



Martin Schlosser (Autor)

Limitierende Skalierungseffekte als Grundlage für innovative Feldeffekttransistoren



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6290>

Copyright:

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

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



1 Einleitung

Technologische Innovationen haben das Leben der Menschen seit Beginn der industriellen Revolution gegen Ende des 18. Jahrhunderts enorm verändert. Während für das 19. Jahrhundert die Entwicklung der Dampfmaschine, erste medizinische Erfolge und damit einhergehende demographische Veränderungen entscheidend waren [Kha08], hat seit der Mitte des 20. Jahrhunderts die Elektronik einen Siegeszug angetreten, der zu tiefgreifenden Veränderungen in nahezu allen Lebensbereichen geführt hat. Seit den ersten Rechenmaschinen Konrad Zuses [Kar97] trat durch die Erfindung und Weiterentwicklung des Transistors eine Leistungsverbesserung und Miniaturisierung ein, die immer neue Anwendungen ermöglichte. Um nur ein Beispiel zu nennen: Während vor etwa 1990 mobiles Telefonieren nur mit sehr teuren und großen Autotelefonen im C-Netz möglich war, ist mobile Kommunikation mittlerweile ein Massenmarkt, durch den immer mehr Menschen mobile Sprach- und Datendienste völlig selbstverständlich in ihr Leben integrieren.

Die Miniaturisierung schreitet immer weiter voran und stößt dabei immer wieder an Grenzen, die es zu überwinden gilt. Dies ist Gegenstand intensiver Forschung und Entwicklung, und damit beschäftigt sich auch ein Großteil dieser Arbeit. Doch das soll nicht davon ablenken, dass es in der Mikroelektronikindustrie auch zahlreiche andere Entwicklungen gibt, die erhebliche Umwälzungen mit sich bringen. Die Auslagerung der Produktion an Foundries [Laz08], die zunehmende Wichtigkeit gewerblicher Schutzrechte [Def08], die Problematik der dauerhaften Speicherung von Daten [Leh08] oder der sich intensivierende Wettbewerb durch Konkurrenten aus Schwellenländern [Agt07] sind nur einige der Faktoren, die erheblichen Einfluss auf Struktur und Profitabilität der Branche haben.

Die Miniaturisierung war für die Halbleiterbranche lange Zeit vor allem unter den Gesichtspunkten der Platzeinsparung und der Leistungssteigerung relevant. Neuerdings kommt als weiterer, immer wichtiger werdender Aspekt die Verringerung des Stromverbrauchs hinzu, da der Markt immer leistungsfähigere Geräte zur mobilen Verwendung verlangt, welche mit begrenzten Batteriekapazitäten auskommen müssen. Unabhängig davon entwickelt sich derzeit auch ein Markt für ortsfeste Elektronik, welche unter dem Gesichtspunkt des Klimaschutzes möglichst wenig Energie verbrauchen soll.

Obwohl in den letzten Jahrzehnten enorme Fortschritte auf allen Bereichen erzielt wurden, besteht somit ein Bedarf für eine Fortführung der Miniaturisierung von Transistoren auch



über die aktuellen Technologien hinaus [Mis07]. Zu den bereits früher üblichen technologischen Weiterentwicklungen zur Realisierung immer kürzerer Kanallängen kommt nun jedoch die Notwendigkeit, mit physikalischen Phänomenen klarzukommen, die allein aufgrund der sehr kleinen Dimensionen auftreten und die Skalierung an unterschiedlichen Stellen begrenzen.

Das grundlegende Konzept des Feldeffekttransistors sowie die verschiedenen klassischen Skalierungsansätze sind Gegenstand der Kapitel 2.1 und 2.2 dieser Arbeit. Anschließend werden in Kapitel 2.3 die drei wichtigsten begrenzenden Effekte der klassischen Skalierung vorgestellt, als welche die Stoßionisation, die Randfeldeffekte (Fringing Fields) und der Tunneleffekt gelten. Kapitel 2.4 beschäftigt sich dann mit technologischen Maßnahmen, die bislang angewandt wurden, um trotz dieser begrenzenden Effekte die Skalierung bis zu den heute üblichen Technologien mit Kanallängen unter 45 nm fortzusetzen.

Diese Arbeit soll sich jedoch nicht mit einer weiteren Verfeinerung der in Kapitel 2.4 vorgestellten technologischen Maßnahmen für noch kleinere Dimensionen beschäftigen. Der hier gewählte Ansatz ist vielmehr, sich die in Kapitel 2.3 diskutierten Effekte zu Nutze zu machen, um neue Bauelemente und Anwendungen zu generieren, welche auf diesen Effekten basieren. Einen konzeptionellen Überblick hierüber gibt Kapitel 3.1. Da im Rahmen dieser Arbeit zahlreiche Simulationen von Bauelementen mit der Software Taurus Medici durchgeführt wurden, soll die Funktionsweise dieses leistungsfähigen, aber auch komplexen Programms in Kapitel 3.2 vorgestellt werden. Das ebenfalls verwendete vertikale Transistorkonzept und dessen Unterschiede zum industriell üblichen lateralen Konzept sind anschließend Gegenstand von Kapitel 3.3.

Ein neues Bauelement, welches sich den Tunneleffekt zu Nutze macht, ist der Tunneltransistor (TFET¹), mit welchem sich Kapitel 4 beschäftigt. Einen Überblick über bisherige Arbeiten zu diesem Thema und das bekannte Problem des bislang zu geringen On-Stroms geben die Kapitel 4.1 und 4.2. Das für diese Arbeit entwickelte und im Hinblick auf die vorgesehenen Untersuchungen optimierte Medici-Simulationsmodell des TFET wird anschließend in Kapitel 4.3 vorgestellt. Die Kapitel 4.4 bis 4.6 beschäftigen sich mit drei Konzepten zur Verbesserung des On-Stroms, wovon eines auf den in Kapitel 2.3 behandelten

¹ TFET = Tunnel Field Effect Transistor



Randfeldeffekten beruht. Kapitel 4.7 gibt abschließend einen Ausblick für den Tunneltransistor.

Ein weiteres, im Rahmen dieser Arbeit untersuchtes Bauelement ist der Stoßionisationstransistor (IMOS²), welcher Gegenstand von Kapitel 5 ist. Er basiert auf dem Stoßionisationseffekt, welcher ebenfalls in Kapitel 2.3 als begrenzender Effekt diskutiert ist. Versuche zur Nutzung dieses Effekts gab es bereits durch ein modifiziertes laterales Transistorkonzept, welches in Kapitel 5.1 vorgestellt wird. Es unterliegt jedoch einer sehr hohen Degradation, was Anlass zu alternativen Lösungen gibt. Grundüberlegungen zu dem im Rahmen dieser Arbeit untersuchten vertikalen IMOS sind dann Gegenstand von Kapitel 5.2. Experimentelle Ergebnisse und deren Interpretation im Hinblick auf die Funktionsweise des Bauelements sowie die Zuverlässigkeit und die günstigen Eigenschaften bei Verwendung unter Hochtemperatur werden in den Kapiteln 5.3 und 5.4 diskutiert. Anschließend stellt Kapitel 5.5 neue Ergebnisse zum Tieftemperaturverhalten des IMOS vor, welches durch oszillierende und plateaubildende Kennlinien gekennzeichnet ist, und beschäftigt sich mit der theoretischen Erklärung dieser Phänomene. Kapitel 5.6 stellt schließlich eine mögliche Anwendung des IMOS als optischer Detektor vor und zeigt damit, dass dieses Transistorkonzept nicht nur unter dem Gesichtspunkt der Verkleinerung von Dimensionen, sondern auch für neue Anwendungen interessant ist. Kapitel 5.7 gibt einen Ausblick für die zukünftige Entwicklung dieses Bauelements.

Kapitel 6 fasst abschließend die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zusammen und diskutiert sie im Hinblick auf die weitere Entwicklung der hier untersuchten Bauelemente.

² IMOS = Impact Ionization MOSFET