

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>v</b>
<b>1 Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen der Epitaxie</b>	<b>9</b>
2.1 Substratbehandlung vor der Epitaxie . . . . .	9
2.1.1 Oberflächenflächenmodifikationen . . . . .	9
2.1.2 Übersicht von Reinigungsverfahren . . . . .	24
2.2 Epitaxie . . . . .	46
2.2.1 Allgemeine Grundlagen der Epitaxie . . . . .	46
2.2.2 Molekularstrahlepitaxie . . . . .	56
2.2.3 Gasphasenepitaxie . . . . .	59
2.2.4 Selektive Epitaxie . . . . .	70
2.3 Schichtcharakterisierung . . . . .	77
2.3.1 Schichtdickenbestimmung . . . . .	77
2.3.2 Oberflächen- und Interface-Kontamination . . . . .	81
2.3.3 Dotierung und Stöchiometrie . . . . .	83
2.3.4 Oberflächenmorphologie . . . . .	85
2.3.5 Kristallqualität . . . . .	85
<b>3 Ultrahochvakuum-Mehrkammersystem</b>	<b>91</b>
3.1 Funktionsprinzip des UHV-Mehrkammersystems . . . . .	91
3.2 UHV-Kammer für Wasserstoff-Plasmareinigung . . . . .	92
3.2.1 Kammeraufbau und Prinzip der Plasmaquelle . . . . .	92
3.2.2 Plasmaätzprozess . . . . .	95
3.3 Epitaxieanlage für UHV-CVD und MBE . . . . .	99
3.3.1 Aufbau der MBE-Anlage . . . . .	100
3.3.2 Aufbau der UHV-CVD-Anlage . . . . .	107
<b>4 UHV-kompatible Reinigungsverfahren</b>	<b>111</b>
4.1 Anforderungen an eine UHV-kompatible Reinigung . . . . .	111
4.1.1 Oberflächenmodifikationen nach Einschleusen und vor der Epitaxie . . . . .	111
4.1.2 Merkmale einer optimalen UHV-kompatiblen Reinigung . . . . .	115
4.1.3 Bausteine einer UHV-kompatiblen Reinigung . . . . .	115
4.2 Thermische Desorption im UHV (HT-Reinigung) . . . . .	118
4.2.1 Nachweis der Sauerstoffdesorption . . . . .	118
4.2.2 Kohlenstoff-Interface-Kontamination und Einfluss der Vorreinigung . . . . .	118

4.2.3	Bor-Interface-Kontamination . . . . .	120
4.2.4	Stickstoff-Interface-Kontamination . . . . .	125
4.2.5	Rekontamination nach thermischer Desorption im UHV . . . . .	128
4.2.6	Temperatur/Zeit-Prozessfenster im Diffusionsmodell . . . . .	130
4.2.7	Oberflächenmorphologie und Glättung von Si-Oberflächen . . . . .	134
4.3	Wasserstoff-Plasmareinigung (LT-Reinigung) . . . . .	136
4.3.1	Nachweis der H-Terminierung einer Si-Oberfläche . . . . .	136
4.3.2	Sputter- und Ätzraten für SiO <sub>2</sub> . . . . .	136
4.3.3	Abhängigkeit der Oxidätzrate vom H <sub>2</sub> -Partialdruck . . . . .	139
4.3.4	Abhängigkeit der Oxid-Ätzrate von der Temperatur . . . . .	142
4.3.5	Abhängigkeit der Oxid-Ätzrate von Prozessgasverunreinigungen . . . . .	142
4.3.6	Rekontamination durch H <sub>2</sub> -Plasmareinigung . . . . .	148
4.3.7	Desorption von Suboxiden nach der H <sub>2</sub> -Plasmareinigung . . . . .	151
4.3.8	Entfernung von Bor- und Stickstoff-Oberflächenkontaminationen mit H <sub>2</sub> -Plasmareinigung . . . . .	160
4.4	Thermische Desorption in reaktiven Gasen (LT-Reinigung) . . . . .	164
4.4.1	Silan-unterstützte thermische Desorption . . . . .	164
4.4.2	German-unterstützte thermische Desorption . . . . .	168
4.4.3	Kohlenstoffentfernung durch Sauerstofftempern . . . . .	172
<b>5</b>	<b>Gasphasenepitaxie (UHV-CVD bis LP-CVD von Si/SiGe)</b>	<b>175</b>
5.1	Ganzflächige CVD von Si/SiGe auf planaren Si-Substraten . . . . .	175
5.1.1	Untersuchung der Stöchiometrie und Morphologie . . . . .	175
5.1.2	Untersuchung der Kristallqualität . . . . .	183
5.2	Selektive Epitaxie (SEG) von Si/SiGe . . . . .	196
5.2.1	Charakterisierung von Polysilizium-Wachstum auf ganzflächigen Oxidsubstraten . . . . .	196
5.2.2	Herstellung von vorstrukturierten Oxid- und Nitridsubstraten . . . . .	199
5.2.3	Einfluss des Maskenmaterials auf SEG . . . . .	200
5.2.4	Einfluss der Vorreinigung auf die Selektivität . . . . .	204
5.2.5	Silan/German-Partialdruckabhängigkeit von SEG . . . . .	209
5.2.6	Temperaturabhängigkeit von SEG . . . . .	210
5.2.7	Loading-Effekte bei SEG . . . . .	216
5.2.8	Facettenwachstum bei SEG . . . . .	219
5.2.9	Untersuchung der Kristallqualität von SEG-Schichten . . . . .	220
5.2.10	Selektive Epitaxie von SiGe-Legierungen . . . . .	227
5.2.11	Freiätzen und selektives Auffüllen von Source/Drain- Extensiongebieten eines 90 nm MOSFETs . . . . .	239
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerung und Ausblick</b>	<b>243</b>
<b>A</b>	<b>Berechnungen und physikalische Konstanten</b>	<b>247</b>
A.1	Verwendete physikalische Konstanten . . . . .	247
A.2	Berechnung / Umrechnung von Aktivierungsenergien . . . . .	248
A.3	Eigenschaften von Silizium, Germanium und Oxid . . . . .	249

---

<b>B</b>	<b>Ausstattung und Prozesse der MUM-Kammern</b>	<b>251</b>
B.1	Modulübersicht . . . . .	251
B.2	Detailausstattung und Prozesse der Kammern . . . . .	252
B.3	Reinheit der verwendeten Gase . . . . .	254
<b>C</b>	<b>Beschreibung der Maskensätze</b>	<b>255</b>
C.1	Maskensatz für PIN-Dioden (PIN 98) . . . . .	255
C.2	Maskensatz für SEG-Substrate (MESAGOX) . . . . .	258
<b>D</b>	<b>Kalibrierkurven der MBE/CVD-Epitaxieanlage</b>	<b>261</b>
D.1	Kalibrierung des Substratheizers mittels TC-Wafer . . . . .	261
D.2	MBE-Wachstumsraten-Kalibrierung mittels QMG . . . . .	264
<b>E</b>	<b>Verwendete nasschemische Lösungen</b>	<b>265</b>
E.1	RCA-Reinigung . . . . .	265
E.2	Caro'sche Reinigung . . . . .	265
E.3	Nitrid-Ätzen . . . . .	266
E.4	Oxid-Ätzen . . . . .	266
E.5	Poly-Si/SiGe-Ätzen . . . . .	266
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>267</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>273</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>275</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>301</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>305</b>
	<b>Lebenslauf</b>	<b>309</b>