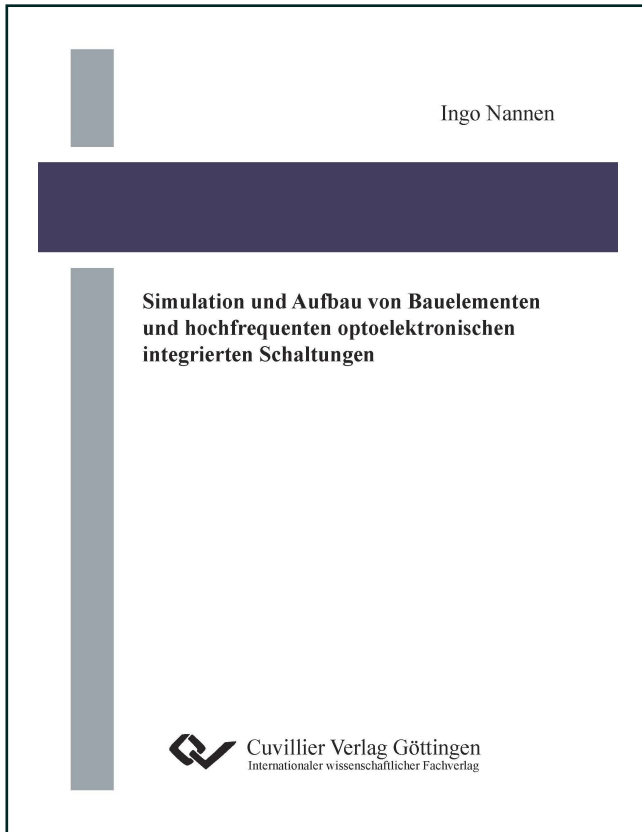




Ingo Nannen (Autor)

# **Simulation und Aufbau von Bauelementen und hochfrequenten optoelektronischen integrierten Schaltungen**



Ingo Nannen

**Simulation und Aufbau von Bauelementen  
und hochfrequenten optoelektronischen  
integrierten Schaltungen**



Cuvillier Verlag Göttingen  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6435>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# 1. Einleitung

Als zu Beginn des 20. Jahrhunderts die Elektronenröhre erfunden wurde [1], war diese lange Zeit das Bauelement der Wahl, um schwache Signale nutzbar zu verstärken. Elektronenröhren wurden unter anderem dafür verwendet, die Verbreitung von Informationen durch das Radio für viele Menschen nutzbar zu machen. Erst 40 Jahre später im Jahre 1947 fanden Wiliam Shockley, John Bardeen and Walter Brattain eine Alternative zur Elektronenröhre mit der Entwicklung des ersten Halbleitertransistors [2, 3]. Damit legten sie die Grundlage für die Entwicklung von integrierten Schaltungen (eng. integrated circuits, IC)[4, 5]. Seither wurden Transistoren in ihrer Leistung und Zuverlässigkeit stetig verbessert [6]. Hinzu kommt eine zunehmende Miniarisierung der Transistoren, so dass in heutigen integrierten Schaltungen bis zu einer Milliarde Transistoren eingesetzt werden [7].

Ein weiterer Meilenstein für die Kommunikation war 1960 [8] die Erfindung des Lasers und im Jahre 1962 [9, 10, 11, 12] die Entwicklung des Halbleiterlasers. Mit der Lasertechnologie in Kombination mit der Glasfasertechnik kam eine neue Möglichkeit hinzu, Daten zu transportieren. Die optische Kommunikation bietet im Gegensatz zur elektrischen Kommunikation eine weitaus kostengünstigere Alternative, die gleiche Datenmenge pro Zeiteinheit zu übertragen [13]. Hinzu kommt, dass die Glasfaser eine geringe Dämpfung, Immunität gegenüber elektromagnetischen Feldern und eine hohe Bandbreite im Vergleich zu elektrischen Leitungen besitzen [14]. Für die Kommunikation über Glasfaser ist am Besten das Licht im Wellenlängenbereich 1300 nm und 1550 nm geeignet. Dieser Wellenlängenbereich wird hervorragend durch die Bandlückenenergie von III/V-Halbleitern, wie zum Beispiel *Indium, Gallium / Arsenid, Phosphid* (*In, Ga / As, P*) abgedeckt. Hier liegt der große Vorteil dieser III/V-Verbindung gegenüber dem kostengünstigeren Silizium (Si), welches in diesem Wellenlängenbereich transparent ist und somit nicht für den Empfang optischer Signale genutzt werden kann. Die Grundlagen für die optische Kommunikation wurden mit optoelektronischen integrierten Schaltungen (eng. optoelectronic integrated circuit, OEIC) auf Basis des *InP*-Systems gelegt. Der erste optoelektronische Empfänger für diesen Wellenlängenbereich wurde im Jahre 1980 [15] und der erste monolithisch integrierte elektroabsorbptionsmodulierte Laser sieben Jahre später vorgestellt [16].

Der optischen Kommunikation kommt besondere Bedeutung zu, wenn die Schätzungen eintreten, dass im Jahre 2016 der Internetverkehr pro Jahr die magische Grenze von einem Zettabyte ( $10^{21}$  byte) überschreitet [17]. Diese explosionsartige Entwicklung ist vor allem auf die Internetdienste wie *Youtube*, die zunehmende populäre Nutzung der Videokonferenzdienste im industriellen und privaten Bereich und die Nutzung solcher Dienste auch im Mobilfunkbereich zurückzuführen. Nach Angaben von *Youtube* werden am Tag über zwei Milliarden Videos mit steigender Tendenz angeschaut [18]. Um die hierfür notwendige Infrastruktur bereit zu stellen, bedarf es neuer Techniken, um vorhandene Glasfasernetze zu nutzen und die Anzahl der pro Zeiteinheit übertragenen Daten zu erhöhen. Eine der wohl vielversprechendsten Techniken, dies zu erreichen, bietet die Übertragung mittels Quadraturphasenumtastung [19]. So wurde in dem von der Europäischen Union geförderten synQPSK-Projekt gezeigt, dass mit synchroner Quadraturphasenumtastung verbunden mit Polarisationsmultiplex die Datenrate über herkömmliche Glasfasernetze vervierfacht werden kann [20], was mit dem Forschungspreis in Nordrhein-Westfalen ausgezeichnet wurde [21].

Um diese hohen Datenraten zu erreichen, müssen schnelle optische Empfänger eingesetzt werden. Heterostruktur-Feldeffekttransistoren und Heterostruktur-Bipolartransistoren bieten mit ihren hohen Grenzfrequenzen optimale Bauelemente, um hochfrequente Schaltungen zu entwickeln, die in Kombination mit *InP*-Photodiode für den Einsatz als optische Empfänger für hohe Datenraten ausreichend sind [22, 23, 24]. Dabei bietet gerade die Kombination von Photodiode und Transistorschaltung auf einem Wafer (monolithische Integration) eine gute Möglichkeit, die parasitären Effekte zu vermeiden, die zum Beispiel bei einer herkömmlichen Verbindung von Photodiode und Transistorschaltung durch das Bonden entstehen [25, 26, 27].

Ein Nachteil der *InP*-Technologie gegenüber der *Silizium*- und *Silizium – Germanium*-Technologie (*SiGe*) ist der höhere Grundpreis für die Wafer und die Technologie zur Herstellung der Transistoren [14, 28, 29]. Hier können die Entwicklungskosten durch den Einsatz von geeigneten Simulationen erheblich reduziert werden. Das Simulationsprogramm *Atlas* bietet dazu die Möglichkeit. Liegen geeignete Transistormodelle zu Grunde, kann durch einfache Simulationen das Bauelementverhalten vor dem Wachstum der Bauelementschichten und der Fertigung in der Prozess-Technologie untersucht werden. Ebenso bieten physikalische Simulationen die Möglichkeit, die Gründe für ein Fehlverhalten von Transistoren durch nachträgliche Untersuchungen zu bestimmen.

Ein weiterer unerlässlicher Baustein zur Entwicklung von Schaltungen ist die Schaltungssimulation, welche mit dem Programm *Advanced Design System* durchgeführt werden kann. Dieses Programm ermöglicht den Aufbau und die Optimierung der Schaltung basierend auf Großsignalmodellen einzelner Bauelemente.

Die Aufgabe dieser Arbeit war es, eine vollständige Entwicklungskette, aufbauend auf physikalischen Simulationen der Heterostruktur-Feldeffekttransistoren, der Heterostruktur-Bipolar-

transistoren und der Photodiode, über die Schaltungssimulation der Transimpedanzverstärker basierend auf Großsignalmodellen, sowie deren technologischen Umsetzung über Layouts und Prozess-Technologie bis hin zum Aufbau der optisch-elektrischen Hochfrequenz-Messtechnik zu realisieren.

## 1.1. Aufbau der Arbeit

Die zur Entwicklung der Transimpedanzverstärker benötigten Transistoren und Photodioden werden in Kapitel 2 vorgestellt. Zur Vorstellung gehören die prinzipielle Funktionsweise, der Schichtaufbau, die zu den Bauelementen gehörigen Kleinsignalersatzschaltbilder und die für die Schaltungssimulation notwendigen Modelle der Transistoren.

Im Anschluss daran werden in Kapitel 3 die Grundlagen der optischen Datenübertragung erklärt und die daraus resultierenden Voraussetzungen für die Verstärker.

Auf die Eigenschaften von Verstärkern, deren charakteristischen Eigenschaften, sowie auf den generellen Aufbau wird in Kapitel 4 eingegangen. Dazu werden grundlegende Schaltungskonzepte erklärt, auf denen die entwickelten Transimpedanzverstärker beruhen.

Die für die Messung und Modellbildung der Bauelemente notwendige Gleichstrom- und Hochfrequenz-Messtechnik wird in Kapitel 5 vorgestellt. Darauf aufbauend werden die für die Modellbildung erforderlichen Mess- und Auswerteverfahren gezeigt. Ebenfalls Bestandteil dieses Kapitels ist die Präsentation eines im Rahmen dieser Arbeit entwickelten optisch-elektrischen Messplatzes, der die Charakterisierung von optisch-elektrischen Bauteilen und Schaltungen ermöglicht.

Im darauf folgenden Kapitel 6 werden die Grundlagen der physikalischen Simulation erläutert. Dies beinhaltet die für die Simulation notwendigen Modelle und die Erklärung der physikalischen Materialparameter, welche für die Simulation der Transistoren und Photodioden erforderlich sind.

Die Ergebnisse der physikalischen Simulation und der Vergleich mit realen Messdaten erfolgt in Kapitel 7.

In Kapitel 8 wird die Entwicklung der Transimpedanzverstärker für zwei Transistortechnologien vorgestellt und unterschiedliche Ansätze für optisch-elektrische Schaltungen diskutiert.

Die technologische Herstellung der Bauelemente und der Transimpedanzverstärker ist Inhalt von Kapitel 9. Ebenso werden hier die entwickelten Layouts betrachtet.

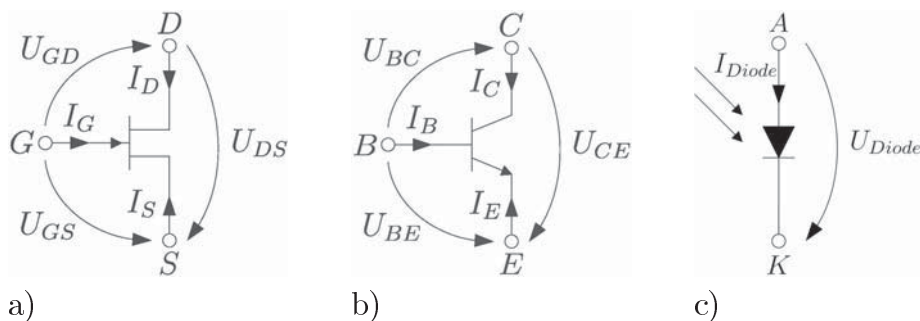
Die Charakterisierung der Transimpedanzverstärker und die technologischen Optimierungen der Bauelemente zur Verbesserung der erreichten Ergebnisse werden anschließend in Kapitel 10 vorgestellt.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse in Kapitel 11 schließt die Arbeit ab.



## 2. Übersicht über die verwendeten Bauelemente

Für die Entwicklung von Transimpedanzverstärkern (eng. **transimpedance amplifier**, TIA) in Kombination mit Photodioden für den Einsatz als optisch-elektrisch integrierte Schaltung (eng. **optoelectronic integrated circuit**, OEIC), werden in dieser Arbeit vier aktive Bauelemente eingesetzt. Dies sind der **Heterostruktur-Feldeffekttransistor** (eng. **heterostructure field effect transistor**, HFET), der **Heterostruktur-Bipolartransistor** (eng. **heterostructure bipolar transistor**, HBT) und als Photodioden die pin-Diode und die pn-Diode. Die zu den Bauelementen gehörenden Schaltsymbole sind in Abbildung 2.1 mit den entsprechenden Spannungen und Strömen gezeigt.



**Abbildung 2.1.** – Schaltsymbole eines a) Heterostruktur-Feldeffekttransistors, b) Heterostruktur-Bipolartransistors und einer c) Photodiode

In diesem Kapitel werden die prinzipielle Funktionsweise, der Schichtaufbau und die für die Schaltungsentwicklung notwendigen Klein- und Großsignalmodelle der verwendeten Bauelemente erklärt. Kleinsignalmodelle lassen dabei nur eine Kleinsignalaussteuerung des Arbeitspunkts zu, da das Modell nur das Verhalten des Bauelements um den Arbeitspunkt herum als ein linearisiertes Verhalten wiedergibt. Im Gegensatz dazu können Großsignalmodelle das Verhalten für unterschiedliche Arbeitspunkte und für deren Großsignalaussteuerung simulieren. Dabei beinhaltet das Großsignalmodell auch zum Kleinsignalersatzschaltbild äquivalente Größen, die bei vorhandenem Kleinsignalersatzschaltbild aus diesem übernommen werden können.