

Kapitel 12

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit einer neuartigen Technologie zur Herstellung von *in-situ* trocken geätzten und sukzessiv molekularstrahlepitaktisch überwachsenen, modulationsdotierten $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -GaAs-Heterostrukturen. Ziel ist es, die Oberflächendefekte eines strukturierten Schichtsystems derart abzusättigen, daß niederdimensionale Elektronensysteme mit hohen Einschlußpotentialen hergestellt werden können.

Für das verwendete, MBE-gewachsene $\text{Al}_{0,33}\text{Ga}_{0,67}\text{As}$ -Volumenmaterial wurde eine Aktivierungsenergie E_A der Elektronen von den Donatorniveaus in das Leitungsband mit 142 meV bestimmt. Die freie Elektronendichte im GaAs:Si stimmt bei 4,2 K mit der Siliziumatomdichte ($N_{Si} \leq 3,5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) überein, während beim $\text{Al}_{0,33}\text{Ga}_{0,67}\text{As:Si}$ in diesem Temperaturbereich alle Ladungsträger in tiefen Niveaus ausgefroren sind.

Zur *ex-situ*-Vorstrukturierung wurde eine speziell entwickelte photolithographische Maske eingesetzt, die mittels Kontaktlithographie eine Photolackmaskierung von Draht- und Kontaktstrukturen mit Abmessungen bis unterhalb 500 nm ermöglicht. Die anschließende Strukturierung der GaAs-Deckschicht oberhalb des aktiven Elektronenbereiches erfolgte zum Teil über einen selektiven GaAs- über $\text{Al}_{0,33}\text{Ga}_{0,67}\text{As}$ -RIE-Prozeß als auch über einen naßchemischen, selektiven GaAs- über AlAs-Ätzprozeß. Das Ätzverhalten der dabei verwendeten Zitronensäurelösung wurde in Abhängigkeit des Mischungsverhältnisses charakterisiert und auf die Herstellung von Drahtstrukturen mit definierter Orientierung der Seitenfacetten hin optimiert.

Die zur Desorption des Oberflächenoxids nötige Temperatur konnte für die hergestellten GaAs-Strukturen mithilfe von RHEED Messungen bestimmt und durch eine naßchemische, *ex-situ* Reinigungssequenz reduziert werden.

Die Vor- und Nachteile der zur Verfügung stehenden *in-situ* Trockenätzprozesse IBE, CGE und CAIBE wurden in Hinblick auf ihre Eignung zum tiefmesa Ätzen von strukturierten Bereichen untersucht. Die Ätzraten für einen anisotropen CAIBE-Prozeß bei einer minimalen, praktikablen Ionenenergie von 100 eV lagen bei 70 nm/min, während das CGE-Ätzverhalten stark anisotrop verläuft und sich nicht zum strukturierten tiefmesa Ätzen eignet. Bei einer gemessenen Oberflächentemperatur von $\sim 550^\circ\text{C}$ (entspricht einer realen Temperatur von ca. $\sim 400^\circ\text{C}$) konnte bei einem Partialchlordruck von $2 \cdot 10^{-5}$ Torr ein stöchio-

metrisches CGE-Ätzverhalten beobachtet werden. Der IBE-Prozeß wurde aufgrund seiner geringen Ätzrate und hohen Materialschädigung lediglich zur Beseitigung von Aluminiumoxiden auf planaren Oberflächenbereichen eingesetzt. Das tiefmessa Ätzen von strukturierten Bereichen wurde mit einem CAIBE- und mit einem anschließenden kurzen, stöchiometrischen CGE-Prozeß (zur Beseitigung der Ätzschäden durch den Ionenbeschuß) durchgeführt. Aus der Diskussion über Ätzschäden durch Ionenbeschuß ergibt sich eine Vorgehensweise, bei der nach einem CAIBE-Prozeß der CGE-Prozeß bei einer geringen Temperatur unterhalb von 100°C durchzuführen ist, um eine Diffusion der Defektstellen (As auf Gitterzwischenplätzen, Gitterfehlstellen) in das Material zu verhindern. Der Chlordruck muß entsprechend gering gewählt werden, um ein stöchiometrisches Ätzverhalten zu gewährleisten.

AFM-Voruntersuchungen an planaren Proben zeigten, daß unter den optimierten Ätzparametern des kombinierten CAIBE- und CGE-Prozesses die RMS-Oberflächenrauigkeit < 1 nm und damit vergleichbar MBE-gewachsenen Oberflächen ist. Mit Hilfe von Kapazitäts-Spannungs-Messungen (CV) an Schottky-Kontakten auf geätzten Oberflächen konnte eine Reduzierung der Defektdichte durch den kombinierten Ätzprozeß festgestellt werden. Genauere Ergebnisse lieferten CV-Messungen zur Bestimmung der Grenzflächenverarmungsdichte N_{ss} an geätzten und überwachsenen Grenzflächen. N_{ss} entspricht in diesem Fall der in den Grenzflächendefekten eingefangenen Elektronendichte. Als Referenz wurde bei einer Probe mit Wachstumsunterbrechung inklusive eines *in-situ* Transfers in die Ätzkammer N_{ss} zu $1,0 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ bestimmt. Während bei einer rein CAIBE-geätzten Probe die Grenzflächenverarmungsdichte $4,4 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ beträgt, lag bei einer CAIBE- und CGE-geätzten Probe die Grenzflächenschädigung mit $N_{ss} = 1,6 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ im Bereich der Referenzprobe. Eine Siliziumanreicherung durch den Ätzprozeß wurde nicht beobachtet.

Die Ergebnisse der CV-Messungen wurden mit Magnetotransportmessungen an Elektronengasen einer HEMT-Struktur verglichen, die an dem Heteroübergang einer vergleichbaren Wachstumsunterbrechung bzw. einem Ätzprozeß ausgesetzt gewesen waren. An CAIBE-geätzten Grenzflächen konnten keine freien Ladungsträger beobachtet werden, während die Schädigung einer mit optimalen Parametern CGE-geätzten Grenzfläche ($n_{2D} = 4,7 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $\mu_{2D} = 81000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) vergleichbar mit einer Referenzprobe ($n_{2D} = 3,6 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $\mu_{2D} = 110000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) ist. Diese Referenzprobe wurde ohne Ätzprozeß lediglich von der MBE zur Ätzkammer hin- und rücktransferiert. Die Daten einer durchgehend gewachsenen Probe betrug $n_{2D} = 3,6 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ und $\mu_{2D} = 110000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.

Beim molekularstrahlepitaktischen Überwachsen von strukturierten GaAs-Bereichen wurde die Bildung von $\{111\}$ B-Facetten auf Drahtstegen entlang der $[011]$ -Richtung und von $\{311\}$ A-Facetten auf Drahtstegen entlang der $[0\bar{1}1]$ -Richtung beobachtet. Dies wird mit der Entstehung von Oberflächen entsprechend der jeweilig geringsten freien Energie erklärt. $\{111\}$ A-Facetten entstehen erst als energetisch nächsthöhere Oberflächenstruktur, nachdem sich die lokal eingegrenzten $\{311\}$ A-Facetten vollständig ausgebildet haben. Bei Wachstumstemperaturen oberhalb von ca. 400°C wird keine Materialabscheidung auf $\{011\}$ - und $\{0\bar{1}1\}$ -Typ-Seitenflächen beobachtet. Bei einem Winkel $< 70^\circ$ zwi-

schen der (100)-Oberfläche und den jeweiligen Seitenfacetten bilden sich ($h11$)-Facetten ($h \leq 3$) beim Überwachsen aus. Die glattesten Oberflächen werden bei einer Wachstumstemperatur um ca. 600°C erzielt. Bei Wachstumsraten von $0,67\ \mu\text{m/h}$ (GaAs) bzw. $1\ \mu\text{m/h}$ ($\text{Al}_{0,33}\text{Ga}_{0,67}\text{As}$) bilden sich an Strukturen entlang der [011]-Richtung stabile (311)B- und an Strukturen entlang $[\bar{0}\bar{1}1]$ -Richtung stabile (111)A-Seitenflächen aus. Die teilweise Ausbildung von stark facettierten Unterstrukturen an den Seitenfacetten wird auf eine lokale Verringerung der freien Oberflächenenergie zurückgeführt und ist rein wachstumsbedingt.

Beim Überwachsen von Drahtstrukturen entlang der $[\bar{0}\bar{1}1]$ -Richtung mit $\text{Al}_{0,33}\text{Ga}_{0,67}\text{As}$ wird eine erhöhte Diffusion des Galliums relativ zum Aluminium von der Drahtseitenfläche weg beobachtet, was zu einem graduellen Anstieg der Aluminiumkonzentration zur Grenzfläche hin führt. Dieser Effekt tritt bei Strukturen entlang [011] nicht auf.

Anhand von REM-Bildern wird das erfolgreiche tiefmesa Ätzen und Überwachsen von $500\ \text{nm}$ breiten Drahtstrukturen durch einen $20\ \text{nm}$ dicken Quantentrog dokumentiert. In Transmissions-Elektronenmikroskopischen Aufnahmen werden bei dieser Probe keine Flächendefekte beobachtet. Punktartige Defekte im Grenzflächenbereich werden auf Kohlenstoffkontaminationen zurückgeführt. Magnetotransport-Untersuchungen an geätzten und überwachsenen Proben, die sowohl Messungen an einem 2DEG-Bereich als auch an einem Einzeldraht ermöglichen, bestätigen die Funktionsweise des entwickelten Herstellungsprozesses.

In einem Ausblick werden alternative Probendesigns und erweiterte Präparationstechniken vorgestellt. Speziell das beobachtete selbstorganisierte Wachstum einer schnellwachsenden Seitenfacette an konkaven Grenzflächen in [011]-Richtung scheint eine weitere, vielversprechende Technik zur weiteren Präparation von Quantenstrukturen zu sein.