

1 Einleitung und Aufgabenstellung

1.1 Motivation und Aufgabenstellung

In den letzten Jahren wurde die Weiterentwicklung von integrierten Schaltungen in erster Linie durch die Reduktion der Bauelementstrukturen bis in den Nanometerbereich vorangetrieben. Durch die mittlerweile erreichten Strukturgrößen und die immer aufwändigere Technologie für die Realisierung integrierter Schaltungen werden Alternativen zu den herkömmlichen CMOS-Schaltungen zunehmend attraktiver.

Alternative Bauelemente mit sehr guten Zukunftsprognosen stellen die Resonanztunnelelemente dar [1]. Die in dieser Arbeit untersuchten Resonanztunneldioden (RTD) sind Zweipolbauelemente mit sehr hohen intrinsischen Schaltgeschwindigkeiten [2], die einen negativ differentiellen Widerstandsbereich in ihrer Strom-Spannungskennlinie aufweisen.

Diese beiden Eigenschaften machen die Resonanztunneldioden interessant als Hochgeschwindigkeitsbauelemente für integrierte Schaltungen. Aufgrund der bisher nachgewiesenen Oszillationsfrequenzen von 650 GHz [3][4][5] eignet sich die RTD für Hochfrequenzanwendungen, schnelle Speicher [6], Analog-Digital Wandler [7] und auch schnelle mehrwertige Logik-Anwendungen [8]. Durch die Verwendung zweier RTD in Reihe lässt sich darüber hinaus ein Gatter formen, welches sich über einen Strom, meist mit auf dem gleichen Substrat realisierten Feldeffekttransistoren oder pin-Dioden, steuern lässt [9][10].

Bislang war die Herstellung von bei Raumtemperaturen funktionierenden RTD nur auf III/V Halbleitern möglich. Es zeigt sich jedoch, dass zunehmend Si-Ge als Technologie für Schaltungen mit Resonanzbauelementen interessant wird [11]. Darüber hinaus ist es möglich geworden, eine Kointegration von III/V-basierenden RTD auf Siliziumsubstrat zu realisieren [12], was neue Möglichkeiten einer zukünftigen Integration von CMOS und Resonanztunnelelementen eröffnet [13].

Das Besondere an den RTD ist der Bereich des negativ differentiellen Widerstands. Durch die enorme Funktionalität und die weiten Anwendungsgebiete des Bauelements stellen sie zugleich auch hohe Anforderungen an die Modellbildung und Simulation der Einzelkomponenten und Schaltungen [14][15]. Die genaue Beschreibung und die Erfassung von nichtlinearen Effekten sind mit rein analytischen Modellen gar nicht oder nur sehr schwer möglich. Deswegen ist der physikalische Bezug eines Schaltungsmodells zu dem quantenmechanischen Funktionsprinzip der RTD ein wesentlicher Bestandteil der Untersuchungen in dieser Arbeit.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, mit Hilfe der simulatorgestützten Parameterextraktion und neuen Mess- und Bestimmungsmethoden ausführliche Untersuchungen an RTD-Bauelementen durchzuführen und Beiträge für die Optimierung der Bauelemente und Schaltungen zu leisten. Dazu werden reale InAlAs/InGaAs RTD-Strukturen, wie sie im Fachgebiet Halbleitertechnik/Halbleitertechnologie der Universität Duisburg-Essen entwickelt werden, zugrunde gelegt und ausführlich analysiert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein konvergierendes semi-physikalisches RTD-Großsignalmodell entwickelt bzw. angepasst, das über die Fläche skalierbar ist und anschließend in der Schaltungsentwicklung eingesetzt wird.

Dafür mussten neue Methoden in der Parameterextraktion und der Messtechnik entwickelt werden, die eine exakte Bestimmung der RTD im linearen und nicht-linearen Bereich erlauben. Vorteil dieser Methoden ist eine starke Reduzierung der Extraktionsfehler durch gezielte Messungen in bestimmten Bereichen der Strom-Spannungskennlinie der RTD. Darüber hinaus konnten mittels eines neuen Messaufbaus im Zeitbereich frequenzabhängige Vorgänge des intrinsischen Bauelements erstmals nachgewiesen und charakterisiert werden.

Die Modellentwicklung führte zu der Realisierung von neuartigen Schaltungskonzepten mit RTD in Kombination mit HFET und pin-Photodioden. So wird durch die komplementäre Verschaltung von vier RTD ein neues Schaltungselement geschaffen, was sich für eine Vielzahl von verschiedenen Anwendungen eignet.

Besonders hervorzuheben sei hier eine zum Patent angemeldete Pulsgenerator-Schaltung auf Basis von RTD und pin-Photodioden, die sich beispielsweise für die sich gerade im Entwicklungsstadium befindlichen Ultrawideband (UWB) Technologie als Puls-Signalquelle sehr gut eignet.

1.2 Aufbau der Arbeit

In den folgenden Kapiteln werden die notwendigen Grundlagen zum Verständnis dieser Arbeit beschrieben. Zunächst werden die Funktionsprinzipien der verwendeten Bauelemente behandelt. Hier wird bereits das zugrundeliegende physikalische Modell der Resonanztunneldiode eingehend auf Basis vorangegangener Arbeiten dargestellt. Des Weiteren wird ein gängiges Modell für einen Feldeffekttransistor auf III-V-Basis vorgestellt und das Grundprinzip einer pin-Diode dargelegt. Abschließend zu den Grundlagen wird das Schaltungs- und Integrationskonzept aller Bauelemente auf einem semiisolierenden Substrat für diese Arbeit präsentiert.

Im Anschluss daran wird in Kapitel 3 auf die verwendete Messtechnik eingegangen und es werden die theoretischen Grundlagen zur Parameterextraktion beschrieben. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Messtechnik zur Bestimmung der zeitabhängigen Großsignalparameter wird im letzten Unterkapitel präsentiert.

Inhalt des vierten Kapitels ist die Untersuchung der RTD mit Hilfe eines Kleinsignalmodells für verschiedene Temperaturen. Im Vordergrund steht dabei die Parameterextraktion aus Hochfrequenzmessungen und eine ausführliche Analyse des Bauelementverhaltens und der Geometrie, die anhand von Messergebnissen und theoretischen Berechnungen gestützt wird.

Ein zentraler Teil des Kapitels 5 beschäftigt sich mit der Großsignalanalyse der Resonanztunneldioden. Zunächst wird das Verhalten der Strom-Spannungscharakteristik bei Großsignalspannungen über den NDR-Bereich hinaus analytisch beschrieben und anschließend mit den neuen messtechnischen Methoden überprüft. Es wird gezeigt, dass das angepasste Großsignalmodell für die gezeigten Flächen der RTD übereinstimmende Ergebnisse mit Hochfrequenzmessungen in den entsprechenden Arbeitspunkten liefert.

Ein weiterer wichtiger Teil der Arbeit ist die Untersuchung von Schaltungskonzepten in Kapitel 6. Dabei wird, ausgehend von einer ausführlichen Analyse und Optimierung eines MOBILE-Gatters, ein neuartiges Schaltungskonzept präsentiert, welches in dieser Arbeit entwickelt wurde. Das Funktionsprinzip und die elektrische Beschreibung der neuen Schaltung schließen dieses Kapitel ab.

In Kapitel 7 werden Schaltungsergebnisse des Konzeptes aus Kapitel 6 anhand eines 1:2-Demultiplexers mit optischem Eingang vorgestellt. Insbesondere wird auf innovative Aspekte bezüglich der erreichten Verdopplung der zu verarbeitenden Datenrate im Vergleich zu vorherigen MOBILE-Demultiplexern eingegangen.

Im Vordergrund von Kapitel 8 steht die Nutzung des neuen Schaltungskonzeptes als Pulsgenerator mit beliebig einstellbarer Ausgangspulsform für Ultrawideband-Systeme. Im Anschluss folgt eine ausführliche Untersuchung der Ausgangssignalformen, die für UWB-Anwendungen von besonderem technischen Interesse sind.

Die Messergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit gefertigten Testschaltungen werden in Kapitel 9 vorgestellt. Dabei werden parallel zu den Messergebnissen Simulationen der Testschaltungen präsentiert, und zum Vergleich und der Interpretation der Ergebnisse verwendet. Darüber hinaus werden Ansatzpunkte zur weiteren Schaltungsoptimierung hier erörtert, um noch höhere Betriebsfrequenzen zu erzielen.

