

1 Einführung und Überblick

An der heutigen hochtechnologisierten Welt hat ein Bauelement grundlegend mitgewirkt: der Transistor. Die Grundlagen dafür wurden im Jahre 1930 von Bloch mit Entwicklung der Halbleitertheorie gelegt [1]. In seiner Doktorarbeit beschrieb Bloch das Verhalten von Elektronen in Kristallgittern auf der Basis der Quantenmechanik. Im Dezember 1947 gelang es Bardeen und Brattain in der Arbeitsgruppe von Shockley in den Bell Laboratories, den ersten Transistor zu realisieren [2-4]. Dabei handelte es sich um einen Spitzenkontakt-Transistor. Die Grundlage bildet ein mit einem rückseitigen elektrischen Kontakt (Basis) versehener Germanium-Kristall, auf dem ein mit zwei Goldfolien versehener spitzer Kontakt aufgesetzt wird (Emitter und Kollektor). Legt man an diesen Kontakten ein Feld an und prägt zwischen der Basis und einem dieser Kontakte einen kleinen Strom ein, so kann ein großer Stromfluss zwischen Emitter und Kollektor beobachtet werden. Das Prinzip der elektrischen Verstärkung konnte so zum ersten Mal mittels eines Halbleiter experimentell gezeigt werden. Die Erfindung des Transistors leitete den Übergang von der Vakuumröhre zu einem Festkörperbauteil als aktives Element in elektronischen Schaltungen ein. Shockley, der insbesondere die Theorie des Transistors mitentwickelte, gelang es dann auch 1950 den ersten bipolaren Sperrschicht Transistor (BJT – bipolar junction Transistor) zu realisieren, der Grundlage für die weitere Entwicklung des Transistors wurde [5,6]. 1956 erhielten alle drei Forscher für diese Entdeckung den Nobelpreis in Physik. 1957 wurde mit den Arbeiten von H. Krömer ein weiterer Meilenstein zu Halbleiterbauelementen gelegt, der bis heute Forscher auf der ganzen Welt beschäftigt. Sein Konzept der Heterostruktur Bipolar-Transistoren (HBT) beruht auf der Kombination unterschiedlicher Halbleitermaterialien [7-9], die viele Verbesserungen mit sich bringen sollten. Prägend ist dabei der Begriff „band gap engineering“ von F. Capasso [10]. Durch den Einsatz von Halbleitermaterialien mit verschiedenen Bandlücken können insbesondere die für den Stromtransport zuständigen Leitungs- und Valenz-Bänder so gestaltet werden, dass die Transistoreigenschaften wie die Stromverstärkung β oder die Hochfrequenzeigenschaft um

ein vielfaches gesteigert werden können. Ungefähr zur gleichen Zeit zeigte J. Kilby [11] und etwas später R. Noyce [12] die ersten auf Si basierenden integrierten Schaltungen (IC – integrated circuit). J. Kilby, H. Krömer und Z. I. Alferov [13], der 1963 zeitgleich mit H. Krömer [14] das Konzept des Halbleiterlasers erarbeitete, erhielten im Jahre 2000 den Nobelpreis für ihre Arbeiten. Zunächst konnten hochperfekte Heterostrukturen ausschließlich mittels der Molekularstrahl Epitaxie (MBE - Molecular Beam Epitaxy) gewachsen werden, später folgte die Entwicklung der metallorganischen Gasphasenepitaxie (MOVPE - Metalorganic Vapour Phase Epitaxy). Diese Grundlage einer technischen Umsetzung der Heterostrukturbauelemente in der Massenproduktion wurden 1968 mit den Arbeiten von H. M. Manasevit gelegt [15]. Mit dieser Technik zum kristallinen Aufwachsen verschiedener Verbindungshalbleiter auf ein gegebenes Substrat ist es möglich, Hetero-Strukturen mit ausreichend guter Grenzflächenschärfe zu realisieren. Basierend auf diesen Arbeiten wurden Heterostrukturbauelemente entwickelt, die aufgrund der hohen Schaltgeschwindigkeit und den optischen Eigenschaften heutzutage in der modernen Kommunikationstechnologie breiten Einsatz finden. Hochleistungstransistoren werden in der Satelliten- und Mobilfunktechnologie, bei Radaranwendungen und in optoelektronischen Schaltungen eingesetzt [16-21]. Zudem führt der weiter steigende Bedarf an hohen Übertragungskapazitäten in Datennetzen dazu, dass weitere intensive Forschung auf dem Gebiet der Epitaxie und Technologie von Heterostrukturbauelementen von höchster Bedeutung sind.

1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Arbeit ist, einen Beitrag zur Entwicklung von Halbleiterschichten und Heterostrukturen für den Einsatz in elektronischen und optoelektronischen Bauelementen zu leisten. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Entwicklung von Doppel-Heterostruktur Bipolartransistoren (D-HBT) auf Indiumphosphid (InP)-Basis. Neben der Weiterentwicklung bestehender Transistorstrukturen durch den Einsatz quaternärer

Zwischenschichten wird das Wachstum der InP/GaAsSb/InP Heterostruktur beschrieben. Der Einsatz von hoch p-dotiertem GaAsSb als Basisschicht in InP basierenden HBTs wurde 1996 erstmalig gezeigt [22,23]. Der für das elektronische Verhalten günstige Leitungsbandverlauf mit einer negativen Leitungsbanddiskontinuität von GaAsSb zu InP ermöglicht den Einsatz von InP als Kollektormaterial ohne dem bekannten current blocking Effekt an dieser Heterostruktur [24]. Somit können einfach aufgebaute D-HBT-Strukturen mit den Vorteilen kleiner Einschalt- und großen Durchbruchspannungen realisiert werden [25]. Zu Beginn dieser Arbeit lagen neben der beiden Erstveröffentlichungen von 1996 Arbeiten einer weiteren Arbeitsgruppe vor, die auch aktuell diese HBT-Struktur weiter entwickeln [24-26]. Ziel dieser Arbeit ist die Integration einer hoch p-dotierten GaAsSb-Schicht als Basis in den vorhanden Prozess. Im etablierten Prozess im Fachgebiet wird Stickstoff als Trägergas genutzt. Die Auswirkungen von Stickstoff auf das Kristallwachstum von GaAsSb ist in der Literatur nicht beschrieben und macht eine Neuentwicklung notwendig.

Der Vorteil der hohen Spannungsstabilität der D-HBT-Strukturen erlaubt den Einsatz zum Treiben von Elektroabsorptionsmodulatoren (EAM). Ein innovativer Ansatz zur monolithischen Integration von optischen Modulator und Transistorstruktur in einem Schichtpaket wird anhand dreier unterschiedlicher Ansätze entwickelt. Ziel ist die Steuerung der optischen Absorption mit Variation der Basis-Kollektor-Spannung im D-HBT, um die Bandlücke und somit die Absorption über den Franz-Keldysh Effekt zu ändern. Das Verschieben der Modulator-Struktur in den Kollektor einer D-HBT Struktur (HBT-EAM) macht verschiedene Schichtentwicklungen notwendig. Aufbauend auf vorhandene Schichtdaten muss die n-Dotierung von InP für sehr hohe, aber auch für minimale Dotierstoffkonzentrationen untersucht werden. Zur Umsetzung der Ansätze ist zudem die Entwicklung einer p-dotierten und für die genutzte Wellenlänge von $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ dazu optisch transparenten p-InGaAlAs Schicht notwendig.

Als weiteres Heterostruktur-Bauelement wird die Entwicklung eines polarisationssensitiven Schalter vorgestellt. Bestimmte

Wachstumsbedingungen führen zu einem Selbstordnungseffekt der Atome im Kristallgitter [27,28], der zu einer ausgeprägten Polarisationsanisotropie führt [29-31]. Ziel dieser Arbeit ist die Umsetzung eines schon für InGaP/GaAs realisierten Schaltungskonzeptes einer doppel-pin-FET-Diode [30-32] für einen intensitäts-unabhängigen Polarisationschalter. Das quaternäre Material InGaAsP ermöglicht dabei die Untersuchung der Polarisationsanisotropie mit einer für Lichtwellenleiter angepassten Wellenlänge von $\lambda = 1,55$ und $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$. Zur Umsetzung wurde das Wachstum von quaternären InGaAsP-Schichten im Temperaturbereich von $T = 550 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $T = 625 \text{ }^\circ\text{C}$ entwickelt. Weiter ist zur Umsetzung der doppel-pin-FET-Diode die Entwicklung optisch transparenter Kontaktschichten notwendig. Dies führt zur Untersuchung der Kohlenstoffdotierung von p-InAlAs. Erstmals wird dabei Tertiärbutylarsin (TBAs) als Gruppe V Quelle eingesetzt. Als weitere Möglichkeit einer für den Wellenlängenbereich optisch transparenten Halbleiterschicht wird die p-Dotierung von InP mit Zink entwickelt.

1.2 Inhalt der Arbeit

Nach einer kurzen Einführung in das Funktionsprinzip von Heterostruktur-Bipolar-Transistoren werden die elektronischen Gleichstrom- und Hochfrequenzeigenschaften im Anschluss an diesen Kapitel erläutert. Der zweite Teil dieser Einführung gibt einen Überblick über die Klasse der III/V-Halbleiter. Die ZnS-Kristallstruktur und die CuPt_B -Struktur wird am Beispiel vom ternären Halbleiter InGaAs vorgestellt. Im Kapitel 2 wird neben einer allgemeinen Beschreibung von typischen eingesetzten Quellenmaterialien und des Wachstumsprozesses die genutzte MOVPE-Anlage und die spezifische Quellenkonfiguration beschrieben, sowie die Bestimmung der für das Wachstum wichtigen Parameter erarbeitet. Kapitel 3 gibt einen Überblick über die eingesetzten Charakterisierungsmethoden. Es wird dargestellt, wie mittels der Hallmessung, der Transmission-Line-Messung, der hochauflösenden Röntgenstrukturanalyse und der Photolumineszenz wichtige Eigenschaften der Halbleiter, wie die

Ladungsträgerkonzentration oder die Gitterkonstante, ermittelt werden können. Kapitel 4 widmet sich dem epitaktischen Wachstum der für die Heterostrukturen notwendigen Halbleitermaterialien. Hauptteil dieses Kapitels ist die Neuentwicklung von GaAsSb unter Stickstoffträgergas sowie die Untersuchung der kristallinen Selbstordnung von quaternären InGaAsP-Schichten. Darüber hinaus wird das Wachstum und die speziellen Eigenschaften weiterer untersuchter Halbleiter erläutert. Abschließend wird in Kapitel 5 die technologische Umsetzung vom Halbleiterschichtsystem bis zum Bauelement beschrieben. Das elektrische Gleichstrom- und Hochfrequenz-Verhalten von zwei D-HBT-Strukturen mit einem Komposit-Kollektor sowie einer GaAsSb-Basisschicht wird daran anschließend vorgestellt und diskutiert. Das Konzept der monolithischen Integration eines Elektroabsorptionsmodulator (EAM) und eines D-HBTs wurde anhand dreier unterschiedlicher Vorgehensweisen mit Hilfe der in Kapitel 4 beschriebenen Halbleiterschichten umgesetzt. Aufbauend auf das Wachstum der integrierten HBT-EAM-Strukturen wird das elektrische Gleichstrom- und das Frequenzverhalten der optischen Modulation vorgestellt. Als weiteres Bauelement wird in Kapitel 5 ein polarisationssensitiver Schalter vorgestellt. Anhand einer pin-Diode mit geordneten quaternären InGaAsP als Funktionsschicht wird die Abhängigkeit der Responsivität mit Drehung der Polarisationsrichtung in Abhängigkeit der Lichtwellenlänge vorgestellt. Im Anschluss werden die Funktionsweise einer doppel-pin-FET-Struktur erläutert und die experimentellen Ergebnisse der realisierten Struktur eines Intensitätsunabhängigen und von der Polarisationsrichtung des Lichtes abhängigen Schalter vorgestellt.

1.3 Der Heterostrukturbipolartransistor

Die Erfindung des Transistors leitete den Übergang von der Vakuumröhre zu einem Festkörperbauteil als aktives Element in elektronischen Schaltungen ein. Im folgenden Kapitel werden grundlegende elektrische Gleichstrom-, aber auch Hochfrequenz-Eigenschaften der im Weiteren untersuchten HBTs allgemein beschrieben. Als weitere Unterpunkte werden anhand von Bändermodellen die spezifischen Eigenschaften InP-basierender S- und D-HBT Strukturen beschrieben.

1.3.1 Funktionsprinzip

Das Prinzip eines Bipolartransistors beruht auf einem Halbleiterkristall, der drei verschiedene Bereiche enthält: Emitter, Basis und Kollektor. Während Emitter und Kollektor die gleiche Dotierungsart aufweisen, ist die Basis immer mit dem entgegengesetzten Dotierstoff versehen. So ergeben sich zwei mögliche Kombinationen, der npn- und der pnp-Transistor. Für Hochfrequenzanwendungen wird durch die deutlich höhere Beweglichkeit der Elektronen im Halbleitermaterial bis auf wenige Ausnahmen der npn-Transistor weiter entwickelt. Die nachfolgenden Betrachtungen werden auf diesen Transistortyp beschränkt.

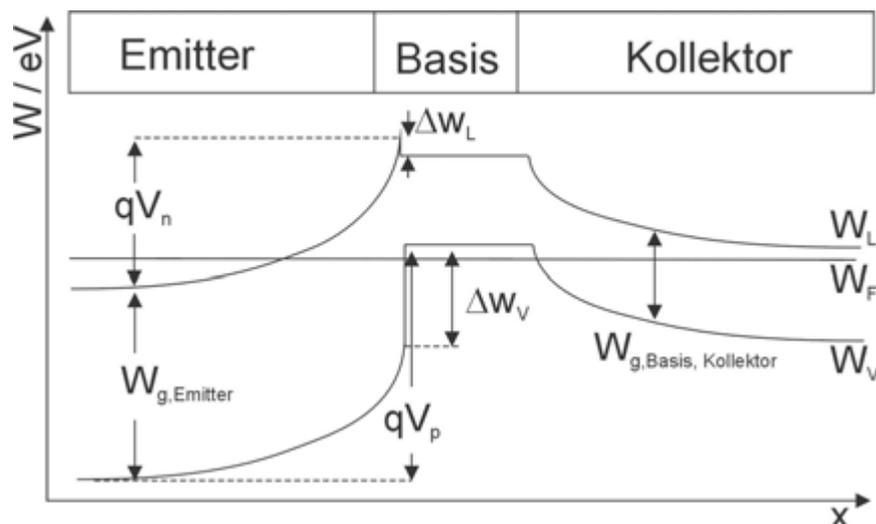


Abbildung 1.1: Qualitative Darstellung der Bandstruktur eines Schichtpaketes für einen S-HBT im thermodynamischen Gleichgewicht.

In Abbildung 1.1 ist der Schichtaufbau einer npn-S-HBT-Struktur (single heterostructure bipolar transistor) mit dem dazugehörigen Bandverlauf gezeigt. Als Emittermaterial wird ein Halbleiter mit größerer Bandlücke als für die Basis- und dem Kollektor genutzt. Zwischen Basis und Emitter wird eine Spannung U_{BE} angelegt, so dass diese pn-Diode in Flussrichtung betrieben wird ($U_{BE} > 0$). So werden Elektronen aus dem Emitter in die Basis und Löcher aus der Basis in den Emitter injiziert. Diese zwei Minoritätsströme steuern das elektrische Verhalten einer Transistorstruktur maßgeblich. Weist der Kollektor nun ein positives Potential gegenüber dem Emitter und der Basis auf $U_{CE} \gg 0$, so befindet sich die Kollektor-Basis-Diode im gesperrten Zustand. Elektronen, die vom Emitter in die Basis injiziert werden und durch Diffusion die Kollektorregion erreichen, werden aufgrund der großen Feldstärke in der Raumladungszone der Basis-Kollektor-Diode vom Kollektor abgesaugt. Durch die Steuerung der Basis-Emitter-Diode mit Einprägen eines Stromes in die Basis, kann ein Kollektorstrom gesteuert werden. Eine sehr dünne Basisschicht ist Voraussetzung dafür, dass die Elektronen aufgrund des Konzentrationsgefälles durch Diffusion die Kollektorschicht erreichen.

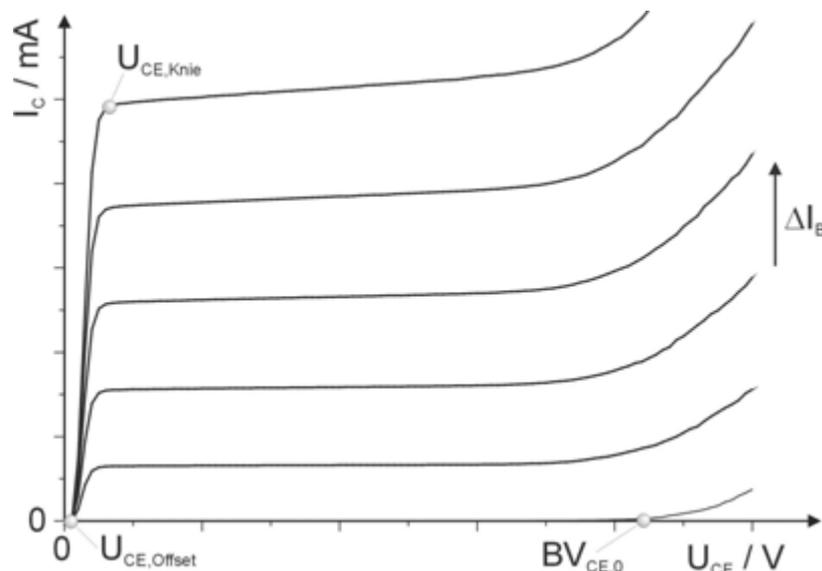


Abbildung 1.2: *Stromgesteuertes Ausgangskennlinienfeld eines Bipolartransistors.*