

Kapitel 1

Einleitung

Ein wesentliches Merkmal heutiger Gesellschaftsformen ist der steigende Austausch an Informationen jeglicher Art. Dies erfordert die Verarbeitung und Übertragung von riesigen Informationsmengen in möglichst kurzer Zeit. Die damit einhergehenden Forderungen nach hohen Übertragungsraten in der Kommunikation und nach steigender Leistungsfähigkeit der beteiligten elektronischen Schaltkreise haben in der Halbleitertechnik zur Realisierung von immer kleineren Bauelementen geführt. Während mikroelektronische Schaltkreise auf Silizium-Basis in elektronischen Geräten dominieren, sind für Anwendungen im Hochfrequenz- und Optoelektronikbereich aufgrund ihrer Materialeigenschaften Verbindungshalbleiter aus den Elementen der III. und V. Gruppe des Periodensystems besser geeignet. In der Hochfrequenztechnik beispielsweise werden für Verstärker-, Oszillator- und Mischerschaltungen rauscharme Bauelemente mit hohen Grenzfrequenzen benötigt. Dabei zählen Heterostruktur-Feldeffekttransistoren aus III-V-Verbindungshalbleitern zu den Transistoren mit den bisher höchsten Frequenzgrenzen. Die Realisierung der zugrunde liegenden Halbleiter-Heterostrukturen mit Schichtdicken von wenigen Nanometern ist durch fortwährende Verbesserung der Herstellungsverfahren ermöglicht worden. Zu nennen sind hier vor allem die MOVPE ('metalorganic vapor phase epitaxy') und MBE ('molecular beam epitaxy').

Die Herstellung von Halbleiter-Heterostrukturen hat u. a. zur Umsetzung des Konzepts der Modulationsdotierung geführt, bei dem die freien Ladungsträger und deren Dotieratome durch eine Heterobarriere räumlich voneinander getrennt sind. Durch die damit verbundene Reduzierung der Störstellenstreuung werden hohe Mobilitäten, kurze Driftzeiten und folglich hohe Grenzfrequenzen erreicht. Heterostruktur-Feldeffekttransistoren (HFET) mit einer Modulationsdotierung bezeichnet man deshalb auch als HEMT ('high electron mobility transistor') oder als MODFET ('modulation doped FET'). Die Diskontinuität im Bandverlauf der Heterostrukturen führt darüber hinaus zu einer hohen freien Ladungsträgerdichte im Kanal, die in Heterostruktur-Feldeffekttransistoren einen hohen steuerbaren Strom ermöglicht. Aufgrund der hohen Elektronenbeweglichkeit in $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ und der hohen Leitungsbanddiskontinuität zwischen $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ und $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ (ca. 0.5 eV) zeigen

Bauelemente basierend auf dem Materialsystem InAlAs/InGaAs/InP ein hohes Leistungspotential im Bereich der Hochfrequenztechnik und Optoelektronik. Die hervorragenden Hochfrequenz- und Rauscheigenschaften von InAlAs/InGaAs-HFETs sind Gegenstand zahlreicher Publikationen, siehe z. B. [1]. Im Mittelpunkt aktueller Forschung stehen auch Transistoren, die auf dem Materialsystem (InAlGa)N basieren [2, 3]. Es bleibt abzuwarten, ob diese Nitrid-basierten HFETs für vergleichbar hohe Betriebsfrequenzen geeignet sind wie InAlAs/InGaAs-HFETs.

Obwohl InAlAs/InGaAs-HFETs bereits vielfach hergestellt und charakterisiert worden sind, ist eine weitere Verbesserung und ein tieferes Verständnis dieser Transistoren erforderlich. Dies betrifft vor allem die hohen Gate-Leckströme [4], die hohen Ausgangsleitwerte [5] und die niedrigen Durchbruchspannungen [6], die diese Transistoren aufweisen. Diese Effekte beschränken die Leistungsverstärkung und die maximale Ausgangsleistung und sind zu einem erheblichen Teil der Stoßionisation der Elektronen im Kanalmaterial $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ zuzurechnen, die durch die geringe Bandlücke dieses Materials (ca. 0.75 eV) begünstigt wird. Neben diesen Auswirkungen auf das Bauelementverhalten zeigt der Stoßionisationsprozess der Elektronen in $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ eine anormale Abhängigkeit von der Gittertemperatur [7, 8] und der elektrischen Feldstärke [7, 9], welche bisher nicht vollständig geklärt werden konnte. Die Stoßionisation der Elektronen in $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ und ihr Einfluss auf das elektrische Verhalten von InAlAs/InGaAs-HFETs bildet deshalb die Hauptmotivation dieser Arbeit. Diesbezügliche Einblicke wären insbesondere für das Verständnis und die Optimierung von AlSb/InAs-HFETs von großer Bedeutung, da in diesen Bauelementen Stoßionisationseffekte in noch stärkerer Form als in InAlAs/InGaAs-HFETs auftreten. Die Herstellung und Charakterisierung von AlSb/InAs-HFETs ist Bestandteil aktueller Forschung [10, 11]. Die Entwicklung dieser HFETs ist letztlich die Fortführung des Trends zu Kanälen mit einem hohen Indium-Anteil. Aufgrund der höheren Elektronenbeweglichkeit in InAs verglichen mit der in $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ sind für AlSb/InAs-HFETs entsprechend höhere Grenzfrequenzen zu erwarten.

Die zunehmende Miniaturisierung der Bauelemente führt zum Auftreten von hohen inhomogenen elektrischen Feldern im Bauelement. Diese Feldgradienten wiederum bewirken bei einem Stromfluss ein nichtstationäres, nichtlokales Transportverhalten, bei dem die Ladungsträger sich lokal nicht im Gleichgewicht mit dem Gitter befinden, da die Relaxation durch Streuprozesse eine endliche Zeit benötigt. Exemplarisch für solche nichtstationären Effekte ist der 'velocity overshoot': Die mittlere Ladungsträgerschwindigkeit zeigt beim Anlegen eines elektrischen Feldes ein zeitliches "Überschwingen", ehe die Wechselwirkung mit dem Gitter zu einem stationären Zustand führt. Die zunehmende Bedeutung von solchen Effekten heißer Ladungsträger wie der 'velocity overshoot' und die Stoßionisation auf das elektrische Bauelementverhalten erfordert geeignete Methoden zur Bauelementmodellierung, wie z. B. eine mikroskopische Behandlung des Ladungsträgertransports mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode [12]. Diese Methode stellt ein stochastisches Verfahren zur Lösung der Boltzmann-Transportgleichung dar und liefert direkt die Verteilungsfunktion der Ladungsträger im

Phasenraum. Die Anwendung dieser rechenzeitintensiven Methode zur Bauelementsimulation wird durch den Einsatz von immer schnelleren und leistungstärkeren Rechnern ermöglicht.

In dieser Arbeit wird eine Zelluläre-Automaten-Methode zur mikroskopischen Modellierung des Ladungsträgertransports angewandt. Sie ist physikalisch äquivalent zur Monte-Carlo-Methode, gestattet aber gegenüber letzterer eine Effizienzsteigerung, die durch ein so genanntes Mehrfachstreuungskonzept und die Benutzung von vorab erstellten Verknüpfungstabellen zur Behandlung der Streuprozesse ermöglicht wird. Ausgehend vom semiklassischen Bild, das dem Zellulären-Automaten-Verfahren und der Monte-Carlo-Methode als physikalische Grundlage dient, werden beide Methoden in Kapitel 2 dargestellt.

Die Kapitel 3 und 4 sind den Hochfeld-Transporteffekten, d. h. den Effekten heißer Ladungsträger, gewidmet und beruhen auf dem Transport unter räumlich homogenen Bedingungen. Dabei werden in Kapitel 3 zunächst die Transportgrößen in den Materialien InAlAs, InGaAs und InP berechnet und, soweit möglich, anhand von experimentellen Messdaten aus der Literatur validiert. Darüber hinaus wird in diesem Kapitel ausführlich der Stoßionisationsprozess der Elektronen in $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ betrachtet, wobei zur Erklärung der experimentell beobachteten anomalen Temperaturabhängigkeit ein phononenunterstützter Stoßionisationsprozess vorgeschlagen wird. Zur Berechnung wird dabei die quantenmechanische Störungstheorie zweiter Ordnung benutzt. Bei einem Vergleich mit Stoßionisationsprozessen ohne direkte Mitwirkung von Phononen wird insbesondere auf den Einfluss der Bandstruktur eingegangen, um die Unterschiede im Stoßionisationsverhalten der Elektronen in GaAs und $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ zu erklären.

Weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit neben der Stoßionisation ist der Einfluss von Einfangstellen und Defekten im Halbleiterkristall. Solche Störstellen sind häufig die Ursache für Abweichungen des theoretisch berechneten und experimentell gemessenen Bauelementverhaltens. Als Kink bezeichnete Anomalien im Ausgangskennlinienfeld von InAlAs/InGaAs-HFETs beispielsweise werden neben der Stoßionisation auf den Einfluss von tiefen Störstellen zurückgeführt [13–15]. Wohlbekannte Einfangstellen für heiße Elektronen sind die mit der Dotierung verknüpften DX-Zentren, auf die eine Verschlechterung der Bauelementeigenschaften von AlGaAs/GaAs-HFETs zurückgeführt wird [16, 17]. Ein verstärktes Einfangen heißer Elektronen findet experimentellen Studien zufolge [18] auch in Fe-dotiertem InP statt. Die Ursache hierfür war trotz der Bedeutung von InP:Fe als semiisolierendes Substrat für InAlAs/InGaAs-HFETs bisher nicht bekannt. Aus diesen Gründen wird in dieser Arbeit der Einfluss tiefer Störstellen, insbesondere von DX-Zentren, untersucht und modelliert.

Der Generations-Rekombinationsmechanismus an tiefen Störstellen wird in Kapitel 4 betrachtet, wobei das nicht strahlende Einfangen und die Emission von Ladungsträgern an der Störstelle als Multiphononübergänge behandelt werden. Mit Hilfe der Störungstheorie werden in dieser Arbeit die Einfang- und Emissionswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von der Energie des freien Ladungsträgers formuliert. Dadurch kann im Gegensatz zu konventionellen Generations-

Rekombinationsmodellen wie das Shockley-Read-Hall-Modell [19] der Effekt heißer Ladungsträger auf Generations-Rekombinationsprozesse in der Transportsimulation berücksichtigt werden. Das entwickelte Modell bildet die Grundlage für die sich anschließende Untersuchung des bei hohen elektrischen Feldern verstärkten Einfangens von Elektronen in InP:Fe. Darüber hinaus wird in Kapitel 4 gezeigt, wie der bei hohen elektrischen Feldern dominante Tunnelemissionsprozess [20] im entwickelten Modell mit nur einem zusätzlichen Parameter berücksichtigt werden kann.

Die Ausbildung des zweidimensionalen Elektronengases (2DEG) in Halbleiter-Heterostrukturen wird in Kapitel 5 betrachtet. Durch selbstkonsistente Lösung der Schrödinger- und der Poisson-Gleichung wird die Dichte des 2DEG in InAlAs/InGaAs-Heterostrukturen berechnet, wobei zur Optimierung der Indium-Anteil variabel gehalten wird. Solche Strukturen lassen sich auf GaAs mit Hilfe eines metamorphen Puffers, mit dem die Gitteranpassung der aktiven InAlAs/InGaAs-Schichten und des Substrates vorgenommen wird, realisieren [21]. Durch Vergleich der berechneten und gemessenen [21] Werte für die Dichte des 2DEG wird die Existenz und der Einfluss tiefer Störstellen und DX-Zentren in InAlAs untersucht, wobei letztere mit Hilfe des in dieser Arbeit entwickelten DX-Donator-Modells bei der selbstkonsistenten Lösung von Schrödinger- und Poisson-Gleichung berücksichtigt werden.

Die Simulation von InAlAs/InGaAs-Heterostruktur-Feldeffekttransistoren, bei der effiziente Methoden zur Berücksichtigung der Entartung und zur Berechnung der Hochfrequenzeigenschaften zum Einsatz kommen, ist Gegenstand von Kapitel 6. Das berechnete Gleichspannungs- und Hochfrequenzverhalten wird anhand von Messungen, die am Daimler-Chrysler-Forschungszentrum in Ulm vorgenommen wurden, validiert. Um einen detaillierten Einblick in den Transport im HFET bei kurzen Gate-Längen zu geben, werden die Transportgrößen im betrachteten 120-nm-Gate-InAlAs/InGaAs-HFET orts aufgelöst untersucht.

Als Optimierungsstudie werden in Kapitel 7 InAlAs/InGaAs-HFETs mit zwei Gate-Kontakten betrachtet. Solche Dual-Gate-HFETs sind u. a. zur Reduzierung von Kurzkanaleffekten (wie z. B. des hohen Ausgangsleitwerts) vorgeschlagen worden [22, 23], um dadurch die Leistungsverstärkung zu erhöhen. Dabei erstrecken sich die bisherigen Untersuchungen vornehmlich auf das elektrische Verhalten bei niedrigeren Frequenzen (< 40 GHz) [23–26] bzw. auf das Gleichspannungsverhalten [23, 27, 28]. In dieser Arbeit wird deshalb, ausgehend vom Einfluss des zweiten Gate-Kontaktes auf die orts aufgelösten Transportgrößen, insbesondere das elektrische Verhalten des Dual-Gate-HFET bei hohen Frequenzen untersucht. Dabei liegt eine Dual-Gate-HFET-Struktur mit einem kurzen Abstand der beiden Gate-Kontakte zugrunde, für die eine Beschreibung durch zwei getrennte FET-Ersatzschaltbilder in Kaskodenschaltung nicht mehr angemessen ist.

Kapitel 8 beinhaltet schließlich eine detaillierte Untersuchung des Durchbruchverhaltens von InAlAs/InGaAs-HFETs, welche wie die Kapitel 3 und 4 zu neuen Einsichten und Erkenntnissen geführt hat. Ausgehend von einer Validierung des berechneten Durchbruchverhaltens anhand von

experimentellen Messdaten wird die Stoßionisation im InAlAs/InGaAs-HFET ortsaufgelöst untersucht. Darüber hinaus wird der Einfluss eines zweiten Gate-Kontaktes auf das Durchbruchverhalten mit den sich daraus ergebenden Auswirkungen auf die Wahl der Arbeitsgeraden für eine maximale Ausgangsleistung analysiert. Durch Computereperimente wird ferner der Einfluss der Raumladung der bei der Stoßionisation erzeugten Löcher und die damit verbundene positive Rückwirkung auf den Eingang demonstriert und dadurch die Bedeutung des Raumladungseffekts im Durchbruchverhalten entschlüsselt. In diesem Zusammenhang wird auch die Bedeutung des Tunneleffekts der Löcher unter dem Gate aufgezeigt, dessen Berücksichtigung in der Bauelementsimulation erst realistische Resultate z. B. für die stoßionisationsbedingte Steilheit ermöglicht. Des Weiteren wird die Durchbruchdynamik anhand des Einflusses der Stoßionisation auf die frequenzabhängigen Zweitorparameter untersucht. Dabei wird ein neuartiges Kleinsignal-Ersatzschaltbild entwickelt, mit dessen Hilfe erstmals starke Stoßionisationseffekte, wie sie z. B. in AlSb/InAs-HFETs auftreten, auf das Hochfrequenzverhalten berücksichtigt werden können. Eine Zusammenfassung bildet den Abschluss dieser Arbeit.