig, hinfällig ist, bezeichnet man SAM-Filme in dieser Form auch als selbstentwickelnde Elektronenresiste [138]. Des weiteren werden sie zur Reduktion der Adhäsion in mikro-mechanischen Systemen [86] oder für die Immobilisierung von Nanopartikeln [87] oder Proteinen [88–90] eingesetzt. Ihr Einsatzgebiet erstreckt sich auch auf andere biologische Systeme wie z.B. für Modell-Membran Systeme (Hybrid Bilayer Membranen) [139,140].

2.2.1 Hexadecanthiol HDT

Hexadecanthiolmoleküle ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{SH}$) [141], die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden, gehören zu der Klasse der Substanzen, die eine organisierte Monolage auf verschiedenen Metalloberflächen (z.B. Au, Ag, Pt) ausbilden [52] (siehe Abbildung 2.2). Die

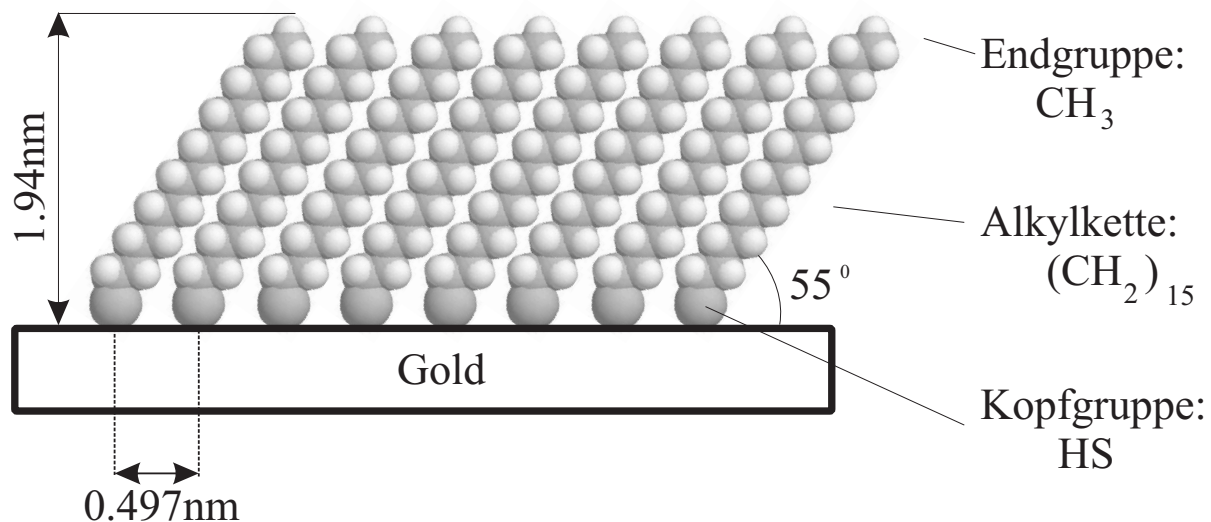


Abbildung 2.2: Strukturmodell einer Hexadecanthiolmonolage auf Gold.

Hexadecanthiolkopfgruppe reagiert mit dem Metallsubstrat (verwendet wurde Gold) und bildet unter Abspaltung des Wasserstoffs ein Thiolat [142]. Diese exotherme Reaktion mit dem Substrat (Bindungsenergien: 150–200 kJ/mol (1,55–2,07 eV/Molekül)) [138] ist die eigentliche Triebkraft des Selbstordnungsprozesses. Bereits adsorbierte Moleküle werden zusammengeschoben und somit verdichtet, da versucht wird, jeden freien Bindungsplatz zu besetzen. Sind die Moleküle nah genug aneinander geraten, tritt die van-der-Waals-Wechselwirkung zwischen den Alkylketten in Kraft. Sie beträgt bei dem verwendeten Hexadecanthiol ca. 10 kJ/mol (0,1 eV/Molekül) [138] und sorgt ebenso wie die Überstruktur der Schwefelkopfgruppe auf dem Substratgitter für die laterale Orientierung der Thiolmoleküle. Elektronenbeugungsexperimente mit hoher [143,144] und mit niedriger Energie [145], sowie AFM-Untersuchungen [146] zeigen, dass sich auf Au(111)-Ebenen eine $\sqrt{3} \times \sqrt{3} R30^\circ$ Überstruktur der Schwefelatome bildet (siehe Abbildung 2.3).

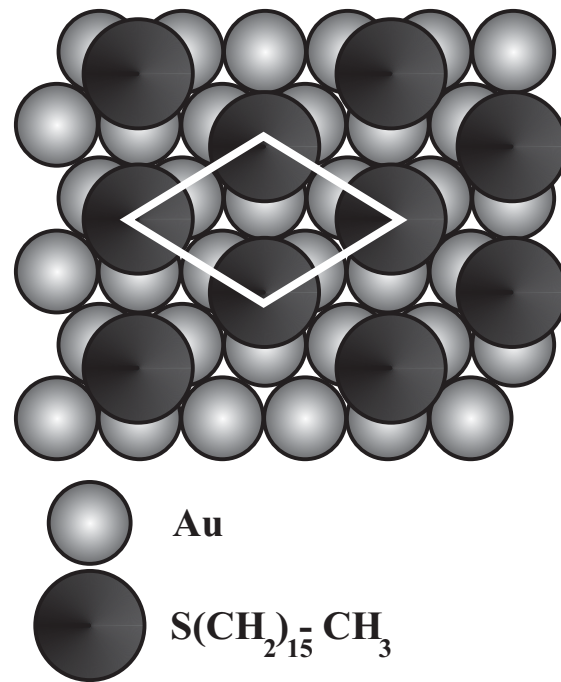


Abbildung 2.3: Modell der Überstruktur einer Hexadecanthiolmonolage auf Gold.

In dieser Anordnung beträgt der Abstand zwischen benachbarten Schwefelatomen 0,497 nm [147]. Dieser Abstand ist jedoch deutlich größer als der Abstand der sich aus der van-der-Waals-Wechselwirkung der Kohlenwasserstoffketten ergibt, jener beträgt ca. 0,45 nm [148]. Um ihre van-der-Waals-Wechselwirkung zu maximieren, verkippen die Ketten gegenüber der Oberflächennormalen um ca. 35° [149,150]. Aus der Kettenlänge [151] und dieser Verkipfung resultiert eine Schichtdicke der Monolage von 1,94 nm [138]. Neben diesem *Tiltwinkel*, also der Verkipfung, tritt eine Verdrehung der Moleküle um die Längsachse auf. Dieser *Twistwinkel* liegt bei polykristallinem Gold zwischen 45° und 52° [145].

Wie der elektrische Leitungsmechanismus in den Thiolen funktioniert, ist noch nicht geklärt. Es wird vermutet, daß es sich um *Poole-Frenkel-Effekte* handelt [152,153], also um feldverstärkte, thermische Anregung aus lokalisierten Zuständen ins Leitungsband. Die physikalischen und chemischen Oberflächeneigenschaften dieser Monolagen werden weitgehend durch die Endgruppen bestimmt. In diesem Fall ist es eine -CH₃ Gruppe. Der SAM-Film ist dadurch hydrophob und somit als Resist für ein naßchemisches Ätzverfahren geeignet [154,155]. In der Literatur existieren Untersuchungen über die Bestrahlungseinflüsse niederenergetischer Elektronen (50 eV – 300 eV) und Elektronen hoher Energie (2,5 keV – 200 keV) auf die Eigenschaften von HDT-SAM-Schichten [59,60,156,157]. Außerdem finden sich Abbildungen der SAM-Moleküle, bzw. deren Überstruktur, auf Au(111) mit atomarer Auflösung [112,143,155].

Werden diese SAM-Filme über 100°C geheizt, so entstehen erste Defekte, wobei es bei

Temperaturen über 230°C zur Desorption der Moleküle kommt [129,158,159].

2.2.2 N–Biphenylthiol N–BPT

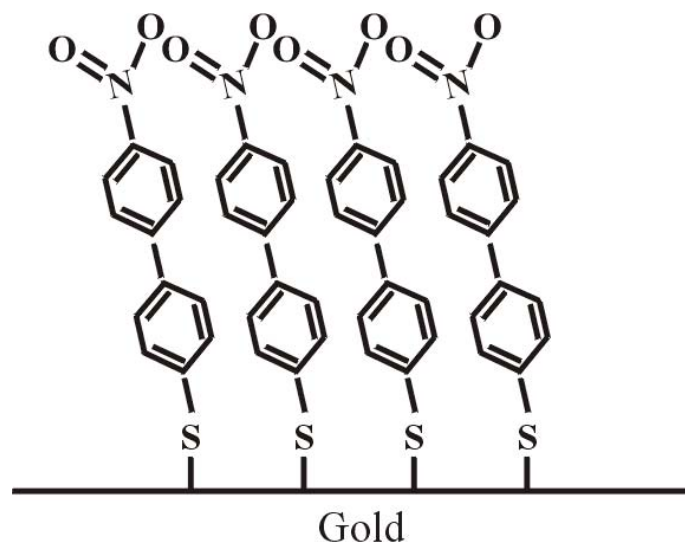


Abbildung 2.4: Strukturmodell einer nitroterminierten Biphenylthiolmonolage auf Gold.

Bei den in dieser Arbeit verwendeten Biphenylthiol-Schichten (BPT) (siehe Abbildung 2.4), handelt es sich um Schichten aus nitroterminierten Biphenylthiolmolekülen ($\text{NO}_2(\text{C}_6\text{H}_4)_2\text{SH}$). Diese Moleküle haben die gleiche Kopfgruppe wie die Hexadecanthiolmoleküle in Kapitel 2.2.1 die die Bindung zur Goldoberfläche herstellt. Der Spacer besteht bei diesem System jedoch aus zwei Phenylringen und nicht aus einer Alkylkette. Bei der Endgruppe handelt es sich um eine Nitrogruppe ($-\text{NO}_2$). Aus Ellipsometriemessungen ist eine Dicke dieser Schichten von $1,4 \pm 0,1$ nm bekannt [160,161]. Im Gegensatz zu der Verkippung der Alkylketten in SAMs aus Alkanthiolen auf Gold, deren treibende Kraft die Maximierung ihrer van-der-Waals-Wechselwirkung ist, ist die mehr senkrechte Molekülorientierung [162] in SAMs aus Biphenylthiolen vermutlich das Resultat aus intermolekularen π - π Wechselwirkungen zwischen den Phenylringen benachbarter Moleküle [161]. Entlang der Ketten findet infolge des Überlapps der π -Elektronensysteme der Phenylringe ein Elektronentransport, resultierend in einer höheren Leitfähigkeit des Films, statt [163,164]. Die Verkippung der Ketten gegenüber der Oberflächennormalen beträgt bei dem verwendeten System ca. 14° [160,161,165]. Zusätzlich zu der Verkippung der Ketten tritt auch eine Verdrehung der Moleküle um die Längsachse auf. Dieser *Twistwinkel* beträgt ca. 30° [161]. Molekularmechanische Rechnungen [166], als auch neueste Röntgenbeugungsdaten [167], deuten auf eine $\sqrt{3} \times \sqrt{3} R30^\circ$ Oberflächenstruktur von Biphenylthiol auf Gold hin. Im Gegensatz dazu sind zur Zeit weder periodische Muster noch molekular aufgelöste STM-Bilder für dieses System gemessen worden [168].

Der Grund hierfür könnte in der Schwierigkeit der Präparation von BPT SAMs auf Au mit hoher Qualität d.h. großen geordneten Domänen sein [161,167,169].

Aus der Literatur sind die Einflüsse von niederenergetischen Elektronen (50 eV) sowie Elektronen hoher Energie (2,5 keV – 200 keV) auf die Eigenschaften von BPT-SAM-Schichten [60,157] bekannt. Es konnte gezeigt werden, dass die Bestrahlung mit Elektronen zu einer Quervernetzung zwischen den Phenylringen führt. In einem naßchemischen Ätzprozeß fungiert somit dieser SAM-Film als Negativresist [60,157].

2.2.3 Octadecyltrichlorsilan OTS

Octadecyltrichlorsilanmoleküle ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{17}\text{SiCl}_3$) [170], die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt wurden, gehören zu der Klasse der meist studierten Systeme der Alkyltrichlorsilane, die eine organisierte Monolage auf verschiedenen hydroxylierten Oberflächen, wie z.B. Siliziumoxid, Titanoxid, Aluminiumoxid oder Mica, ausbilden [27,52,171,172]. Glas kann ebenfalls als Substrat benutzt werden, wie es in einer der ersten Studien der silanbasierten SAMs gezeigt wurde [173]. Verantwortlich für die Bindung der Moleküle an die Oberfläche ist die Kopfgruppe, es handelt sich hierbei um ($-\text{SiCl}_3$). Es wird davon ausgegangen, dass sie in einem ersten Schritt in ein Silanol ($-\text{Si}-\text{OH}$) umgewandelt wird, z.B. durch Wasser in der Adsorbatlösung, und anschließend diese mit anderen Silanolmolekülen und Hydroxylgruppen der Substratoberfläche zu einem zweidimensionalen lateralen Netzwerk aus Polysiloxanen reagieren [174]. Abbildung 2.5 zeigt dieses schematisch.

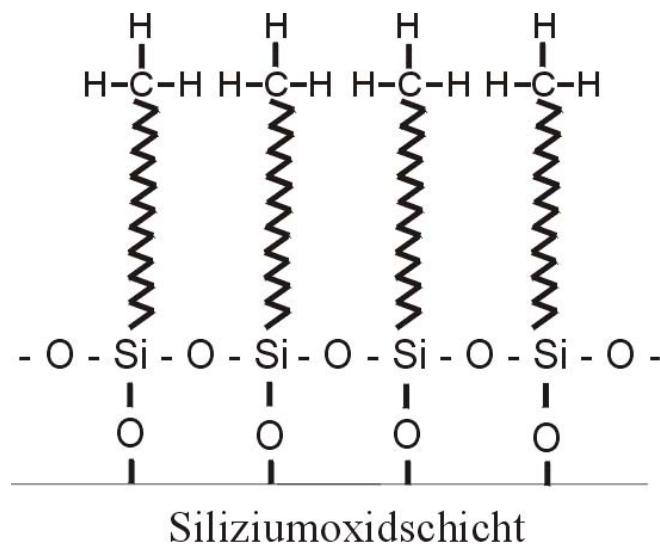


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung einer Organosilanmonolage.

Neuere AFM Messungen deuten darauf hin, dass selbstorganisierten Monolagen aus OTS auf Si ein Inselwachstumsprozeß zugrunde liegt [175–177]. Zu Beginn des Filmwachstums adsorbieren fraktal geformte Inseln auf der Oberfläche. Anschließend wachsen diese Inseln in einem viel langsameren Prozeß und die Lücken zwischen ihnen werden durch

Adsorption von Monomeren aus der Lösung geschlossen [177]. Dies steht im Widerspruch zu früheren Studien, die von einem gleichförmigen Wachstumsprozeß ausgingen [178]. Die Dicke einer OTS Monolage beträgt $2,5 \pm 0,3$ nm, welches in guter Übereinstimmung mit dem erwarteten Wert von 2,62 nm liegt, der sich ergibt, wenn man von einer *all-trans* Kettenkonformation senkrecht zur Oberfläche ausgeht [52,175]. Aus kombinierten NEXAFS- und XPS Studien wurde ein Kippwinkel von weniger als 10° von OTS auf oxidiertem Silizium ermittelt [179], der dieses unterstützt. Aus Röntgenreflexionsdaten wurde eine Fläche pro RSi-Gruppe von $2,1 \pm 0,3$ nm² in einer Monolage auf SiO₂ abgeschätzt [178]. Die Struktur des Films in der Ebene wird als „crystalline-like phase“ bezeichnet [177]. Angst und Simmons haben gezeigt, dass sich Wassermoleküle, die die Alkylketten eines dichtgepackten OTS-Films durchdringen, in der Grenzflächenregion an Silanolgruppen binden, die an der Siliziumoberfläche als auch an OTS-Molekülen befestigt sind [180]. Dies ist schematisch in Abbildung 2.6 dargestellt.

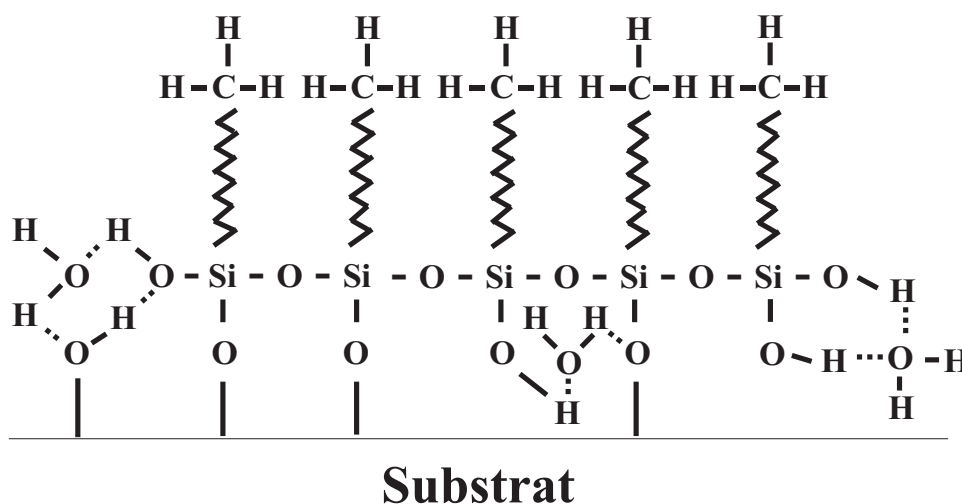


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der möglichen Bindungsplätze für die H₂O Adsorption an einer Organosilanmonolage.

Durch heizen der OTS-Filme auf 150°C läßt sich die Anzahl der Silanolgruppen durch eine ausgeprägtere Quervernetzung der OTS-Moleküle reduzieren. Dies reduziert signifikant die Adsorption von Wassermolekülen [180].

Alkylsiloxane auf oxidiertem Silizium zeigen im Vergleich zu den Alkanthiolen auf Gold eine viel höhere thermische Stabilität. Unter UHV Bedingungen bzw. in N₂ Atmosphäre sind Alkylsiloxanmonolagen stabil bis ca. 740 K [86,181]. Oberhalb dieser Temperatur kommt es zum Brechen von C-C Bindungen und somit zur Degradierung des Films. Die Siloxankopfgruppe bleibt bis etwas 1100 K auf der Oberfläche [181]. OTS auf Silizium stellt eine dünne Isolatorschicht dar, da zwischen dem Siliziumleitungsband und dem untersten unbesetzten Molekülorbital ein Energieoffset von 4,1–4,3 eV besteht [182]. Andererseits beträgt der Energieoffset zwischen dem Valenzband und dem höchsten besetzten

Molekülorbital der Alkylketten 4,1–4,5 eV [182].

2.2.4 Octadecyltrimethoxysilan OTMS

Octadecyltrimethoxysilanmoleküle ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{17}\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$) [183], die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden, gehören ebenfalls zu der Klasse der Alkylsiloxane. Sie bilden z.B. eine organisierte Monolage auf einer hydroxylierten Chromoberfläche aus [184]. Im Vergleich zu dem betrachteten System (OTS auf Si) in Kapitel 2.2.3 reagiert hier die ($-\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$) Kopfgruppe mit ($-\text{CrO}^-$) Gruppen, die sich auf der Oberfläche befinden. Durch Rückstände von Wasser, die auf der Oberfläche des Substrats adsorbiert sind, bilden sich Si–O–Si Bindungen aus [58]. Daraus resultiert eine Monolage, in der die Moleküle mutmaßlich beidseitig miteinander und durch eine starke chemische Bindung mit der Chromoberfläche verbunden sind [58]. Der Aufbau der Schicht ist wie in Abbildung 2.5, jedoch wurden diese Schichten auf Chromoxid präpariert. Aus NEXAFS Studien wurde ein Kippwinkel von $9.3^\circ \pm 1.3^\circ$ gegenüber der Oberflächennormalen von OTMS auf Chrom festgestellt [58]. Trimethoxysilanfilme zeigen eine langsamere Adsorptionskinetik als Trichlorsilanfilme unter gleichen Filmpräparationsbedingungen, was auf eine geringere Oberflächenreaktivität zurück zu führen ist. Dies könnte einen unterschiedlichen Wachstumsprozeß zur Folge haben [175].

2.2.5 Hydroxybiphenyl HBP

Bei den verwendeten HBP-Schichten handelt es sich um Schichten aus Hydroxybiphenylmolekülen ($(\text{C}_6\text{H}_5)(\text{C}_6\text{H}_4)\text{OH}$), die auf H-terminierten Si(111) präpariert wurden (siehe Abbildung 2.7).

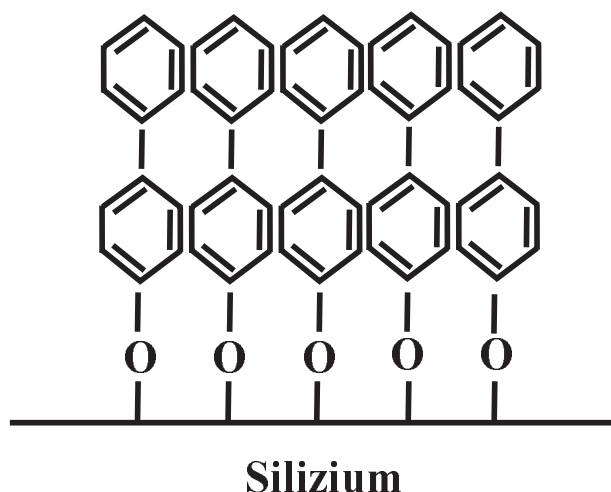


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung einer Hydroxybiphenylmonolage.

Die Moleküle stehen nahezu senkrecht auf der Oberfläche und die Schicht hat eine Dicke von ca. 1 nm [185]. Entlang der Ketten findet infolge des Überlapps der π -Elektronensysteme der Phenylringe ein Elektronentransport, resultierend in einer Leitfähigkeit des Films, statt. Es existieren bis jetzt keine molekular aufgelösten Bilder dieser Schichten, um z.B. Aussagen über Domänen-Größen machen zu können [186].

2.2.6 Ethoxybiphenylsilan EBP

Bei den verwendeten EBP-Schichten handelt es sich um Schichten aus $((C_6H_5)(C_6H_4)O(CH_2)_3Si(OCH_3)_3)$ Molekülen, die auf Siliziumoxid auf Si(111) präpariert wurden (siehe Abbildung 2.8). Diese EBP-Filme sind ebenso wie die OTS- bzw. OTMS-Filme über eine Silanbindung an das Substrat gebunden. Die Schicht hat eine

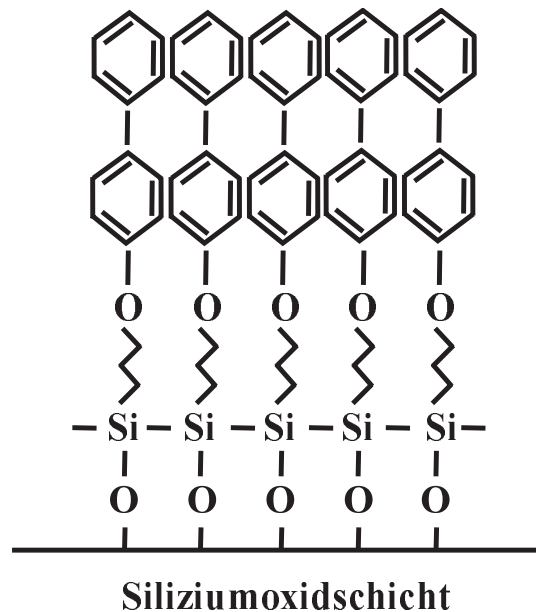


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung einer Ethoxybiphenylsilanmonolage.

Dicke von ca. 1,5 nm, wenn davon ausgegangen wird, dass die Moleküle nahezu senkrecht auf der Oberfläche stehen. Ebenso wie bei den Hydroxybiphenylmonolagen sorgt bei diesem System die aromatische Kette für eine erhöhte Leitfähigkeit des EBP-Films gegenüber dem System OTS auf Silizium. Für dieses System existieren bis jetzt ebenfalls keine molekular aufgelösten Bilder [186].

Kapitel 3

Mikroskope zur Charakterisierung, Strukturierung und Analyse

In diesem Kapitel werden kurz die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Mikroskope bzw. Meßapparaturen vorgestellt. Für die Charakterisierung der SAM-Schichten nach der Präparation wurde ein Kontaktwinkelmeßgerät (Krüss G10) verwendet. Die Strukturierung der SAM-Schichten ist mit einem UHV-Rastertunnelmikroskop (Omicron Micro-STM) durchgeführt worden. Die Analyse der geschriebenen Strukturen nach dem Ätzübertrag erfolgte mittels eines Luft-AFMs (Digital Instruments Nanoscope IIIa) und eines Rasterelektronenmikroskops (LEO 1530 Gemini) [187].

3.1 Kontaktwinkelmeßgerät G10

Für die Charakterisierung der SAM-Schichten nach der Präparation wurde das in Abbildung 3.1 dargestellte Meßgerät eingesetzt. Es handelt sich um ein Kontaktwinkelmeßgerät G10 der Firma Krüss. Es besteht im wesentlichen aus dem Probenstisch mit den Bedienelementen zur Probenpositionierung, einem Zoom-Objektiv mit den Bedienelementen zur Objektivbewegung, einer Beleuchtungseinheit, einer Spritzenhalterung zur Positionierung der Spritze horizontal und vertikal, einer Spritze für die Testflüssigkeit und einem Meßokular. Mit diesem Gerät wird der Kontaktwinkel eines einzelnen liegenden Flüssigkeitstropfens auf einer Festkörperoberfläche gemessen. Die Meßaufnahme erfolgt manuell durch das Auge des Beobachters. Die Meßgenauigkeit liegt bei $\pm 1^\circ$.

Aus der Literatur ist bekannt, dass ein Wassertropfen auf den präparierten hydrophoben SAM-Schichten einen Kontaktwinkel von $110^\circ - 112^\circ$ ausbildet (HDT [142], OTS [175,188,189] und OTMS [58]). Der Grund hierfür ist die gleiche Endgruppe ($-\text{CH}_3$) und eine Alkylkette als Spacer. Dies kann als Maß für eine gelungene Präparation genutzt werden (Kapitel 4.3).

Der Kontaktwinkel θ ist wie folgt definiert: Die Tangentialebene an der Tropfen-

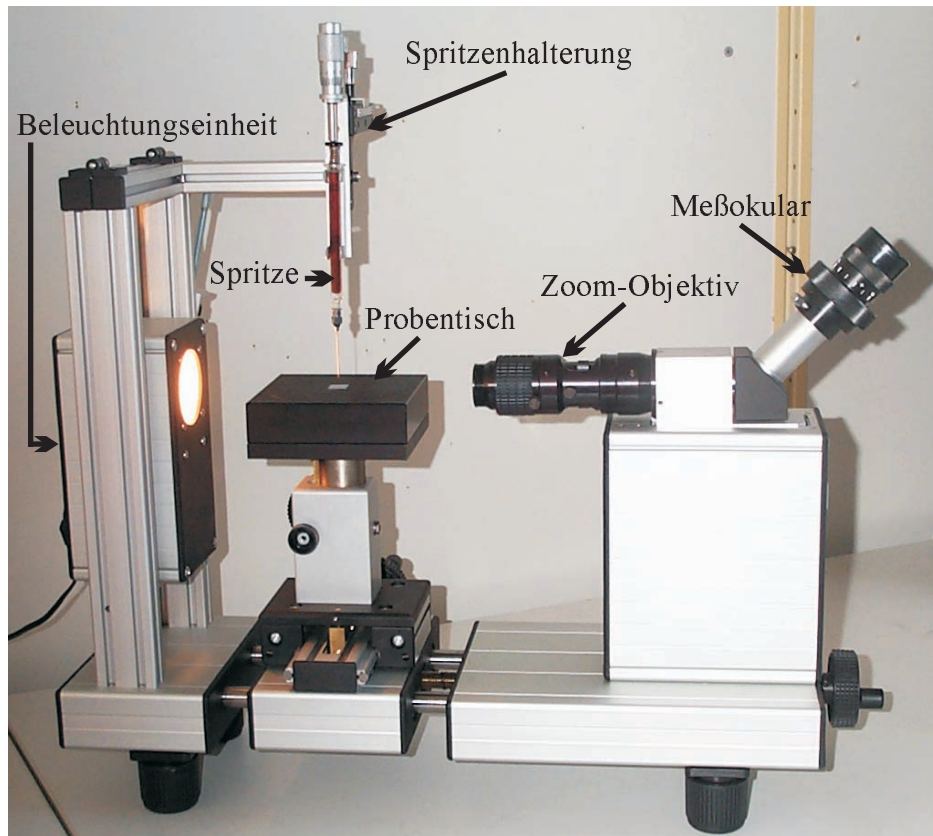


Abbildung 3.1: Das Kontaktwinkelmeßgerät G10. Es wird für die Charakterisierung der SAM-Schichten eingesetzt.

berfläche im Berührungspunkt zwischen Tropfen und Unterlage – dem Dreiphasenpunkt – schließt mit der Ebene der Unterlage einen Winkel ein. Dieser wird als Kontaktwinkel θ bezeichnet (siehe Abbildung 3.2). Die Größe des Kontaktwinkels im Dreiphasenpunkt wird durch die Oberflächenkräfte bestimmt. Im thermodynamischen Gleichgewicht wird der Kontaktwinkel durch die *Youngsche Gleichung* bestimmt [190]

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} * \cos \theta. \quad (3.1)$$

Hierbei ist γ_{sv} die Oberflächenspannung der Grenzfläche zwischen Festkörper und gasförmiger Phase, γ_{sl} die Oberflächenspannung zwischen der flüssigen Phase und der Festkörpergrenzfläche und γ_{lv} die Oberflächenspannung der Grenzfläche zwischen flüssiger und gasförmiger Phase. Bei hydrophoben Festkörperoberflächen ist die Oberflächenspannung zwischen Wasser und Festkörper recht groß. Je größer γ_{sl} ist, um so größer ist auch der Kontaktwinkel θ . Bei hydrophilen Festkörperoberflächen ist dies gerade umgekehrt.

Für die Bestimmung des Kontaktwinkels θ wurde die *Sessile – Drop – Methode* [191] angewendet. Hierbei wird der Winkel θ bestimmt, indem man einen Flüssigkeitstropfen auf die Probenoberfläche aufbringt und ihm während der Messung kontinuierlich Flüssigkeit

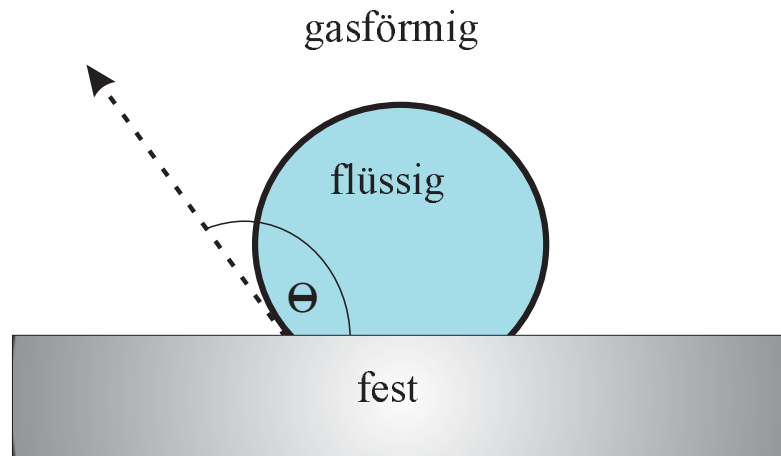


Abbildung 3.2: Definition des Kontaktwinkels.

zuführt. Dies wird auch als Messung des Fortschreitewinkels bezeichnet. Im umgekehrten Fall mißt man den Rückschreitewinkel durch kontinuierliche Flüssigkeitsentnahme.

3.2 Micro-STM-Aufbau

Dieses UHV-System, welches auch in vorherigen Arbeiten benutzt wurde [23,111], besteht im wesentlichen aus dem in Abbildung 3.4 schematisch dargestellten UHV-Micro-STM [192]. Die Kammer (siehe Abbildung 3.3) kann durch eine Kombination von Vor-, Turbo-

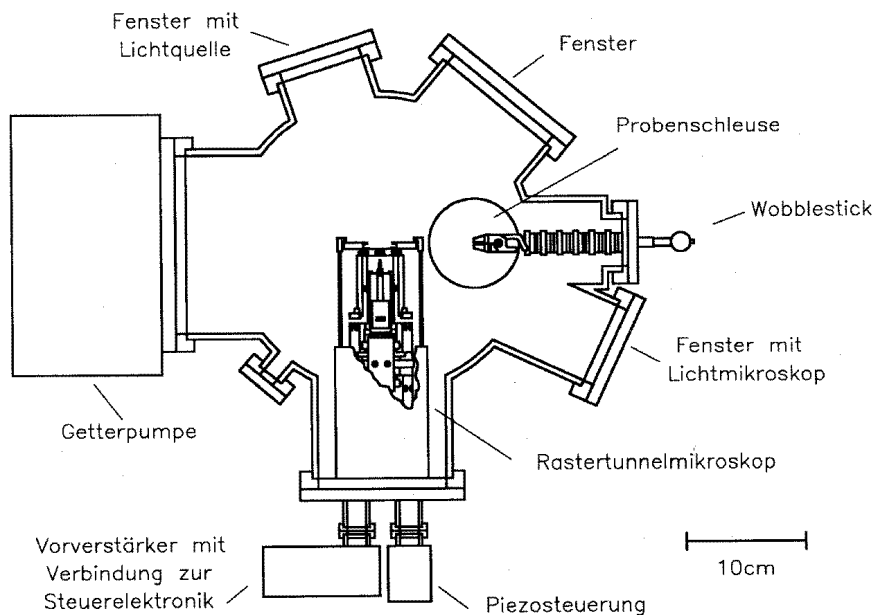


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des Micro-STM-Aufbaus [193].

und Getterpumpe gepumpt werden. Dies ermöglicht einen Basisdruck von 1×10^{-10} mbar. Die UHV-Bedingungen wurden gewählt, damit die Strukturierungsexperimente nicht durch Restgaspartikel beeinflusst werden. Dieses UHV-System besitzt des weiteren eine Probenschleuse, die durch ein Ventil von der Meßkammer zu trennen ist, wodurch es möglich ist, Proben zu tauschen ohne die gesamte Kammer zu belüften. Der gesamte Aufbau ist auf Schwingungsdämpfungsfüßen aufgestellt, um die Apparatur von Schwingungen des Bodens zu entkoppeln [194].

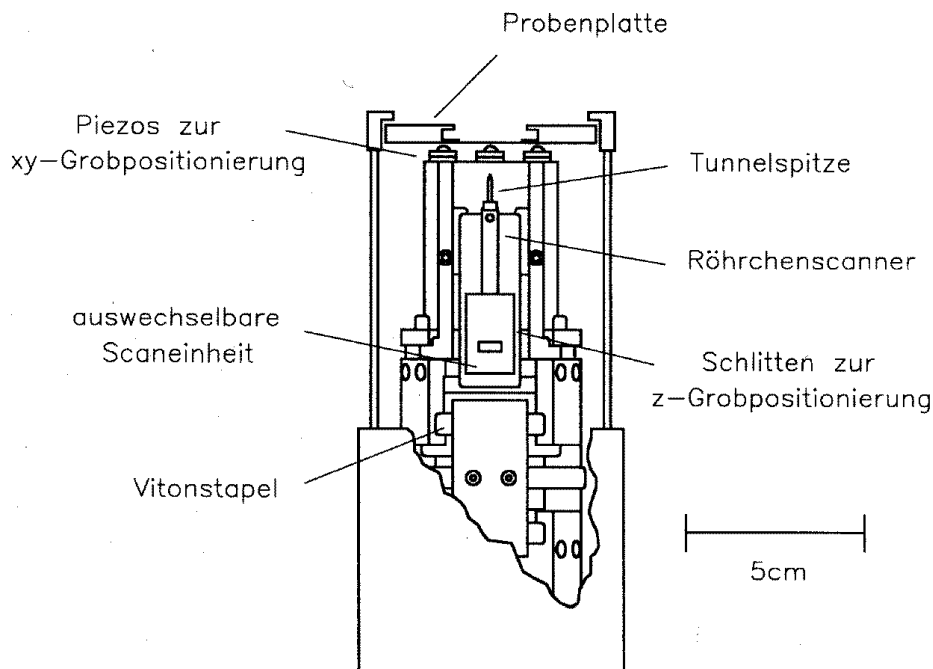


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des Omicron UHV-Micro-STM [192].

Abbildung 3.4 zeigt den Aufbau des Omicron Micro-STM [192]. Hierbei handelt es sich um ein UHV Gerät, welches für die Strukturierungen eingesetzt wurde. Das Mikroskop setzt sich aus dem Mikroskopkopf und dem als Dämpfungsstufe eingebauten Vitonstack zusammen. Mit diesem STM kann atomare Auflösung erreicht werden [110,193]. Zur Raster-scaneinheit gehört der Röhrenchenscanner mit Tunnelspitze, der über einen magnetischen Stecker und Steckfüßchen mit dem Schlitten zur z -Grobpositionierung verbunden ist. Der z -Schlitten wird durch eine piezoangetriebene Schrittsteuerung bewegt. Wird der Röhrenchenscanner ganz heruntergefahren, ist ein Proben- oder Scannerwechsel ohne Beschädigung der Tunnelspitze möglich. Für das Micro-STM stehen zwei Scanner mit einem Meßbereich von $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ und $12,5 \mu\text{m} \times 12,5 \mu\text{m}$ zur Verfügung. Innerhalb dieses Bereichs können beliebig große Flächen analysiert oder strukturiert werden. Zusätzlich kann die Probenplatte über an den Auflagepunkten angreifende Piezos um ± 3 mm in x - und y -Richtung bewegt werden. Die Schrittweite liegt dabei zwischen 50 nm – 250 nm.

Die Geschwindigkeit, mit der sich dieser Röhrenscanner beim Abrastern einer Oberfläche bewegen kann, läßt sich von 1 nm/s – 27500 nm/s bzw. – 33120 nm/s variieren [192]. Daher eignet sich dieses Micro-STM zur Strukturierung großer Flächen und Probenbereiche.

Das Steuersystem des Micro-STM setzt sich zusammen aus Elektronik-CU und Computer. Die elektronische Steuereinheit (CU) ist über ein Bussystem mit dem Computer (Sun-Solaris-Workstation) verbunden. Die Elektronik wird vollständig über den Computer gesteuert. Die Software [195] bietet neben der Wahl der Meßparameter die Möglichkeit, Macros zur Oberflächenmanipulation zu programmieren. Innerhalb der durch die lineare Auslenkbarkeit des jeweiligen Scanners vorgegebenen Grenzen des Meßbereichs können einzelne Punkte oder Punktfolgen, entweder über einen vorher programmierten Pfad (Macro) oder manuell durch Bewegen des Cursors auf dem Bildschirm des Computers, angefahren werden. An jeder dieser Stellen können die Tunnelparameter und Verweilzeiten in Form von programmierten Ereignissen variiert werden. Hierbei kann die Gapspannung in einem Bereich von –10 V bis +10 V bzw. der Tunnelstrom von 10 pA – 50 nA variiert werden.

Verwendete Tunnelspitzen

Für die Strukturierungen wurden hauptsächlich Wolframspitzen eingesetzt. Lediglich für das System OTS/Si wurden auch Platin-Iridium-Spitzen verwendet. Bei den Pt/Ir-Spitzen handelt es sich um kommerzielle Spitzen [196], während die Wolframspitzen selber präpariert wurden. Bei der Spitzenpräparation muß darauf geachtet werden, dass die Spitzen nicht zu lang und dünn sind, um das Einkoppeln von Schwingungen zu vermeiden. Optimale Tunnelspitzen sollten einen möglichst kurzen, stabilen Schaft und damit eine möglichst hohe mechanische Eigenfrequenz haben. Die Spitzen werden durch ein elektrochemisches Ätzverfahren hergestellt. Dabei wird ein Wolframdraht, der einen Durchmesser zwischen 0,2 mm und 0,5 mm haben kann, in eine 5 molare NaOH-Lösung eingetaucht. Zwischen einer ringförmigen Edelstahlelektrode und dem Wolframdraht als Anode wird eine Gleichspannung von 4 V angelegt. Der Draht wird in die Lösung soweit eingetaucht bis ca. 30 – 40 mA fließen. Durch das einsetzende elektrolytische Ätzen verjüngt sich der Draht an der Flüssigkeitsoberfläche und reißt schließlich aufgrund seines Eigengewichts bei ca. 14 mA ab. In diesem Moment wird die Spannungsversorgung abgeschaltet. Die Spitzen werden mit destilliertem Wasser von Ätzrückständen gereinigt. Anschließend mit Isopropanol gespült um Wasserrückstände zu entfernen. Vor und nach dem Einbau in den Scanner wird die Form der Spitze mit einem Lichtmikroskop überprüft, wobei bei 500-facher Vergrößerung die Spitze der Tunnelspitze nicht aufgelöst werden sollte. Dies dient dazu um defekte Spitzen, wie sie in der SEM-Aufnahme in Abbildung 3.5 zu sehen ist, auszusortieren. Diese Spitze ist nach dem Ätzprozeß beim Einbau in den Scanner deformiert worden.

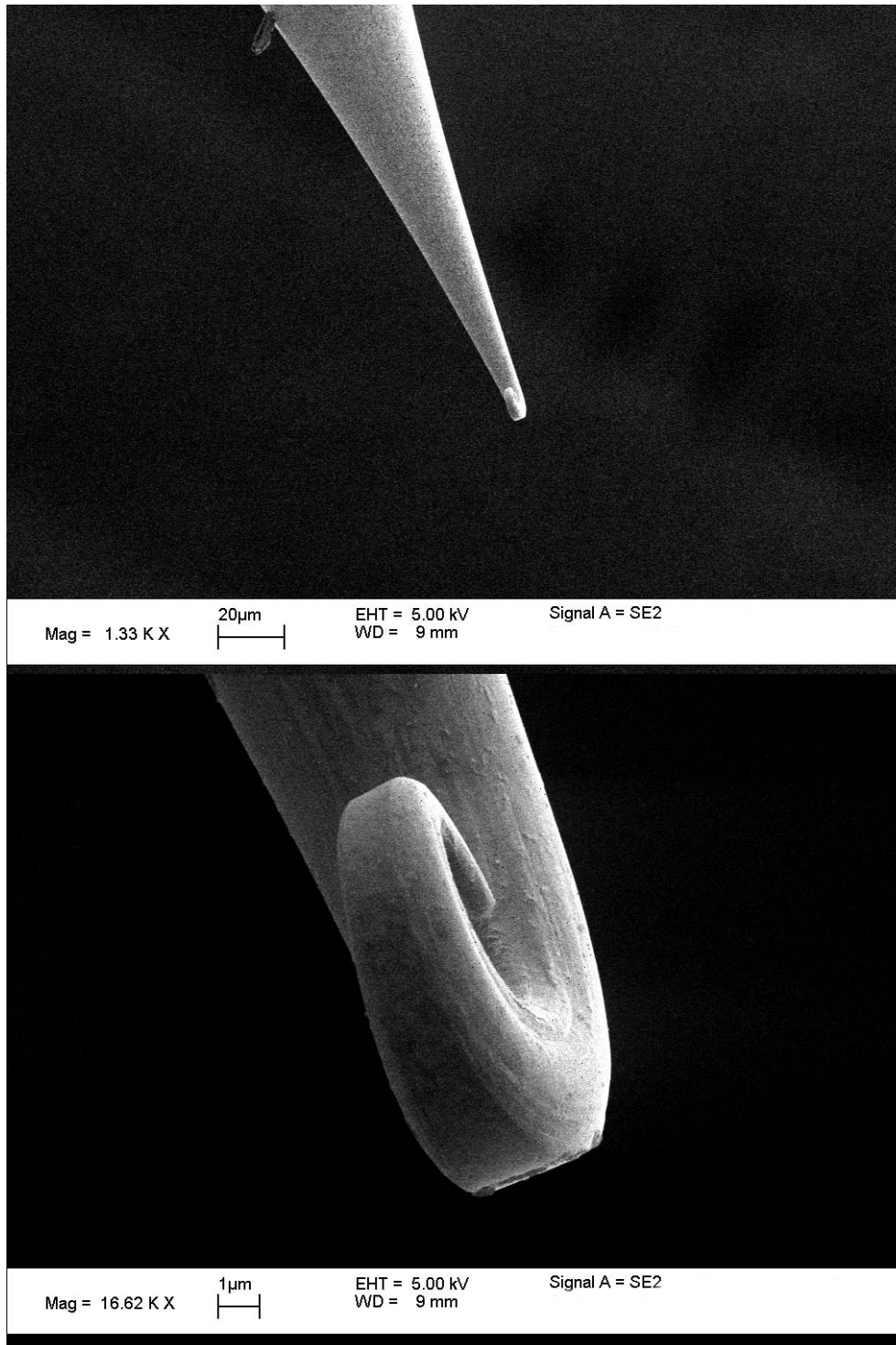


Abbildung 3.5: SEM-Aufnahme einer defekten STM-Spitze.

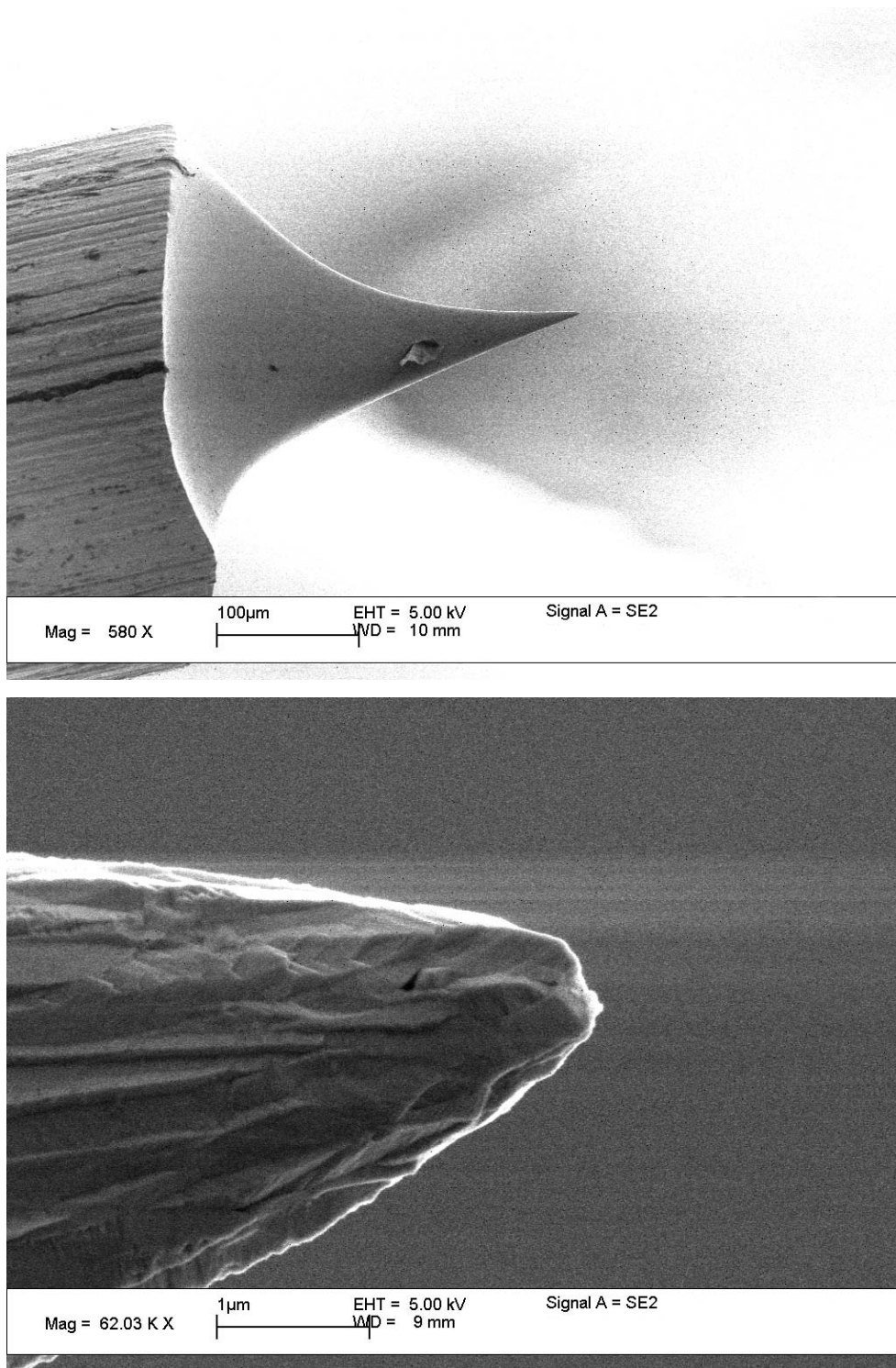


Abbildung 3.6: SEM-Aufnahme einer typischen eingesetzten STM-Spitze (Teil 1).

Abbildung 3.6 und 3.7 zeigen eine Serie von SEM-Aufnahmen einer typischen eingesetzten geätzten Wolframspitze nach der Präparation. Wie in Abbildung 3.7 zu erkennen

ist hat der vorderste Bereich der Tunnelspitze einen Radius von ca. 30 nm.

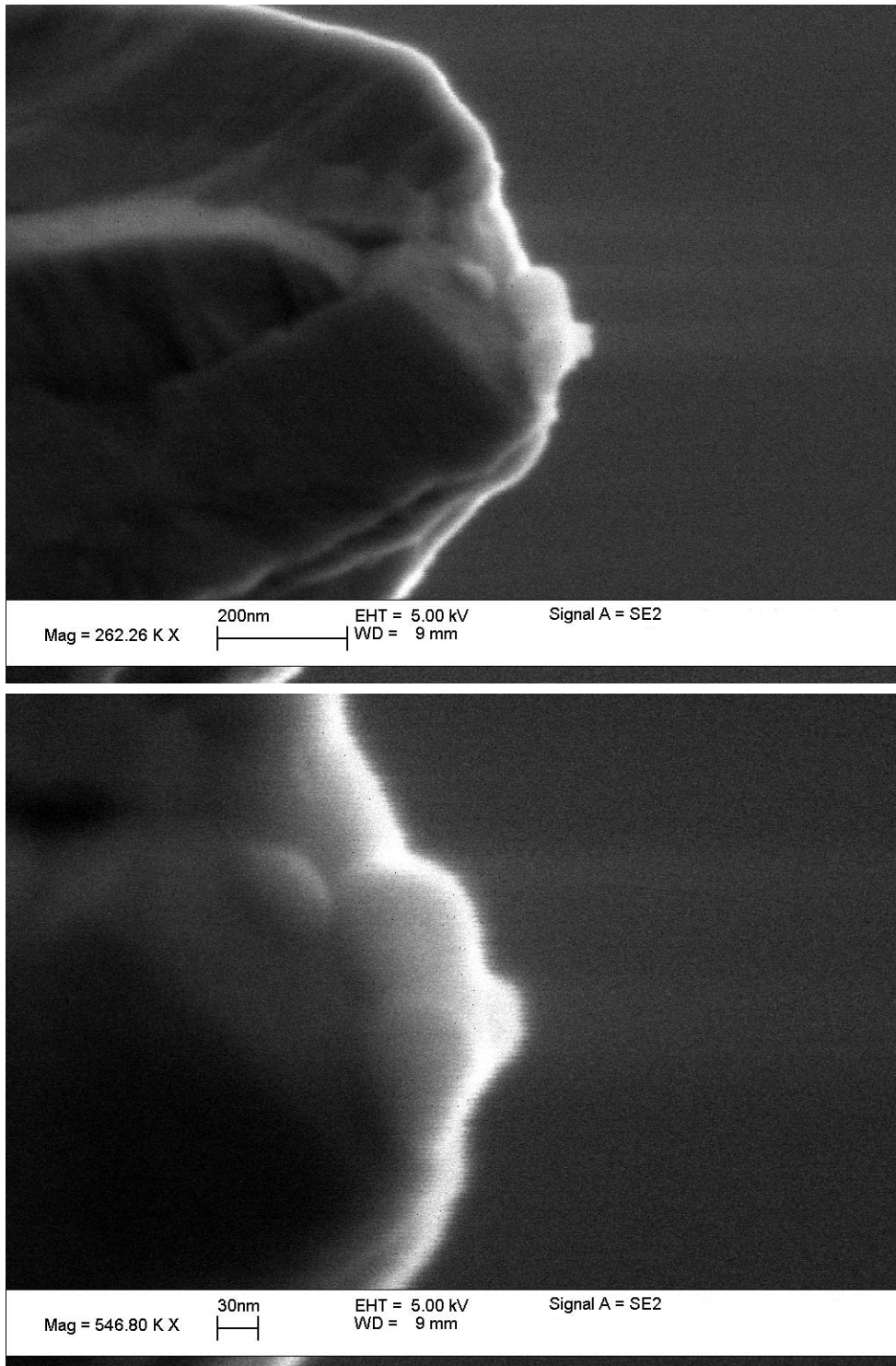


Abbildung 3.7: SEM-Aufnahme einer typischen eingesetzten STM-Spitze (Teil 2).

3.3 Digital Instruments Nanoscope IIIa

Bei dem Nanoscope IIIa handelt es sich um ein Luft-AFM. Es kann sowohl im Kontakt- als auch im dynamischen Modus betrieben werden. Da die geätzten Strukturen ihre Ei-

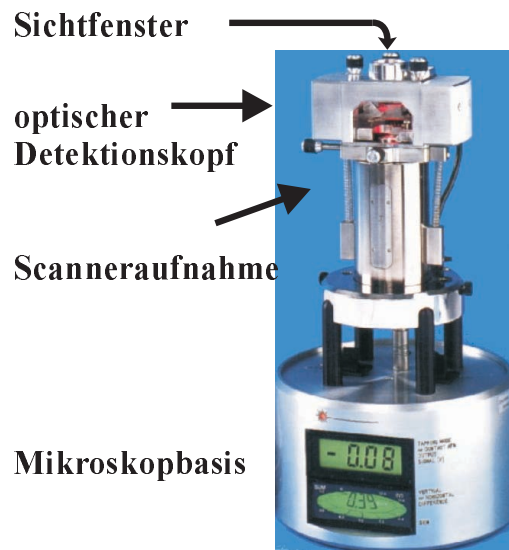


Abbildung 3.8: Foto des Digital Instruments Nanoscope IIIa, welches für die Analyse der geätzten Strukturen eingesetzt wurde [197].

genschaften an Luft nicht mehr verändern, können sie unter Umgebungsbedingungen untersucht werden.

Das Multi-Mode Kraftmikroskop (siehe Abbildung 3.8) besteht im wesentlichen aus einem optischen Detektionskopf, einem Scanner und einer Mikroskopbasis (siehe Abbildung 3.8). Dieser kompakte Aufbau (ca. 30 cm hoch und ca. 10 cm breit) liefert in Kombination mit einer externen Schwingungsdämpfung die mechanische Stabilität und die geringen Störungen, die notwendig sind für hohe Auflösung. Der optische Detektionskopf beinhaltet ein Sichtfenster an der Oberseite. Für die Einstellung des Laserstrahls auf dem Cantilever, bzw. für die bessere Positionierung der Spitze über dem Bereich der Probe, welcher von Interesse ist, ist ein optisches Mikroskop oberhalb dieses Sichtfensters angebracht. Der Scanner des Mikroskops hat einen Meßbereich von $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$. Dieses Gerät ist somit sehr gut für die Analyse der erzeugten Strukturen geeignet.

3.4 Rasterelektronenmikroskop LEO 1530 Gemini

Bei der Rasterelektronenmikroskopie wird im Hochvakuum ein fein fokussierter Elektronenstrahl rasterförmig über das Untersuchungsobjekt geführt. Trifft der Elektronenstrahl auf die Probenoberfläche so werden Photonen- und Elektronensignale emittiert. Je nach Fragestellung werden die unterschiedlichen Signale detektiert. Die am häufigsten

gebrauchten Signale sind dabei die zurückgestreuten Elektronen, die aus der Probenoberfläche ausgelösten Sekundärelektronen und Röntgenstrahlen. Die Anzahl der detektierten Elektronen hängt dabei zum einen vom Material der untersuchten Stelle auf der Probe ab, zum anderen aber auch von der Orientierung zum Detektor, wodurch bei den Proben sowohl ein Material- als auch ein Topographiekontrast auftritt. Durch Abrastern der Probe entsteht so ein Abbild der Probenoberfläche. Ein limitierender Faktor für das Auflösungsvermögen eines SEMs ist durch den Durchmesser des Elektronenstrahls gegeben. Da sich die Probe durch die Absorption der Elektronen bzw. durch die Abgabe von Sekundärelektronen aufladen kann, ist das Rasterelektronenmikroskop in der Regel nur für leitfähige Proben benutzbar [198].

Bei dem LEO 1530 Gemini handelt es sich um ein hochauflösendes Rasterelektronenmikroskop mit Schottky Feldemitter. Es können Sekundär- und Rückstreuelektronenbilder mit Energien von einigen 100 eV bis 30 keV aufgenommen werden. Die Abbildung strahlungsempfindlicher und elektrisch isolierender Proben ist somit bei niedrigen Energien möglich. Die Auflösung für die Sekundärelektronenabbildung beträgt 1 nm bei 20 keV und 3 nm bei 1 keV.

Kapitel 4

Präparation der Substrate und der SAM-Resistfilme

4.1 Substratpräparation

Wie sich in früheren Arbeiten [111,199] gezeigt hat, hat die Oberflächenrauigkeit der Goldschichten einen Einfluß auf die Güte der HDT-SAM-Schichten und die minimale erreichbare Strukturgröße. Somit ist es wichtig, sehr glatte Goldschichten zu verwenden. Da die AG von Prof. Grunze (Heidelberg) schon seit längerer Zeit die Herstellung von polykristallinen Goldschichten im Hinblick auf deren Anwendung in der Nanolithographie intensiv untersucht [200], wurde in Kooperation das in Abbildung 4.1 schematisch dargestellte Schichtsystem hergestellt:

Auf einen Si(100)-Wafer wurde in Bielefeld eine Molybdän/Silizium-Multischicht aufgedampft [201]. Das Schichtsystem ist aus $N = 30$ Doppelschichten mit einer Periodendicke von $d = 7$ nm aufgebaut. Die Herstellung und Charakterisierung dieser Schichtsysteme ist in [34-41] detailliert beschrieben. Auf diese Multischicht wurde in Heidelberg eine 9 nm Titan-Haftvermittlerschicht (sie verhindert das Ablösen der Goldschicht beim Ätzen [202]) sowie anschließend eine 30 nm Gold-Schicht aufgebracht (diese Proben werden im Folgenden als *TypA* bezeichnet). Des Weiteren wurden Proben mit einer 5 nm Titan-Haftvermittlerschicht sowie darauf einer 100 nm Goldschicht präpariert (diese Proben werden im Folgenden als *TypB* bezeichnet). Die Herstellung der Schichten mittels thermischer Verdampfung, die apparativen Komponenten, sowie die Schichteigenschaften solcher Goldschichten sind in [200] ausführlich beschrieben.

Bei den verwendeten Silizium(100) Proben für die OTS-SAM-Schichten handelt es sich um kommerziell erworbene n-dotierte Siliziumwafer der Orientierung (100). Die Art der Dotierung spielt hierbei keine Rolle. Die Höhe der Dotierung hingegen sollte so hoch sein, dass die Leitfähigkeit ausreicht, um mit dem STM einen stabilen Tunnelkontakt herzustellen. Es wurden Si(100) Wafer mit einem Widerstandswert von 0,005-0,025 Ωcm

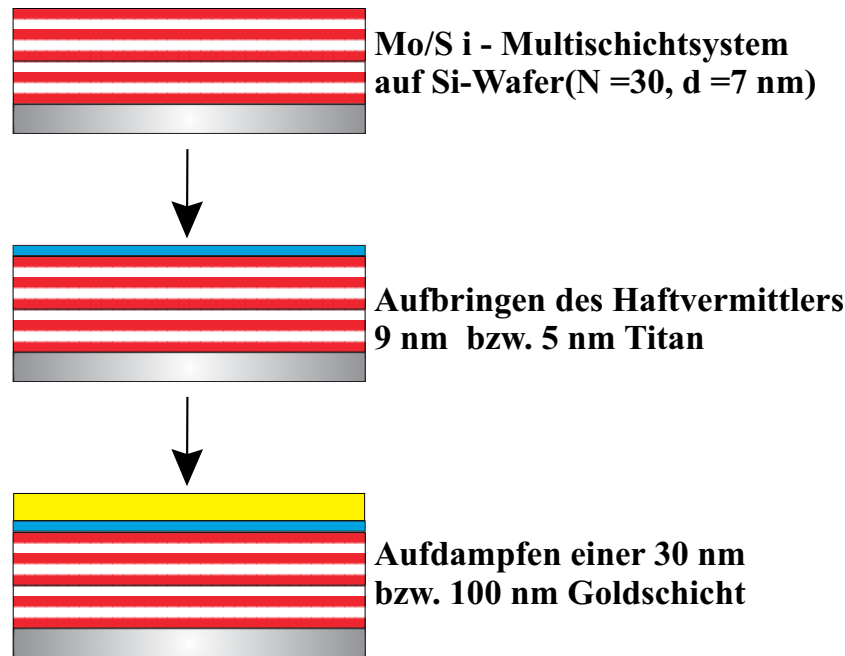


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der Präparation des für die HDT-SAMs verwendeten Schichtsystems, welches in Kooperation mit der AG Prof. Grunze (Heidelberg) hergestellt wurde.

verwendet, die dies gewährleisten.

Die für die OTMS-SAM-Schichten benutzten Chrom-Schichten wurden mittels Elektronenstrahlverdampfung hergestellt [203]. Es wurden Schichten einer Dicke von 56 nm auf eine Mo/Si-Multischicht aus $N = 30$ Doppelschichten mit einer Periodendicke von $d = 7$ nm auf einem Si(100) Wafer abgeschieden. Die Schichtdicke des Chroms wurde insitu durch ein Schichtdickenmeßgerät bestimmt und exsitu mittels Röntgenreflektometrie unter streifenden Einfall überprüft. Eine detaillierte Beschreibung des apparativen Aufbaus und der Schichtdickenbestimmung ist in [36] zu finden.

Zum Abschluß dieses Kapitels wird kurz darauf eingegangen, warum diese Schichtsysteme verwendet wurden. Abbildung 4.2 zeigt die schematische Darstellung einer der möglichen Anwendungen einer lateral strukturierten Multischicht: Eine EUV-Reflexionsmaske mit strukturierter Gold- oder Chrom-Absorberschicht.

Die mittels UHV-STM-Lithographie in Gold- oder Chrom-Schichten erzeugten lateralen Nanostrukturen können als effiziente metallische EUV-Absorberschicht (Au,Cr) aufgebracht auf dem darunterliegenden EUV-Multischichtenspiegel fungieren [29,204]. Die typischen Strukturgrößen in Masken sind < 100 nm, wobei die Strukturgenauigkeit < 10 nm betragen sollte. So erhält man eine amplitudenmodulierte Multischichtenstruktur als Reflexionsmaske [205]. Im Folgenden soll kurz auf die Funktion von EUV-Multischichtenspiegeln eingegangen werden.

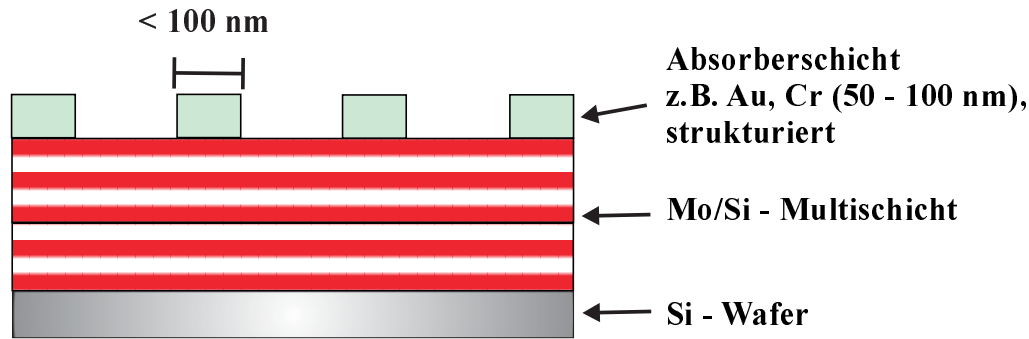


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung einer EUV-Reflexionsmaske mit strukturierter Absorberschicht.

Multischichtspiegel bieten die Möglichkeit, Strahlung im EUV-Bereich unter nicht streifendem Einfall zu reflektieren und diesen Wellenlängenbereich ($\lambda = 0,6\text{ nm} - 50\text{ nm}$) zu nutzen [206]. Sie bestehen aus einem periodischen Schichtsystem, welches aus alternierenden Schichten zweier Materialien mit unterschiedlichen optischen Konstanten besteht. Die Funktionsbasis der Multischichtspiegel ist die konstruktive Interferenz der an den Einzelschichten reflektierten Teilstrahlen. Wenn die Wellenlänge λ und der Einfallswinkel α der Strahlung, sowie die Periodendicke d des Schichtstapels passende Werte zueinander annehmen, ergibt sich ein Reflexionsmaximum. Der formale Zusammenhang wird durch die Bragg-Gleichung beschrieben [207].

$$n\lambda = 2d \cos \alpha. \quad (4.1)$$

In Bielefeld werden Multischichtsysteme mittels MOCVD und Elektronenstrahlverdampfung hergestellt. Eine detaillierte Beschreibung von Herstellung und Charakterisierung der Multischicht-Röntgenspiegel findet man in [34–41]. Durch künstliche Lateralstrukturierung dieser Schichtsysteme werden nanostrukturierte Röntgenspiegel hergestellt, die wichtige, auch aus dem optischen Spektralbereich bekannte Anwendungen finden, z.B. als Beugungsgitter und fokussierende Optiken. Sie finden Anwendung für die EUV-Lithographie in Bereichen der Nanoelektronik [208], als integrale Bestandteile in apparativen Systemen, wie z.B. EUV-Gittern [45], Polarisatoren [209,210] und EUV-Fresnel-Zonenplatten [44].

4.2 SAM Präparation

Im Folgenden wird die Präparation der unterschiedlichen SAM-Filmsysteme kurz beschrieben. Allen Systemen ist gemeinsam, dass sie durch Immersionsbeschichtung hergestellt wurden.

Abbildung 4.3 skizziert dieses kurz. Im ersten Schritt wird die Oberfläche der Probe präpariert. Anschließend wird die Probe in die entsprechende SAM-Lösung für eine be-

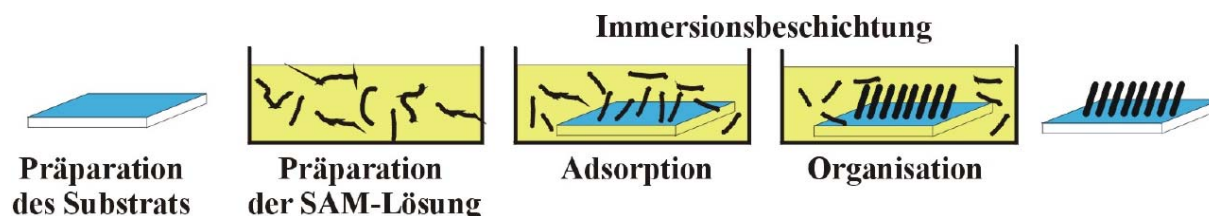


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung der Präparation der SAM-Resistfilme durch Immersionsbeschichtung

stimmten Immersionszeit (typisch 24 oder 72 Stunden) eingelegt. Um nicht adsorbierte Moleküle und Lösungsmittelreste zu entfernen, wird die Probe nach der Entnahme aus der SAM-Lösung intensiv gespült.

4.2.1 Hexadecanthiol (HDT) auf Gold

Die Präparation der HDT-Schicht ist folgendermaßen durchgeführt worden [138]: Eine saubere Goldschicht (gereinigt mit Isopropanol im Ultraschallbad) wird für 24 Stunden in eine 1 mM ethanolische Lösung des Thiols gelegt. Bei dem verwendeten Thiol handelt es sich um Hexadecanthiol, welches eine Reinheit von $\sim 95\%$ hat [141]. Der Schmelzpunkt des Hexadecanthiols liegt zwischen 15°C und 18°C [211]. Die Lösung wird bei Raumtemperatur angesetzt. Als Lösungsmittel wird Ethanol (p.A.) verwendet. Während die Probe in der Lösung liegt, reagiert, wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, die Thiolkopfgruppe mit dem Metallsubstrat und bildet unter Abspaltung des Wasserstoffs ein Thiolat [142]. Diese exotherme Reaktion mit dem Substrat stellt die eigentliche Triebkraft des Selbstordnungsprozesses dar. Nach Ablauf von 24 Stunden wird die Probe der Lösung entnommen, mit frischem Ethanol gespült und unter einem Strom sauberen Stickstoffs (5.0) trocken geblasen [138]. Nach erfolgreicher Präparation (siehe Kapitel 4.3) wird die Probe umgehend in die UHV-Apparatur eingeschleust, um Verunreinigungen zu vermeiden. Da die Hexadecanthiolmoleküle chemisorbiert sind, sind die gebildeten Monolagen stabil unter UHV-Bedingungen.

4.2.2 N-Biphenylthiol (N-BPT) auf Gold

Auf Grund einer Kooperation mit der Arbeitsgruppe von Prof. Grunze (Uni Heidelberg) wurden uns diese Proben zu Verfügung gestellt. Die Biphenylthiol-Monolagen werden durch Immersion von Au(30 nm)/Si Substraten in einer degasten Lösung aus 15 mM N-BPT in N,N-dimethylformamid unter N_2 Atmosphäre präpariert. Die Immersionszeit beträgt dabei 72 Stunden. Details für die chemische Synthese und die Filmpräparation sind in [60] beschrieben.

4.2.3 Octadecyltrichlorsilan (OTS) auf Silizium (100)

In Abbildung 4.4 ist das Prinzip der Adsorption von OTS-Molekülen auf einer Siliziumschicht schematisch dargestellt.

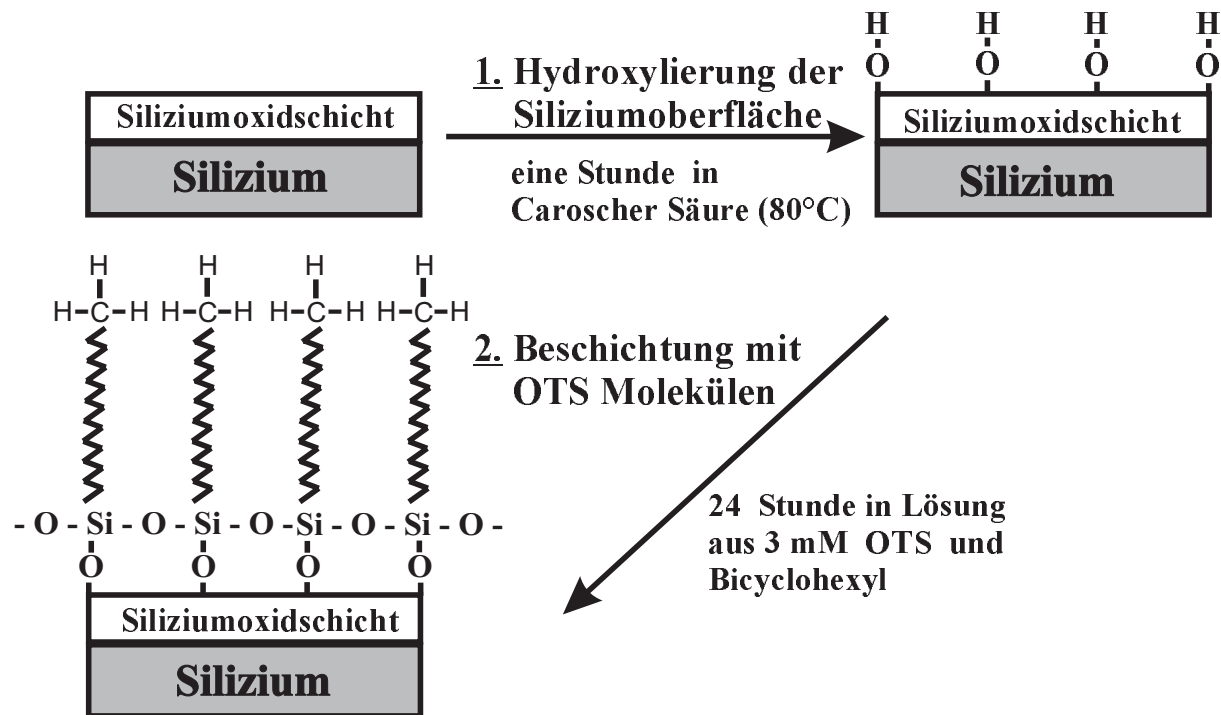


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung der Präparation von OTS auf Silizium.

Die Präparation der OTS-Schicht läuft in mehreren Schritten ab. Im ersten Schritt wird die Oberfläche von Si(100) Waferstücken hydroxyliert, da aus der Literatur bekannt ist, dass sich auf Siliziumoberflächen nur dann ein geschlossener OTS-Film ausbildet, wenn die Oberfläche zuvor hydroxyliert worden ist [180]. Diese Aktivierung der Oberfläche wird erreicht, indem die Si-Proben für eine Stunde bei 80°C in Carosche Säure, eine Mischung aus H_2SO_4 97%-ig und H_2O_2 30%-ig im Verhältnis 3:1, gelegt werden. Anschließend werden die Proben intensiv mit destilliertem Wasser gespült und mit sauberem Stickstoff (5.0) trocken geblasen. Im zweiten Schritt werden diese Proben in eine 3 mM Lösung aus OTS [170] und Bicyclohexyl unter Ar-Atmosphäre für 24 Stunden eingelegt. Im dritten Schritt werden die Proben der Lösung entnommen und einer Reinigungsprozedur unterzogen. Hierbei sollen nicht adsorbierte Moleküle entfernt werden. Die Proben werden jeweils für einige Minuten nacheinander in Hexan, Chloroform, einem Gemisch aus Isopropanol und destilliertem Wasser 4:1 und destilliertem Wasser im Ultraschallbad gereinigt und anschließend mit sauberem Stickstoff (5.0) trocken geblasen. Es besteht die Möglichkeit, die Proben nach der Präparation zu lagern, da diese Schichten unter Umgebungsbedingungen stabil sind. In der Literatur finden sich Beispiele, in denen Proben über ein Jahr unter Umgebungsbedingungen gelagert wurden, ohne Änderungen in der

Dicke bzw. den Oberflächeneigenschaften festzustellen [212]. Um jedoch Verunreinigungen zu vermeiden, werden sie nach erfolgreicher Präparation (siehe Kapitel 4.3) umgehend in die UHV-Apparatur eingeschleust.

4.2.4 Octadecyltrimethoxysilan (OTMS) auf Chrom

In Abbildung 4.5 ist das Prinzip der Adsorption von OTMS-Molekülen auf einer Chromschicht schematisch dargestellt.

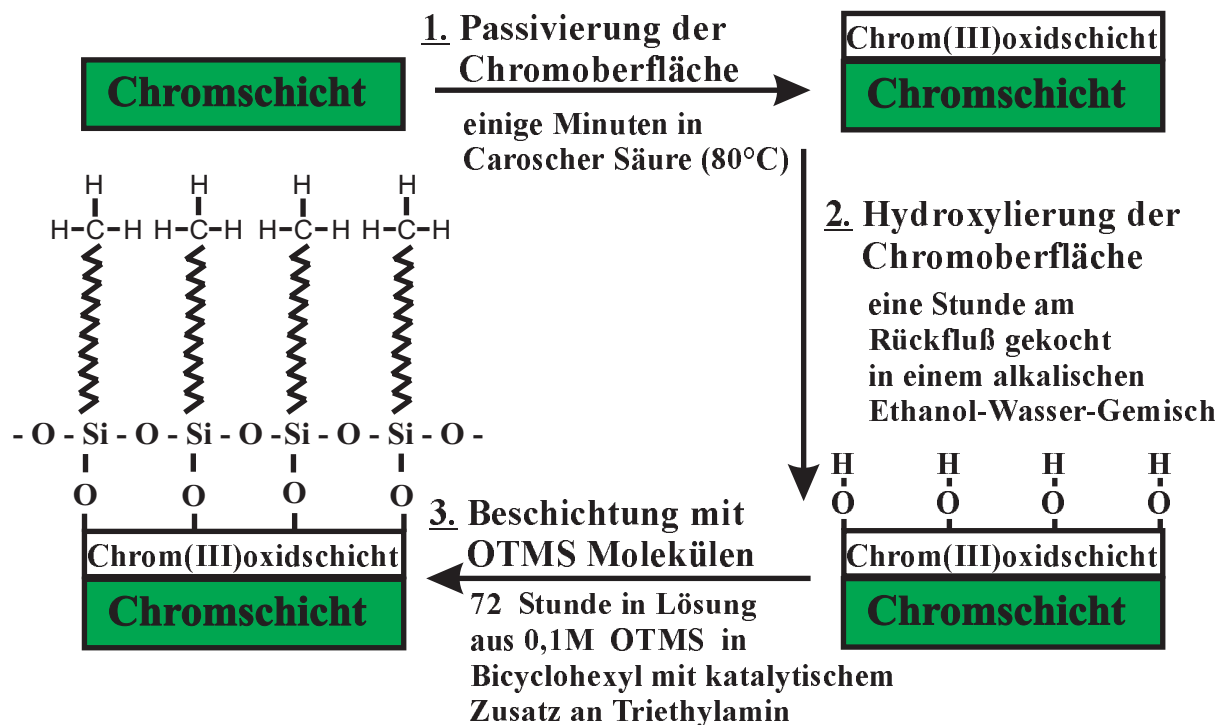


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung der Präparation von OTMS auf Chrom.

Die Präparation der OTMS-Schicht läuft ebenfalls in mehreren Schritten ab. Im ersten Schritt wird die zu beschichtende Probe eine Minute lang in heiße (80°C) Carosche Säure gelegt, um die Chromoberflächen zu reinigen und gleichzeitig zu passivieren, d.h. mit einer Chrom(III)oxidschicht zu überziehen. Im zweiten Schritt wird die Chromoberfläche hydroxyliert, indem die Probe eine Stunde lang in einem alkalischen Ethanol-Wasser-Gemisch ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} : \text{H}_2\text{O} 5:1$; $\text{NaOH} 0,1 \text{ mM}$) am Rückfluß gekocht wird. Danach wird die Chromoberfläche mit sauberem Stickstoff trocken geblasen, bevor sie im dritten Schritt in eine OTMS-haltige Lösung (0,1 M OTMS in Bicyclohexyl mit katalytischem Zusatz an Triethylamin NEt_3) für mindestens drei Tage eingelegt wird. Im vierten Schritt werden die Proben der Lösung entnommen und einer Reinigungsprozedur unterzogen. Hierbei sollen nicht adsorbierte Moleküle entfernt werden. Die Proben werden jeweils für einige Minuten nacheinander in Hexan, Chloroform, einem Gemisch aus Isopropanol und de-

stilliertem Wasser 4:1 und destilliertem Wasser im Ultraschallbad gereinigt. Anschließend mit sauberem Stickstoff (5.0) trocken geblasen. Eine detaillierte Untersuchung der Präparationsparameter ist in [184] zu finden. Der Grund dafür, warum OTMS anstelle von OTS verwendet wurde, um auf Chrom eine SAM-Schicht zu präparieren, liegt darin begründet, dass bei der Reaktion der Kopfgruppe der OTS Moleküle ($-\text{SiCl}_3$) in der SAM-Lösung Salzsäure entsteht [184]. Diese greift die Chromoberfläche an und raut sie auf. Nach erfolgreicher Präparation (siehe Kapitel 4.3) werden die Proben ebenfalls umgehend in die UHV-Apparatur eingeschleust, um Kontaminationen zu vermeiden.

4.2.5 Hydroxybiphenyl (HBP) auf H-terminiertem Silizium (111)

Durch eine Kooperation mit der Arbeitsgruppe von Prof. Grunze und Dr. A. Götzhäuser (Uni Heidelberg) wurden uns diese Proben zu Verfügung gestellt. Die Wahl des Substrates liegt darin begründet, dass sich diese HBP-Schichten bisher nur auf Si(111) präparieren ließen [213]. Die Präparation läuft folgendermaßen ab: In einem ersten Schritt werden Silizium (111)-Waferstücke gereinigt. Anschließend wird die Oxidschicht durch den Einsatz von Flußsäure entfernt und gleichzeitig die Oberfläche wasserstoffpassiviert. Im nächsten Schritt werden diese Proben unter Schutzgasatmosphäre (frei von O_2 und H_2O) in die SAM-Lösung, die aus $((\text{C}_6\text{H}_5)(\text{C}_6\text{H}_4)\text{OH})$ gelöst in Toluol (p.A.) besteht, für sechs Stunden bei $100\text{ }^\circ\text{C}$ gelegt. Nach Entnahme werden sie gespült [214].

4.2.6 Ethoxybiphenylsilan (EBP) auf Silizium (111)

Auf Grund der Kooperation mit der Arbeitsgruppe von Prof. Grunze und Dr. A. Götzhäuser (Uni Heidelberg) wurden uns diese Proben ebenfalls zu Verfügung gestellt. Die EBP-Schichten wurden auf Siliziumoxid auf Si(111) Wafer präpariert, um den direkten Vergleich zu dem System HBP auf H-terminiertem Silizium (111) zu haben. Diese beiden Systeme auf Si(111) sind ebenfalls stabil unter Umgebungsbedingungen [186].

4.3 Charakterisierung der SAM-Schichten nach der Präparation

Für die Charakterisierung der SAM-Schichten nach der Präparation wurde das in Kapitel 3.1 vorgestellte Kontaktwinkelmeßgerät eingesetzt. Wie in diesem Kapitel beschrieben kann man aus der Größe des Kontaktwinkels auf die Qualität der Schicht schließen, da sich auf einem dichtgepacktem Adsorbat hydrophober Moleküle ein größerer Kontaktwinkel von Wasser ausbildet als auf einer weniger dicht gepackten. Als Testflüssigkeit wurde dreifach destilliertes Wasser verwendet, um den Fortschreitewinkel zu bestimmen. Die Meßprozedur ist dabei folgende: Mit Hilfe der Mikroliterspritze wird ein Tropfen auf die

zu untersuchende horizontal liegende Probe am linken Rand des Sichtfeldes aufgesetzt. Durch das Mikroskop, in dessen Okular sich ein Goniometer befindet, kann der Tropfen betrachtet werden. Durch die Bestrahlung des Tropfens von hinten mit parallelem Licht sind nur dessen Konturen sichtbar. Die Spitze der Spritze verbleibt während der Messung im Tropfen. Der Tropfen wird nun kontinuierlich vergrößert und zu dem Zeitpunkt, in dem der Tropfen die Mitte des Sichtfeldes überschreitet, wird im Schnittpunkt zwischen Tropfenoberfläche und Probe eine bewegliche Linie im Goniometer tangential an die Tropfenoberfläche angelegt und der Kontaktwinkel an einer Skala abgelesen. Diese Messung wird an mehreren Stellen auf jeder Probe durchgeführt. Wurde ein Winkel von 110° – 112° gemessen, ist von einer erfolgreichen Präparation ausgegangen worden. Nur diese Proben wurden für die Strukturierung verwendet und umgehend in die UHV-Apparatur eingeschleust.

Kapitel 5

Naßchemische Ätzprozesse für den Strukturübertrag

In diesem Kapitel werden die eingesetzten naßchemischen Ätzprozesse für den Strukturübertrag in die dünnen Metallfilme (Gold und Chrom) und Silizium (100) bzw. (111) kurz erläutert.

5.1 Strukturübertragung in polykristalline Gold-Schichten

Es gibt prinzipiell zwei Techniken zur Strukturübertragung in Goldschichten. Zum einen handelt es sich um Sputterätzprozesse, wie Ionenstrahlätzen, bei denen Gold mechanisch entfernt wird, zum anderen existieren Naßätzverfahren, bei denen das Gold oxidiert wird [215]. Da jedoch die SAM-Filme solchen Sputterätzprozessen nicht standhalten [216], kommt nur ein naßchemisches Ätzverfahren in Frage. Als Ätzmittel für Gold wird eine wässrige Lösung von Cyanid-Verbindungen verwendet. Es wird eine 0,2 M KCN/ 1 M KOH-Lösung benutzt. Die für den Ätzprozeß entscheidende Chemikalie ist das Kaliumcyanid, welches in Gegenwart von Sauerstoff einen Gold-Cyanid-Komplex $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ bildet. Das Kaliumhydroxid wird der Lösung nur aus Sicherheitsgründen beigemischt, um bei einem eventuellen Kontakt der Ätzlösung mit einer Säure die Entstehung von giftiger Blausäure zu verhindern [138]. Die Proben wurden jeweils für einige Minuten in die Ätzlösung gelegt. Nach dem Ätzvorgang werden die Proben zuerst mit entmineralisiertem Wasser, anschließend mit Isopropanol gespült und dann mit sauberem Stickstoff (5.0) trocken geblasen. Durch das Spülen mit Wasser sollen Rückstände der Ätzlösung auf der Probe entfernt werden. Das Isopropanol sorgt dafür, dass keine Wasserrückstände auf der Probe verbleiben. Beim naßchemischen Ätzen in Gold handelt es sich um einen isotropen Ätzprozeß. Die Breite einer übertragenen Struktur hängt also direkt mit der Tiefe zusammen.

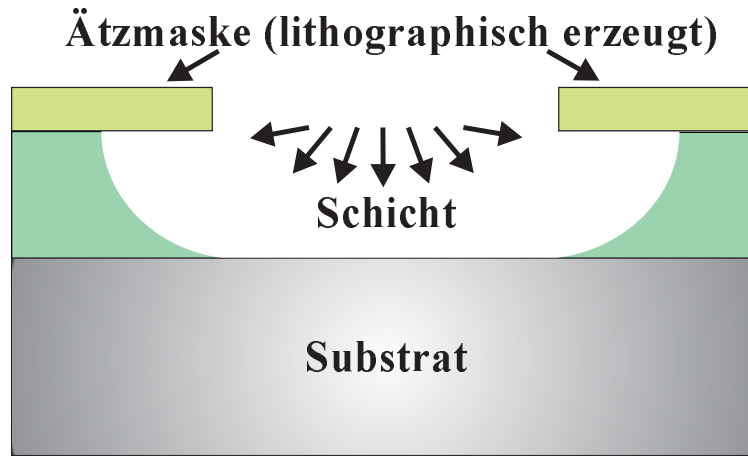


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des isotropen Ätzens. Hierbei ist der Abbruch des Ätzvorgangs vor einer Überätzung dargestellt.

5.2 Strukturübertragung in Silizium (100) und (111)

Zum Übertragen der Strukturen vom OTS ins Silizium (100) wurde ein zweistufiger Ätzprozeß angewandt. Zuerst wurden die Strukturen vom SAM ins Siliziumoxid übertragen, hierfür wurde 5%ige Flußsäure (HF) verwendet. Die Proben wurden für 30 Sekunden in die Flußsäure gedippt, anschließend in entmineralisiertes Wasser getaucht, um HF-Rückstände zu entfernen, und danach für 60 Sekunden in 30%ige KOH-Lösung gedippt. Bei diesem Schritt wurden die Strukturen vom Siliziumoxid ins Silizium übertragen. Noch einmal wurden die Proben mit entmineralisiertem Wasser gespült, um KOH-Rückstände zu entfernen und mit sauberem Stickstoff (5.0) trocken geblasen.

Der alkalische Ätzprozeß in Si(100) zeigt eine ausgeprägte anisotrope Ätzcharakteristik, wobei die Ätzrate stark richtungsabhängig ist. Hierbei ätzt die KOH-Lösung das Silizium vertikal bei Raumtemperatur ca. 400 mal schneller als horizontal [217]. Der anisotrope Ätzprozeß ins Silizium (100), justiert bezüglich der $\langle 110 \rangle$ -Richtungen, ist in Abbildung 5.2 schematisch dargestellt [218]. Die (111)-Ebenen, die unter einem Winkel von $54,7^\circ$ Grad bezüglich der (100)-Ebene geneigt sind, sind wegen der minimalen Ätzgeschwindigkeit ätzbegrenzend. Dies hat zur Folge, dass eine geschriebene Linie, wenn sie ins Silizium übertragen wird, einen V-förmigen Graben ausbildet, bei dem die Seiten um $54,7^\circ$ Grad bezüglich der (100)-Ebene geneigt sind.

Zum Übertragen der Strukturen vom EBP ins Silizium (111) wurde ebenfalls ein zweistufiger Ätzprozeß angewandt. Erst wurden die Strukturen vom SAM ins Siliziumoxid übertragen, hierfür wurde 5%ige Flußsäure (HF) verwendet. Die Proben wurden für 3 Minuten in die Flußsäure getaucht anschließend in entmineralisiertes Wasser gedippt,

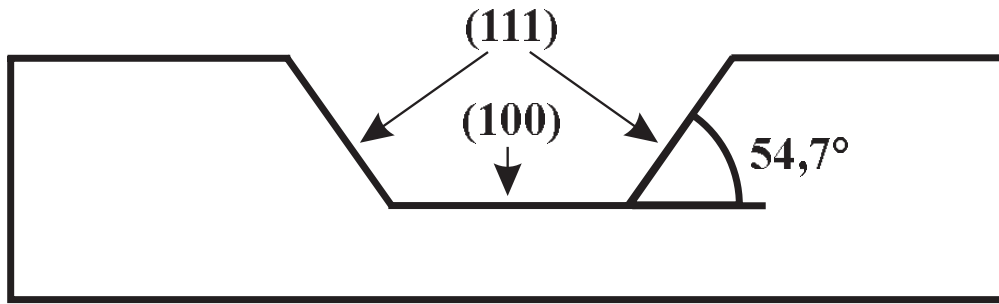


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung des anisotropen Ätzens in Si(100), justiert bezüglich der $\langle 110 \rangle$ -Richtungen. Hierbei ist der Abbruch des Ätzvorgangs, bevor er bis zum Schnittpunkt der (111)-Ebenen fortgeschritten ist, dargestellt.

um HF-Rückstände zu entfernen, und danach für 5 Minuten in einer 1 molaren Kaliumhydroxidlösung im Ultraschallbad geätzt. Bei diesem Schritt werden die Strukturen vom Siliziumoxid ins Silizium übertragen. Die Proben werden dann noch ein weiteres mal mit entmineralisiertem Wasser gespült, um KOH-Rückstände zu entfernen und mit sauberem Stickstoff (5.0) trocken geblasen. Dieser Ätzprozeß weicht deswegen von dem beim Übertragen der Strukturen vom OTS ins Silizium ab, weil sich herausgestellt hat, dass die EBP-Schicht der Flußsäure länger standhält. Mit einer Ätzzeit von nur 30 Sekunden für den ersten Ätzschritt konnten keine Strukturen ins Silizium übertragen werden.

Zum Übertragen der Strukturen vom HBP ins Silizium (111) wurden die Proben für 5 Minuten in einer 1 molaren Kaliumhydroxidlösung im Ultraschallbad geätzt. Anschließend mit entmineralisiertem Wasser gespült und dann mit sauberem Stickstoff (5.0) trocken geblasen.

Der anisotropen Ätzprozeß ins Silizium (111) ist in Abbildung 5.3 schematisch dargestellt. Auf der linken Seite ist die Aufsicht auf die (111)-Ebene mit den sie schneidenden $\{211\}$ -artigen Ebenen zu sehen. Auf der rechten Seite sind die jeweiligen Schnitte senkrecht zu diesen Richtungen abgebildet. In diesen Schnitten sind die unter $70,5^\circ$ Grad geneigten jeweils parallelen (111)-Ebenen ätzbegrenzend. Dies hat zur Folge, dass sich Linien, die entlang der $[211]$ -artigen Richtungen geschrieben werden, stark verbreitern bzw. unterätzt werden und verschwinden (abhängig davon, ob ein Positiv- oder Negativübertrag stattgefunden hat). Nur Linien, die senkrecht dazu geschrieben werden, also entlang der $[110]$ -artigen Richtungen in der Oberfläche, werden durch zwei parallele, um $70,5^\circ$ Grad geneigte $\{111\}$ -Flächen im Ätzprozeß stabilisiert, so dass sich geneigte Stege ausbilden [219].

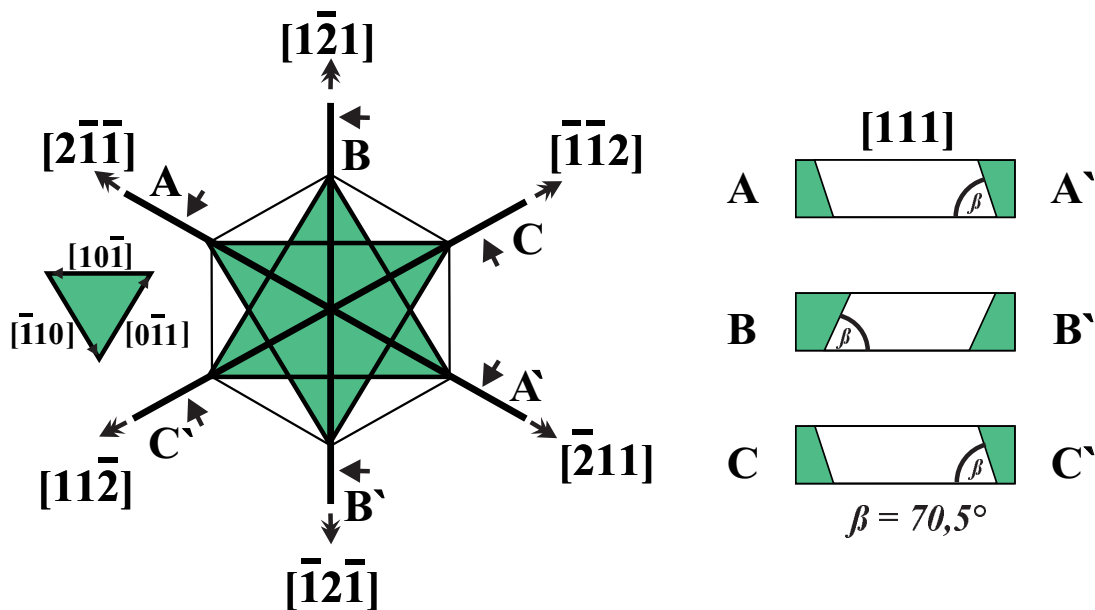


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung des anisotropen Ätzens in Si(111). Links: Aufsicht auf die (111)-Ebene mit den in ihr liegenden $\{211\}$ -artigen Ebenen. Rechts: Schnitte senkrecht zu diesen Richtungen $[219]$.

5.3 Strukturübertragung in Chrom

Zum Übertragen der Strukturen ins Chrom wurden unterschiedliche Ätzlösungen eingesetzt. Es handelt sich dabei um alkalische Hexacyanoferratlösungen: Zum einen wurden die Proben in eine Lösung aus (0,4 ml 15%-ige KOH, 0,8 ml 25%-ige $K_3Fe(CN)_6$, 1,8 ml H_2O) getaucht, wobei die Ätzzeiten einige Minuten betragen. Zum anderen wurde eine wässrige Lösung aus 17% NaOH + 25% $K_3Fe(CN)_6$ benutzt. Die Ätzzeiten betragen zwischen 20 und 40 Sekunden. Nachdem die Proben aus der Ätzlösung gezogen wurden, werden sie sofort mit entmineralisiertem Wasser gespült, um den Ätzprozeß zu stoppen und Rückstände zu entfernen. Anschließend werden sie mit sauberem Stickstoff trocken geblasen. Hexacyanoferrat-(III) wird in der Literatur als Ätzmittel für Chrom empfohlen [217,220]. Beim Angriff der Ätzlösung auf die Chromschicht oxidiert das Kaliumhexacyanoferrat das Chrom über mehrere Oxidationsstufen zu wasserlöslichem Chromationen [221].

Des Weiteren wurden alternative Chrom Ätzprozesse unter Verwendung von HCl oder Cer-Ammonium-Nitrat verwendet, die jedoch keine wesentliche Verbesserung des Übertragsverhaltens zeigten. Dass sich das Problem des naßchemischen selektiven Ätzens der polykristallinen Chromschichten als gravierende Einschränkung für die erzielbaren minimalen Strukturbreiten erweist, ist in Kapitel 6.3 ausgeführt. Da die einzelnen Kristallite anisotrop geätzt werden, wird während des Ätzprozesses die Körnigkeit der Unterlage verstärkt. Daraus resultiert, dass sich Strukturen mit hoher Kantenrauigkeit ergeben. Die

besten Ergebnisse wurden mit der wässrigen Lösung aus 17% NaOH + 25% $K_3Fe(CN)_6$ erzielt.

5.4 Kurze Zusammenfassung der Ätzprozesse

In diesem Kapitel werden die in den vorangegangenen Kapiteln gewonnenen Ergebnisse kurz tabellarisch zusammengestellt, um einen einfachen Überblick über die Ätzprozesse zu erhalten.

System	Ätzlösung	Ätzzeit
HDT/Au	0,2 M KCN/ 1 M KOH-Lösung (wässrige Lösung)	einige Minuten
N-BPT/Au	0,2 M KCN/ 1 M KOH-Lösung (wässrige Lösung)	einige Minuten
OTMS/Cr	0,2 ml 15%-ige KOH-Lösung 0,8 ml 25%-ige $K_3Fe(CN)_6$ -Lösung 1,8 ml H_2O	einige Minuten
	17% NaOH 25% $K_3Fe(CN)_6$ (wässrige Lösung)	20 – 40 Sekunden
	alternative Chrom Ätzprozess unter Verwendung von HCl oder Cer-Armonium-Nitrat	
OTS/Si(100)	5%-ige Flußsäure (HF)	30 Sekunden
	anschließend 30%-ige KOH-Lösung	60 Sekunden
EBP/Si(111)	5%-ige Flußsäure (HF)	3 Minuten
	anschließend 1 M KOH-Lösung (wässrige Lösung)	5 Minuten im Ultraschallbad
HBP/Si(111)	1 M KOH-Lösung (wässrige Lösung)	5 Minuten im Ultraschallbad

Tabelle 5.1: Zusammenfassung der Ätzprozesse

Kapitel 6

Analyse der geschriebenen Strukturen nach dem Ätzübertrag

In diesem Kapitel wird die Analyse der mit dem STM in die unterschiedlichen verwendeten Systeme geschriebenen Strukturen nach dem jeweiligen Ätzübertrag vorgestellt. Die Elektronen flossen bei der Strukturierung aller hier vorgestellten Ergebnisse von der STM-Spitze zur Probe. Um jede weitere Modifikation der Resistschicht zu vermeiden, wurden die erzeugten Strukturen vor dem Ätzvorgang nicht mit dem AFM oder STM abgebildet. Untersuchungen hierzu sind für das System HDT/Au in [111,199] zu finden.

Da es viele Faktoren gibt, die zu Meß- und Interpretationsfehlern bei SPM-Messungen führen können [109], insbesondere wenn die Erzeugung und Analyse von Strukturen mit ein und demselben Gerät durchgeführt werden, wurde die Analyse der geätzten Strukturen mit einem SEM und einem AFM durchgeführt. Der Einsatz dieser beiden auf grundsätzlich verschiedenen Meßprinzipien beruhenden Analysemethoden bietet größere Sicherheit bei der Interpretation der Messergebnisse. Meßartefakte werden leichter erkannt. Die Analyse erfolgte hinsichtlich der erreichten Strukturgrößen sowie der Abhängigkeit des Strukturübertrags von den Schreibparametern. Alle in diesem Kapitel präsentierten AFM-Messungen wurden im dynamischen Modus (*tapping mode*) aufgenommen (siehe Kapitel 2.1.2).

6.1 Hexadecanthiol (HDT) auf Gold

Abbildung 6.1 stellt die vorangegangenen Prozeßschritte schematisch dar und zeigt das Verhalten des Resists bezüglich der Übertragsrichtung. Der Resist verhält sich wie ein Positivresist, das heißt, an den Stellen, an denen er modifiziert wurde, werden während des in Kapitel 5.1 beschriebenen Ätzprozesses die Strukturen ins Gold übertragen. Da das System HDT/Au in vorangegangenen Arbeiten [111,199] ausführlich bezüglich der Schreibparameter untersucht wurde, ist in dieser Arbeit auf diese Ergebnisse zurückgegriffen worden. Die im Folgenden vorgestellten Ergebnisse wurden alle mit den gleichen

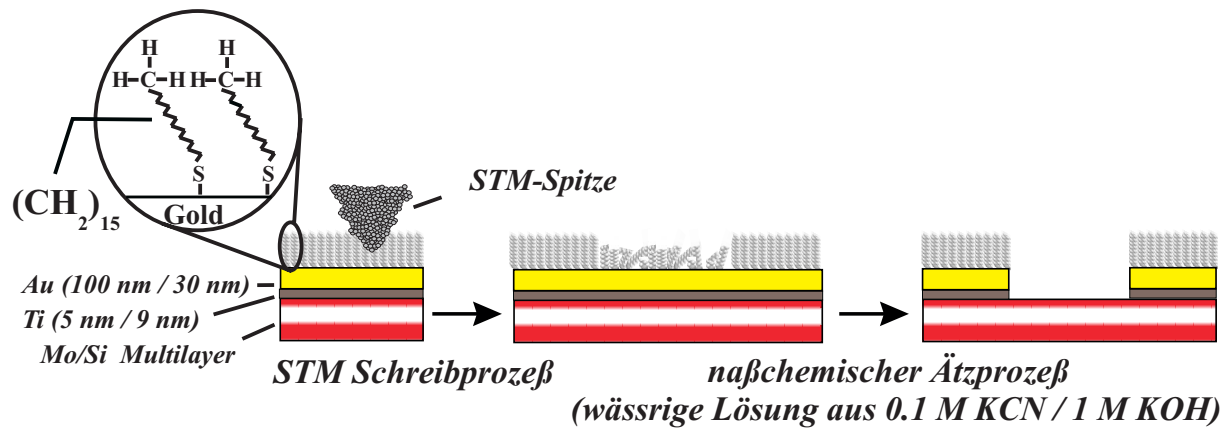


Abbildung 6.1: Schema des STM-Lithographieprozesses in HDT/Au.

Schreibparametern erzeugt. Die verwendeten Parameter sind ein Tunnelstrom von 1 nA, eine Gapspannung von 1 V und eine Scangeschwindigkeit von 20000 nm/s. Dass der Resist sich wie ein Positivresist verhält, belegt anschaulich Abbildung 6.2. Die 3D-Darstellung der AFM-Aufnahme zeigt eine Rechteckstruktur, die in den SAM-Film geschrieben wurde. Die HDT-Schicht befand sich auf einer Probe vom *TypA* (siehe Kapitel 4.1). Der Strukturübertrag erfolgte mit dem in Kapitel 5.1 beschriebenen Ätzprozeß. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Ätzlösung nur in dem abgerasterten Bereich die Goldschicht angegriffen hat. In den nicht abgerasterten Bereichen sorgt die Hydrophobizität des SAM-Films dafür, dass die Goldschicht nicht angegriffen wurde. Es hat also ein Positivübertrag stattgefunden.

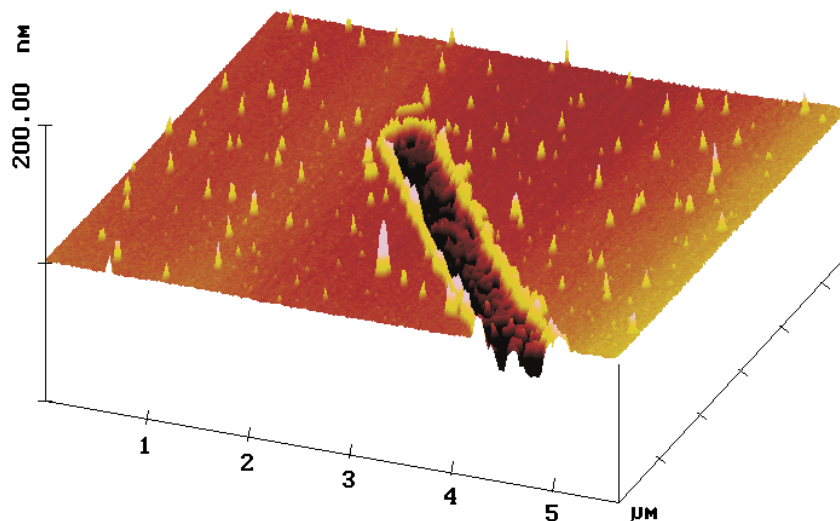


Abbildung 6.2: 3D-Darstellung der AFM-Aufnahme einer ins Gold übertragenen Rechteckstruktur. Nur im abgerasterten Bereich konnte die Ätzlösung das Gold angreifen.

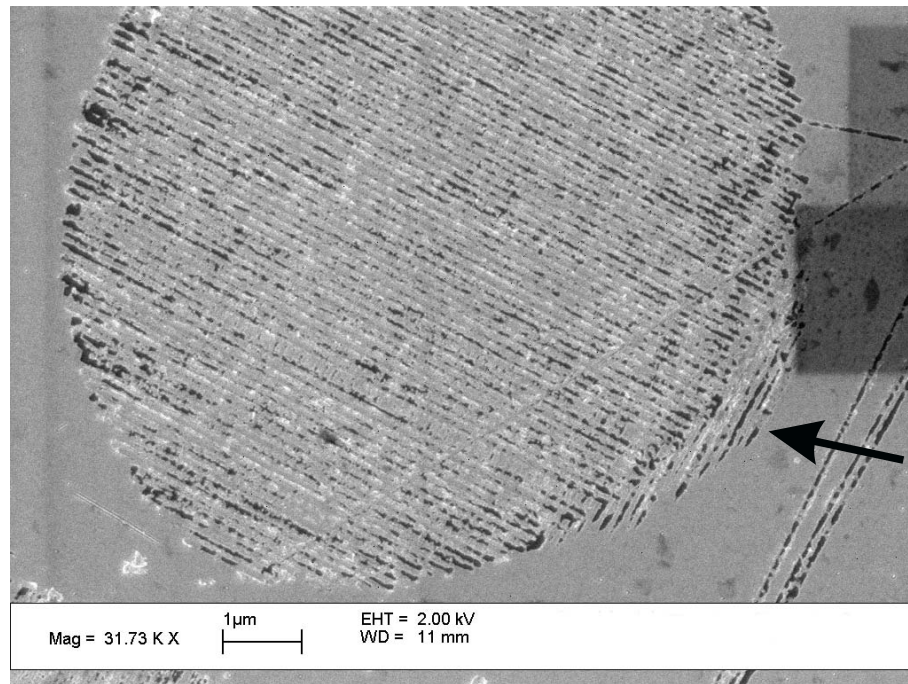


Abbildung 6.3: SEM-Aufnahme einer in HDT geschriebenen und in die Goldschicht geätzten Kreisstruktur.

Bei Abbildung 6.3 handelt es sich um die SEM-Analyse einer erzeugten Kreisstruktur. Erzeugt wurde diese unter Ausnutzung der in Kapitel 2.1.1 beschriebenen Möglichkeit, Scanpfade zu programmieren (Macros). Dieses verwendete Macro sorgt dafür, dass die STM-Spitze die in Abbildung 6.4 zur Verdeutlichung dargestellte Struktur abfährt. Sie

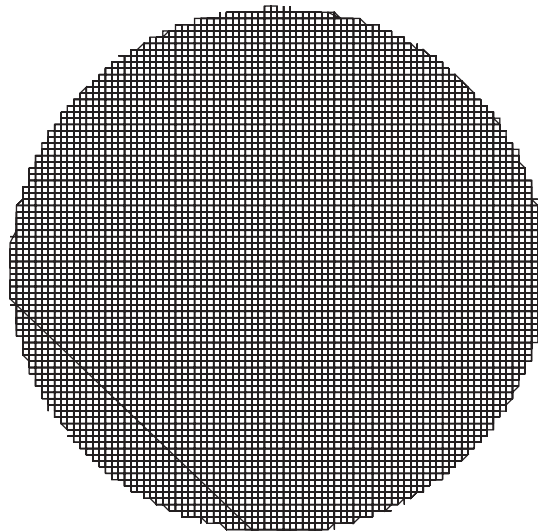


Abbildung 6.4: Plot eines programmierten Kreismacros.

besteht aus parallelen Einzellinien variabler Länge. Zuerst werden die Linien in der einen Orientierung abgefahren, bevor die in der dazu senkrechten Orientierung abgefahren werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass nur der eine Satz von parallelen Linien ins Gold übertragen wurde. Nur in Bereichen, die noch nicht abgefahren wurden, ist der zweite Satz von Linien zu erkennen. Eine solche Stelle ist durch den Pfeil gekennzeichnet. In Abbildung 6.5 ist eine AFM-Messung eines Ausschnittes einer solchen Kreisstruktur zu sehen. Auch hier ist nur der erste Satz von Gitterlinien ins Gold (*TypA*) übertragen worden, während die dazu senkrecht liegenden Linien nicht mehr erkennbar sind. Ausgenommen ist der durch den Pfeil gekennzeichnete Bereich. In diesem ist es zu einem Aussetzer in einer senkrecht geschriebenen Linie gekommen. Dies hatte zur Folge, dass auch der zweite Satz von Linien klar übertragen wurde. Die Linien haben eine Periode von 110 nm.

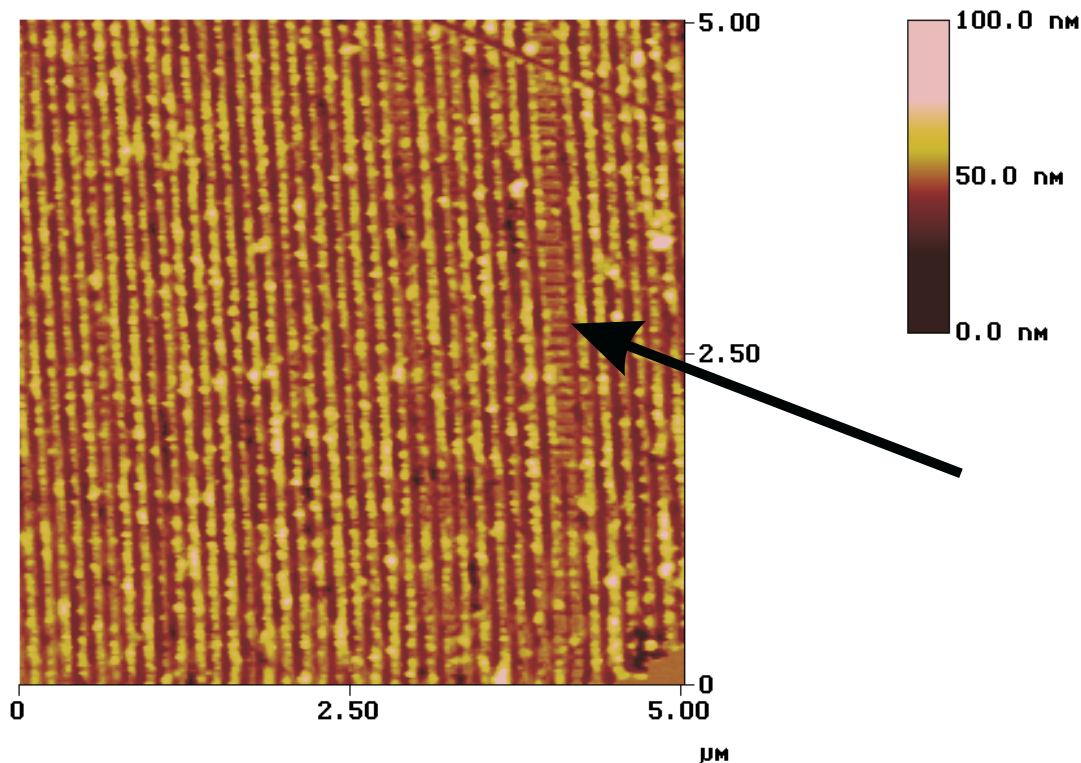


Abbildung 6.5: AFM-Aufnahme eines Ausschnittes einer in die Goldschicht geätzten Kreisstruktur. Von der in den HDT-Film geschriebenen Kreuzgitterstruktur ist außer in dem durch den Pfeil gekennzeichneten Bereich nur ein Satz an Gitterlinien übertragen worden.

Durch Linienprofilanalysen lassen sich Tiefe und Breite der in die Goldschicht übertragenen Strukturen ermitteln. Um die Tiefe der übertragenen Strukturen bestimmen zu können, ist Abbildung 6.6 mit einem Linescan versehen worden. Die isolierte Linie ist im Mittel 15 nm tief in die 30 nm dicke Goldschicht (*TypA*) geätzt worden. Im rechten unteren Bereich ist ebenfalls wieder ein Teil einer Kreisstruktur zu erkennen.

Auch hier ist das gleiche Verhalten bezüglich des Übertrags zu beobachten.

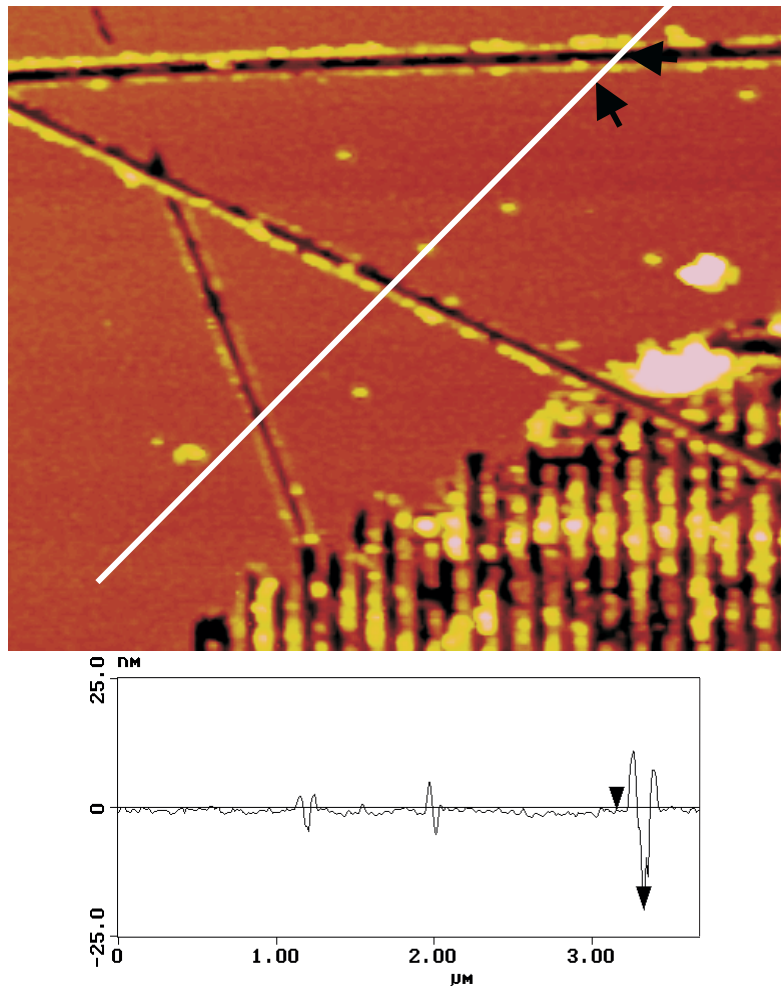


Abbildung 6.6: AFM-Aufnahme mit Linescan einer ins Gold geätzten Linie. Die Tiefe beträgt 15 nm.

Um Aussagen über die erreichte minimale Breite der geätzten Strukturen machen zu können, ist Abbildung 6.7 herangezogen worden. Hierbei handelt es sich um eine Spiralstruktur, die nach dem gleichen Schreibprozeß (gleiche Schreibparameter) in einen Goldfilm vom *TypB* (siehe Kapitel 4.1) übertragen wurde. Im unteren Bild ist der markierte Ausschnitt aus dem oberen erneut abgebildet worden. Es handelt sich also nicht um einen softwaretechnischen Zoom. Darin ist der gemachte Linescan eingezeichnet. Die Tiefe der übertragenen Einzellinien beträgt 15 nm. Diese Tiefe stimmt mit dem oben genannten Wert überein, da der gleiche Ätzprozeß angewendet wurde. Die Linien haben eine Breite von $57 \text{ nm} \pm 3 \text{ nm}$ (FWHM).

Im Folgenden werden die in diesem Kapitel gewonnenen Ergebnisse kurz tabellarisch zusammengestellt.

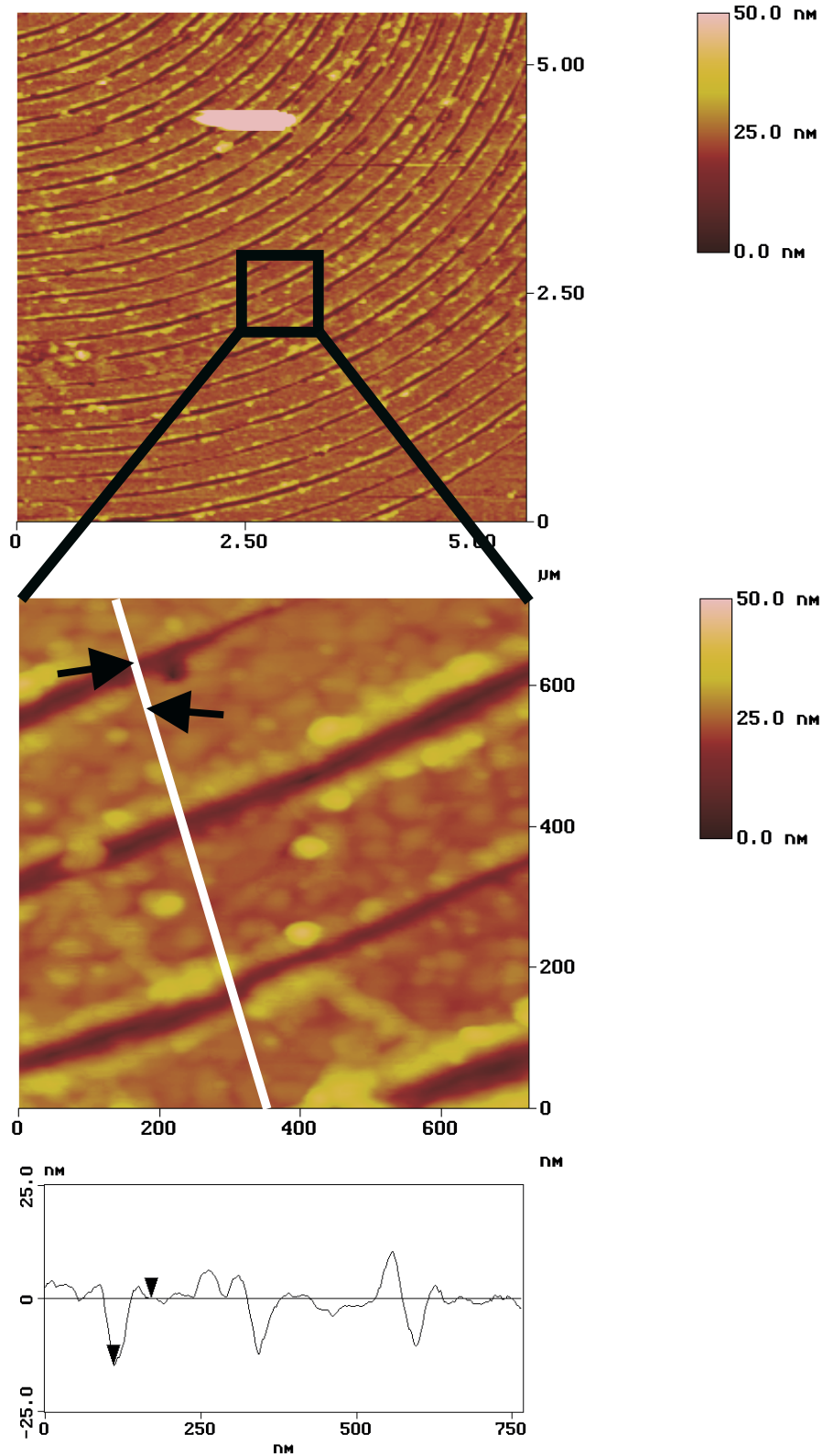


Abbildung 6.7: AFM-Aufnahme einer Spiralstruktur mit Linescan. Die Tiefe der Struktur beträgt 15 nm.

System	Übertragsverhalten	Parameterbereich	Strukturbreite
HDT/Au	Positivübertrag	1 V, 1 nA	57 nm \pm 3 nm bei 15 nm Tiefe

Tabelle 6.1: Zusammenfassung der Ergebnisse des Systems HDT/Au.

6.2 N-Biphenylthiol (N-BPT) auf Gold

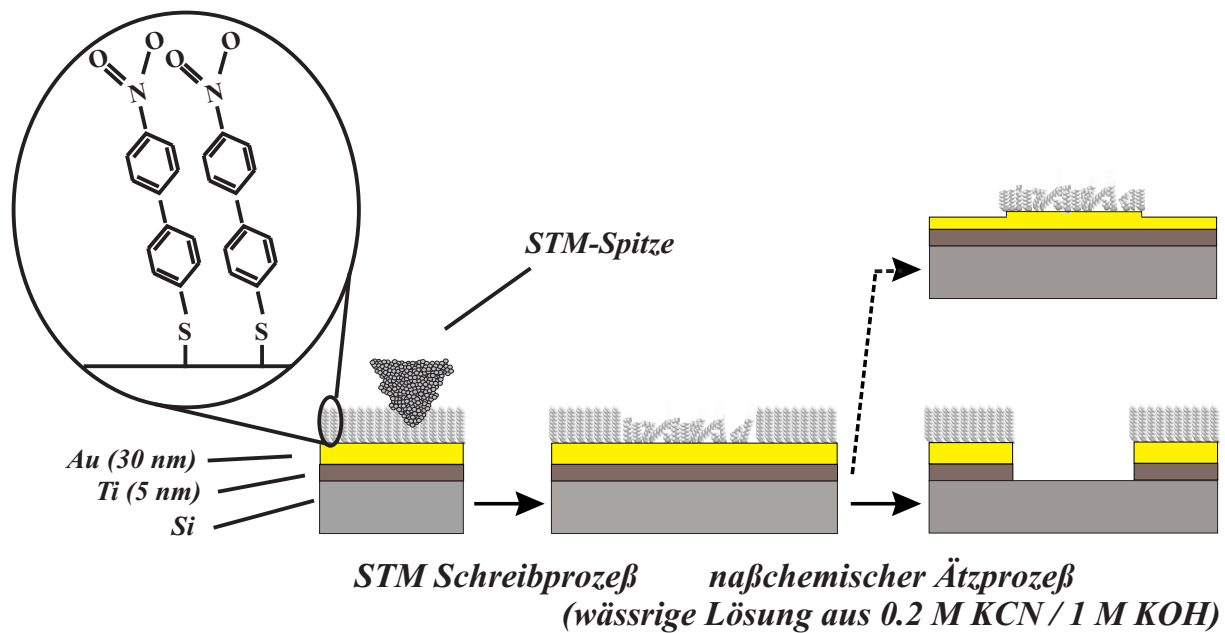


Abbildung 6.8: Schema des STM-Lithographieprozesses in N-BPT/Au.

Abbildung 6.8 stellt noch einmal kurz die vorangegangenen Prozeßschritte schematisch dar und zeigt das Verhalten des Resists bezüglich der Übertragsrichtung. Im folgenden werden die Ergebnisse vorgestellt, die das Verhalten des Resists bezüglich des Strukturübertrags bei unterschiedlich verwendeten Schreibparametern zeigen. Hierzu wird sowohl auf den Einfluß der Gapspannung als auch auf den Einfluß der Tunnelströme (der Elektronendosis) eingegangen. Für die Untersuchung des Verhaltens bei kleinen Gapspannungen ist die AFM-Messung in Abbildung 6.9 herangezogen worden. Die drei rechteckigen Strukturen entstehen aus jeweils 5×100 Linien, wobei die Gapspannung von 0,002 V über 0,02 V, 0,2 V, 0,4 V auf 0,8 V nach jeweils 100 Scanlinien erhöht wurde. Dies ist rechts in dem Bild skizziert. Die Scangeschwindigkeit betrug 6000 nm/s. Als Tunnelstrom wurde links 0,1 nA, in der Mitte 1 nA und rechts 10 nA gewählt. Die Scanrichtung ist horizontal. Bei der Variation der Gapspannung in dem Bereich bis 0,8 V ist kein Einfluß auf den Strukturübertrag der geschriebenen Strukturen bei Tunnelströmen von 0,1 nA und 1 nA erkennbar. Alle Bereiche haben die gleiche Tiefe. Nur bei einem Tunnelstrom

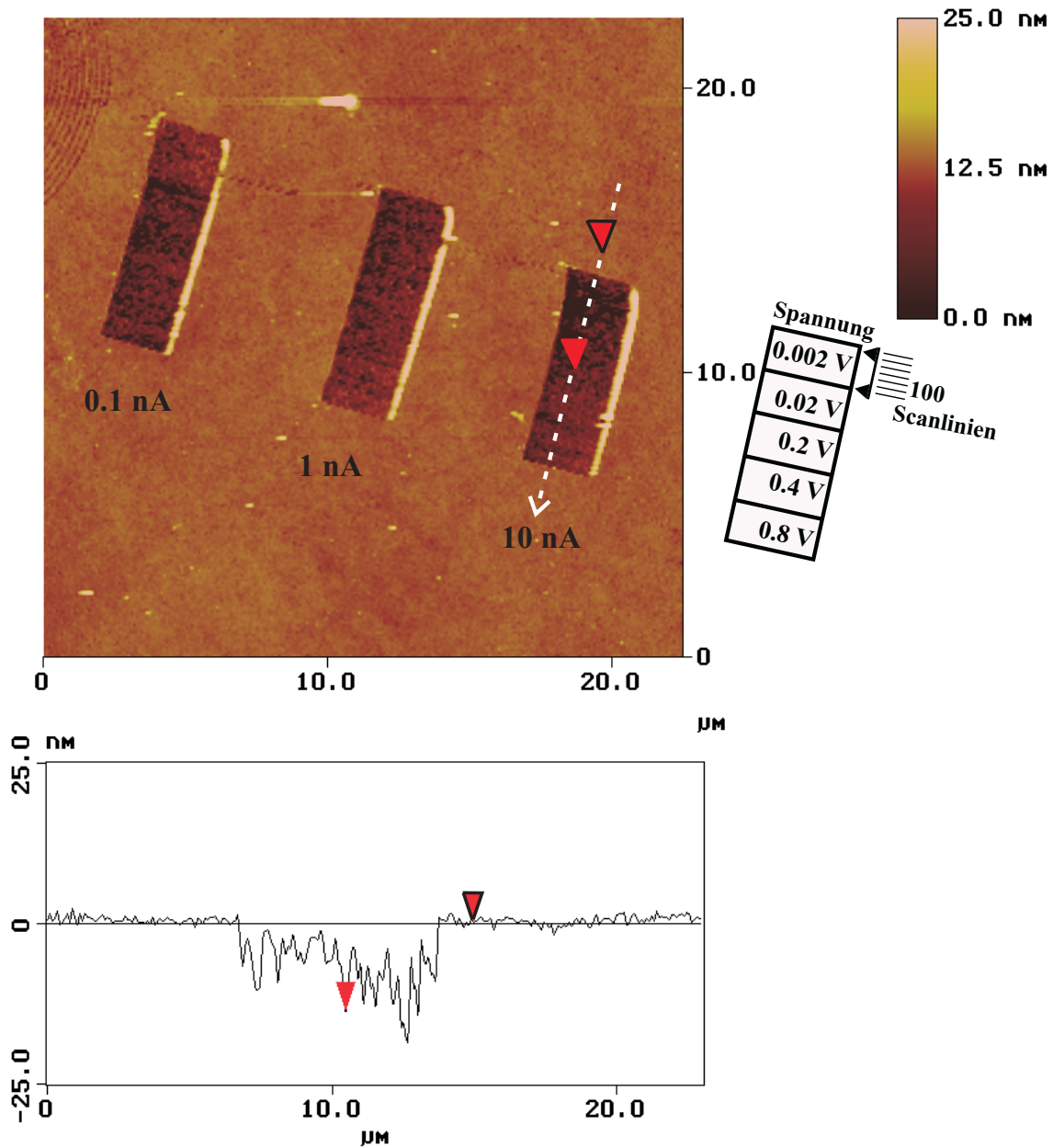


Abbildung 6.9: AFM-Aufnahme dreier Rechteckstrukturen, die das Übertragsverhalten des Resists bei kleinen Gapspannungen zeigen. Jede der drei Rechteckstrukturen besteht aus 5×100 dicht geschriebenen Linien. Der Linescan zeigt die Tiefe der rechten übertragenen Struktur. Bei der linken und die mittleren Struktur haben alle Bereiche die gleiche Tiefe.

von 10 nA ist die Struktur bei den kleinen Gapspannungen tiefer. Dies ist deutlich in dem Linescan in Abbildung 6.9 zu erkennen. Der Verlauf des Linescans durch die rechte Struktur ist im AFM-Bild durch den Pfeil angedeutet. Bei niedrigen Spannungen ist das Verhalten eines N-BPT-SAM-Films bezüglich des Übertrages das eines Positivresists.

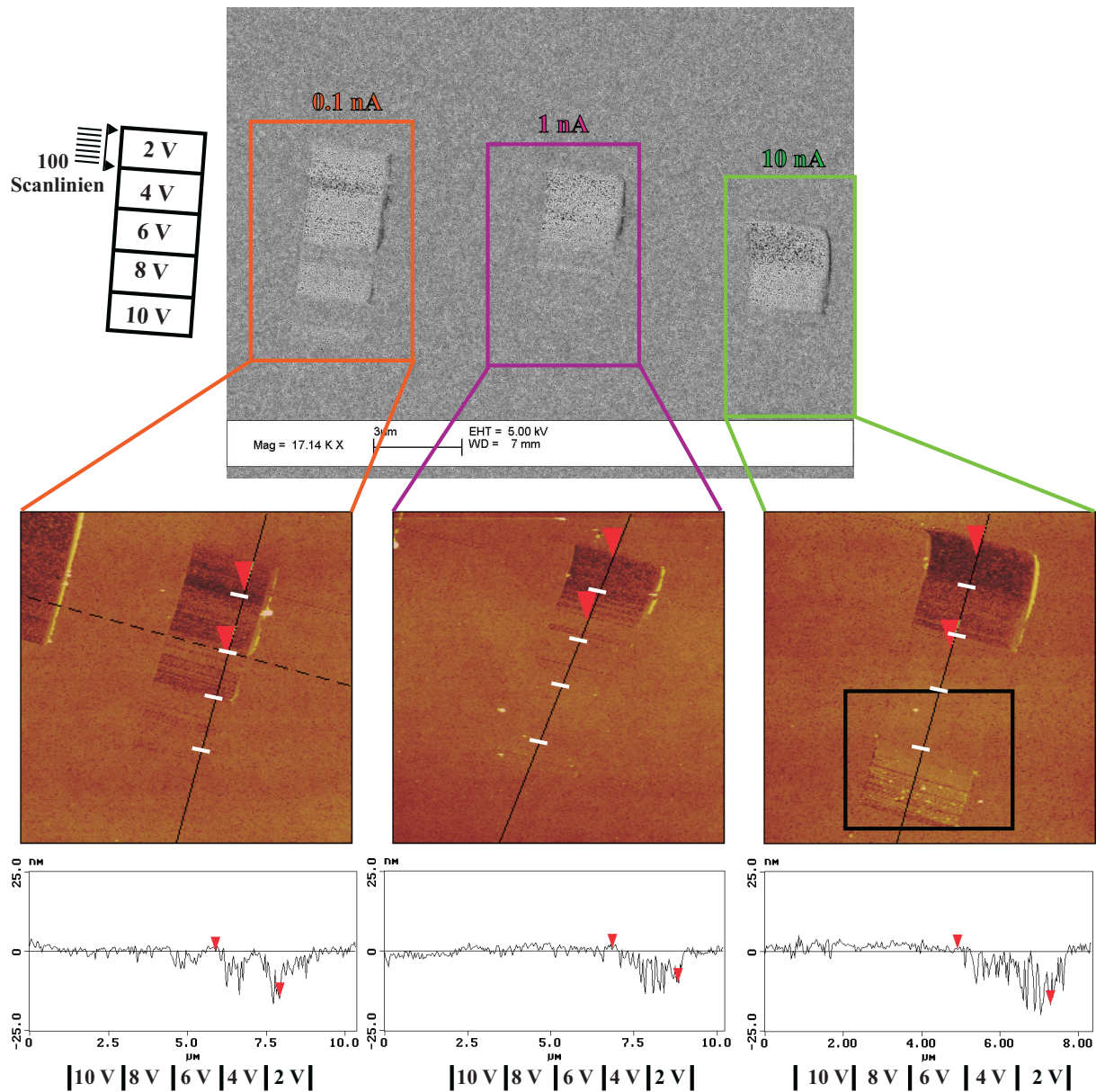


Abbildung 6.10: Kombinierte SEM- und AFM-Aufnahme dreier Rechteckstrukturen, die das Übertragsverhalten des Resists bei größeren Gapspannungen zeigen. Jede der drei Rechteckstrukturen besteht aus 5×100 dicht geschriebenen Linien. Die Linescans zeigen das Tiefenprofil der Strukturen. In der SEM-Aufnahme sind nur Bereiche zu erkennen die mit kleinen Spannungen geschrieben wurden.

Abbildung 6.10 zeigt das Verhalten bei höheren Gapspannungen. Bei dieser Abbildung handelt es sich um eine SEM- und drei AFM-Aufnahmen einer Probenstelle. Der Verlauf der Linescans ist in den AFM-Bildern eingezeichnet. Um das Übertragsverhalten zu untersuchen, wurden wieder drei rechteckige Strukturen geschrieben, die jeweils aus

5×100 Linien bestehen, wobei die Gapspannung von 2 V auf 10 V in 2 V-Schritten nach jeweils 100 Scanlinien erhöht wurde. Dies ist links im Bild skizziert. Die Geschwindigkeit betrug wegen der Vergleichbarkeit ebenfalls 6000 nm/s. Als Tunnelstrom wurde wieder links 0,1 nA, in der Mitte 1 nA und rechts 10 nA gewählt. In der SEM-Messung und den AFM-Messungen ist deutlich zu sehen, dass die Variation der Gapspannung in dem Bereich von 2 V bis 10 V je nach gewähltem Tunnelstrom einen sehr großen Einfluß auf den Strukturübertrag hat. Während es bei 2 V und 4 V bei allen gewählten Tunnelströmen zu einem positiven Ätzübertrag unterschiedlicher Tiefe kommt, tritt dieser bei höheren Spannungen bei 1 nA und 10 nA nicht mehr auf. Bei einem Tunnelstrom von 0,1 nA ist auch bei 6 V noch ein Ätzübertrag im Linescan zu erkennen, jedoch ist bei höheren Spannungen (8 V, 10 V) hier auch kein Übertrag mehr festzustellen. In den Linescans ist deutlich zu erkennen, dass die Tiefe mit steigender Spannung sinkt. Das stufenförmige Ansteigen der Spannung ist mit einem stufenförmigen Absinken der Ätztiefe verknüpft. Bei 10 V und 10 nA hat es den Anschein, als ob der SAM-Film der Ätzlösung teilweise widersteht (Negativresist). Um dieses besser beurteilen zu können, ist der Bereich im rechten AFM-Bild, der mit einem Kasten markiert wurde, nochmal detaillierter aufgenommen worden. Abbildung 6.11 zeigt diesen Bereich mit einem horizontal verlaufenden Linescan.

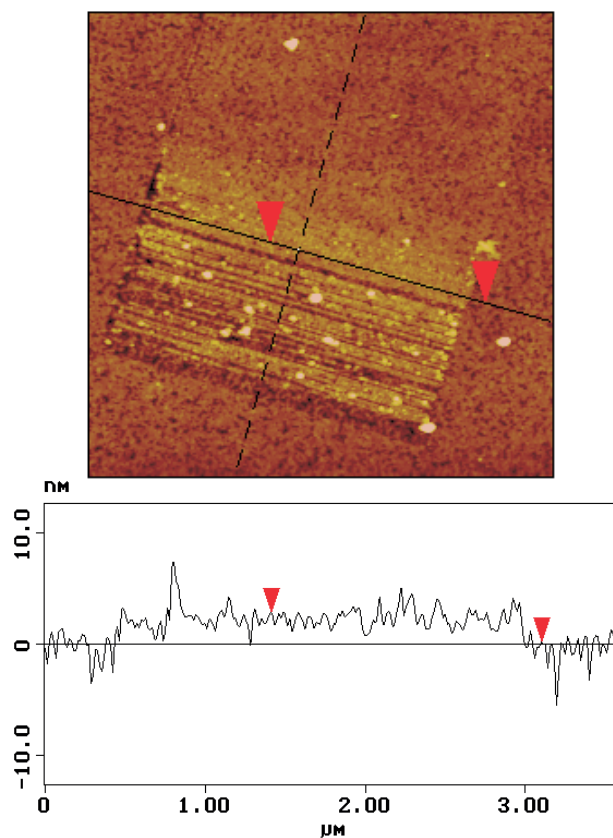


Abbildung 6.11: AFM-Aufnahme mit Linescan eines Bereiches, der mit 10 V und 10 nA geschrieben wurde. Dieser Bereich hat der Ätzlösung teilweise widerstanden.

Dass dieser Bereich gegenüber der Umgebung höher ist, ist im Linescan zu sehen. Der SAM-Film hat also in dem Bereich, in dem er mit 10 V und 10 nA abgerastert wurde, der Ätzlösung länger widerstanden als die nicht abgerasterten Bereiche. Der Resist verhält sich also bei diesen Strukturierungsparametern wie ein Negativresist.

Bei Abbildung 6.12 handelt es sich um die SEM-Analyse einer erzeugten Kreisstruktur. Erzeugt wurde diese Struktur unter Ausnutzung des in Abbildung 6.4 dargestellten Macros. Hierbei sind beide Sätze von parallelen Linien auch ins Gold übertragen worden. Geschrieben wurde diese Struktur mit den gleichen Parametern wie in Kapitel 6.1, also mit einem Tunnelstrom von 1 nA und einer Gapspannung von 1V und einer Scangeschwindigkeit von 20000 nm/s.

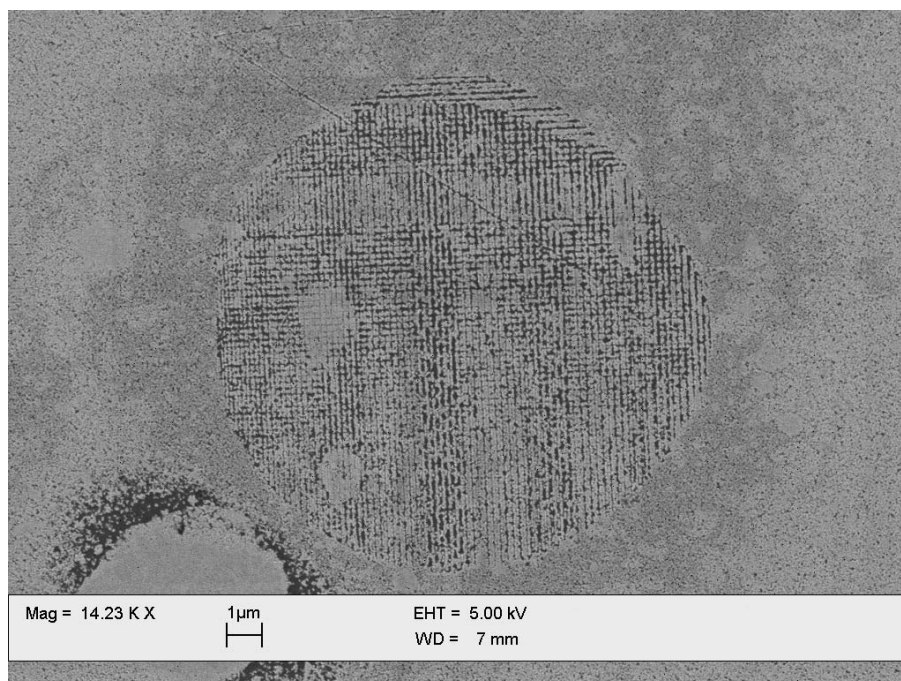


Abbildung 6.12: SEM-Aufnahme einer in *N*-BPT geschriebenen und in die Goldschicht geätzten Kreisstruktur eines Kreuzgitters. Es ist deutlich das übertragene Kreuzgitter zu erkennen.

In Abbildung 6.13 ist eine AFM-Messung eines Ausschnittes einer solchen Kreisstruktur zu sehen. Auch hier sind beide Sätze von parallelen Linien ins Gold übertragen worden. Dies ist nicht in allen Bereichen vollständig geschehen, jedoch ist die Tendenz klar zu erkennen. Abbildung 6.14 ist nochmals eine detailliertere AFM-Aufnahme einer erzeugten Kreuzgitterstruktur in 3D-Darstellung. Es ist ein Bereich gewählt worden, in dem die horizontalen Linien nur andeutungsweise vorhanden sind.

Es ist auch möglich, komplexere Strukturen in den *N*-BPT-Film zu schreiben und zu übertragen. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 6.15 und 6.16 zu sehen. Bei Abbildung

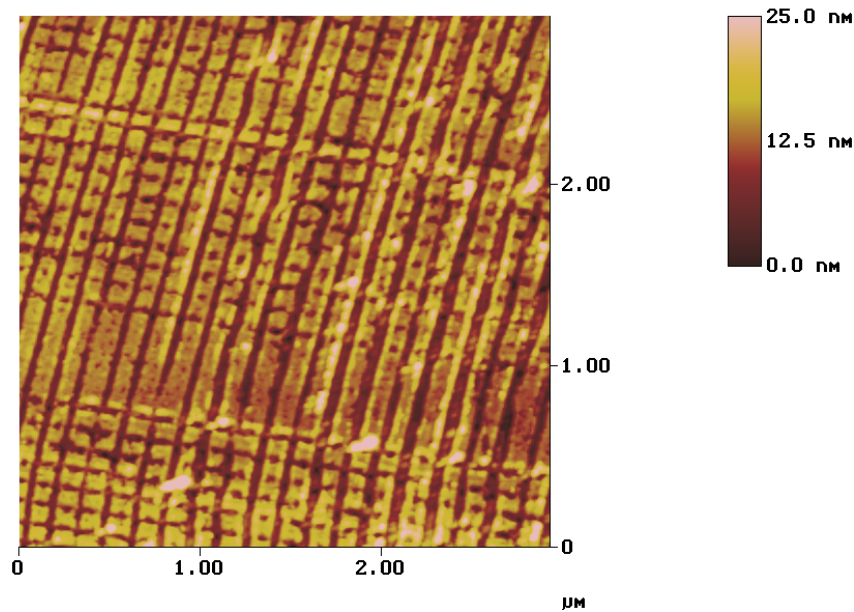


Abbildung 6.13: AFM-Aufnahme eines Ausschnittes einer in die Goldschicht geätzten Kreuzgitterstruktur.

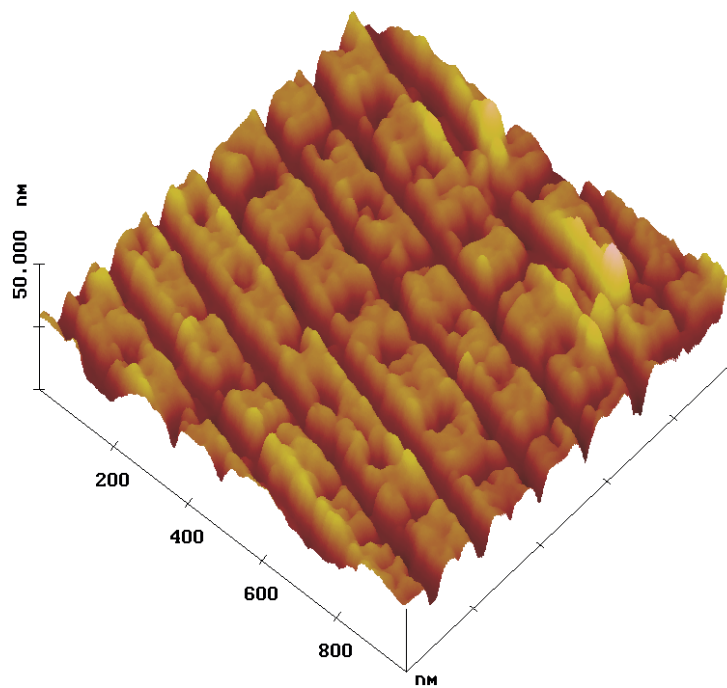


Abbildung 6.14: 3D-Darstellung einer AFM-Aufnahme einer Kreuzgitterstruktur.

6.15 handelt es sich um eine Spiralstruktur, die mit 1 V, 1 nA und einer Scangeschwindigkeit von 10000 nm/s geschrieben wurde. 6.16 ist eine Detailaufnahme dieser Struktur mit

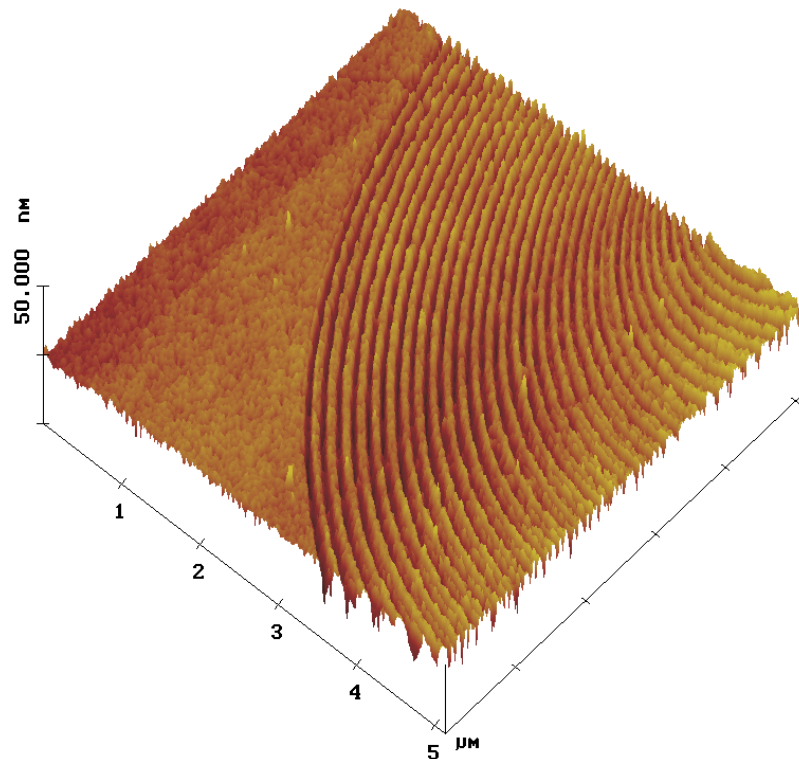


Abbildung 6.15: 3D-Darstellung einer AFM-Aufnahme einer Spiralstruktur.

Linescan. Diese AFM-Aufnahme liefert Aussagen über das Verhältnis der Breite der geätzten Strukturen bezüglich der erreichten Tiefe. Die Breite der Struktur beträgt ca. 55 nm (FWHM) bei einer Tiefe von 18 nm an der durch die Pfeile markierten Stelle. Die hohe Kantenrauigkeit bzw. Variation in der Tiefe der Gräben tritt in dieser Aufnahme deutlich hervor.

Im Folgenden werden die in diesem Kapitel gewonnenen Ergebnisse kurz tabellarisch zusammengestellt.

System	Übertragsverhalten	Parameterbereich	Strukturbreite
NBPT/Au	Positivübertrag	von 0,002 V – 4 V für 0,1 nA, 1 nA und 10 nA für 0,1 nA auch bei 6 V	55 nm ± 3 nm bei 18 nm Tiefe bei 1 V und 1 nA
	kein Übertrag sichtbar	0,1 nA für 8 V und 10 V 1 nA für 6 V, 8 V und 10 V 10 nA für 6 V, 8 V	
	Negativübertrag	10 nA für 10 V	

Tabelle 6.2: Zusammenfassung der Ergebnisse des Systems NBPT/Au.

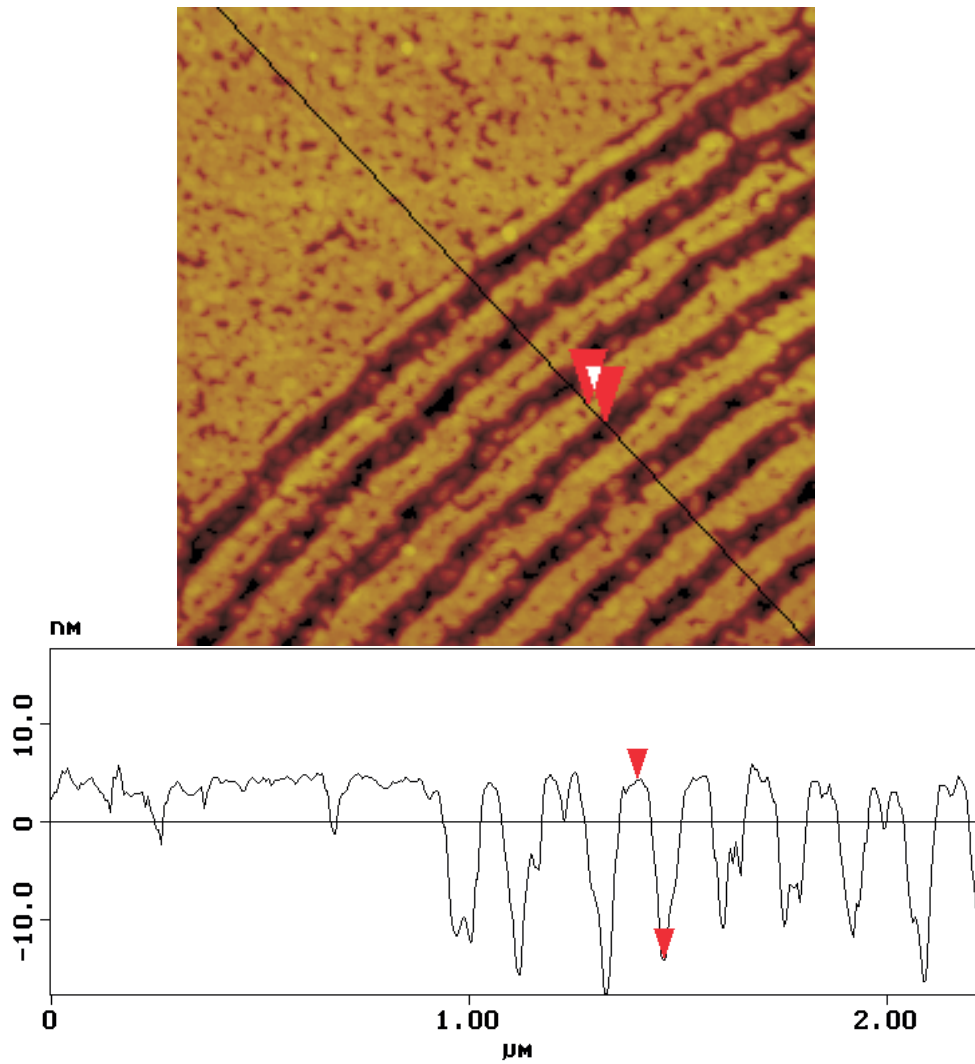


Abbildung 6.16: AFM-Aufnahme eines Ausschnitts einer Spiralstruktur mit Linescan. Die Breite der Struktur beträgt ca. 55 nm (FWHM) bei einer Tiefe von 18 nm an der durch die Pfeile markierten Stelle.

6.3 Octadecyltrimethoxysilan (OTMS) auf Chrom

Abbildung 6.17 stellt noch einmal kurz die vorangegangenen Prozessschritte schematisch dar und zeigt das Verhalten des Resists bezüglich der Übertragsrichtung.

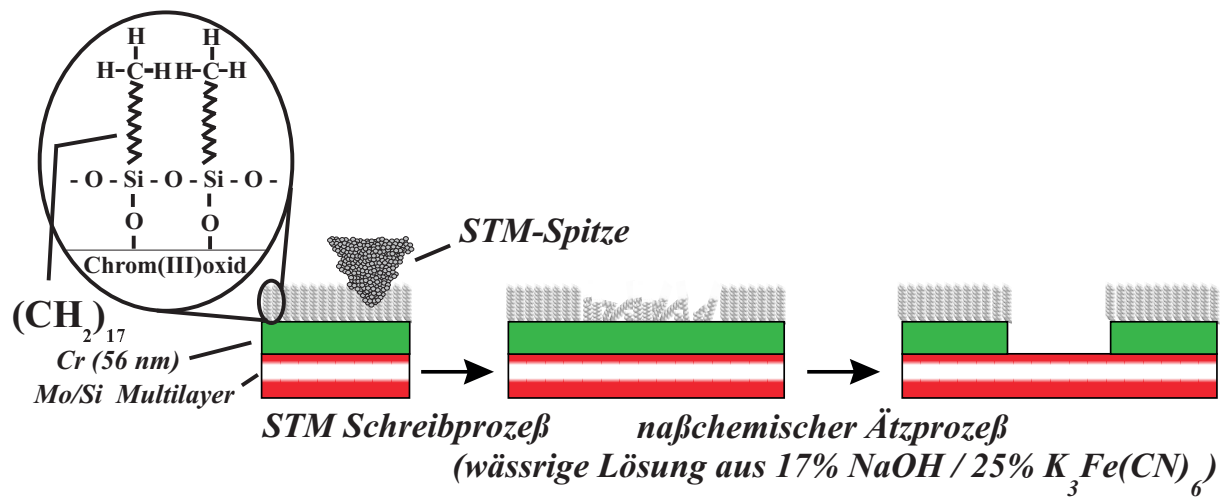


Abbildung 6.17: Schema des STM-Lithographieprozesses in OTMS/Cr.

Abbildung 6.18 zeigt dieses exemplarisch. Auch für dieses System wurde ein positiver

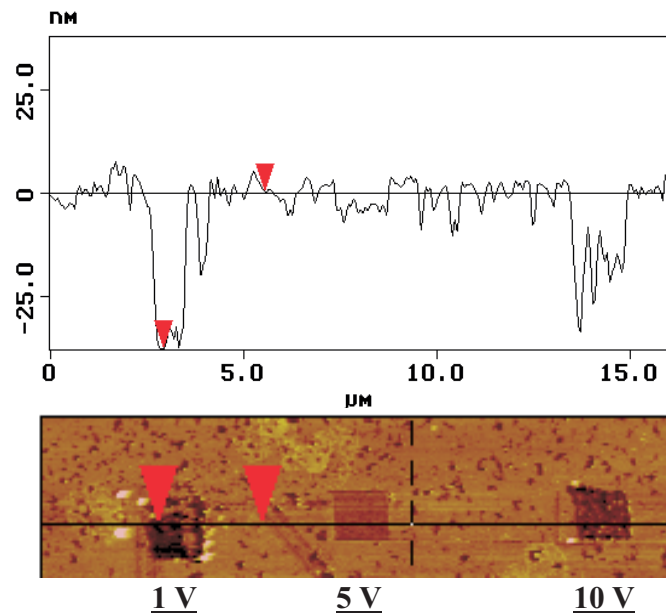


Abbildung 6.18: AFM-Aufnahme dreier quadratischer Strukturen, die das Übertragsverhalten des Resists bei unterschiedlichen Gapspannungen zeigen. Der Linescan zeigt die Tiefen der übertragenen Strukturen.

Strukturübertrag unterschiedlicher Tiefe für alle verwendeten Parametersätze festgestellt. Die drei quadratischen Strukturen in Abbildung 6.18 wurden mit einem Tunnelstrom von 1 nA und einer Scangeschwindigkeit von 3000 nm/s geschrieben, wobei die Gapspannung beim linken Quadrat 1 V, beim mittleren 5 V und beim rechten 10 V betrug. Die Strukturen bestehen jeweils aus 300 geschriebenen Linien. In dem horizontal durch die Strukturen gelegten Linescan ist deutlich der Unterschied in der Ätztiefe abzulesen. Während die mit 1 V geschriebene Struktur eine Tiefe von ca. 37 nm aufweist, ist die mit 5 V geschriebene nur ca. 5 nm tief. Die mit 10 V geschriebene Struktur hat eine Tiefe von ca. 12 nm. Abbildung 6.19 ist eine Detailaufnahme der mit 5 V geschriebenen quadratischen Strukturen

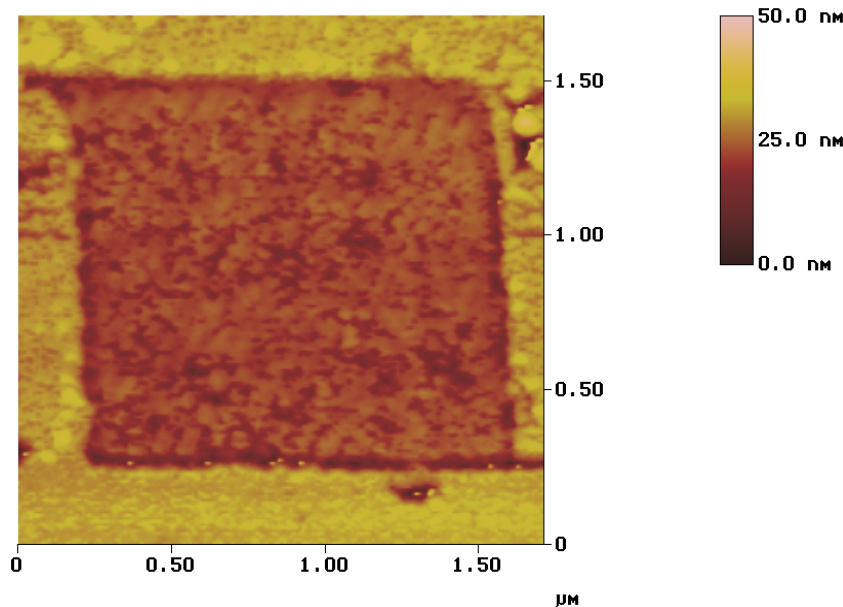


Abbildung 6.19: Detailaufnahme der mit 5 V geschriebenen quadratischen Struktur aus Abbildung 6.18. Die Polykristallinität der Chromschicht ist deutlich zu erkennen.

Struktur. Es ist deutlich die große Mikrorauigkeit aufgrund der Körnigkeit der mittels Elektronenstrahldeposition erzeugten polykristallinen Chromschichten zu erkennen. Dass sich das Problem des nasschemischen selektiven Ätzens dieser Schichten als gravierende Einschränkung für die erzielbaren minimalen Strukturbreiten erweist, ist auch an Abbildung 6.20 zu erkennen. Im Ätzprozeß wird die Körnigkeit dieser Unterlage durch Vorzugsätzen noch verstärkt und durch isotropes Ätzen die Schreibstrukturen stark verbreitert, so dass sich Strukturen mit hoher Kantenrauigkeit ergeben. Bei Abbildung 6.20 handelt es sich um eine SEM-Aufnahme von parallelen Linien einer Periode von 220 nm. Die Linien weisen eine Breite von ca. 180 nm auf und sind durch die Chromschicht geätzt. Die Linien wurden mit einem Tunnelstrom von 1 nA, einer Gapspannung von 1 V und einer Scangeschwindigkeit von 20000 nm/s geschrieben. Dass die Linien tatsächlich durch die Chromschicht geätzt wurden, liegt darin begründet, dass diese Probe doppelt so lange geätzt wurde wie die in der Abbildung 6.18 dargestellte. Hierbei war die mit 1 V und

1 nA geschriebene Struktur ca. 37 nm tief in die Chromschicht geätzt.

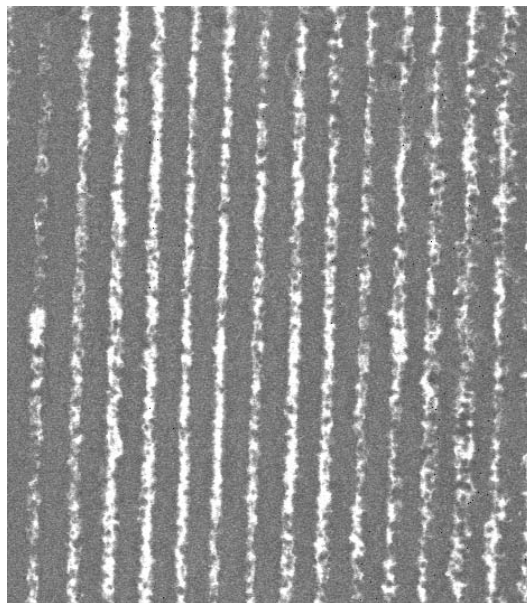


Abbildung 6.20: SEM-Aufnahme von parallelen Linien einer Periode von 220 nm. Die Linien weisen eine Breite von ca. 180 nm auf und sind durch die 56 nm dicke Chromschicht geätzt. Die dunklen Bereiche sind die geschriebenen und durchgeätzten Linien.

Im Folgenden werden die in diesem Kapitel gewonnenen Ergebnisse kurz tabellarisch zusammengestellt.

System	Übertragsverhalten	Untersuchter Parameterbereich	Strukturtiefe
OTMS/Cr	Positivübertrag bei allen Parametern	1 V, 1 nA	ca. 37 nm
		5 V, 1 nA	ca. 5 nm
		10 V, 1 nA	ca. 12 nm

Tabelle 6.3: Zusammenfassung der Ergebnisse des Systems OTMS/Cr.

6.4 Octadecyltrichlorsilan (OTS) auf Silizium (100)

Abbildung 6.21 stellt noch einmal kurz die vorangegangenen Prozeßschritte schematisch dar und zeigt das Verhalten des Resists bezüglich der Übertragsrichtung. Dass der Resist sich wie ein Negativresist verhält, belegt anschaulich Abbildung 6.22. Die 3D-Darstellung der AFM-Aufnahme zeigt den Ausschnitt eines Quadrats, das in den SAM-Film mit einem Tunnelstrom von 1 nA einer Gapspannung von 10 V und einer Scangeschwindigkeit von 20000 nm/s geschrieben wurde. Die OTS-Schicht befand sich auf Si(100). Der

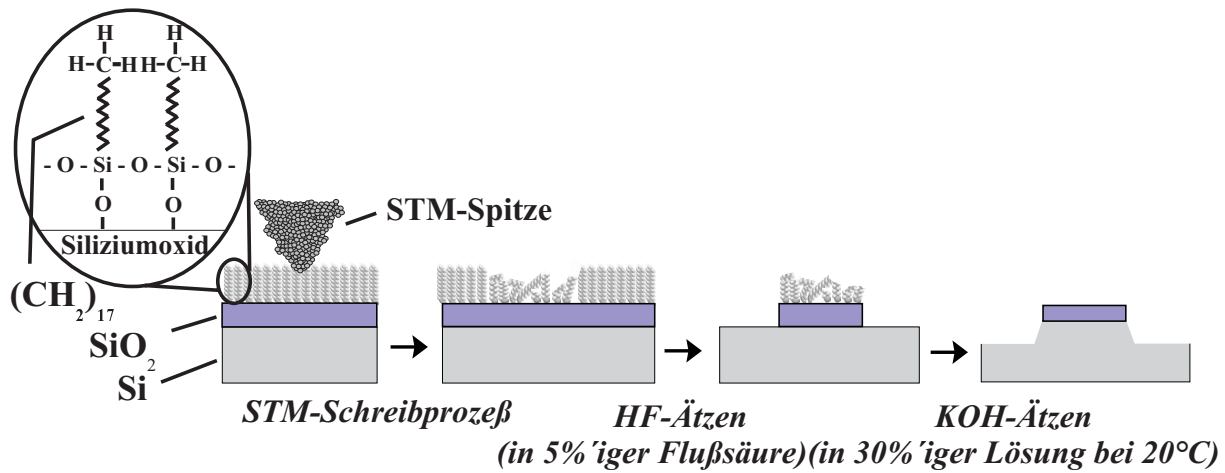


Abbildung 6.21: Schema des STM-Lithographieprozesses in OTS/Si(100).

Strukturübertrag erfolgte mit dem in Kapitel 5.2 beschriebenen Ätzprozeß. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Ätzlösung nur in dem nicht abgerasterten Bereich das Silizium angegriffen hat. Es hat also ein Negativübertrag stattgefunden.

Im folgenden werden die Ergebnisse vorgestellt, die das Verhalten des Resists bezüglich des Strukturübertrags bei den unterschiedlichen verwendeten Schreibparametern zeigten. Hierzu wird sowohl auf den Einfluß der Gapspannung als auch auf den Einfluß der Tunnelströme (der Elektronendosis) eingegangen.

Um das Übertragungsverhalten des Resists bei unterschiedlichen Tunnelströmen (Elek-

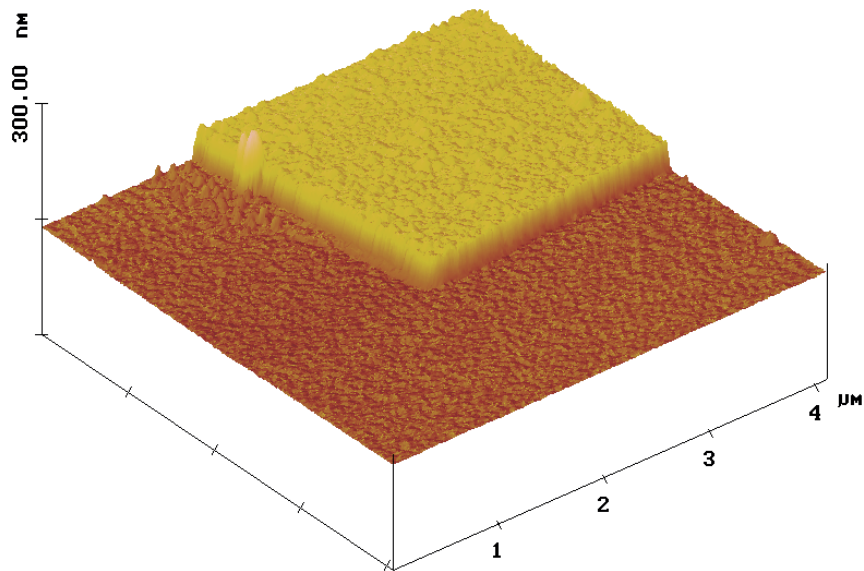


Abbildung 6.22: AFM-Aufnahme eines Si-Quadrates geschrieben in OTS/Si(100). Es ist zu erkennen, dass ein Negativübertrag stattgefunden hat.

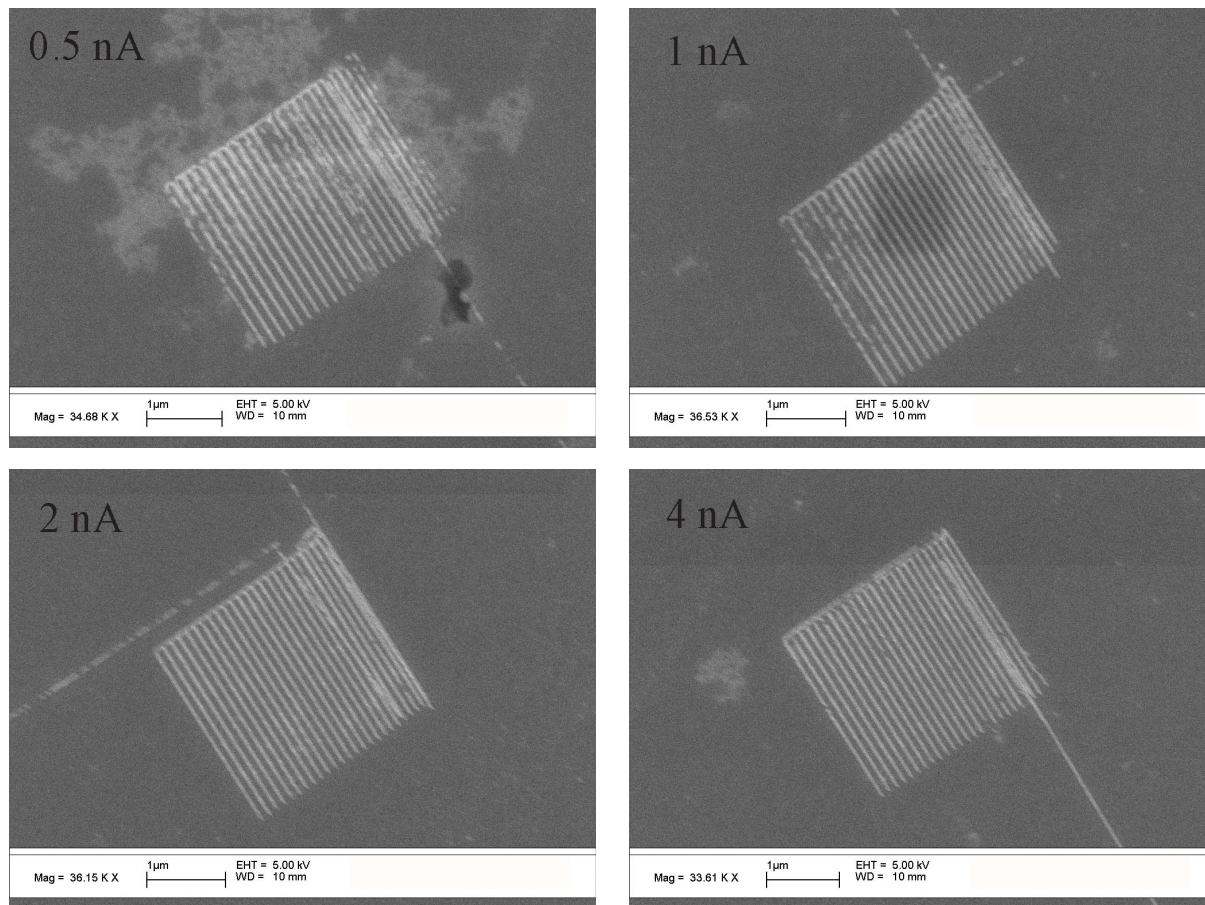


Abbildung 6.23: SEM-Analyse von vier quadratischen Strukturen, die das Übertragungsverhalten des Resists bei unterschiedlichen Tunnelströmen zeigen. Die Scangeschwindigkeit betrug 2000 nm/s und die Gapspannung 10 V . Der Linienabstand beträgt 115 nm .

tronendosen) zu untersuchen, wurden quadratische Strukturen aus parallelen Linien mit unterschiedlichen Tunnelströmen geschrieben. Die Linien hatten einen Abstand von 115 nm und wurden mit einer Scangeschwindigkeit von 2000 nm/s mit einer Gapspannung von 10 V geschrieben. Der Tunnelstrom wurde in einem Bereich von $0,5 \text{ nA} - 4 \text{ nA}$ variiert, die Liniendosis also um einen Faktor acht verändert. Die Analyse von diesen vier quadratischen Strukturen ist in Abbildung 6.23 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass alle geschriebenen Strukturen gleich gut ins Silizium übertragen wurden. Der Tunnelstrom bzw. die Elektronendosis hat also in dem untersuchten Bereich keinen sichtbaren Einfluß auf den Strukturübertrag. Abbildung 6.27 unterstützt dies. Hier wurden Linien mit einer Scangeschwindigkeit von 20000 nm/s bei einem Tunnelstrom von 1 nA geschrieben. Die Dosis ist also um einen Faktor zehn kleiner als bei dem mit 2000 nm/s und 1 nA geschriebenen Linien.

Um das Übertragungsverhalten des Resists bei unterschiedlichen Gapspannungen zu untersuchen, wurden ebenfalls quadratische Strukturen aus parallelen Linien mit unter-

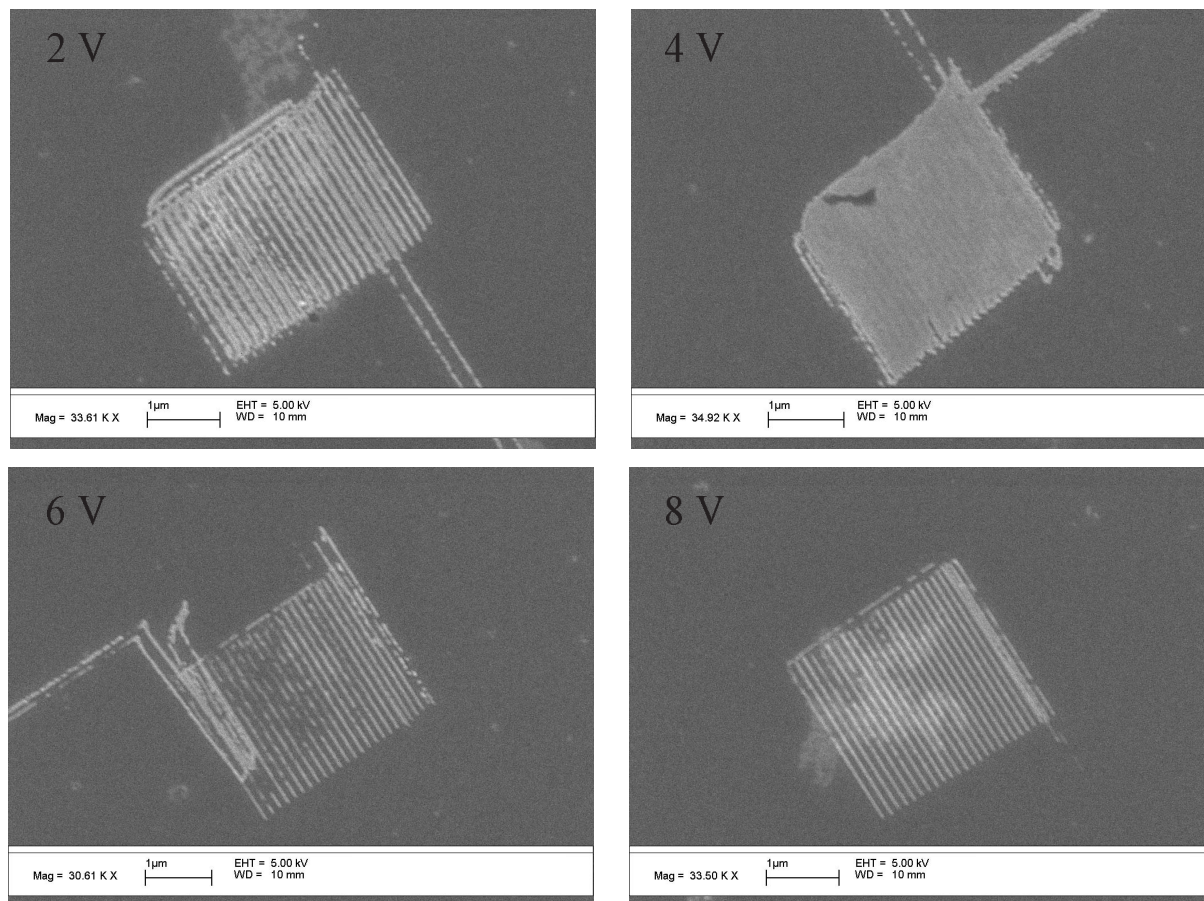


Abbildung 6.24: SEM-Analyse von vier quadratischen Strukturen, die das Übertragsverhalten des Resists bei unterschiedlichen Gapspannungen zeigen. Die Scangeschwindigkeit betrug 2000 nm/s und der Tunnelstrom 1 nA . Der Linienabstand beträgt 115 nm .

schiedlichen Gapspannungen geschrieben. Die Linien hatten auch einen Abstand von 115 nm und wurden mit einer Scangeschwindigkeit von 2000 nm/s mit einem Tunnelstrom von 1 nA geschrieben. Die Analyse von diesen vier quadratischen Strukturen ist in Abbildung 6.24 zu sehen. Zieht man die Struktur aus Abbildung 6.23, die mit 1 nA und 10 V geschrieben wurde, mit heran, so kann das Verhalten des Resists beim Schreiben mit Spannungen von $2 \text{ V} - 10 \text{ V}$ bezüglich des Übertragsverhalten analysiert werden. Es ist festzustellen, dass alle geschriebenen Strukturen, außer denen bei einer Gapspannung von 4 V , keine signifikanten Unterschiede aufweisen. Bei 4 V hingegen kommt es zu einer Linienverbreiterung. Dies ist daran zu erkennen, dass keine einzelnen Linien zu erkennen sind bzw. die einzelne Linie, die rechts oben von der Struktur weggeht, die ebenfalls mit 4 V geschrieben wurde, viel breiter ist, als bei den anderen Strukturen. Aus einer AFM-Analyse dieser vier quadratischen Strukturen ist kein signifikanter Unterschied in der Höhe der Strukturen festzustellen. Der Grund hierfür ist jedoch der in Kapitel 5.2 beschriebene zweistufige Ätzprozeß.

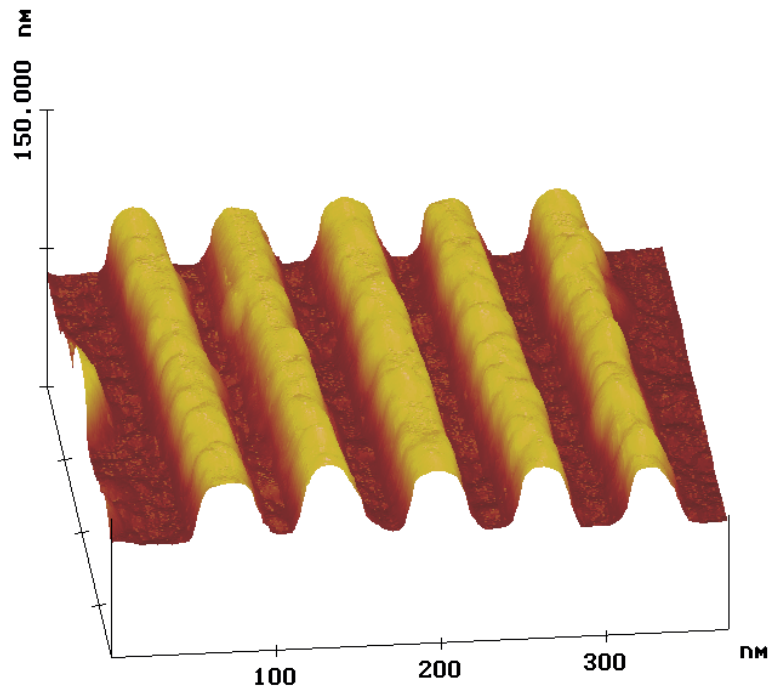


Abbildung 6.25: 3D-Darstellung einer AFM-Aufnahme von parallelen Linien einer Periode von 65 nm.

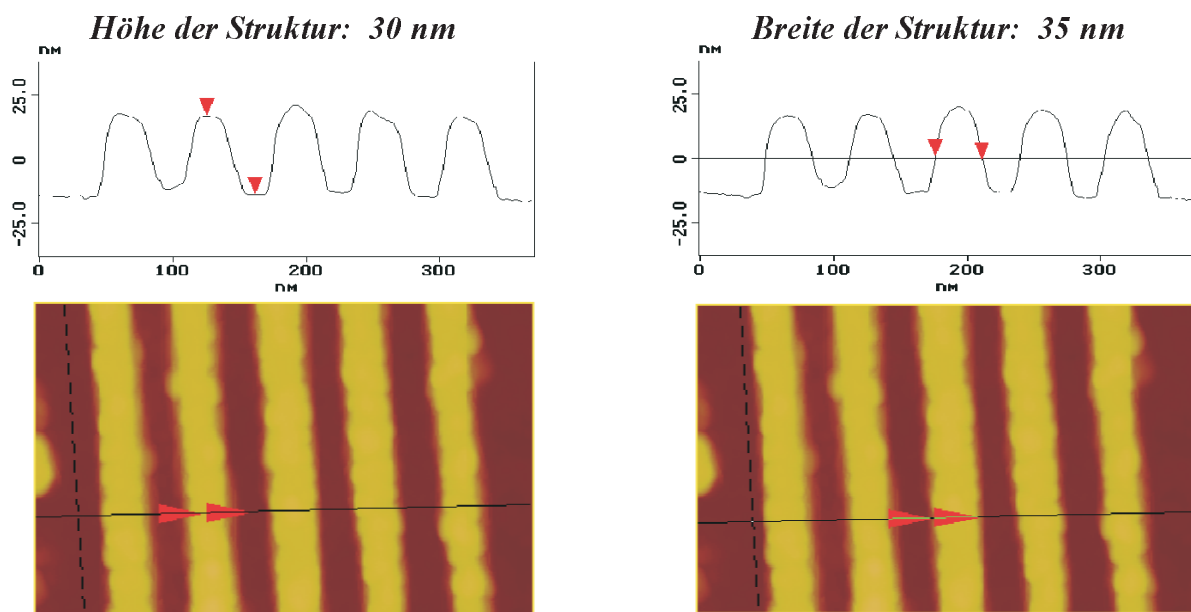


Abbildung 6.26: AFM-Aufnahme mit Linescans zur Analyse der Höhe und Breite der in Abbildung 6.25 in 3D-Form dargestellten parallelen Linien. Die Linien haben eine Breite von 35 nm bei einer Höhe von 30 nm.

Im Folgenden wird auf die erreichte minimale Strukturbreite eingegangen. Die kleinsten erreichten Strukturen sind in Abbildung 6.25 in 3D-Form dargestellt und werden in Abbildung 6.26 bezüglich Breite und Höhe analysiert. Diese Linien wurden mit einem Tunnelstrom von 1 nA und einer Gapspannung von 10 V geschrieben. Die Scangeschwindigkeit betrug 18000 nm/s. Es wurde eine minimale Linienbreite von 35 nm bei einer Tiefe der Struktur von 30 nm erzielt. Es ist deutlich das durch den anisotropen Ätzprozeß ins Silizium bedingte V-förmige aufeinander Zulaufen der Flanken benachbarter Stege zu erkennen (siehe Kapitel 5.2).

Linien dieser Größe lassen sich nicht nur auf kleinen Bereichen erzeugen. Ein Beleg hierfür liefert die SEM-Aufnahme in Abbildung 6.27. Diese parallelen Linien wurden mit einem Tunnelstrom von 1 nA, einer Gapspannung von 10 V und einer Scangeschwindigkeit von 20000 nm/s geschrieben. Es ist möglich, diese Linien, die einen Abstand von 90 nm haben, über einen großen Bereich ohne Defekte zu erzeugen.

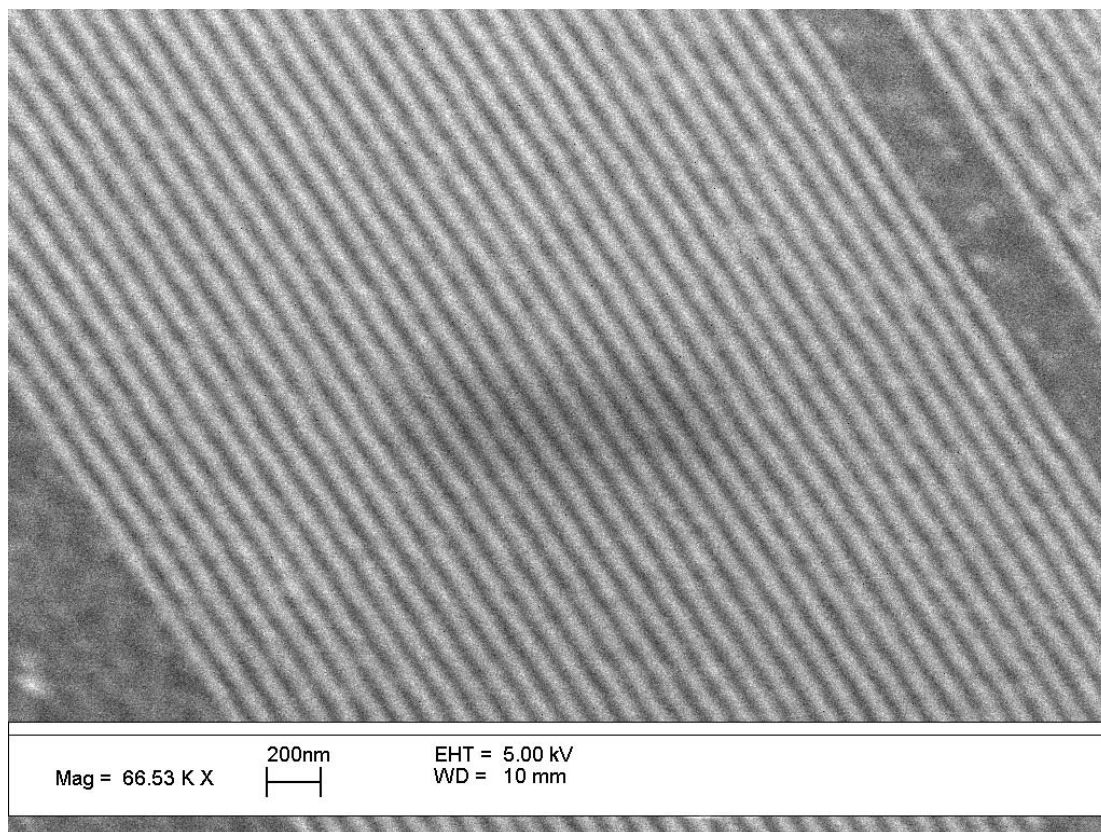


Abbildung 6.27: SEM-Aufnahme von parallelen Linien eines Abstandes von 90 nm. Es ist möglich, diese Linien über einen großen Bereich ohne Defekte zu erzeugen. Die hellen Bereiche sind die geschriebenen Linien.

Im Folgenden werden die in diesem Kapitel gewonnenen Ergebnisse kurz tabellarisch zusammengestellt.

System	Übertragsverhalten	Parameterbereich	Strukturbreite
OTS/Si	Negativübertrag für alle Parameter	von 2 V – 10 V für 1 nA	35 nm bei 30 nm Tiefe
		0,5 nA bis 4 nA bei 10 V	mit 1 nA und 10 V
		bei 4 V und 1 nA	Linienverbreiterung

Tabelle 6.4: Zusammenfassung der Ergebnisse des Systems OTS/Si.

6.5 Hydroxybiphenyl (HBP) auf H-terminiertem Silizium (111)

Abbildung 6.28 stellt noch einmal kurz die vorangegangenen Prozessschritte schematisch dar und zeigt das Verhalten des Resists bezüglich der Übertragsrichtung.

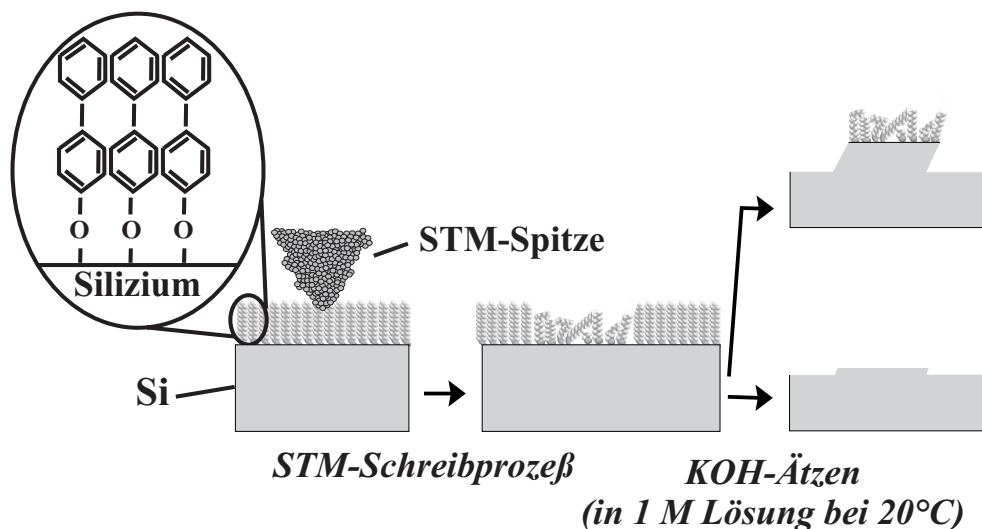


Abbildung 6.28: Schema des STM-Lithographieprozesses HBP/Si(111).

Im Folgenden werden die Ergebnisse vorgestellt, die das Verhalten des Resists bezüglich des Strukturübertrags bei den unterschiedlichen verwendeten Schreibparametern zeigen. Hierzu wird sowohl auf den Einfluß der Gapspannung, als auch auf den Einfluß der Tunnelströme (der Elektronendosis) eingegangen.

Die SEM- und AFM-Messungen in Abbildung 6.29 und 6.30 sind hierzu herangezogen worden. Um das Übertragsverhalten zu untersuchen, wurden jeweils drei rechteckige

Strukturen geschrieben, die jeweils aus 5×100 Linien bestehen, wobei die Gapspannung von 2 V auf 10 V in 2 V Schritten nach jeweils 100 Scanlinien erhöht wurde. Dies ist jeweils links neben den Aufnahmen skizziert. Die Scangeschwindigkeit betrug für das Schreiben der Strukturen 6000 nm/s in Abbildung 6.29 und 12000 nm/s in Abbildung 6.30. Als Tunnelstrom wurde für die linke Struktur 0,2 nA, für die mittlere 1 nA und für die rechte 10 nA gewählt. In den Abbildungen ist deutlich zu sehen, dass die Variation der Gapspannung in dem Bereich von 2 V bis 10 V je nach gewähltem Tunnelstrom einen sehr großen Einfluß auf den Strukturübertrag hat. Des Weiteren ist durch die Variation der Scangeschwindigkeit und somit der Elektronendosis um den Faktor zwei bei den kleineren Tunnelströmen (0,2 nA, 1 nA) ein leichter Unterschied in den übertragenen Strukturen festzustellen.

In den SEM-Aufnahmen hat es den Anschein, dass erst bei höheren Gapspannungen ein Ätzübertrag festzustellen ist. Die AFM-Analyse zeigt jedoch, dass auch für kleinere Gapspannungen ein Übertrag stattgefunden hat. Jedoch sind die Strukturen in diesen Bereichen deutlich flacher. Die Analyse der Linescans liefert eine einheitliche Höhe der Strukturen in den Bereichen, die mit höheren Gapspannungen geschrieben wurden, von ca. 25 nm. Die AFM-Aufnahmen belegen also, dass sich der HBP-Film wie ein negativ Resist verhält, wobei eine sehr starke Spannungsabhängigkeit zu beobachten ist.

Bei einem Tunnelstrom von 0,2 nA ergibt sich für den Bereich, der mit 8 V bzw. 10 V geschrieben wurde, eine einheitliche Höhe. Mit sinkender Gapspannung nimmt die Höhe ebenfalls ab. Der Übergang von 8 V nach 6 V ist dabei sehr ausgeprägt. Die gesamte Struktur ist in Abbildung 6.29, in der sie mit einer langsameren Scangeschwindigkeit, also höherer Elektronendosis geschrieben wurde, ausgeprägter, z.B. ist der 2 V Bereich in Abbildung 6.30 nicht mehr klar zu erkennen.

Für 1 nA hingegen hat der Bereich, der mit 6 V geschrieben wurde, die gleiche Höhe wie der 8 V- bzw. 10 V-Bereich. Dieser ist bei 6000 nm/s Scangeschwindigkeit nicht so ausgeprägt wie bei 8 V bzw. 10 V. Bei 12000 nm/s hingegen ist die gesamte Struktur von 6 V–10 V fehlerhafter ausgebildet. In dem durch den Pfeil im SEM-Bild gekennzeichneten Bereich in Abbildung 6.29 wurde versehentlich mit 10 V an Stelle von 2 V geschrieben. Dadurch hat dieser Bereich die gleiche Höhe wie der 10 V Bereich und unterscheidet sich so deutlich. Der Übergang von 6 V nach 4 V ist hierbei sehr ausgeprägt. Wobei in Abbildung 6.30 die Bereiche, die mit 4 V bzw. 2 V geschrieben wurden, nur noch eine sehr geringe Höhe aufweisen.

Bei einem Tunnelstrom von 10 nA findet ebenfalls bei 6 V ein Übertrag gleicher Höhe statt, der sich jedoch zwischen den beiden Scangeschwindigkeiten nicht wesentlich unterscheidet. Ein Unterschied in der Strukturhöhe zwischen dem 2 V- und dem 4 V-Bereich existiert in beiden Aufnahmen nicht. Signifikanter ist der Unterschied in der Höhe des 4 V- bzw. 2 V-Bereichs zwischen den beiden Aufnahmen. Dieser ist für die höhere Scangeschwindigkeit deutlich geringer.

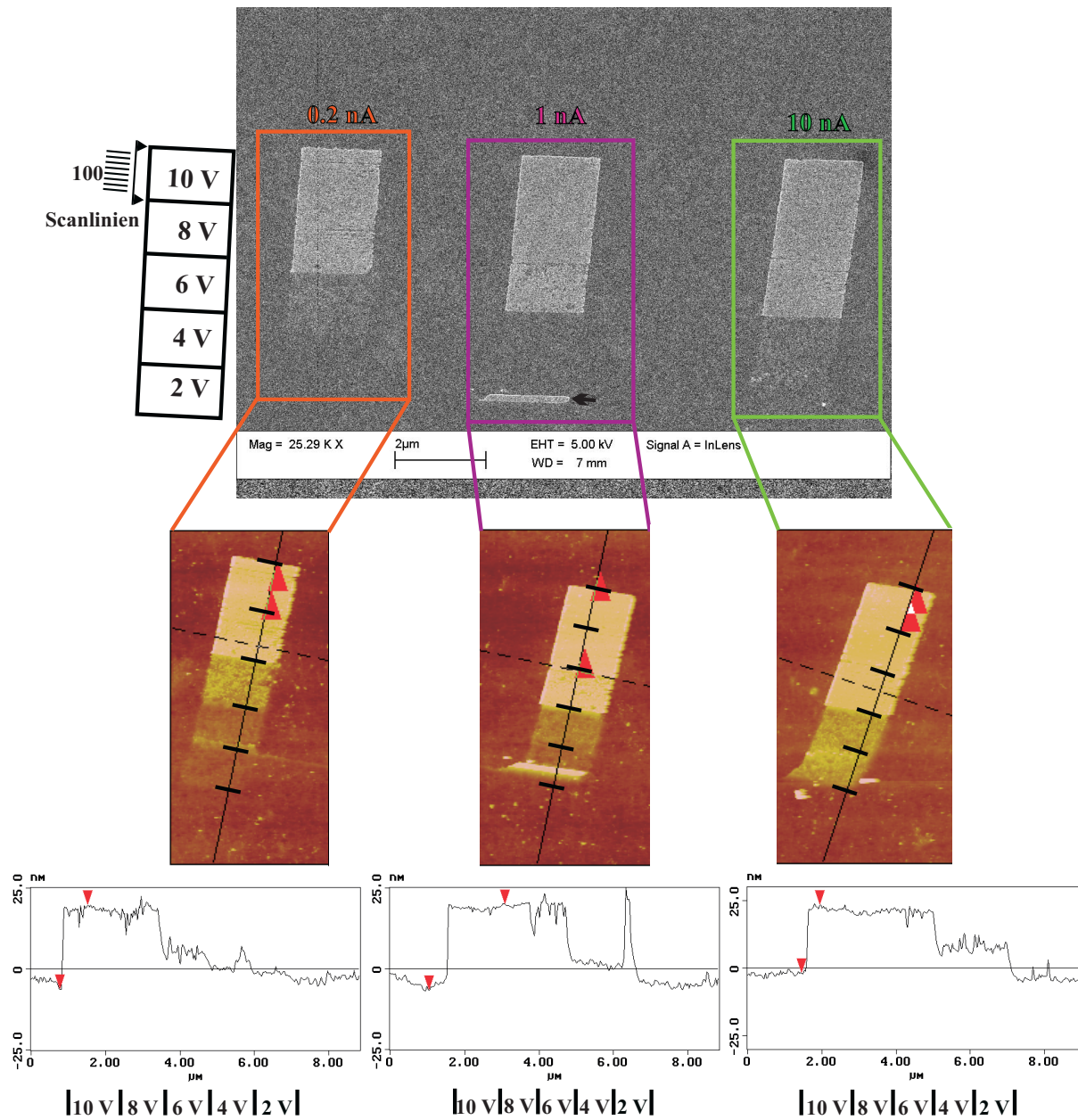


Abbildung 6.29: SEM- und AFM-Aufnahmen dreier Rechteckstrukturen, die das Übertragsverhalten des Resists bei unterschiedlichen Gapspannungen und Tunnelströmen zeigen. Die Scangeschwindigkeit betrug 6000 nm/s. Jede der drei Rechteckstrukturen besteht aus 5×100 dicht geschriebenen Linien. In dem durch den Pfeil (im SEM-Bild (1nA)) gekennzeichneten Bereich wurde versehentlich mit 10 V an Stelle von 2 V geschrieben. Die Linescans senkrecht durch die Strukturen liefern die Höhenanalyse. Es ist deutlich zu erkennen, dass ein Negativübertrag stattgefunden hat. In der SEM-Aufnahme sind die Bereiche die mit kleinen Spannungen geschrieben wurden nicht klar zu erkennen. Der Grund hierfür ist der geringe Höhenunterschied.

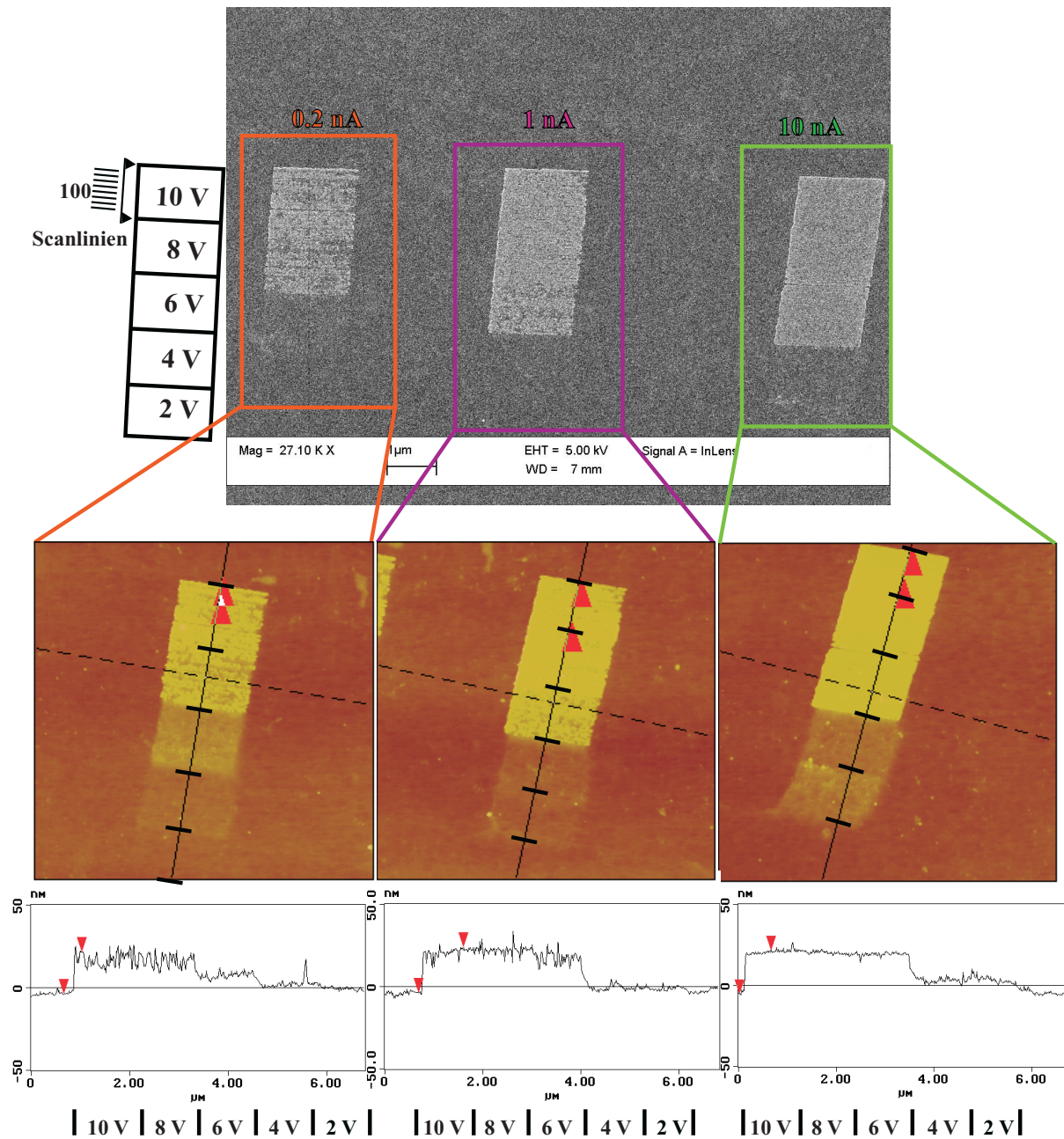


Abbildung 6.30: SEM- und AFM-Aufnahmen dreier Rechteckstrukturen, die das Übertragsverhalten des Resists bei unterschiedlichen Gapspannungen und Tunnelströmen zeigen. Die Scangeschwindigkeit betrug 12000 nm/s. Jede der drei Rechteckstrukturen besteht aus 5×100 dicht geschriebenen Linien. Die Linescans senkrecht durch die Strukturen liefern die Höhenanalyse. In der SEM-Aufnahme sind die Bereiche die mit kleinen Spannungen geschrieben wurden nicht klar zu erkennen. Der Grund hierfür ist der geringe Höhenunterschied.

Im Folgenden werden die in diesem Kapitel gewonnenen Ergebnisse kurz tabellarisch zusammengestellt.

System	Übertragsverhalten	Parameterbereich	Strukturtiefe bei 6000 nm/s	Strukturtiefe bei 12000 nm/s
HBP/Si	Negativübertrag	0,2 nA von 10 V – 8 V	25 nm	25 nm aber sehr viele Fehlstellen
		1 nA von 10 V – 6 V		25 nm aber bei 6 V viele Fehlstellen
		10 nA von 10 V – 6 V		25 nm
	stark reduzierter Negativübertrag	0,2 nA bei 6 V	12 nm aber sehr viele Fehlstellen	12 nm aber sehr viele Fehlstellen
		0,2 nA bei 4 V – 2 V	4 nm – 3 nm	ca. 3 nm
		1 nA bei 4 V – 2 V	8 nm	ca. 3 nm
		10 nA bei 4 V – 2 V	12 nm aber sehr viele Fehlstellen	8 nm

Tabelle 6.5: Zusammenfassung der Ergebnisse des Systems HBP/Si.

6.6 Ethoxybiphenylsilan (EBP) auf Siliziumoxid auf Silizium (111)

Abbildung 6.31 stellt noch einmal kurz die vorangegangenen Prozeßschritte schematisch dar und zeigt das Verhalten des Resists bezüglich der Übertragsrichtung.

Dass der Resist sich wie ein Negativresist verhält, belegt anschaulich Abbildung 6.32. Die 3D-Darstellung der AFM-Aufnahme zeigt einen Ausschnitt eines Quadrats, das in den SAM-Film mit einem Tunnelstrom von 10 nA einer Gapspannung von 2 V und einer Scangeschwindigkeit von 6000 nm/s geschrieben wurde. Die EBP-Schicht befand sich auf Si(111). Der Strukturübertrag erfolgte mit dem in Kapitel 5.2 beschriebenen Ätzprozeß. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Ätzlösung nur in dem nicht abgerasterten Bereich das Silizium angegriffen hat. Es hat also ein Negativübertrag stattgefunden.

Im folgenden werden die Ergebnisse vorgestellt, die das Verhalten des Resists bezüglich des Strukturübertrags bei den unterschiedlichen verwendeten Schreibparametern zeigen.

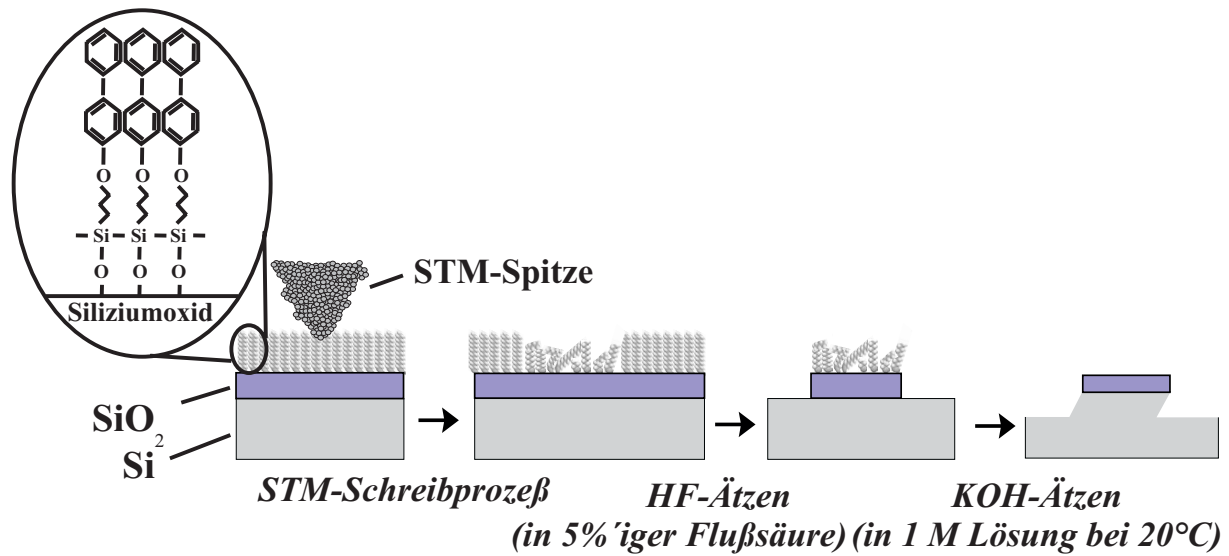


Abbildung 6.31: Schema des STM-Lithographieprozesses EBP/Si(111).

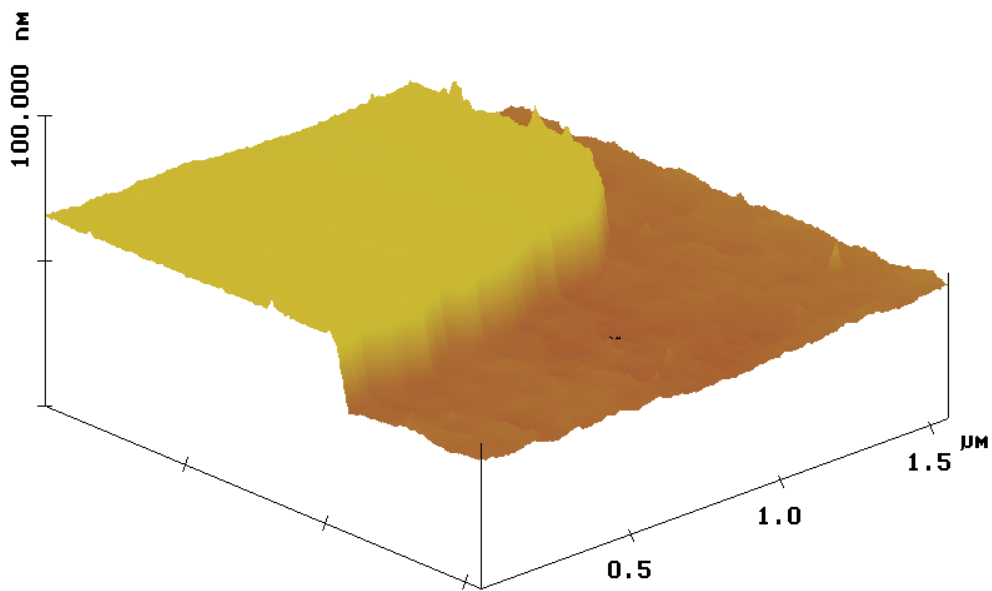


Abbildung 6.32: AFM-Aufnahme eines Ausschnitts eines Si-Quadrates geschrieben in EBP/Si(111). Es ist zu erkennen, dass ein Negativübertrag stattgefunden hat.

Hierzu wird sowohl auf den Einfluß der Gapspannung als auch auf den Einfluß der Tunnelströme (der Elektronendosis) eingegangen.

Um das Übertragsverhalten zu untersuchen, wurden vier rechteckige Strukturen geschrieben, die jeweils aus 5×20 Linien bestehen, wobei die Gapspannung von 2 V auf 10 V in 2 V Schritten nach jeweils 20 Scanlinien erhöht wurde, bzw. wobei die Gapspannung von 10 V auf 2 V in 2 V Schritten nach jeweils 20 Scanlinien erniedrigt wurde. Dies ist oben in Abbildung 6.33 skizziert. Hierbei handelt es sich um SEM-Aufnahmen dieses Probenbereiches. Die Scangeschwindigkeit betrug wegen der Vergleichbarkeit zu den bisherigen Messungen ebenfalls 6000 nm/s während des Schreibprozesses. Der Tunnelstrom wurde dabei von links nach rechts wie folgt variiert 10 nA, 0,1 nA, 1 nA und für die ganz rechte Struktur 10 nA. Es ist festzustellen, dass in dem 2 V Bereich bei 1 nA und 10 nA keine isolierten Linien zu erkennen sind. In den beiden Detailaufnahmen (3a und 4a), die den Übergangsbereich zwischen dem 2 V- und dem 4 V-Bereich zeigen, ist dieses Verhalten sehr deutlich zu sehen. Der Vergleich der beiden mit 10 nA Tunnelstrom geschriebenen Strukturen (1 und 4) zeigt, dass dieses Verhalten unabhängig davon ist, ob zuerst oder zuletzt mit 2 V Gapspannung geschrieben wurde. Beide Bereiche zeigen eine Linienverbreiterung. Dieses Verhalten ist auch in Abbildung 6.34 ersichtlich. Hierbei handelt es sich um eine AFM-Aufnahme der Struktur Nr. 4 aus Abbildung 6.33, die mit 10 nA und unterschiedlichen Gapspannungen (oben im Bild skizziert) geschrieben wurde. Diese Struktur ist in dieser AFM-Aufnahme um 180° Grad gedreht gegenüber der SEM-Aufnahme in Abbildung 6.33 abgebildet worden, wodurch hierbei der Bereich, der mit 2 V geschrieben wurde, in dieser Aufnahme unten ist und nicht wie in der SEM-Aufnahme oben. Die gesamte Struktur weist eine einheitliche Höhe auf. In dem Bildausschnitt Nr. 4a in Abbildung 6.34 ist dieser Übergangsbereich noch einmal etwas detaillierter aufgenommen worden. Es bestätigt sich, dass keine isolierten Linien in dem 2 V-Bereich vorhanden sind. Diese exemplarisch dargestellte AFM-Aufnahme belegt, dass die verwendeten Schreibparameter keinen Einfluß auf die Höhe der übertragenen Strukturen haben. In den mit 0,1 nA bzw. 1 nA geschriebenen Strukturen aus Abbildung 6.33, die hier nicht abgebildet wurden, ist ebenfalls kein signifikanter Höhenunterschied vorhanden.

Die SEM-Aufnahmen in Abbildung 6.33 bzw. die exemplarische AFM-Aufnahme in Abbildung 6.34 dokumentieren, dass es für das System EBP auf Si(111) kein äquivalentes Übertragsverhalten zu dem System HBP auf Si(111) gibt.

Die kleinsten erreichten Strukturen sind exemplarisch in den SEM-Aufnahmen in Abbildung 6.35 dargestellt und wurden bezüglich ihrer Breite analysiert. Es handelt sich hierbei um ein Satz paralleler Linien, die mit einem Tunnelstrom von 50 nA, einer Gapspannung von 10 V und einer Scangeschwindigkeit von 10000 nm/s geschrieben wurden. Das untere Bild ist eine detailliertere Aufnahme eines Ausschnitts aus dem oberen Bild. An der durch den Kreis markierten Stelle wurde exemplarisch die Breite eines Steges bestimmt. Die Breite beträgt an dieser Stelle nur 13,9 nm. Da die Breite der Linien schwankt, läßt sich sagen, dass diese ins Silizium übertragenen Linien im Mittel eine

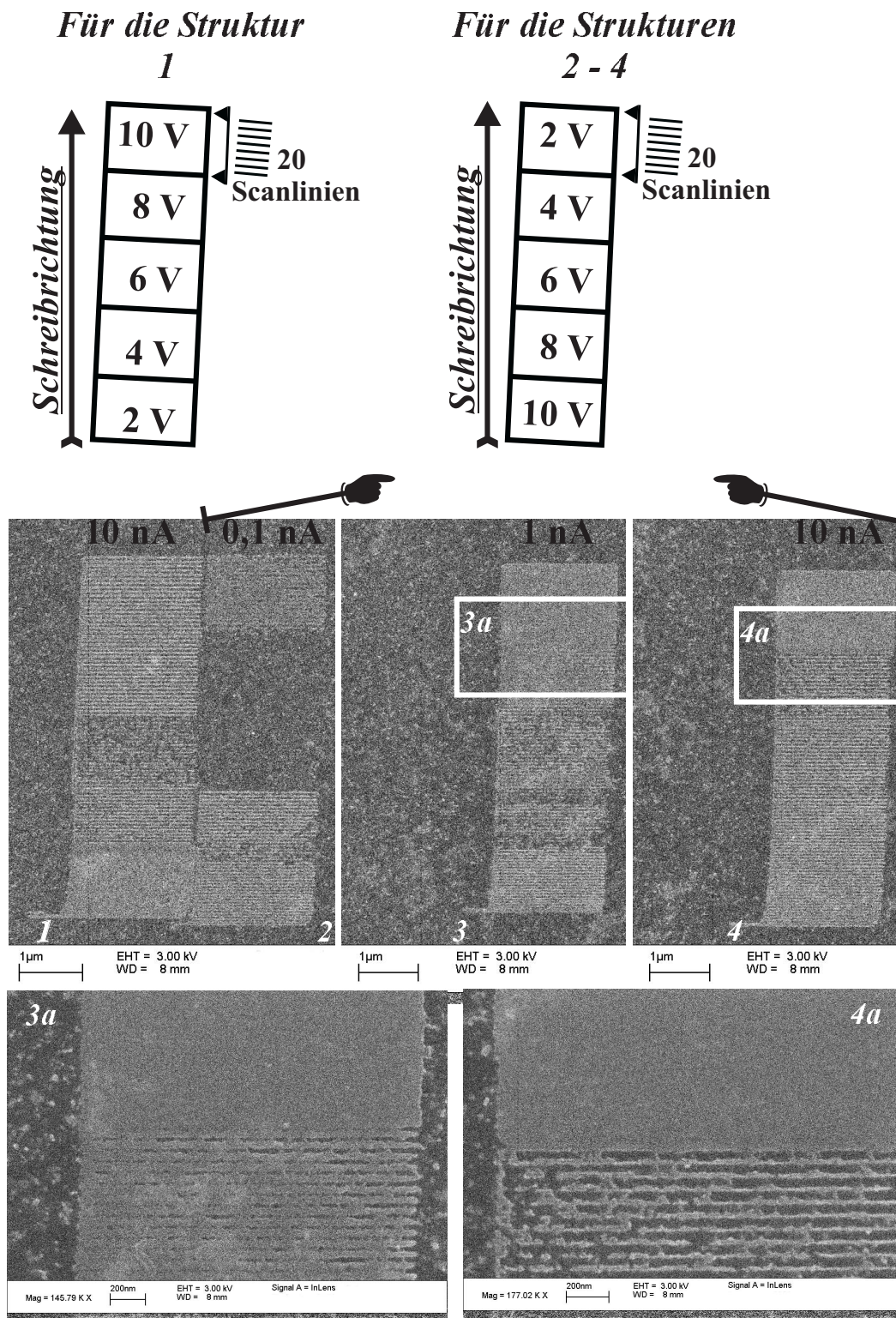


Abbildung 6.33: SEM-Aufnahme von vier Rechteckstrukturen, die das Übertragsverhalten des Resist bei unterschiedlichen Gapspannungen und Tunnelströmen zeigen. Die Scangeschwindigkeit betrug 6000 nm/s. Die Strukturen bestehen aus jeweils 5×20 Linien, wobei die Gapspannung wie oben im Bild skizziert variiert wurde.

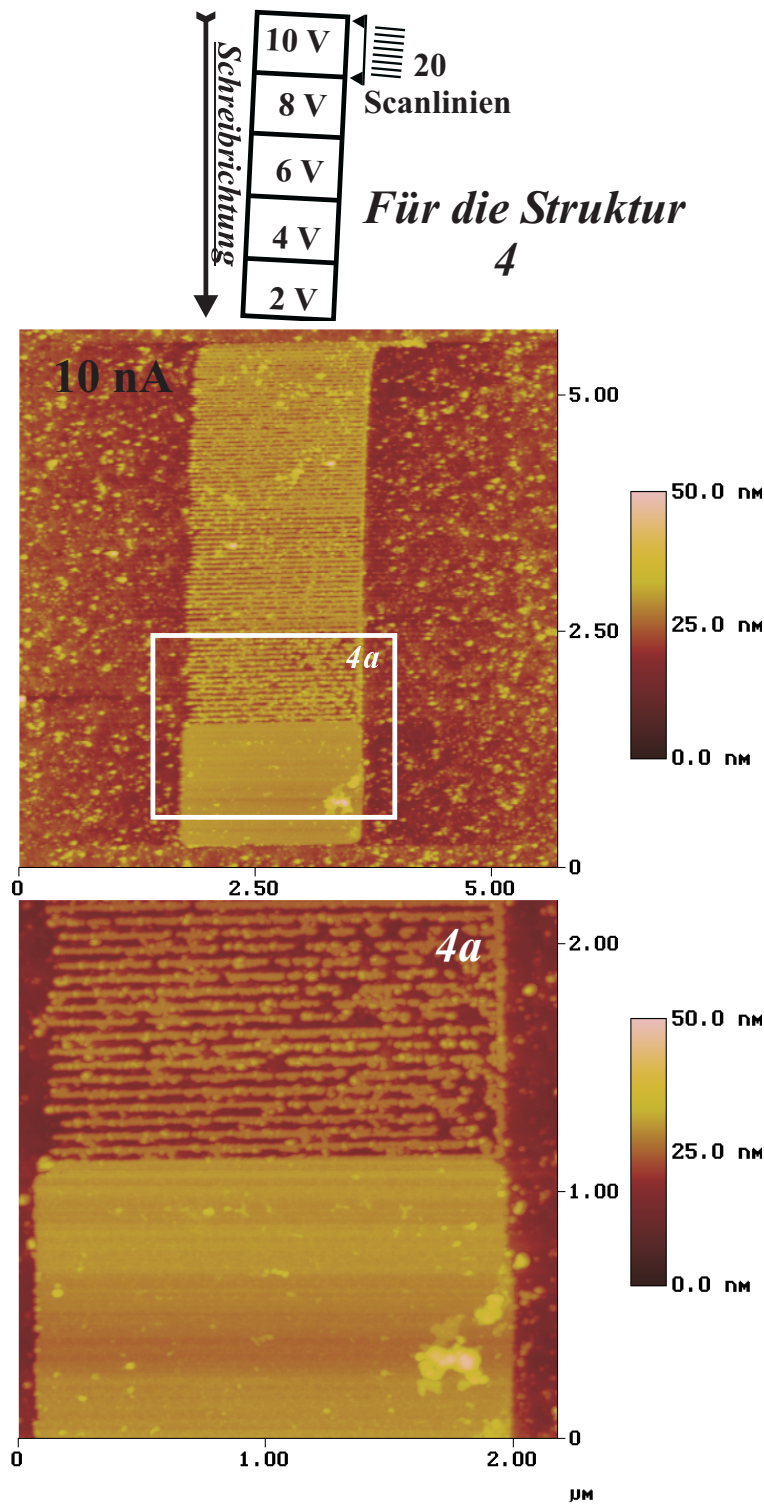


Abbildung 6.34: AFM-Aufnahme der Struktur Nr. 4 aus Abbildung 6.33, die mit 10 nA und unterschiedlichen Gapsspannungen geschrieben wurde. Die Scangeschwindigkeit betrug 6000 nm/s. Es ist kein Höhenunterschied in den Strukturen festzustellen. Die Detailaufnahme zeigt den Übergangsbereich von 2 V nach 4 V.

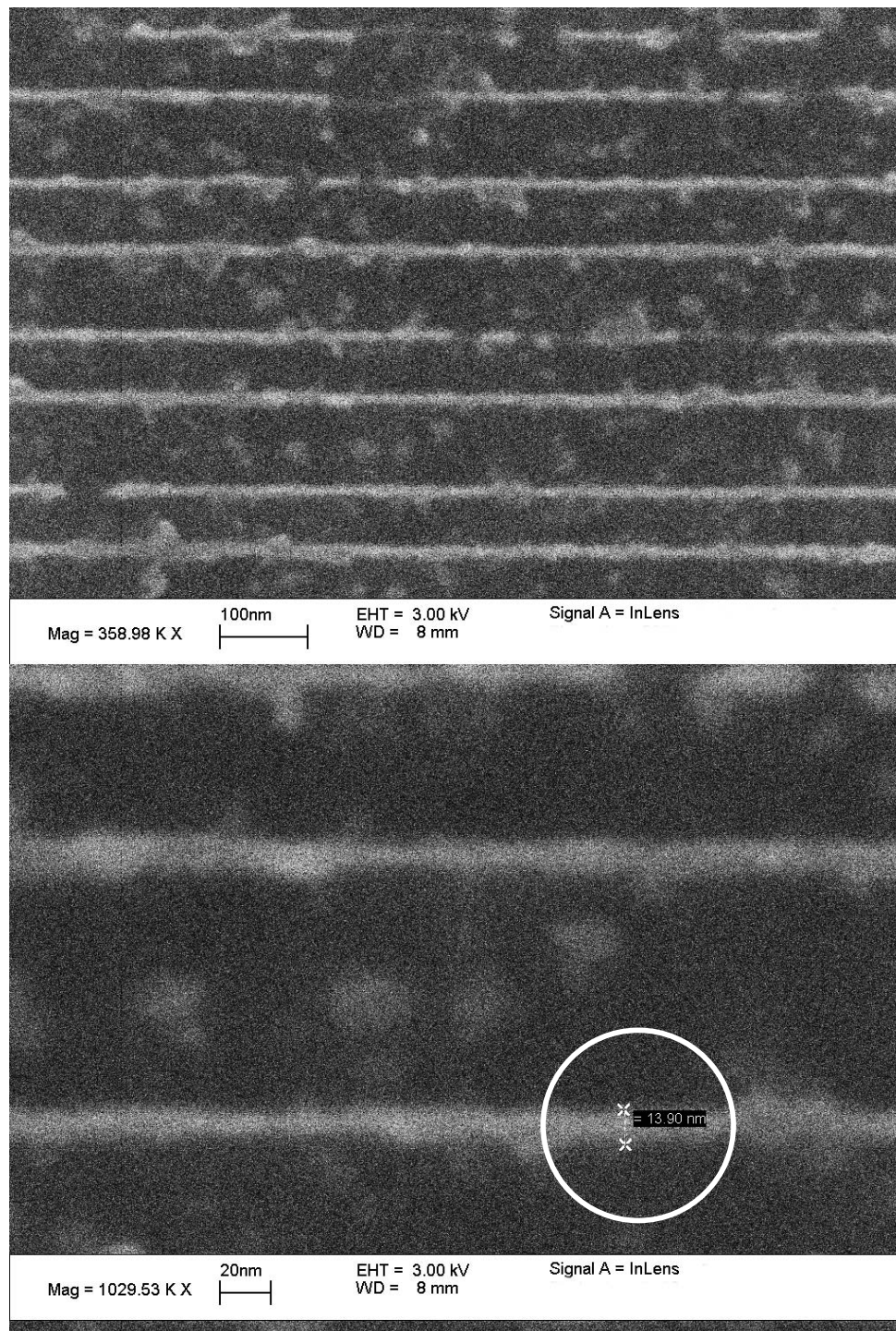


Abbildung 6.35: SEM-Aufnahme von in Silizium übertragenen parallelen Linien (die hellen Bereiche sind die geschriebenen Linien), die eine Breite von ca. 15 nm haben. Diese wurden mit einem Tunnelstrom von 50 nA, einer Gapspannung von 10 V und einer Scangeschwindigkeit von 10000 nm/s geschrieben.

Breite von ca. 15 nm haben.

Im Folgenden werden die in diesem Kapitel gewonnenen Ergebnisse kurz tabellarisch zusammengestellt.

System	Übertragsverhalten	Parameterbereich	Strukturbreite
EBP/Si	Negativübertrag für alle Parameter einheitlicher Höhe	von 2 V – 10 V für 0,1 nA – 50 nA	ca. 15 nm bei 13,5 nm Tiefe mit 50 nA und 10 V
		bei 2 V	Linienverbreiterung

Tabelle 6.6: Zusammenfassung der Ergebnisse des Systems EBP/Si.

Zum Abschluß dieses Kapitels wird nochmals die Besonderheit des Übertragsverhaltens ins Si(111) bezüglich der Schreiborientierung diskutiert. In Abbildung 6.36 ist andeutungsweise das in Kapitel 5.2 beschriebene anisotrope Ätzverhalten von Linien, die entlang der [110]-artigen Richtungen in der Oberfläche geschrieben wurden, zu erkennen. Die eine Seite der Stege ist im unteren Bereich angeschrägt. Dieses ergab sich unabhängig von der Scanrichtung. Diese Linien wurden mit einem Tunnelstrom von 10 nA, einer Gapspannung von 10 V und einer Scangeschwindigkeit von 6000 nm/s geschrieben. Sie haben eine Breite von 26 nm – 31 nm bei einer Tiefe von ca. 23 nm.

Des Weiteren wurde die SEM-Aufnahme einer geschriebenen Sternstruktur in Abbildung 6.37 und die AFM-Aufnahme eines ins Si(111) übertragenen Kreuzgitters in Abbildung 6.38 hierzu herangezogen. Der Stern wurde mit einem Tunnelstrom von 1 nA, einer Gapspannung von 10 V und einer Scangeschwindigkeit von 20000 nm/s in vier Teilen geschrieben, die jeweils um 45° Grad verdreht sind. Die gestrichelte Linie markiert die Lage des Teils des Sterns, der nach dem Ätzprozeß fehlt. Jeder Teil des Sterns besteht aus 30 dicht geschriebenen Linien. Die entstandene Struktur spiegelt sehr gut die Abhängigkeit des Übertrags ins Si(111) bezüglich der Schreiborientierung wieder. Der vierte Steg des Sterns fehlt, weil er entlang einer [211]-artigen Richtung geschrieben wurde und somit aufgrund des negativen Übertrags weggeätzt wurde. Ein weiterer Steg liegt um einige Grad verdreht gegenüber einer [211]-artigen Richtung und ist somit stark verjüngt worden. In Abbildung 6.38 ist das in Kapitel 5.2 beschriebene anisotropen Ätzverhalten sehr anschaulich zu erkennen. Hierbei handelt es sich um eine 3D-Darstellung einer AFM-Aufnahme eines ins Si(111) übertragenen Ausschnitts eines Kreuzgitters. Dieses wurde mit 5 V Gapspannung, 1 nA Tunnelstrom und einer Scangeschwindigkeit von 10000 nm/s geschrieben. Die Pfeile markieren die [211]-artigen Richtungen. Da in diesem Fall die horizontalen Linien entlang einer [110]-artigen Richtung in der Oberfläche geschrieben wurden, werden sie durch zwei parallele {111}-Flächen im Ätzprozeß stabilisiert (siehe Kapitel 5.2). Bei den dazu senkrecht geschriebenen Linien kommt es jeweils zwischen zwei Kreuzungspunkten zur Verjüngung der Stege in der Mitte. Dadurch bildet sich eine wabenartige Struktur aus, die durch die Lage der (111)-Ebenen bedingt ist (siehe Kapitel 5.2).

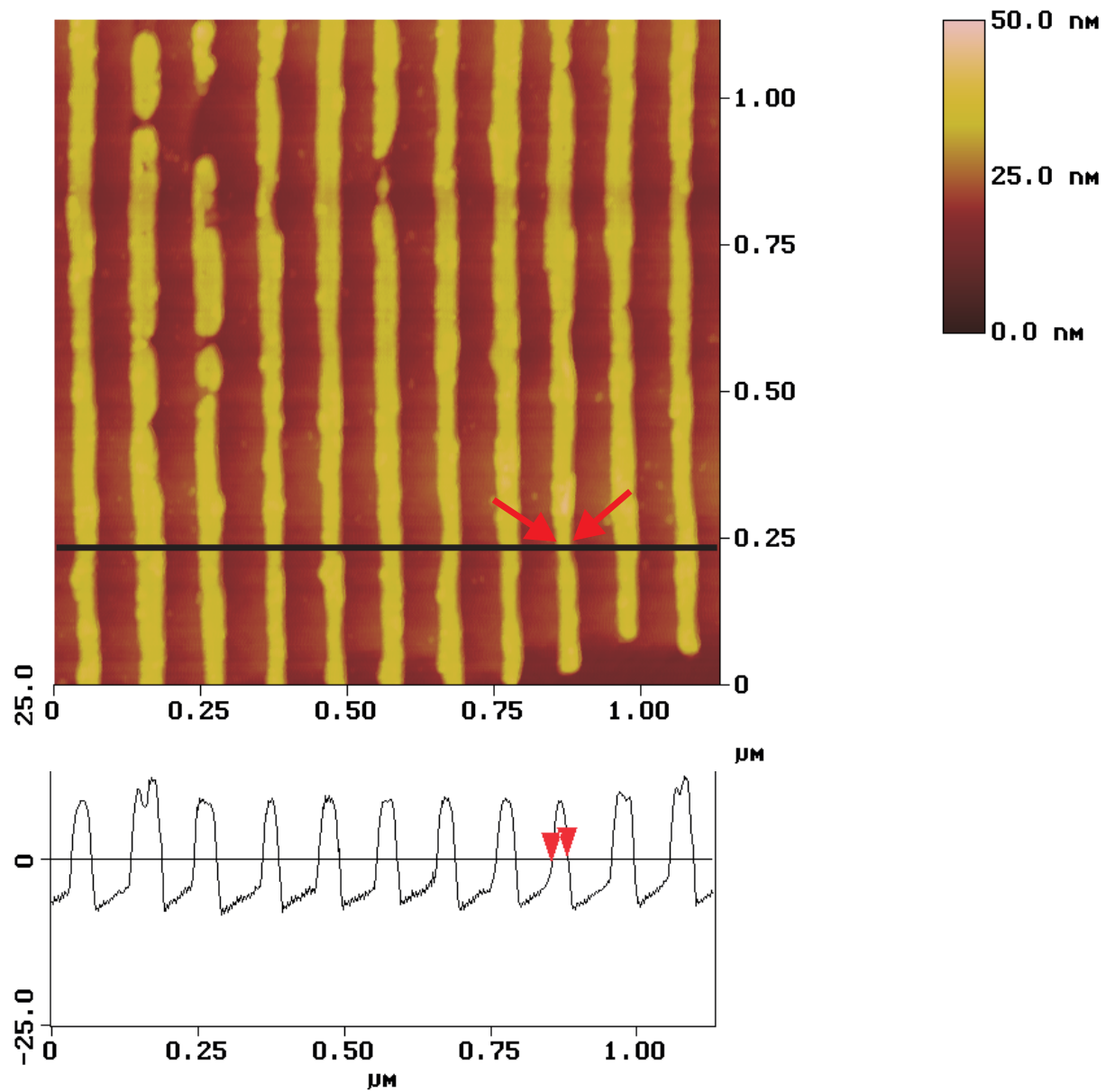


Abbildung 6.36: AFM-Aufnahme mit Linescan eines Bereiches, der mit 10 nA Tunnelstrom und 10 V Gapspannung geschrieben wurde. Die Scangeschwindigkeit betrug 6000 nm/s. Die Linien haben eine Breite von 26 nm – 31 nm. Sie wurden entlang einer [110]-artigen Richtung geschrieben.

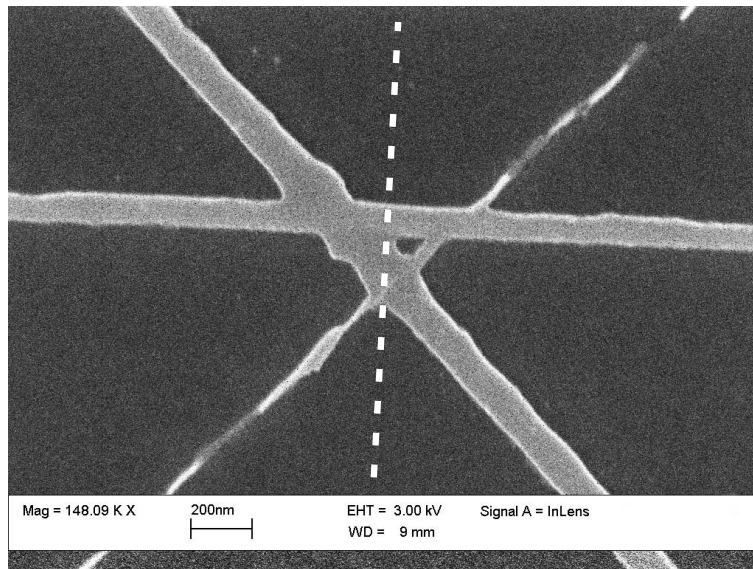


Abbildung 6.37: SEM-Aufnahme einer Sternstruktur, die das Übertragsverhalten ins Si(111) bezüglich der Schreiborientierung zeigt. Die gestrichelte Linie markiert die Lage des Teils des Sterns, der nach dem Ätzprozeß fehlt.

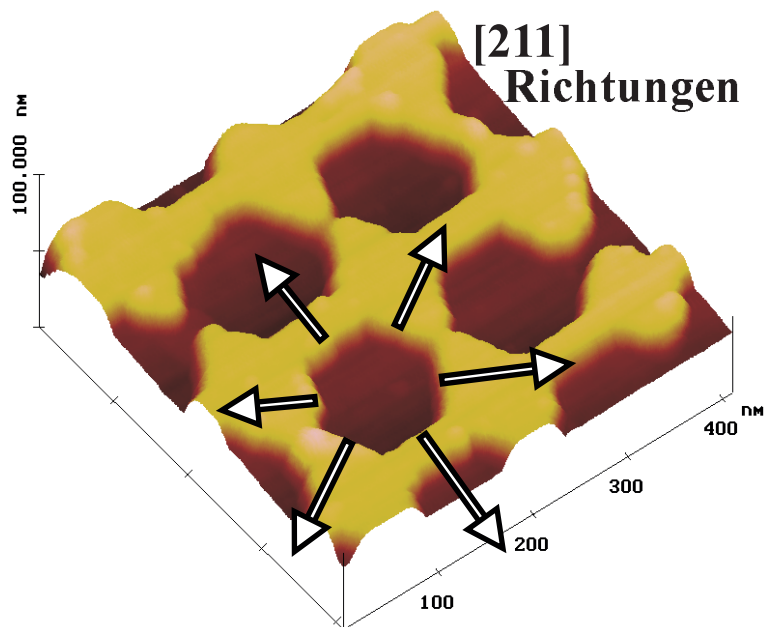


Abbildung 6.38: 3D-Darstellung einer AFM-Aufnahme eines ins Si(111) übertragenen Ausschnitts eines Kreuzgitters. Es ist deutlich das Übertragsverhalten ins Si(111) bezüglich der Schreiborientierung zu erkennen. Aufgrund des anisotropen Ätzverhalten entsteht eine Wabenstruktur. Die Pfeile markieren die [211]-artigen Richtungen.

6.7 Kurze Zusammenfassung der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die in den vorangegangenen Kapiteln gewonnenen Ergebnisse kurz tabellarisch zusammengestellt, um einen einfachen Überblick über die wesentlichen Ergebnisse zu erhalten. In Teil 1 sind die Systeme HDT/Au, NBPT/Au, OTMS/Cr und OTS/Si(100) zu finden. In Teil 2 die Systeme HBP/Si(111) und EBP/Si(111).

System	Übertragsverhalten	Untersuchter Parameterbereich
HDT/Au	Positivübertrag	Aufgrund früherer Arbeiten wurde nur 1 V, 1 nA verwendet $D_L = 0,5 \frac{\mu C}{cm}$
NBPT/Au	Positivübertrag	von 0,002 V – 4 V für 0,1 nA, 1 nA und 10 nA für 0,1 nA auch bei 6 V
	kein Übertrag sichtbar	0,1 nA für 8 V – 10 V 1 nA für 6 V, 8 V – 10 V 10 nA für 6 V, 8 V
	Negativübertrag	10 nA für 10 V
		Liniendosis D_L $0,33 \frac{\mu C}{cm} - 33 \frac{\mu C}{cm}$
OTMS/Cr	Positivübertrag bei allen Parametern unterschiedlicher Tiefe	1 V, 1 nA
		5 V, 1 nA
		10 V, 1 nA
		Liniendosis D_L $1 \frac{\mu C}{cm} - 6,6 \frac{\mu C}{cm}$
OTS/Si	Negativübertrag für alle Parameter einheitlicher Höhe	von 2 V – 10 V für 1 nA
		0,5 nA – 4 nA bei 10 V
		4 V Linienverbreiterung
		Liniendosis D_L $1 \frac{\mu C}{cm} - 40 \frac{\mu C}{cm}$

Tabelle 6.7: Zusammenfassung der Ergebnisse aller untersuchten Systeme: Teil 1.

System	Übertragsverhalten	Untersuchter Parameterbereich
HBP/Si	Negativübertrag	für 0,2 nA von 10 V – 8 V
		für 1 nA von 10 V – 6 V
		für 10 nA von 10 V – 6 V
	stark reduzierter Negativübertrag	für 0,2 nA von 6 V – 2 V
		für 1 nA von 4 V – 2 V
		für 10 nA von 4 V – 2 V
		Liniendosis D_L $0,33 \frac{\mu C}{cm} - 33 \frac{\mu C}{cm}$
EBP/Si	Negativübertrag für alle Parameter einheitlicher Höhe	von 2 V – 10 V für 0,1 nA – 50 nA
		2 V Linienverbreiterung
		Liniendosis D_L $0,33 \frac{\mu C}{cm} - 82,5 \frac{\mu C}{cm}$

Tabelle 6.8: Zusammenfassung der Ergebnisse aller untersuchten Systeme: Teil 2.

Kapitel 7

Interpretation der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die in Kapitel 6 vorgestellten Ergebnisse der unterschiedlichen Systeme verglichen. Es werden Systeme, die auf dem gleichen Substrat aufgewachsen sind, aber aus einem unterschiedlichen SAM-Film bestehen, bzw. Systeme, die aus dem gleichen SAM-Film bestehen, aber auf unterschiedlichem Substrat aufgewachsen sind, gegenübergestellt. Dadurch werden Unterschiede herausgearbeitet und Erklärungsansätze geliefert, die z.B. auf die verschiedenen Strukturierungsmechanismen hindeuten. Hierzu werden auch Ergebnisse aus der Literatur herangezogen, die mit anderen Lithographieverfahren durchgeführt wurden. Der Schwerpunkt der Arbeit lag jedoch nicht auf der vollständigen Klärung der Strukturierungsmechanismen, sondern bei der experimentellen Untersuchung der Erzeugung von künstlichen lateralen Strukturen im Nanometerbereich in unterschiedlichen Substraten durch den Einsatz geeigneter SAM-Resistmaterialien. Des Weiteren wird also auf die erreichten minimalen Strukturgrößen und deren limitierende Größen eingegangen. Hierbei wird auch auf den Vergleich mit Ergebnissen von anderen Arbeitsgruppen eingegangen.

7.1 Vergleich der Systeme HDT und N-BPT auf Gold

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse für die beiden unterschiedlichen Thiol-SAM-Filme, die auf Gold adsorbiert sind, miteinander verglichen. Diese SAM-Filme besitzen zum einen einen aliphatischen (bei HDT) bzw. zum anderen einen aromatischen (bei N-BPT) Spacer. Die Unterschiede, die daraus für den SAM-Film folgen, sind in Kapitel 2.2.1 und 2.2.2 detailliert beschrieben. Im folgenden wird auf die Sensitivität des Resists, den möglichen Strukturierungsprozeß und auf die minimalen erreichten Strukturgrößen eingegangen.

7.1.1 2D Strukturierbarkeit des Resists

Abbildung 6.5 aus Kapitel 6.1 (System HDT/Au) und Abbildung 6.13 aus Kapitel 6.2 (System N-BPT/Au) zeigen jeweils eine AFM-Aufnahme einer in den jeweiligen SAM-Film geschriebenen Kreuzgitterstruktur nach dem Ätzübertrag. Beide Strukturen wurden mit den gleichen Schreibparametern (Gapspannung 1 V, Tunnelstrom 1 nA und Scangeschwindigkeit 20000 nm/s) geschrieben und mit dem gleichen Ätzprozeß (gleiche Ätzlösung und Ätzzeit) in einen 30 nm dicken Goldfilm übertragen. Auffällig ist, dass die in N-BPT eingeschriebene Kreuzgitterstruktur deutlich erkennbar durch den Ätzprozeß in den Goldfilm übertragen wurde. Bei der in HDT geschriebenen Struktur ist nur der zuerst geschriebene Satz an Gitterlinien ins Gold übertragen worden, während die dazu senkrecht liegenden Linien nicht klar erkennbar sind. Diese treten nur dort auf, wo keine Strukturierung durch den ersten Liniensatz vorliegt. Eine Erklärung für diesen Effekt könnte zum einen in der unterschiedlichen Eindringtiefe der Spitze in den Film während des Schreibprozesses liegen, die aus der unterschiedlichen Leitfähigkeit der Molekülfilme resultiert (siehe Kapitel 2.2.1 und 2.2.2). Bei den im Konstantstrommodus geschriebenen Strukturen wird die Eindringtiefe der Spitze und somit die mechanische Manipulation im Falle des N-BPT deutlich geringer ausfallen als im Fall des HDT-Filmes. Einen weiteren Einfluß könnte der kleinere Verkippungswinkel von N-BPT gegenüber HDT ausüben. Dies könnte zur Folge haben, dass ein N-BPT-Film am Rand einer strukturierten Stelle stabiler ist und nicht so leicht verkippt und sich somit beim dazu senkrechten Abscannen besser modifizieren läßt.

7.1.2 Minimale erreichte Strukturgrößen

Die minimalen Strukturgrößen, die in Gold erzeugt werden konnten, unterscheiden sich nicht wesentlich. Sie liegen bei dem System HDT/Au bei $57 \text{ nm} \pm 3 \text{ nm}$ (FWHM) und bei N-BPT/Au bei $55 \text{ nm} \pm 3 \text{ nm}$ (FWHM) bei einer Tiefe von $15 \text{ nm} \pm 3 \text{ nm}$. Die Minimalgröße ist nicht durch die Strukturiergenauigkeit der SAM-Filme, sondern durch den Ätzübertrag der Strukturen in den polykristallinen Goldfilm beschränkt. Dies zeigen frühere Arbeiten für das System HDT/Au. Es konnte gezeigt werden, dass es möglich ist mittels STM-Lithographie eine Strukturgenauigkeit von mindestens 7 nm in HDT-Filmen zu erreichen [111]. Dass der Ätzprozeß der beschränkende Faktor ist, ist auch z.B. in Abbildung 6.16 in Kapitel 6.2 für das System N-BPT/Au zu erkennen. Einerseits sorgt die Polykristallinität des Goldfilm für die Kantenrauhigkeit bzw. die Schwankungen in der Tiefe der Strukturen, andererseits ist der isotrope Ätzprozeß in erster Linie für die Minimalbreite verantwortlich. Bei einer Tiefe der Strukturen von ca. 15 nm sorgt der isotrope Ätzprozeß für eine Verbreiterung der Ausgangsstruktur um das Doppelte der Tiefe also ca. 30 nm.

Die Lithographie mit HDT- bzw. BPT-SAMs als Resist für niederenergetisches als auch hochenergetisches Elektronenstrahlschreiben wurde experimentell untersucht [54,55,138,156,157]. Der Einsatz ultrascharfer Feldemitter bei der Belichtung mit

niederenergetischen Elektronen (10 eV – 50 eV) resultierte in minimalen Strukturgrößen von 25 nm [138,156]. Durch den Einsatz hochenergetischer Elektronenstrahlen (2,5 keV bzw. 200 keV) konnten Strukturbreiten bis ≈ 20 nm erreicht werden [61,157]. Der naßchemische isotrope Strukturübertrag wurde dabei ebenfalls als das zentrale Problem angesehen.

7.1.3 Modell der Strukturierungsprozesse

Früheren Arbeiten über das System HDT/Au haben gezeigt, dass die Schreibparameter (Tunnelstrom und Gapspannung) sehr wohl einen Einfluß auf die Strukturierung des HDT-Films haben [111,199,205,222,223]. Es gibt Parametersätze, für die keine sichtbare Strukturierung auftritt, eine Teilstrukturierung festzustellen ist bzw. eine vollständige Strukturierung stattfindet. Jedoch findet bei allen untersuchten Parametersätzen, die zu einer Strukturierung des SAM-Films führen, ein Positivübertrag der geschriebenen Strukturen statt.

Vergleicht man dieses mit den Ergebnissen für das System N-BPT/Au, so stimmt dieses für niedrige Gapspannungen bei unterschiedlichen Tunnelströmen (Elektronendosen) mit den Ergebnissen für HDT/Au überein. Dies zeigt z.B. Abbildung 6.9 in Kapitel 6.2 sehr deutlich. Für alle dort verwendeten Gapspannungen (0,002 V – 0,8 V) ist ein Positivübertrag festzustellen. Dies gilt auch noch für größere Gapspannungen bis 4 V (siehe Abbildung 6.10). Die Übertragsrichtung ist immer noch positiv, jedoch nimmt die Tiefe der Strukturen deutlich ab. Ein Grund hierfür könnte der steigende Abstand der Tunnelspitze von der Goldoberfläche mit steigender Spannung sein. Die Tunnelspitze taucht nicht mehr so tief in den SAM-Film ein. Bei noch höheren Spannungen, im Bereich 6 V – 8 V konnte kein Übertrag mehr festgestellt werden. Bei 10 V und einem Tunnelstrom von 10 nA, also einer hohen Elektronendosis (es ergibt sich eine Liniendosis von $33 \mu\text{C}/\text{cm}$) konnten hingegen erste Hinweise auf einen Negativstrukturübertrag gefunden werden, der auf eine beginnende Polymerisation der Biphenylketten hindeutet. Dies ist sehr deutlich in Abbildung 6.11 zu erkennen. Der abgerasterte Bereich hebt sich nach dem Ätzen gegenüber den umgebenen Bereichen deutlich ab. Das Verhalten des Biphenylfilms zeigt sehr deutlich, dass der Strukturierungsprozeß für dieses System kein rein mechanischer Prozeß sein kann. Dadurch könnte der Übergang von einem Positiv- zu einem Negativresist nicht erklärt werden.

Für den Strukturierungsprozeß an den hier verwendeten Hexadecanthalol bzw. Biphenylthiol Monolagen finden sich unterschiedliche Ansätze in der Literatur, z.B. werden diese Schichten mittels Elektronenstrahlschreibens oder Elektronen-Projektions-Lithographie belichtet [54,55,60,138,157]. NEXAFS-Analysen haben gezeigt, dass bei HDT bei kleinen Elektronendosen wie $30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ die C-C und C-H Resonanzen der Moleküle geschwächt sind und C=C Doppelbindungen auftreten. Außerdem sind weniger Übergänge der C 1s – Elektronen in Rydbergorbitale R^* zu beobachten [224]. Bei hochdosierter

Bestrahlung dominiert die Formation von intra- und /oder intermolekularen Doppelbindungen [138]. Die Reduktion der R^* -Resonanzintensität kann sowohl durch chemische wie auch durch strukturelle Änderungen des Thiolfilms hervorgerufen werden. Bei einer Dosis von $1000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ treten Störungen der C-S Bindung auf. 40 % der Gold-Thiolatbindungen werden zerstört, die Schichtdicke nimmt um 25 % ab und ein sogenanntes „cross-linking“, das Ausbilden von intramolekularen Doppelbindungen zwischen den C-Atomen, tritt auf [59,225]. Bei einer Belichtung mit 10 eV oder weniger ändert sich die Dicke der Schicht nicht, bei wenig höheren Energien nimmt sie geringfügig ab [138]. Die Bestrahlung mit niederenergetischen Elektronen führt also zu einer Unordnung bzw. Zerstörung des Films [226], was zur Folge hat, dass die Ätzlösung den SAM-Film an diesen Stellen durchdringen kann, also ein Positivübertrag stattfindet.

Auch bei den Biphenylen wurde der Einfluß niederenergetischer Elektronen auf die Ordnung der SAM-Filme untersucht. Infrarot Spektroskopie-Analysen haben gezeigt, dass bei 50 eV bei Elektronendosen von $3000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ es zu ersten „cross-links“ zwischen benachbarten Phenylringen durch elektroneninduziertes Brechen von C-H Bindungen kommt [60]. Die elektroneninduzierte Modifikation der BPT-Filme unterscheidet sich also signifikant von denen bei HDT-Filmen. Die BPT-Filme vernetzen untereinander und werden nicht zerstört. Dies hat zur Folge, dass die vernetzten Bereiche einem naßchemischen Ätzprozeß besser standhalten und somit ein Negativübertrag festzustellen ist [157]. Auch bei höheren Strahlenergien von 2,5 keV kommt es bei Elektronendosen über $20 \text{mC}/\text{cm}^2$ zu einem vollständigen Schutz des Goldfilms durch Quervernetzungen in den bestrahlten Bereichen [157].

Kombiniert man die in früheren Arbeiten gewonnenen Ergebnisse mit denen aus dieser Arbeit und berücksichtigt dabei die aus der Elektronenstrahl-Lithographie von diesen Systemen gewonnenen Erkenntnisse bezüglich des Strukturierungsprozesses, so stellt das Strukturieren mit dem STM einen sehr komplexen Prozeß dar. Eine Komponente dieses Prozesses wird elektrochemisch sein, also das Brechen von Bindungen durch die Bestrahlung mit Elektronen. Vor allem die Ergebnisse aus dem System N-BPT/Au deuten darauf hin, dass für größere Gapspannungen bei gleichzeitig hohen Elektronendosen der elektrochemische Anteil dominiert. Ein Ausbilden von „cross-links“ zwischen benachbarten Phenylringen, der für den Übergang von einem Positiv- zu einem Negativresist notwendig ist, läßt sich nicht durch ein mechanisches Entfernen des SAM-Resistfilms erklären. Durch die Position der Tunnelspitze, die während des Scans, vor allem bei kleinen Gapspannungen, in den SAM-Film tiefer eintaucht, wird ein mechanischer Anteil hinzukommen. Ein Indiz hierfür könnte die zunehmende Tiefe der übertragenen Strukturen bei sinkender Gapspannung sein. Die Modifikation durch die Tunnelspitze steigt und somit kann die Ätzlösung schneller den Goldfilm angreifen. Dadurch werden die Strukturen tiefer. Ein Einfluß der Gapspannung sowie eine Abhängigkeit von der Elektronendosis ist festzustellen.

In Abbildung 7.1 und 7.2 sind die möglichen Modelle für den oder die Strukturierungsprozesse noch einmal schematisch dargestellt.

Die Elektronendosis ist nicht explizit angegeben worden, da sie durch die Parameter

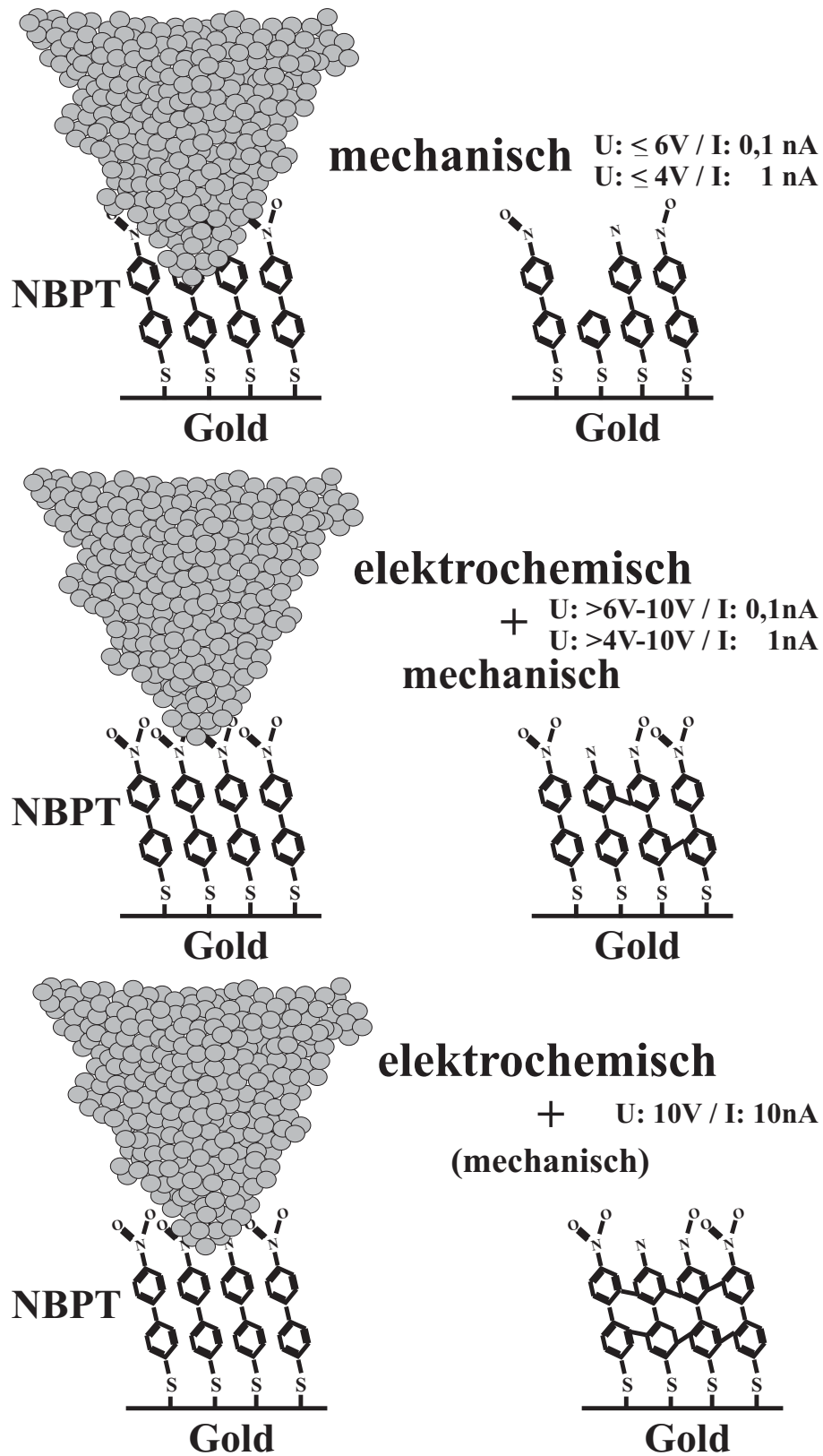


Abbildung 7.1: Schematisches Modell für den Strukturierungsprozeß in NBPT.

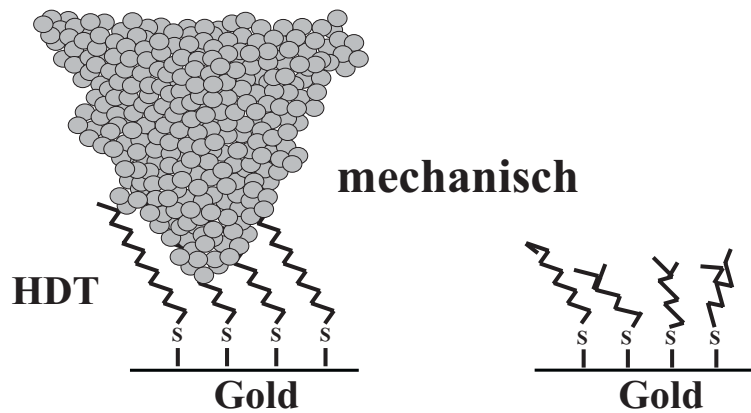


Abbildung 7.2: Schematisches Modell für den Strukturierungsprozess in HDT.

wie Tunnelstrom, Scangeschwindigkeit und Anzahl der Abrasterungsvorgänge gegeben ist. Durch die Position der Tunnelspitze, die während des Scans leicht in die SAM-Schicht eintaucht, lassen sich diese Parameter, aufgrund des mechanischen Anteils, nicht nur auf die Elektronendosis reduzieren. Sie läßt sich aber mit der in Kapitel 2.1.1 angegebenen Formel 2.3 bzw. 2.4 berechnen.

7.2 Vergleich der Systeme OTMS auf Chrom und OTS auf Silizium (100)

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse für die beiden Silan-SAM-Filme, die auf Chrom bzw. Si(100) adsorbiert sind, miteinander verglichen. Diese Filme bestehen nach der Präparation aus den gleichen Molekülen, sie unterscheiden sich in den Ausgangssubstanzen (siehe Kapitel 2.2.4 und 2.2.3) und bilden nur leicht unterschiedliche Filme [179]. Im folgenden wird auf die Funktionsweise des Resists und damit verknüpft auf den möglichen Strukturierungsprozeß und auf die minimalen erreichten Strukturgrößen eingegangen.

7.2.1 Funktionsweise des Resists

Bei dem System OTMS/Cr findet bei allen untersuchten Parametersätzen, die zur Strukturierung des SAM-Films untersucht wurden, ein Positivübertrag der geschriebenen Strukturen unterschiedlicher Tiefe statt. Vergleicht man dieses mit dem System OTS/Si, so findet hierbei ein Negativübertrag bei allen untersuchten Parametersätzen einheitlicher Tiefe statt. Da die SAM-Filme nahezu identisch sind (siehe Kapitel 2.2), ist davon auszugehen, dass bei beiden Systemen die SAM-Filme während der Strukturierung auf dieselbe Weise modifiziert werden. Um den Unterschied verstehen zu können, ist somit

das komplette System, also Substrat, SAM-Film und der angewendete Ätzprozeß, zu betrachten.

Das System OTMS/Cr verhält sich, abgesehen von der deutlich höheren Ätzresistenz des strukturierten SAM-Films bei 5 V Gapspannung gegenüber den übrigen verwendeten Gapspannungen (siehe Abbildung 6.18 in Kapitel 6.3), wie dieses nach den Untersuchungen an dem System HDT/Au zu erwarten war. Der SAM-Film besteht aus der gleichen Endgruppe und der Spacer besteht auch nur aus zwei CH_2 -Gruppen mehr. Somit ist es naheliegend, dass die Modifikation des SAM-Filmes prinzipiell nicht wesentlich unterschiedlich ist. In der Literatur gibt es Untersuchungen zur Strukturierung des System OTMS/Cr mittels Elektronenstrahl-Lithographie. Hierbei wurden Spannungen zwischen 80 V und 200 V und Elektronendosen von $50 \mu\text{C}/\text{cm}^2 - 550 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ eingesetzt [58]. Es wurde ebenfalls ein Positivübertrag festgestellt. Die Bestrahlung mit niederenergetischen Elektronen führt also wie bei dem System HDT/Au zu einer Unordnung bzw. Zerstörung des Films, was zur Folge hat, dass die Ätzlösung den SAM-Film an diesen Stellen besser durchdringen kann.

Untersuchungen, die sich mit dem Verhalten des OTS-Films auf Silizium bei der Bestrahlung mit Elektronen beschäftigen, zeigen, dass es bei kleinen Elektronendosen ($12 \mu\text{C}/\text{cm}^2 - 52 \mu\text{C}/\text{cm}^2$) zu einem Schrumpfen der Dicke (aus AFM und Elipsometriemessungen) und einer Abnahme der Hydrophobizität (aus Kontaktwinkelmessungen) kommt [227]. Bei höheren Elektronendosen ($120 \mu\text{C}/\text{cm}^2 - 350 \mu\text{C}/\text{cm}^2$) kommt es zu einem signifikanten Materialverlust (C-Atome) (aus AES- und XPS-Messungen) [227]. Dieses ist in Übereinstimmung zu den Untersuchungen an OTMS/Cr und zeigt, dass es durch den Einfluß von Elektronen nur zu einer Zerstörung des aliphatischen SAM-Films kommt und somit ein Positivübertrag stattfindet [63]. Ein Negativübertrag ist dadurch nicht zu erklären.

Die negative Übertragsrichtung bei dem System OTS/Si(100) läßt sich dadurch erklären, dass hierbei der SAM-Film nicht hauptsächlich die Funktion eines Ätzresists hat, sondern er dafür sorgt, dass Wassermoleküle im Oberflächenbereich gebunden werden die auch im UHV gebunden bleiben (siehe Kapitel 2.2.3 Abbildung 2.6). Dadurch kommt es beim Schreiben mit der STM-Spitze zu einer lokalen Oxidation der Siliziumoberfläche. Daraus ergibt sich, dass die Oxidschichtdicke in den abgescanten Bereichen dicker ist. Ein entscheidender Unterschied ist der angewendete zweistufige Ätzprozeß. Der erste Ätzschritt hat nun zur Folge, dass an den modifizierten Stellen Siliziumoxid stehen bleibt, gegenüber den nicht modifizierten Stellen. In diesen Bereichen wird sowohl der SAM-Film als auch die Oxidschicht durch die Flußsäure entfernt. Im zweiten Ätzschritt wird nun die so entstandene Oxidmaske zum Übertragen der Strukturen ins Silizium genutzt. So findet also ein Negativübertrag statt. Dass nicht der Oxidmantel, der die zum Schreiben benutzten Wolframspitzen umgibt, für die lokale Oxidation verantwortlich ist, konnte dadurch gezeigt werden, dass entsprechende Ergebnisse auch mit Platin-Iridium-Spitzen erzielt werden konnten. In Abbildung 7.3 ist ein Ausschnitt einer hier exemplarisch dargestellten SEM-Aufnahme von parallelen Linien, die mit einer Platin-Iridium-Spitze in OTS

geschrieben wurden, nach dem Ätzübertrag zu sehen.

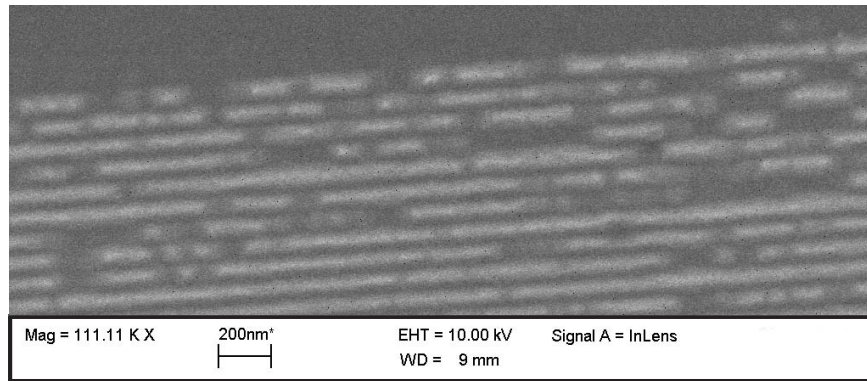


Abbildung 7.3: Ausschnitt einer SEM-Aufnahme von parallelen Linien, geschrieben mit einer Pt/Ir Spitze in OTS, nach dem Ätzübertrag. Diese parallelen Linien wurden mit einem Tunnelstrom von 1 nA, einer Gapspannung von 10 V und einer Scangeschwindigkeit von 10000 nm/s geschrieben. Die hellen Bereiche sind die geschriebenen Linien.

In der Literatur finden sich viele Beispiele, in denen ein AFM bzw. STM eingesetzt wird, um spitzeninduzierte lokale Oxidation von z.B. Siliziumoberflächen an Luft bei definierter Luftfeuchtigkeiten (z.B. 10% – 95%) zu erzeugen [228–230]. Ausgenutzt wird hierbei zur Oxidation der Wasserfilm, welcher sich auf der Siliziumoberfläche bildet.

Betrachtet man nun die höhere Ätzresistenz des Systems OTMS/Cr bei 5 V so läßt sich dieses wie folgt erklären: Eine höhere Ätzresistenz aufgrund einer Quervernetzung der SAM-Moleküle ist aufgrund von Ergebnissen aus der Literatur auszuschließen [157]. Es kommt lediglich zu einer Zerstörung der aliphatischen Ketten und nicht zu einer definierten Vernetzung. Der SAM-Film ist nach der Präparation nahezu identisch mit dem OTS-Film. Somit werden in ihm ebenfalls Wassermoleküle im Oberflächenbereich gespeichert. Es wird also beim Schreiben mit der STM-Spitze ebenfalls zu einer lokalen Oxidation der Chromoberfläche kommen. In der Literatur finden sich ebenfalls viele Beispiele, in denen ein AFM bzw. STM eingesetzt wird, um spitzeninduzierte lokale Oxidation von Metalloberflächen zu erzeugen [231]. Dass nun trotzdem ein Positivübertrag stattfindet, wird auf den Ätzprozeß zurückzuführen sein. Der SAM-Film hält den Ätzlösungen besser stand als dieses bei dem HF-Ätzen für das System OTS/Si der Fall ist. Die reduzierte Ätztiefe zwischen 5 V und 10 V könnte auf den größeren Abstand zwischen Spitze und Chromoberfläche zurückzuführen sein. Dass die Struktur bei 1 V am tiefsten ist, könnte dadurch erklärt werden, dass bei dieser Spannung eine Oxidation noch nicht auftritt oder eine untergeordnete Rolle spielt. In diesem Fall fungiert der SAM-Film wie bei dem System HDT/Au. Es wird die Hydrophobizität ausgenutzt, so dass es zu einem Positivübertrag kommt. Für diesen Fall (1 V) wird das schematische Modell wie in Abbildung 7.2 aussehen.

In Abbildung 7.4 ist das mögliche Modell für den Strukturierungsprozeß (für den

übrigen untersuchten Parameterbereich) noch einmal schematisch dargestellt.

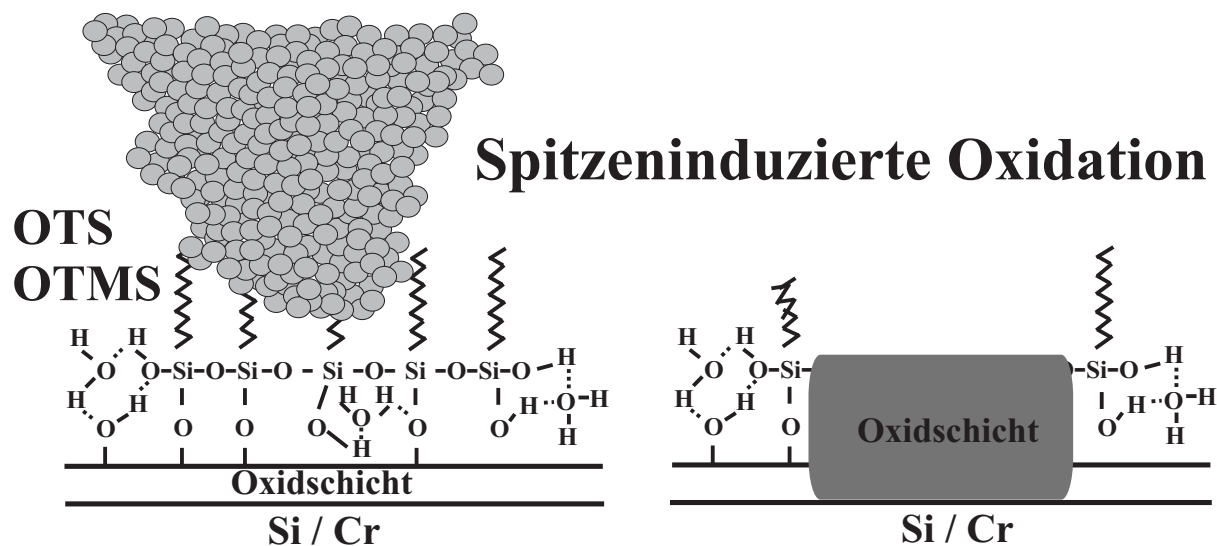


Abbildung 7.4: Schematisches Modell für den Strukturierungsprozeß in OTS/OTMS.

7.2.2 Minimale erreichte Strukturgrößen

Betrachtet man die minimalen erzielten Strukturbreiten für das System OTMS/Cr, so erweist sich das Problem des naßchemischen selektiven Ätzens der polykristallinen Chromschichten als gravierende Einschränkung. Bei Abbildung 6.20 handelt es sich um eine SEM-Aufnahme von parallelen Linien einer Periode von 220 nm. Die Linien weisen eine Breite von ca. 180 nm auf und sind durch die Chromschicht geätzt. Dass diese Strukturen so viel breiter sind als die, die in Gold übertragen wurden, hängt jedoch auch damit zusammen, dass die Strukturen in Gold nur ca. 15 nm tief waren und nicht wie hier ca. 60 nm. Der naßchemische Ätzprozeß in Chrom wie in Gold ist ein isotroper Prozeß, der für die starke Verbreiterung bei steigender Tiefe der Strukturen verantwortlich ist.

Die minimalen erzielten Strukturbreiten für das System OTS/Si(100) betragen 35 nm bei einer Tiefe von 30 nm. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Ätzübertrag ins Silizium stark anisotrop ist. Dies sorgt dafür, dass die Strukturen eine sehr geringe Kantenrauigkeit aufweisen und nicht wesentlich verbreitert werden (siehe Kapitel 5.2).

Auch die Lithographie mit OTS-SAMs als Resist für Elektronenstrahlschreiben wurde experimentell untersucht. Es wurden Elektronenstrahlenergien von 1–50 keV eingesetzt. Durch den Einsatz von Rasterelektronenmikroskopen zum Schreiben mit Energien von 20 keV bzw. 50 keV konnten minimale Strukturbreiten bis ≈ 30 nm bzw. 25 nm in Silizium nach dem Ätzübertrag erreicht werden [57,232,233].

7.3 Vergleich der Systeme OTS und HBP bzw. EBP auf Silizium

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse für die SAM-Filme, die auf Silizium adsorbiert wurden, miteinander verglichen. Neben der Gemeinsamkeit, nach der die HBP- bzw. EBP-SAM-Filme jeweils auf Si(111) präpariert wurden, enthält bei beiden Systemen der Spacer zwei Phenylringe. Dies sorgt im Gegensatz zu dem System OTS auf Si(100), welches eine Alkylkette als Spacer besitzt, zu einer höheren Leitfähigkeit. Andererseits sind die OTS- bzw. EBP-SAM-Filme jeweils durch die gleiche Kopfgruppe an die Oxidschicht der jeweiligen Siliziumsubstrate gebunden. Aufgrund der vorhandenen Oxidschicht wurde für diese beiden Systeme für den Strukturübertrag ein zweistufiger Ätzprozeß angewendet. Im Gegensatz zu dem einstufigen Ätzprozeß für das System HBP auf Si(111). Im Folgenden wird auf die Funktionsweise des Resists und damit verknüpft auf den möglichen Strukturierungsprozeß und auf die minimalen erreichten Strukturgrößen eingegangen.

7.3.1 Minimale erreichte Strukturgrößen

Auf die minimalen erzielten Strukturbreiten für das System OTS/Si(100) ist schon in Kapitel 7.2.2 eingegangen worden. Es konnten minimale Linienbreiten von 35 nm erzielt werden. Die besten Ergebnisse wurden jedoch mit dem System EBP/Si(111) erzielt. Hierbei betrug die minimale Breite von geschriebenen Linien nach dem Ätzübertrag ins Si(111) nur ca. 15 nm (siehe Abbildung 6.35). Mit dem STM erzeugte Strukturen dieser Größe können also sowohl mit den durch Elektronenstrahlschreiben als auch mittels Elektronen Projektionslithographie erzeugten Strukturen bezüglich der Strukturgrößen konkurrieren.

7.3.2 Modell der Strukturierungsprozesse

Auf das System OTS auf Si(100) ist bezüglich des Strukturierungsprozesses bzw. der Funktionsweise des Resists in Kapitel 7.2 schon ausführlich eingegangen worden. Diese Ergebnisse werden in diesem Kapitel mit denen für die Systeme HBP- bzw. EBP auf Si(111), die im folgenden kurz zusammengefaßt vorgestellt werden, verglichen.

Bei dem System EBP/Si(111) findet bei allen untersuchten Parametersätzen, die zur Strukturierung des SAM-Films untersucht wurden, ein Negativübertrag der geschriebenen Strukturen einheitlicher Höhe statt. Bei dem System HBP/Si(111) findet bei allen untersuchten Parametersätzen, die zur Strukturierung des SAM-Films untersucht wurden, ebenfalls ein Negativübertrag der geschriebenen Strukturen statt, jedoch haben diese Strukturen keine einheitliche Höhe. Es ist eine starke Abhängigkeit des Strukturübertrags von der Gapspannung festzustellen. Dies sieht man sehr deutlich in Abbildung 6.29 und 6.30, im Vergleich zu Abbildung 6.33 und 6.34 in denen das Übertragsverhalten des Systems EBP/Si(111) dargestellt ist.

Das Übertragsverhalten des System EBP/Si(111) ähnelt sehr stark dem System OTS

auf Si(100). Es ist auch bei sehr kleinen Gapspannungen und Tunnelströmen (Elektronendosen) ein Übertrag festzustellen. Dieses, die Diskrepanz zum System HBP/Si(111) bezüglich des Übertrags und die Tatsache, dass OTS- bzw. EBP-SAM-Filme jeweils durch die gleiche Kopfgruppe an die Oxidschicht der jeweiligen Siliziumsubstrate gebunden sind, läßt vermuten, dass hierbei der EBP-Film nicht hauptsächlich die Funktion eines Resists hat. Sondern er sorgt dafür, dass im UHV Wassermoleküle im Oberflächenbereich gebunden werden (siehe Kapitel 2.2.3). Dadurch kommt es beim Schreiben mit der STM-Spitze zu einer lokalen Oxidation der Siliziumoberfläche. Die einheitliche Höhe der übertragenen Strukturen wird somit auf den in Kapitel 5.2 beschriebenen zweistufigen Ätzprozeß zurückzuführen sein.

Das Schwellwertverhalten des Ätzübertrags für die HBP-Filme stellt sich so dar, wie man es erwarten würde, wenn man von einer chemischen Modifikation der Filme durch die Bestrahlung mit Elektronen ausgeht. Es ist eine bestimmte Energie der Elektronen erforderlich, um C-H Bindungen zu brechen, die anschließend zu einer Quervernetzung der Phenylringe führen. Hinzu kommt, dass die Elektronendosis einen Einfluß auf die Vollständigkeit der Vernetzung hat und sich somit in der Qualität der übertragenen Strukturen widerspiegelt. Je mehr die HBP-Filme vernetzt sind, um so besser halten sie der Ätzlösung stand. Es findet also ein Negativübertrag statt. Diese Ergebnisse sind also konform zu denen aus der Literatur, die in Kapitel 7.1.3 angeführt wurden, bezüglich der Strukturierung von aromatischen Filmen, am Beispiel von BPT, mit Elektronen hoher bzw. niedriger Energie [60,157]. Dass hingegen auch bei kleinen Gapspannungen eine gewisse Resistenz der strukturierten Bereiche festzustellen ist, läßt sich aufgrund der geringen Energie der Elektronen so nicht durch eine Vernetzung des Films durch die Bestrahlung erklären. Hierbei wird sicherlich wieder der Einfluß der STM-Spitze zum Tragen kommen. Denkbar wäre zum einen eine leichte mechanische Modifikation des SAM-Films durch die STM-Spitze, also einem mechanischen Aufreißen des Films, das anschließend eine leichte Vernetzung zur Folge hat. Diese Bereiche widerstehen dem naßchemischen Ätzangriff dadurch etwas länger als die nicht modifizierten Bereiche. Ein anderer denkbarer Erklärungsansatz ist eine leichte Oxidation der Siliziumoberfläche durch die STM-Spitze, da HBP-Filme nicht die Möglichkeit bieten, Wasser in Oberflächennähe zu binden. Hierbei muß jedoch die Dicke der erzeugten Oxidschicht viel geringer sein als bei den EBP-Filmen, da sie nur eine geringe Ätzresistenz zeigen.

In Abbildung 7.5 und 7.6 sind die möglichen Modelle für die Strukturierungsprozesse noch einmal schematisch dargestellt.

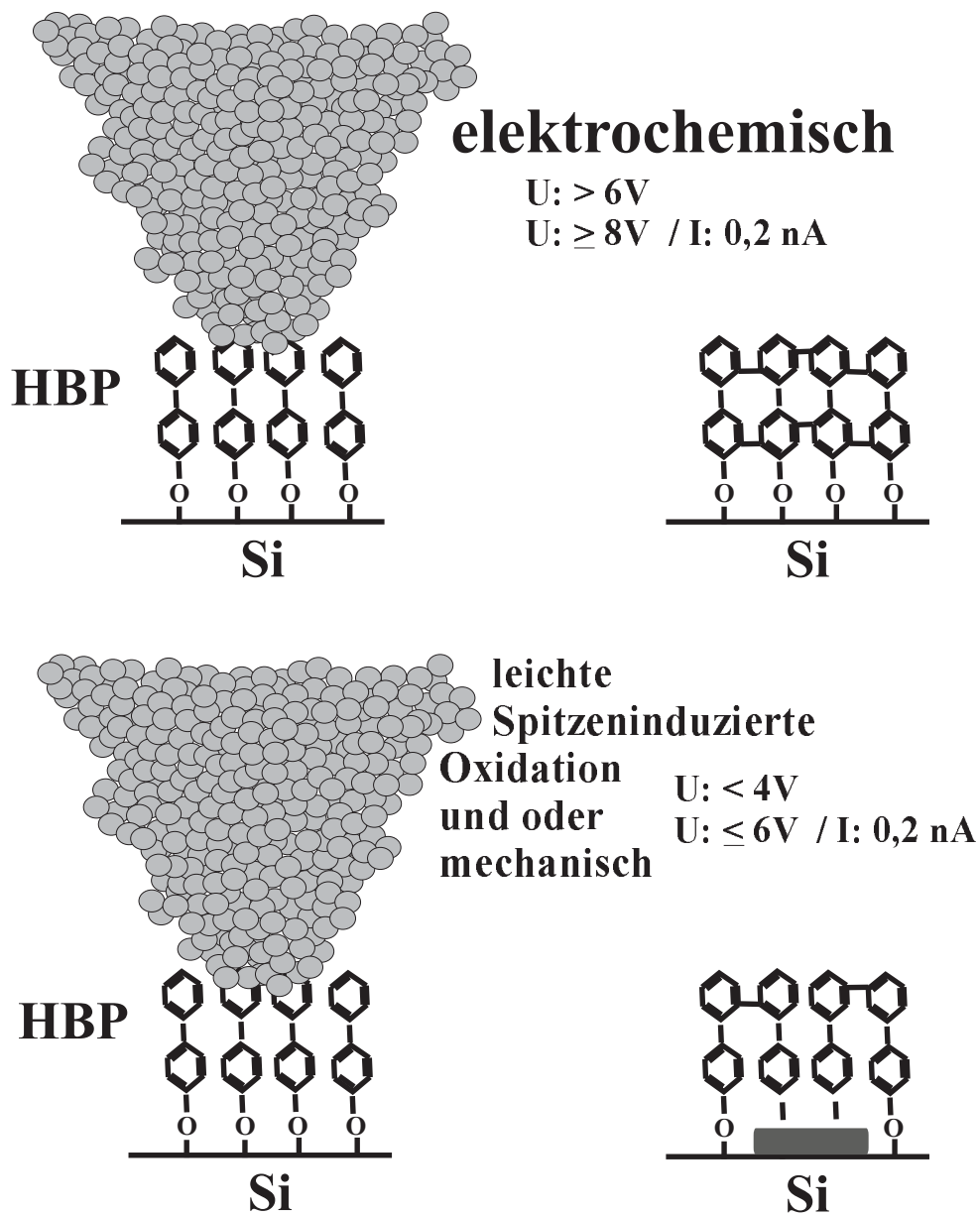


Abbildung 7.5: Schematisches Modell für den Strukturierungsprozeß in HBP.

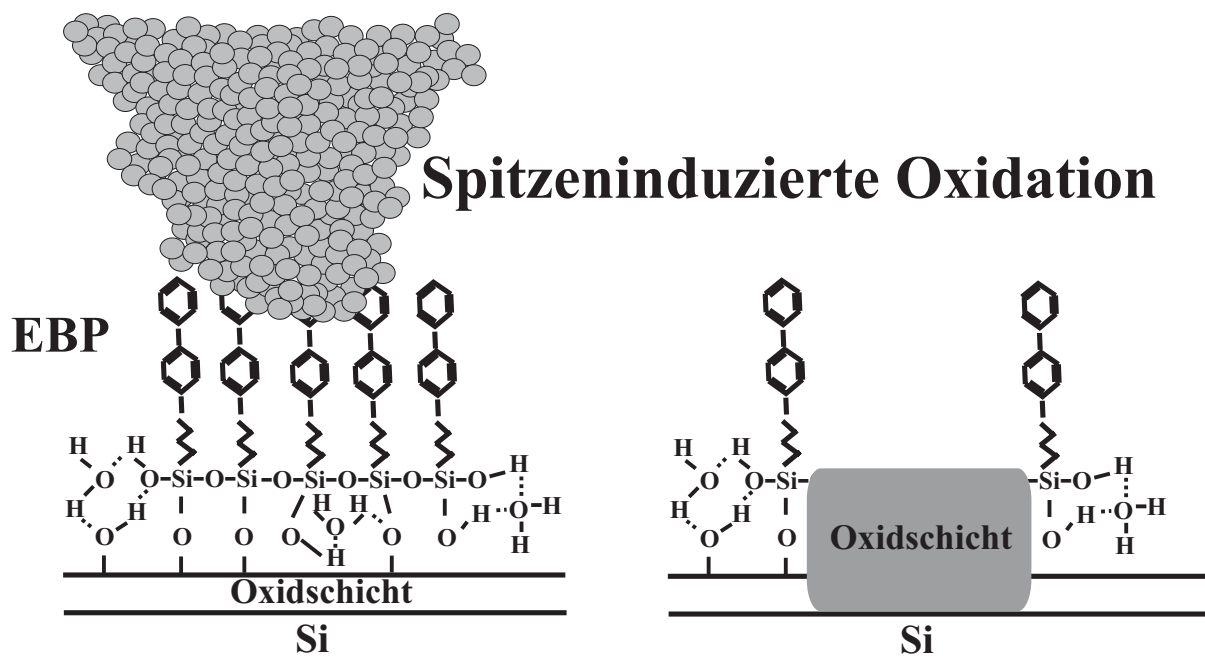


Abbildung 7.6: Schematisches Modell für den Strukturierungsprozeß in EBP.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Herstellung und die Charakterisierung von Nanostrukturen in unterschiedlichen Materialien. Die Herstellung der lateralen Nanostrukturen erfolgte mittels UHV–STM–Schreibens in unterschiedliche SAM–Resists, die als Maske für den naßchemischen Strukturübertrag in das jeweilige Substrat dienen. Die zentrale Fragestellung ist die Eignung der verschiedenen untersuchten SAM–Filme für die Erzeugung kleinster Strukturen. Untersucht wurden die minimal zu erreichenden Strukturgrößen der in die jeweiligen Substrate übertragenen Strukturen. Diese wurden mit Ergebnissen aus der Literatur verglichen, die mit anderen Lithographieverfahren erzielt wurden, um die Eignung der SAM–Filme für die STM–Lithographie zu zeigen. Durch Variation der Schreibparameter ist eine Abhängigkeit des Ätzübertrags vom Schreibprozeß untersucht worden, um somit Rückschlüsse auf den Strukturierungsprozeß zu erhalten. Hierzu sind Untersuchungen anderer Arbeitsgruppen herangezogen worden, die weitere Indizien lieferten.

Es wurden Nanostrukturen in Goldschichten unter dem Einsatz von Alkylthiolschichten (Hexadecanthiol HDT) sowie Biphenylthiolschichten (N–BPT) erzeugt. Hierbei erwiesen sich die Biphenylthiole im Vergleich zu den Alkylthiolen hinsichtlich ihrer Eignung für die STM–Strukturierung als deutlich überlegen bezüglich der strukturgetreuen Übertragung. Die minimalen Strukturgrößen, die erreicht werden konnten (HDT/Au 57 nm, N–BPT/Au 55 nm), sind nicht durch die Strukturiergenauigkeit der SAM–Filme, sondern durch den Ätzübertrag der Strukturen in die polykristallinen Goldfilme beschränkt. Bei den N–BPT–Schichten ist sowohl ein Positiv– als auch Negativübertrag in Abhängigkeit von den verwendeten Schreibparameter festzustellen. Dieses Verhalten der Biphenylfilme zeigt sehr deutlich, dass der Strukturierungsprozeß für dieses System kein rein mechanischer Prozeß sein kann.

Ferner wurden mittels UHV–STM geschriebene Nanostrukturen, erzeugt in Alkylsilanschichten (Octadecyltrichlorsilan OTS und Octadecyltrimethoxysilan OTMS), in Chromschichten sowie Si(100)–Wafersubstrate übertragen. Betrachtet man die Ergebnisse für das System OTMS/Cr, so erweist sich das Problem des naßchemischen selektiven Ätzens der polykristallinen Chromschichten als gravierende Einschränkung der erreichten mini-

malen Strukturgrößen. Bei dem System OTMS/Cr findet bei allen untersuchten Parametersätzen, die zur Strukturierung des SAM-Films untersucht wurden, ein Positivübertrag statt.

Die negative Übertragsrichtung bei dem System OTS/Si(100) läßt sich dadurch erklären, dass hierbei der SAM-Film nicht hauptsächlich die Funktion eines Resists hat. Durch die Kopfgruppe des SAM-Films werden im UHV Wassermoleküle im Oberflächenbereich gebunden und es kommt beim Schreiben mit der STM-Spitze zu einer lokalen Oxidation der Siliziumoberfläche. Durch den zweistufigen Ätzprozess kommt es zum Negativübertrag, da die Flußsäure den SAM-Film an den nicht modifizierten Stellen und das natürliche Oxid darunter schneller angreift als die modifizierten Stellen (im Gegensatz zu dem Ätzprozess bei dem System OTMS/Cr). Das Übertragsverhalten für das System Ethoxybiphenylsilan (EBP)/Si(111) unterstützt diese These, da bei allen untersuchten Parametersätzen, die zur Strukturierung des SAM-Films untersucht wurden, ein Negativübertrag gleicher Strukturhöhe stattfindet und dieser SAM-Film die gleiche Kopfgruppe wie der OTS-Film hat. Im Gegensatz dazu zeigen jedoch die Hydroxybiphenyl-Filme (HBP) ein stark von der Gapspannung abhängiges Übertragsverhalten, wie es für aromatische SAMs zu erwarten ist. Dabei wird der Negativübertrag durch eine Quervernetzung des Films erklärt. Diese Ergebnisse sind konform zu Untersuchungen aus der Literatur, die das Verhalten aromatischer SAMs bei der Bestrahlung mit Elektronen hoher als auch niedriger Energie zeigen. Die minimalen Strukturgröße, die in einkristallinem Silizium erreicht werden konnten, wurden mit dem System (EBP)/Si(111) erzielt. Hierbei betrug die minimale Breite von geschriebenen Linien nach dem Ätzübertrag nur ca. 14 nm.

Aufgrund der erreichten Dimensionen der Strukturen in einkristallinem Silizium kann die STM-Lithographie auf aromatischen SAM-Monolagen durchaus mit den kleinsten mittels Elektronenstrahlolithographie erzeugten Strukturen konkurrieren, jedoch eignet sich das STM-Schreiben durch die niedrigen Schreibgeschwindigkeiten nicht für großflächige Anwendungen. Durch den Einsatz von vielen Spitzen, die parallel arbeiten, könnte dieses Manko vielleicht ausgeräumt werden. Den Ansatz, mehrere Spitzen parallel zu betreiben, verfolgen z.B. IBM-Forscher um Gerd Binnig. Ihr entwickeltes „Millipede“ besteht aus einem Raster von 1024 Cantilevern eines Kraftmikroskops. Diese Entwicklung stellt einen Ansatz für eine mechanisch arbeitende Nano-Speichertechnik dar [234].

Eine Möglichkeit, die die Qualität der Strukturierung steigern könnte, bzw. mehr Aufschluß über den Strukturierungsprozeß liefern könnte, könnte die Entkoppelung der Schreibparameter von der Abstandsregelung darstellen. Hierzu wäre der Einsatz eines Hybrids aus AFM und STM denkbar wie es von Wilder et.al. [235,236] vorgeschlagen wurde.

Literaturverzeichnis

- [1] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel. *Appl. Phys. Lett.* **40** (1982) 178.
- [2] G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber and E. Weibel. *Phys. Rev. Lett.* **49** (1982) 57.
- [3] E.J. van Loenen, D. Dijkkamp, A.J. Hoeven, J.M. Lenssinck and J. Dieleman. *Appl. Phys. Lett* **55** (1989) 1312.
- [4] H.J. Mamin, P.H. Guethner and D. Rugar. *Phys. Rev. Lett.* **65** (1990) 2418.
- [5] M.A. McCord and R.F.W. Paese. *Appl. Phys. Lett.* **50** (1987) 569.
- [6] E.E. Ehrichs, S. Yoon and A.L. de Losanne. *Appl. Phys. Lett.* **53** (1988).
- [7] R.M. Silver, E.E. Ehrichs and A.L. de Lozanne. *Appl. Phys. Lett.* **51** (1987) 247.
- [8] D.M. Eigler and E.K. Schweizer. *Nature* **344** (1990) 524.
- [9] J. Jersch and K. Dickmann. *Appl. Phys. Lett.* **68** (1996) 868.
- [10] S. Hosaka, H. Koyanagi, A. Kikukawa, Y. Maruyama and R. Imura. *J. Vac. Sci. Technol.* **B 12** (1994) 1872.
- [11] T.A. Jung, A. Moser, H.J. Hug, D. Brodbeck, R. Hofer, R.H. Hidber and U.D. Schwarz. *Ultramicroscopy* **42–44** (1992) 1446.
- [12] R. Wiesendanger. *Appl. Surf. Sci.* **54** (1992) 271.
- [13] A. Born and R. Wiesendanger. *Appl. Phys. A* **68** (1999) 131.
- [14] M.F. Crommie, C.P. Lutz and D.M. Eigler. *Science* **262** (1993) 218.
- [15] J.A. Stroscio and D.M. Eigler. *Science* **254** (1992) 1319.
- [16] L. Koenders. *Physik in unserer Zeit* **6** (1993) 260.
- [17] Ph. Avouris. *Acc. Chem. Res.* **28** (1996) 95.
- [18] H. Uchida, D.H. Huang, J. Yoshinobu and M. Aono. *Surf. Sci.* **287/288** (1993) 1065.

- [19] E. Dubois and J.L. Bubbendorff. *Solid-State Electronics* **43** (1999) 1085.
- [20] J. Jersch, F. Demming, L.J. Hildenhagen and K. Dickmann. *Appl. Phys. A* **66** (1998) 29.
- [21] J. Jersch and K. Dickmann. *Appl. Phys. Lett.* **68** (1996) 868.
- [22] V. Heisig, 1998. Bau und Inbetriebnahme eines Miniatur-Stickstofflasers und dessen Einsatz im FOLANT-Verfahren. Diplomarbeit, Universität Bielefeld.
- [23] J. Vrodoulis, 2000. Erzeugung und Simulation von Nanostrukturen auf Goldoberflächen mit dem "FOLANT"-Verfahren im Ultrahochvakuum. Diplomarbeit, Universität Bielefeld.
- [24] J.J. Cuomo, S.M. Rosnagel and W.D. Westwood. *Reactive Ion Etching: Handbook of Plasma Processing Technology*, Seite 196. Noyes Publication, Park Ridge, New Jersey, 1990.
- [25] H. Jansen, H. Gardeniers, M. de Boer, M. Elwenspoek and J. Fluitman. *J. Micro-mech. Microeng.* **6** (1996) 14.
- [26] J.A. Mucha and D.W. Hess. *Advances in Chemistry Series, 219. Introduction to Microlithography*, Seite 215. American Chemical Society, New York, 1983.
- [27] M.J. Lercel, H.G. Craighead, A.N. Parikh, K. Seshadir and D.L. Allara. *J. Vac. Sci. Technol. A* **14(3)** (1996) 1844.
- [28] C.K. Malek, F.R. Ladan, R. Rivoira and T. Moreno. *J. Vac. Sci. Technol.* **B 9** (1991) 3315.
- [29] D.M. Tennant, J.E. Bjorkholm, R.M. D'Souza, L. Eichner, R.R. Freeman, J.Z. Pastalan, L.H. Szeto, T.E. Jewell, W.M. Mansfield, W.K. Waskiewicz, D.L. White, D.L. Windt and A.A. MacDowell. *J. Vac. Sci. Technol.* **B 9** (1991) 3176.
- [30] N.M. Ceglio, A.M. Hawryluk, D.G. Stearns, D.P. Gaines, R.S. Rosen and S.P. Vernon. *J. Vac Sci Technol.* **B 8** (1990) 1325.
- [31] S. Katagiri, M. Ito, H. Yamanashi, E. Seya and T. Terasawa. *Proc. SPIE* **34** (1996) 2723.
- [32] P.P. Naulleau, K.A. Goldberg, E.H. Anderson, D. Attwood, P. Batson, P. Denham, E. Gullikson, B. Harteneck, B. Hoef, K. Jackson, D. Olynick, S. Rekawa, F. Salmassi, J. Bokor K. Blaedel, H. Chapman, L. Hale, R. Souffi, E. Spiller, D. Sweeney, J. Taylor, C. Walton, G. Cardinale, A. Ray-Chaudhuri, A. Fisher, G. Kubiak, D. O'Connell, R. Stulen, D. Tichenor, C.W. Gwyn, P.-Y. Yan and G. Zhang. *Proc. SPIE* **4688-05** (2002) in press.

- [33] B.W. Smith. *Optics and Photonics News* **8 (3)** (1997) 23.
- [34] H.-J. Stock, 1998. Herstellung von Multischicht-Röntgenspiegeln für verschiedene Wellenlängenbereiche von 2 bis 30 nm. Dissertation, Universität Bielefeld.
- [35] A. Kloidt, 1993. Herstellung von Multischichtsystemen durch Elektronenstrahlverdampfung für die Anwendung als Röntgenspiegel. Dissertation, Universität Bielefeld.
- [36] U. Kleineberg, 1994. Röntgenoptische Charakterisierung von Multilayer-Röntgenspiegeln und Multilayer-Röntgenreflexionsgittern. Doktorarbeit, Universität Bielefeld.
- [37] K. Hilgers, 1995. Untersuchungen an Multischichten-Röntgenspiegeln durch AES-Tiefenprofilanalyse und Raster-AES. Dissertation, Universität Bielefeld.
- [38] O. Wehmeyer, 1999. Asphärische Multilayer-Spiegel mit lateraler Periodendickenvariation als Kondensorreflexionsoptiken für laserinduzierte Plasmalichtquellen: Anwendung im Labor – EUV – Photoemissions – Elektronenmikroskop. Dissertation, Universität Bielefeld.
- [39] Y.C. Lim, 2001. Herstellung und Charakterisierung von schmalbandigen EUV-Multischichtspiegeln für Anwendungen mit fs-HHG-Strahlung. Dissertation, Universität Bielefeld.
- [40] F. Hamelmann, S.H.A. Petri, A. Klipp, G. Haindel, J. Hartwich, L. Dreeskornfeld, U. Kleineberg, P. Jutzi and U. Heinzmann. *Thin Solid Films* **338** (1999) 70.
- [41] F. Hamelmann, G. Haindel, J. Hartwich, A. Klipp, E. Majkova, U. Kleineberg, P. Jutzi and U. Heinzmann. *Mater. Res. Soc. Proc.* **555** (1999) 19.
- [42] U. Kleineberg, K. Osterried, H.-J. Stock, D. Menke, B. Schmiedeskamp, D. Fuchs, P. Müller, F. Scholze, K.F. Heidemann, B. Nelles and U. Heinzmann. *Appl. Opt.* **34** (1995) 6506.
- [43] U. Kleineberg, H.-J. Stock, D. Menke, K. Osterried, B. Schmiedeskamp, U. Heinzmann, D. Fuchs, P. Müller, F. Scholze, K.F. Heidemann, B. Nelles and J. Thieme. *Proc. SPIE* **2279** (1994) 269.
- [44] E. Spiller. *Soft X-Ray Optics.*, Seite 243. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham/Washington, 1994.
- [45] M.P. Kowalski, R.G. Guddace, J.F. Seely, J.C. Rife, K.F. Heidemann, U. Heinzmann, U. Kleineberg, K. Osterried, D. Menke and W.R. Hunter. *Optics Letters* **22** (1997) 834.
- [46] M.A. Kastner. *Ann. Phys.* **11–12** (2000) 885.

- [47] U.F. Keyser, H.W. Schumacher, U. Zeitler and R.J. Haug. *Appl. Phys. Lett.* **76(4)** (2000) 457.
- [48] D.W. Carr and H.G. Craighead. *J. Vac. Sci. Technol B* **15(6)** (1997) 2760.
- [49] S. Evoy, A. Olkhovets, L. Sekaric, J.M. Parpia, H.G. Craighead and D.W. Carr. *App. Phys. Lett.* **77(15)** (2000) 2397.
- [50] M.L. Roukes. *Technical Digest of the 2000 Solit-State Sensor and Actuator Workshop* (2000) 1–10.
- [51] S.W. Turner, A.M. Perez, A. Lopez and H.G. Craighead. *J. Vac. Sci. Technol B* **16(6)** (1998) 3835.
- [52] A. Ulman. An Introduction to Ultra-Thin Organic Films:. In *Langmuir-Blodgett to Self-Assembly*, Seiten 237–425. Academic Press, New York, 1991.
- [53] F. Schreiber. *Prog. Surf. Sci.* **65** (2000) 151–256.
- [54] H.U. Müller, C. David, B. Völkel and M. Grunze. *J. Vac. Sci. Technol.* **B13** (1995) 2846.
- [55] C. David, H.U. Müller, B. Völkel and M. Grunze. *Microelectronic Engineering* **30** (1996) 57.
- [56] M.J. Lercel, H.G. Craighead, A.N. Parikh, K. Seshadir and D.L. Allara. *Appl. Phys. Lett.* **68(11)** (1996) 1504.
- [57] C.S. Whelan, M.J. Lercel, H.G. Craighead, K. Seshadir and D.L. Allara. *Appl. Phys. Lett.* **69(27)** (1996) 4245.
- [58] R. Hild, C. David, H.U. Müller, B. Völkel D.R. Kayzer and M. Grunze. *Langmuir* **14(2)** (1998) 342.
- [59] M. Zahrnikov, W. Geyer, A. Gölhäuser, S. Frey and M. Grunze. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **1** (1999) 3163.
- [60] W. Geyer, V. Stadler, W. Eck, M. Zahrnikov, A. Gölhäuser and M. Grunze. *Appl. Phys. Lett.* **75** (1999) 2401.
- [61] A. Gölhäuser, W. Geyer, V. Stadler, W. Eck and M. Grunze. *J. Vac. Sci. Technol. B* **18(6)** (2000) 3414.
- [62] W. Eck, V. Stadler, W. Geyer, M. Zharnikov, A. Gölhäuser and M. Grunze. *Adv. Mater.* **12(11)** (2000) 805.
- [63] W. Geyer, V. Stadler, W. Eck, A. Gölhäuser, M. Grunze, M. Sauer, T. Weimann and P. Hinze. *J. Vac. Sci. Technol. B* **19(6)** (2001) 2732.

- [64] A. Kumar and G.M. Whitesides. *Appl. Phys. Lett.* **63** (1993) 2002.
- [65] A. Kumar, H.A. Biebuyck and G.M. Whitesides. *Langmuir* **10(5)** (1994) 1498.
- [66] A. Kumar, N.L. Abbott, E. Kim, H.A. Biebuyck and G.M. Whitesides. *Acc. Chem. Res.* **28** (1995) 219.
- [67] N.L. Joen, K.Finnie, K.Branshaw and R.G. Nuzzo. *Langmuir* **13** (1997) 3382.
- [68] P.M.St. John and H.G. Craighead. *Appl. Phys. Lett.* **68(7)** (1996) 1022.
- [69] J.L. Wilbur, A. Kumar, E. Kim and G.M. Whitesides. *Adv. Mater.* **6** (1995) 600.
- [70] H.A. Biebuyck, N.B. Larsen, E. Delamarche and B. Michel. *IBM J. Res. & Dev.* **41(5)** (1997) 159.
- [71] B. Michel, A. Bernard, A. Bietsch, E. Delamarche, M. Geissler, D. Juncker, H. Kind, J.-P. Renault, H. Rothuizen, H. Schmid, P. Schmidt-Winkel, R. Stutz and H. Wolf. *IBM J. Res. & Dev.* **45(5)** (2001) 697.
- [72] M.J. Tarlov, D.R.F. Burgess and G. Gillen. *J. Am. Chem. Soc.* **115** (1993) 5305.
- [73] J. Huang, D.A. Dahlgren and J.C. Hemminger. *Langmuir* **10** (1994) 626.
- [74] K.C. Chan, T. Kim, J.K. Schoer and R.M. Crooks. *J. Am. Chem. Soc.* **117** (1995) 5875.
- [75] J.M. Calvert. *Lithographically patterned self-assembled films.*, Seiten 109–141. Thin Films Vol. 20., Academic Press, Boston, 1995.
- [76] H. Sugimura, K. Ushiyama, A. Hozumi and O. Takai. *Langmuir* **16** (2000) 885.
- [77] K.K. Berggren, A. Bard, J.L. Wilbur, J.D. Gillaspay, A.G. Helg, J.J. McClelland, S.L. Rolston, W.D. Phillips, M. Prentiss and G.M. Whitesides. *Science* **269** (1995) 1255.
- [78] S.B. Hill, C.A. Haich, F.B. Dunning, G.K. Walters, J.J. McClelland, R.J. Celotta, H.G. Craighead, J. Han and D.M. Tanenbaum. *J. Vac. Sci. Technol. B* **17(3)** (1999) 1087.
- [79] C.B. Ross, L. Sun and R.M. Crooks. *Langmuir* **9** (1993) 632.
- [80] N.L. Abbott, J.P. Folkers and G.M. Whitesides. *Science* **257** (1992) 1380.
- [81] E. Kim, Y. Xia and G.M. Whitesides. *Nature* **376** (1995) 581.
- [82] J.K. Schoer, F.P. Zamborini and R.M. Crooks. *J. Phys. Chem.* **100** (1996) 11086.

- [83] J.K. Schoer and R.M. Crooks. *Langmuir* **13** (1997) 2323.
- [84] G.-Y. Liu, S. Xu and Y. Qian. *Acc. Chem. Res.* **33** (2000) 457.
- [85] E. Delamarche, A.C.F. Hoole, B. Michel, S. Wilkes, M. Despont, M.E. Welland and H. Biebuyck. *J. Phys. Chem. B* **101** (1997) 9263.
- [86] U. Srinivasan, M.R. Houston and R.T. Howe. *J. Microelectromech. Syst.* **7(2)** (1998) 252.
- [87] R. Resch, S. Meltzer, T. Vallant, H. Hoffmann, B.E. Koel, A. Madhukar, A.A.G. Requicha and P. Will. *Langmuir* **17** (2001) 5666.
- [88] N. Patel, M.C. Davies, M. Hartshorne, R.J. Heaton, C.J. Roberts, S.J.B. Tendler and P.M. Williams. *Langmuir* **13** (1997) 6485.
- [89] M. Mrksich and G.M. Whitesides. *Annu. Rev. Biophys. Biomol. Struct.* **25** (1996) 55.
- [90] A. Bernard, E. Delamarche, H. Schmid, B. Michel, R.H. Bosshard and H.A. Biebuyck. *Langmuir* **14** (1998) 2225.
- [91] C.K. Harnett, K.M. Satyalakshmi and H.G. Craighead. *Langmuir* **17** (2001) 178.
- [92] G. Binnig and H. Rohrer. *Rev. Mod. Phys.* **59** (1987) 615.
- [93] D.W. Pohl. *Phys. Bl.* **47** (1991) 517.
- [94] G. Binnig and C.F. Quate. *Phys. Rev. Lett* **56** (1986) 930.
- [95] D. Sarid and V. Ellings. *J. Vac. Sci. Technol.* **B9** (1991) 431.
- [96] Y. Martin and H.K. Wickramasinghe. *Appl. Phys. Lett.* **50** (1987) 1455.
- [97] C.C. Williams and H.K. Wickramasinghe. *Appl. Phys. Lett.* **49** (1986) 1587.
- [98] H. Heinzelmann and D.W. Pohl. *Appl. Phys. A* **59** (1994) 89.
- [99] K. Dransfeld. *Phys. Bl.* **46** (1990) 307.
- [100] H.K. Wickramasinghe. *Spektrum der Wissenschaft* **12** (1989) 62.
- [101] H. Fuchs. *Phys. Bl.* **45** (1989) 105.
- [102] S. Gasiorowicz. *Quantenphysik*, Seiten 98–101. R. Oldenbourg Verlag, München, 1977.
- [103] M. Henzler and W. Göpel. *Oberflächenphysik des Festkörpers*, Seiten 114–115. Teubner, Stuttgart, 1984.

- [104] R.H. Fowler and L. Nordheim. *Proc. R. Soc.* **A119** (1928) 173.
- [105] J. Tersoff. STM Images and their Interpretation. In *Scanning Tunneling Microscopy and Related Methodes*, Seiten 83–94. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1989.
- [106] J. Tersoff. Theory of Scanning Tunneling Microscopy. In *Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy: Theory, Techniques and Applications*, Seite 32. VCH, New York, 1993.
- [107] J. Tersoff. Theory of the Scanning Tunneling Microscope. In *The Structure of Surfaces*, Seite 54. Springer Series in Surface Science 2, Berlin, Heidelberg, New York, 1984.
- [108] G. Doyen, E. Koetter, J.P. Vigneron and M. Scheffler. *Appl. Phys. A* **51** (1990) 281.
- [109] S.N. Magonov and M.-H. Whangbo. *Surface Analysis with STM and AFM*. VCH, Weinheim, New York, Basel, Cambridge, Tokyo, 1996.
- [110] L. Dreeskornfeld, 1997. Nanostrukturierung von Oberflächen und Multischichten mittels STM–Lithographie. Diplomarbeit, Universität Bielefeld.
- [111] J. Hartwich, 1999. Herstellung und Untersuchung lateraler Nanostrukturen in Resistschichten und Absorberfilmen auf EUV–Multischichtsystemen mittels Raster-sondenmethoden. Dissertation, Universität Bielefeld.
- [112] E. Delamarche, B. Michel, H.A. Biebuyck and C. Gerber. *Adv. Mater.* **8** (1996) 719.
- [113] J.A. Sondag-Huethorst, H.R.L. van Helleputte and L.G.J. Fokkink. *Appl. Phys. Lett.* **64(3)** (1994) 285.
- [114] N.A. Burnham and R.C.Colton. Force Microscopy. In. In *Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy: Theory, Techniques and Applications*, Seiten 191–249. VCH, New York, 1993.
- [115] N.A. Burnham and R.C.Colton. Force Microscopy. In. In *Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy: Theory, Techniques and Applications*, Seiten 198–202. VCH, New York, 1993.
- [116] Ch. Gerthsen, H.O. Kneser and H. Vogel. *Physik, 14. Aufl.*, Seite 682. Springer, 1983.
- [117] Y. Martin, C.C. Williams and H.K. Wickramasinghe. *J. Appl. Phys.* **61** (1987) 4723.
- [118] T.R. Albrecht, P. Grütter, D. Horne and D. Rugar. *J. Appl. Phys.* **69** (1991) 668.

- [119] T. Gyalog, M. Bammerlin, R. Lüthi, E. Meyer and H. Thomas. *Europhys. Lett.* **31** (1995) 269.
- [120] H. Hölscher, U.D. Schwarz and R. Wiesendanger. *Europhys. Lett.* **36** (1996) 19.
- [121] H. Hölscher, U.D. Schwarz and R. Wiesendanger. *Surf. Sci.* **375** (1997) 395.
- [122] H. Hölscher, U.D. Schwarz, O. Zwörner and R. Wiesendanger. *Phys. Rev. B* **57** (1998) 2477.
- [123] F.J. Giessibl. *Science* **267** (1995) 68.
- [124] M. Bammerlin, R. Lüthi, E. Meyer, A. Baratoff, J. Lü, M. Guggisberg, C. Gerber, L. Howald and H.-J. Güntherodt. *Probe Microscopy* **1** (1997) 3.
- [125] H. Ueyama, M. Ohta, S. Sugawara and S. Morita. *Jpn. J. Appl. Phys.* **34** (1995) L1086.
- [126] A. Ulman. *Chem. Rev.* **96** (1996) 1533.
- [127] F. Schreiber. *Prog. Surf. Sci.* **65** (2000) 213–227.
- [128] R.G. Nuzzo and D.L. Allara. *J. Am. Chem. Soc.* **105** (1983) 4481.
- [129] R.G. Nuzzo, B.R. Zegarski and L.H. Dubois. *J. Am. Chem. Soc.* **109** (1987) 733.
- [130] K. diGleria, H.A.O. Hill, D.J. Page and D.G.J. Tew. *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* (1986) 460.
- [131] T. T.-T. Li, H.Y. Liu and M.J. Weaver. *J. Am. Chem. Soc.* **106** (1984) 6107.
- [132] J.-E. Sundgren, P. Bodö, B. Ivarsson and I. Lunström. *J. Colloid Interface Sci.* **113** (1986) 53.
- [133] G.G. Roberts. *Adv. Phys.* **34** (1985) 475.
- [134] D.G. Whitten. *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.* **18** (1979) 440.
- [135] L.R. Faulkner. *Chem. Engl. News* (1984) 28.
- [136] A. Kumar, H.A. Biebuyck and G.M. Whitesides. *Langmuir* **10**(5) (1994) 1498.
- [137] Y. Xia and G.M. Whitesides. *Angew. Chem. Int. Ed.* **37** (1998) 550.
- [138] H.U. Müller, 1995. Dissertation, Universität Heidelberg.
- [139] J.B. Hubbard, V. Silin and A.L. Plant. *Biophysical Chemistry* **75** (1998) 163.
- [140] C.W. Meuse, G. Niaura, M.L. Lewis and A.L. Plant. *Langmuir* **14** (1998) 1604.

- [141] Fluka Chemie AG. 1-Hexadecanethiol, Reinheitsgrad $\sim 95\%$.
- [142] C.D. Bain, E.B. Troughton, Y.-T. Tao, J. Evall, G. M. Whitesides and R.G. Nuzzo. *J. Am. Chem. Soc.* **111** (1989) 321.
- [143] L. Strong and G.M. Whitesides. *Langmuir* **4** (1988) 546.
- [144] C.E.D. Chidsey, D.N. Loiacono, T. Sleator and S. Nakahara. *Surf. Sci.* **200** (1988) 45.
- [145] L.H. Dubois, B.R. Zegarski and R.G.Nuzzo. *J. Phys. Chem.* **98** (1993) 678.
- [146] C.A. Alves, E.L. Smith and M.D. Porter. *J. Am. Chem. Soc.* **114** (1992) 1222.
- [147] C.E.D. Chidsey and N.D. Loiacono. *Langmuir* **6** (1990) 682.
- [148] B. Wunderlich. *Molecular Physics*. Academic Press, London, 1971.
- [149] G. Häner, M. Kinzler, C. Thümmel, Ch. Wöll and M. Grunze. *J. Vac. Sci. Technol.* **B 10** (1992) 2758.
- [150] C.A. Widrig, C. Chung and M.D. Porter. *J. Electroanal. Chem.* **310** (1991) 335.
- [151] M.D. Porter, T.B. Bright, D.L. Allara and C.E.D. Chidsey. *J. Am. Chem. Soc.* **109** (1987) 3559.
- [152] K. Edinger, A. Götzhäuer, K. Demota, Ch.Wöllner and M. Grunze. *Langmuir* **9** (1993) 4.
- [153] C.A. Mead. *Phys. Rev.* **128** (1962) 2088.
- [154] A. Kumar, H.A. Biebuyck, N.L. Abbott and G.M. Whitesides. *J. Am. Chem. Soc.* **114** (1992) 9188.
- [155] Y. Xia, X.-M. Zhao and G.M. Whitesides. *Microelectronic Engineering* **32** (1996) 255.
- [156] B. Völkel, A. Götzhäuser, H.U. Müller, C. David and M. Grunze. *J. Vac. Sci. Technol. B* **15(6)** (1997) 2877.
- [157] T. Weimann, W. Geyer, P. Hinze, V. Stadler, W. Eck and A. Götzhäuser. *Microelectronic Engineering* **57–58** (2001) 903.
- [158] R.G. Nuzzo, L.H. Dubois and D.L. Allara. *J. Am. Chem. Soc.* **112** (1990) 558.
- [159] J.J. Hickman, D. Offer, C. Zou, M.S. Wrighton, E.P. Laibinis and G.M. Whitesides. *J. Am. Chem. Soc.* **113** (1991) 1128.

- [160] J.F. Kang, A. Ulman, S. Liao and R. Jordan. *Langmuir* **15** (1999) 2095.
- [161] J.F. Kang, A. Ulman, S. Liao, R. Jordan, G. Yang and G. Liu. *Langmuir* **17** (2001) 95.
- [162] J.F. Kang, S. Liao, R. Jordan and A. Ulman. *J. Am. Chem. Soc.* **120** (1998) 9662.
- [163] T. Ishida, W. Mizutani, U. Akiba, K. Umemura, A. Inoue, N. Choi, , M. Fujihira and H. Tokumoto. *J. Phys. Chem B* **103** (1999) 1686.
- [164] T. Ishida, W. Mizutani, H. Tokumoto, N. Choi, U. Akiba and M. Fujihira. *J. Vac. Sci. Technol. A* **18(4)** (2000) 1437.
- [165] A. Ulman. *Acc. Chem. Res.* **34** (2001) 855.
- [166] E. Sabatani, J. Cohen-Boulakia M. Bruening and I. Rubenstein. *Langmuir* **9** (1993) 2974.
- [167] T.Y.B. Leung, P. Schwatz, G. Scoles, F. Schreiber and A. Ulman. *Surf. Sci.* **458** (2000) 34.
- [168] Y.T. Tao, C.-C Wu, J.-Y. Eu, W.-L. Lin, K.-C. Wu and C.-H. Chen. *Langmuir* **13** (1997) 4018.
- [169] K. Heister, M. Zharnikov and M. Grunze. *J. Phys. Chem. B* **105** (2001) 4058.
- [170] Fisher Scientific GmbH. Octadecyltrichlorsilan, Reinheitsgrad $\sim 95\%$.
- [171] M.J. Lercel, G.F. Redinbo, M. Rooks, R.C. Tiberioand, H.G. Craighead, C.W. Sheen and D.L. Allara. *Microelectron. Eng.* **27** (1995) 43.
- [172] C.N. Sukenik, N. Balachander, L.A. Clup, K. Lewandowska and K. Merritt. *J. Biomed. Mater. Res.* **24** (1990) 1307.
- [173] J. Sagiv. *J. Am. Chem. Soc.* **102** (1980) 92.
- [174] P.E. Laibinis, G.M. Whitesides, D.L. Allara, Y.T. Tao, A.N. Parikh and R.G. Nuzzo. *J. Am. Chem. Soc.* **113** (1991) 7153.
- [175] K. Bierbaum, M.Grunze, A.A. Baski, L.F. Chi, W. Schrepp and H. Fuchs. *Langmuir* **11(6)** (1995) 2143.
- [176] T. Komeda, K. Namba and Y. Nishioka. *J. Vac. Sci. Technol A* **16** (1998) 1680.
- [177] R. Resch, M. Grasserbauer, G.Friedbacher, Th. Vallant, H.Brunner, U. Mayer and H Hoffmann. *Appl. Surf. Sci.* **140** (1999) 168.

- [178] S.R.Wasserman, G.M. Whitesides, I.M. Tidswell, B.M. Ocko, P.S. Pershan and J.D. Axe. *J. Am. Chem. Soc.* **111** (1989) 5852.
- [179] K. Bierbaum, M.Kinzler, C. Wöll, M.Grunze, G Hähner, S. Heid and F. Effenberger. *Langmuir* **11** (1995) 512.
- [180] D.L. Angst and G.W. Simmons. *Langmuir* **7** (1991) 2236.
- [181] G.J. Kluth, M.M. Sung and R. Maboudian. *Langmuir* **13** (1997) 3775.
- [182] D. Vuillaume, C. Boulas, J. Collet, G. Allan and C. Delerue. *Phys. Rev B* **58(24)** (1998) 16491.
- [183] Lancaster Syntesis GmbH. Octadecyltrimethoxysilan, Reinheitsgrad $\sim 97\%$.
- [184] R. Hild, 1996. Mikrostrukturierung von Chromoberflächen durch Lithographie mit niederenergetischen Elektronen. Diplomarbeit, Universität Heidelberg.
- [185] 2001. Prof. Dr. M. Grunze, Universität Heidelberg, Persönliche Mitteilung.
- [186] 2002. Arbeitsgruppe Dr. A. Götzhäuser, Heidelberg. Persönliche Mitteilung.
- [187] Die SEM und AFM-Analyse der geschriebenen Strukturen nach dem Ätzübertrag wurde in der AG Prof. Reiss (Universität Bielefeld) durchgeführt.
- [188] S.R.Wasserman, S.R. Tao and G.M. Whitesides. *Langmuir* **5** (1989) 1074.
- [189] N. Tillman, A. Ulman, J.S. Schildkraut and T. Penner. *J. Am. Chem. Soc.* **110** (1988) 6136.
- [190] T. Young. *Miscellaneous Works*, Seite 418. G.Peacock (Ed.), Murray, London, 1, 1855.
- [191] Krüss GmbH, 1994-1995. G 10 Kontaktwinkelmessgerät Benutzerhandbuch.
- [192] Omicron GmbH, 1992. UHV-Micro-STM, Technisches Manual.
- [193] J. Hartwich, 1995. Inbetriebnahme eines UHV-Rastertunnelmikroskops und dessen Einsatz bei der Charakterisierung von Einkristall- und Schichtoberflächen. Diplomarbeit, Universität Bielefeld.
- [194] Newport GmbH, 1998. Vibration Control, Technisches Manual.
- [195] Omicron GmbH, 1994. Software-Manual.
- [196] WITec Wissenschaftliche Instrumente und Technologie GmbH, 2001. geätzte Pt(.8)Ir(.2) Spitzen mit einem Drahtdurchmesser von 25 μm .

- [197] Inc. Digital Instruments, 1997. Nanoscope IIIa, Multi-Mode SPM.
- [198] S.L. Flegler, J.W. Heckmann and K.L. Klomparens. *Elektronenmikroskopie Grundlagen-Methoden-Anwendungen*, Seiten 81–117. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg Berlin Oxford, 1995.
- [199] M. Sundermann, 1999. Erzeugung und Charakterisierung künstlicher Nanostrukturen in selbstorganisierten Hexadecanhiol–Monolagen mittels UHV–Rastersondenverfahren (AFM/STM). Diplomarbeit, Universität Bielefeld.
- [200] G. Albert, 1996. Herstellung und Charakterisierung polykristalliner Goldschichten zur Verwendung in der Nanolithography. Diplomarbeit, Universität Heidelberg.
- [201] Die Mo/Si-Multischicht wurde von Dr. Y.C. Lim hergestellt.
- [202] R.F. Wolffenbuttel. *Sensors And Actuators A* **62(1-3)** (1997) 640.
- [203] Die Cr-Schichten wurde von Dipl.-Phys. Thomas Westerwalbesloh hergestellt.
- [204] A.M. Hawryluk, N.M. Ceglio and D.P. Gaines. *J. Vac. Sci. Technol. B* **7(6)** (1989) 1702.
- [205] M. Sundermann, J. Hartwich, K. Rott, D. Meyners, E. Majkova, U. Kleineberg, M. Grunze and U. Heinzmann. *Surf. Sci.* **454-456** (2000) 1104.
- [206] E. Spiller. *Appl. Phys. Lett.* **20** (1972) 356.
- [207] E. Spiller. *Soft X-Ray Optics.*, Seite 106. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham/Washington, 1994.
- [208] K.B. Nguyen, G.F. Cardinale, D.A. Tichenor, G.D. Kubiak, K. Berger, A.K. Ray-Chaudhuri, Y. Perras, S.J. Haney, R. Nissen, K. Krenz, R.H. Stullen, H. Fujioka, C. Hu, J. Bokor, D.M. Tennant and L.A. Fetter. *J. Vac. Sci. Technol. B* **14(6)** (1996) 4188.
- [209] H. Kimura M. Yamamoto, M. Yanagihara, T. Maehara and T. Namioka. *Rev. Sci. Instr.* **63(1)** (1992) 1379.
- [210] T. Koide, T. Shidara, M. Yuri, N. Kandaka, H. Fukutani and K. Yamaguchi. *Rev. Sci. Instr.* **63(1)** (1992) 1458.
- [211] *Laborchemikalien und analytische Reagenzien.*, Seite 719. Sigma–Aldrich Chemie GmbH, 1999–2000.
- [212] M.J. Lercel, G.F. Redinbo, F.D. Pardo, M. Rooks, P. Simpson, H.G. Craighead, C.W. Sheen, A.N. Parikh and D.L. Allara. *J. Vac. Sci. Technol. B* **12(6)** (1994) 3663.

- [213] Januar 2002. Arbeitsgruppe Dr. A. Götzhäuser, Heidelberg. Persönliche Mitteilung.
- [214] A. Küller, V. Stadler, W. Geyer, E. Eck, A. Glözhäuser, M. Grunze, T. Weimann and K. Edinger. Nanostrukturierung von Selbstaggregierenden Hydroxybiphelyl Monolagen auf Si(111) Oberflächen mittels Elektronenstrahlolithographie. Vortrag auf der Frühjahrstagung 2002 in Regensburg.
- [215] A. Kumar, H.A. Biebuyck, N.L. Abbott and G.M. Whitesides. *J. Am. Chem. Soc.* **114** (1992) 9188.
- [216] C.R.K. Marrian, F.K. Perkins, S.L. Brandow, T.S. Koloski, E.A. Dobisz and J.M. Calvert. *Appl. Phys. Lett.* **64** (1994) 390.
- [217] S. Büttgenbach. *Mikromechanik*, Seite 106. Teubner Studienbücher Angewandte Physik, 1994.
- [218] S. Büttgenbach. *Mikromechanik*, Seiten 109–110. Teubner Studienbücher Angewandte Physik, 1994.
- [219] R.E. Oosterbroek, J.W. Berenschot, A.J. Nijdam, G. Pandraud, M.C. Elwenspoek and A. van den Berg. *proc. SPIE, Micromachining and Microfabrication Process Technology V* **3874** (1999) 384.
- [220] T.A. Skankoff and E.A. Chandress. *J. Electrochem. Soc.* **122** (1975) 294.
- [221] I.C. Szep. *Thin Solid Films* **620** (1991) 101.
- [222] J. Hartwich, M. Sundermann, U. Kleineberg and U. Heinzmann. *Appl. Surf. Sci.* **144-145** (1999) 538.
- [223] U. Kleineberg, A. Brechling, M. Sundermann and U. Heinzmann. *Adv. Funct. Mater.* **11(3)** (2001) 208.
- [224] P.S. Bagus, K. eiss, A. Schertel, Ch. Wöll, W. Braun, H. Hellwig and C. Jung. *Chem. Phys. Lett.* **248** (1996) 129.
- [225] H.U. Müller, M. Zharnikov, B. Völkel, A. Schertel, P. Harder and M. Grunze. *J. Phys. Chem. B* **102** (1998) 7949.
- [226] C. Olsen and P.A. Rowntree. *J. Chem. Phys.* **108(9)** (1996) 3750.
- [227] K. Seshadri, K. Froyd, A.N. Parikh, D.L. Allara, M.J. Lercel and H.G. Craighead. *J. Phys. Chem.* **100** (1996) 15900.
- [228] Ph. Avouris, R. Mantel, T. Hertel and R. Sandstrom. *Appl. Phys. A* **66** (1998) 659.
- [229] P. Fay, R.T. Brockenbrough, G. Abeln, P. Scott, S. Agarwala, I. Adesida and J.W. Lyding. *J. Appl. Phys.* **75** (1994) 7545.

- [230] P.M. Campbell, E.S. Snow and P.J. McMarr. *Appl. Phys. Lett.* **66(11)** (1995) 1388.
- [231] K. Matsumoto, S. Takahashi, M. Ishii, M. Hoshi, A. Kurokawa, S. Ichimura and A. Ando. *Jpn. J. Appl. Phys.* **34** (1995) 1378.
- [232] M.J. Lercel, R.C. Tiberio, P.F. Chapman, H.G. Craighead C.W. Sheen, A.N. Parikh and D.L. Allara. *J. Vac. Sci. Technol. B.* **11(6)** (1993) 2823.
- [233] M.J. Lercel, C.S. Whelan, H.G. Craighead, K. Seshadir and D.L. Allara. *J. Vac. Sci. Technol. B* **14(6)** (1996) 4085.
- [234] P. Vettiger, M. Despont, U. Drechsler, U. Dürig, W. Häberle, M.I. Lutwyche, H.E. Rothuizen, R. Stutz, R. Widmer and G.K. Binnig. *IBM J. Res. Develop.* **44(3)** (2000) 323.
- [235] K. Wilder, H.T. Soh, A. Atalar and C. Quate. *J. Vac. Sci. Technol. B* **15(5)** (1997) 1811.
- [236] K. Wilder, C. Quate, B.Singh and D.F. Kyser. *J. Vac. Sc. Technol. B* **16(6)** (1998) 3864.

Danksagung und Eidesstattliche Erklärung

Diese Arbeit entstand am Lehrstuhl für Molekül- und Oberflächenphysik der Universität Bielefeld unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. U. Heinzmann, dem für die interessante Aufgabenstellung, die gute wissenschaftliche Anleitung und das ständige Interesse am Fortgang der Arbeit sowie die umfassende Ausstattung des Experiments mein besonderer Dank gilt.

Für die gute Betreuung und die wertvollen Diskussionen und Anregungen bedanke ich mich besonders bei Priv. Doz. Dr. U. Kleineberg.

Für die außerordentlich gute und freundschaftliche Zusammenarbeit am Experiment danke ich Herrn Dipl.-Phys. A. Brechling.

Mein Dank gilt weiterhin Herrn Dipl.-Phys. Ch. Meier für die zahlreichen Ratschläge und Diskussionen unter anderem in Fragen zu Rechnern und Elektronik.

Herrn Dipl.-Phys. T. Westerwalbesloh und Herrn Dr. Y.C. Lim sowie Herrn Dr. O. Weh-meyer sei für die Herstellung der Cr-Schichten bzw. der Mo/Si Multischichten sowie den zahlreichen wertvollen Diskussionen gedankt.

Den Herren Dipl.-Phys. D. Meyners und Dr. K. Rott der Arbeitsgruppe von Herrn Prof. Dr. Reiss danke ich für die zahlreichen AFM- bzw. SEM-Messungen. Mein Dank gilt selbstverständlich auch Herrn Prof. Dr. Reiss für die Möglichkeit, diese Meßgeräte nutzen zu dürfen.

Für den regen Informationstransfer und die Bereitstellung von SAM-Schichten sei der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. M. Grunze und Dr. A. Gölhäuser in Heidelberg sehr herzlich gedankt.

Ich danke allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Molekül- und Oberflächenphysik für das gute Arbeitsklima, die zahlreichen Diskussionen und die ständige Bereitschaft zur Hilfeleistung. Desgleichen möchte ich Frau K. Lofthouse, K. Wisotzky und Frau K. Schneider herzlich danken.

Den Mitarbeitern der feinmechanischen und elektronischen Werkstatt sei für die sorgfältige und schnelle Anfertigung und Reparatur apparativer Komponenten gedankt.

Ganz herzlich möchte ich meinen Eltern danken, deren Unterstützung mir das Studium ermöglicht hat.

Ich versichere hiermit an Eides statt, die vorliegende Arbeit bis auf die dem Aufgabensteller bekannten Hilfen selbständig angefertigt und die benutzten Hilfsmittel unter Angabe der Literaturstellen kenntlich gemacht zu haben.

Bielefeld, im Juli 2002

Michael Sundermann

Lebenslauf

Name Michael Sundermann
Geburtsdatum 28. März 1973
Geburtsort Bielefeld

Schulischer und beruflicher Werdegang:

August 1979 – Juli 1983 Plafschule in Bielefeld
August 1983 – März 1985 Marienschule der Ursulinen in Bielefeld
März 1985 – Juli 1989 Realschule in Bielefeld–Jöllenbeck
August 1989 – Juni 1992 Marienschule der Ursulinen in Bielefeld
Juni 1992 Abitur
Juli 1992 - Juni 1993 Wehrdienst
Oktober 1993 Studium der Physik an der Universität Bielefeld
Januar 1999 Abschluß der Diplomarbeit
bei Prof. Dr. U. Heinzmann mit dem Thema
„Erzeugung und Charakterisierung künstlicher Nanostrukturen
in selbstorganisierten Hexadecanithiol–Monolagen mittels
UHV–Rastersondenverfahren (AFM/STM)“
seit Februar 1999 Wissenschaftlicher Angestellter an der
Fakultät für Physik der Universität Bielefeld
mit dem Ziel der Promotion

Bielefeld, 24.07.2002