

1 Einleitung

Obwohl der Begriff der NANOTECHNOLOGIE ein besonderes Maß an Innovation und Fortschritt suggeriert, werden nanotechnologische Phänomene seit der Antike beschrieben. Insbesondere Nanopartikel und die damit verbundenen kolloidalen Dispersionen wurden häufig in ihren Erscheinungen beobachtet und ihre Auswirkungen genutzt. Als Beispiele hierfür seien kolloidale Flusssedimente im Babylon des 13. Jahrhunderts vor Christus, rotgefärbte Kirchenfenster durch Plasmonenresonanz in Gold-Nanopartikeln im mittelalterlichen Europa oder aber auch nanoskalige Rußadditive in Gummireifen zur Steigerung der Abriebfestigkeit ab dem frühen 20. Jahrhundert nach Christus genannt. Die ersten Anwendungen sind somit hauptsächlich der Materialwissenschaft und der Chemie zuzuordnen.

Das Interesse am Einsatz von Nanopartikeln in elektronischen Anwendungen wuchs erst mit der Suche nach Möglichkeiten, elektronische Schaltungen auf flexiblen Trägermaterialien (Substraten) und kosteneffizient in Druckverfahren (Rolle-zu-Rolle) herstellen zu können. Die konventionelle Siliziumhalbleitertechnologie kann zwar technisch für einen Großteil der Anwendungen eingesetzt werden, die Material- und Produktionskosten sind jedoch bezüglich des Nutzens unverhältnismäßig hoch [Won09]. Zunächst konzentrierte sich die Forschung auf die organische Elektronik, deren entscheidender Nachteil die Degradation darstellt. Bis auf das Gebiet der organischen Leuchtdioden (OLED) existieren bislang nur sehr wenige marktreife Produkte [VDM09]. Dabei wird das Marktpotenzial auf bis zu 43 Milliarden Euro im Jahr 2020 geschätzt [Mau10]. Mögliche Anwendungsgebiete sind unter anderem die Displaytechnik, Photovoltaik, Batterien, Sensoren, *RFID* und intelligente Textilien.

Im Laufe der letzten Jahre blieb die Degradation organischer Transistoren (*OFET*) ein dominantes Problem, so dass auch anorganische Halbleitermaterialien für die flexible Elektronik in Betracht gezogen wurden [SR07]. Diese lassen sich zwar als Dünnschichten in flexibler Elektronik integrieren, doch nur als kolloidale Dispersion lassen sich anorganische Materialien auch im Druckverfahren abscheiden. Insbesondere Zinkoxid (ZnO) wird als aussichtsreiches Material angesehen, da zur Prozessierung geringe Temperaturen benötigt werden, aber dennoch relativ leistungsstarke Transistoren möglich sind [OHM10, Won09].

Das Einsatzgebiet der Nanopartikelelektronik besteht zunächst aus Anwendungen der *Makroelektronik*. Dieses Gebiet zielt nicht auf eine ausschließliche Erhö-

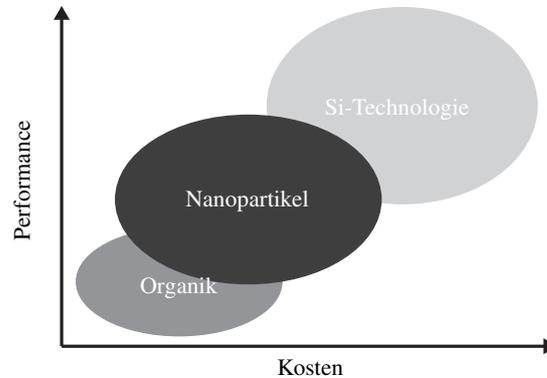


Abbildung 1.1: Einordnung der nanopartikelbasierten Elektronik gegenüber der organischen Elektronik und der konventionellen Siliziumtechnologie im Kosten-Performance-Verhältnis

hung der Integrationsdichte wie die *Mikro-* oder *Nanoelektronik* ab, sondern auf die Größe des Gesamtsystems. In Applikationen, bei denen Größe eine untergeordnete Rolle spielt bzw. gezielt erwünscht ist (z. B. großflächige Displays), soll nanopartikelbasierte Elektronik im sogenannten *low-cost/low-performance*-Segment eingesetzt wird, also einem Bereich, in der eine mittelmäßige Leistungsfähigkeit bei niedrigen Kosten akzeptabel ist. Es ist durchaus möglich, bessere Ladungsträgerbeweglichkeiten in anorganischen Nanopartikeln als in organischen Dünnschichten zu erreichen und gleichzeitig die Produktionskosten konstant zu halten, wenn nicht sogar zu senken. Die Nanopartikelhalbleitermaterialien stellen somit ein Bindeglied zwischen den organischen Halbleitern und der konventionellen Siliziumtechnik dar [siehe Abbildung 1.1].

Vorteilhafterweise zeigt sich, dass ein Teil der Forschungsergebnisse aus der OFET-Technologie auf die Nanopartikeltechnologie transferiert werden kann. So ist es möglich, auf dieselben Isolatoren und Substrate zurückzugreifen [Hal06, Won09]. Auch die späteren Druckverfahren können unter Anpassung der Dispersionsrheologie auf die Nanopartikelelektronik übertragen werden.

1.1 Zielsetzung

Im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen Transistoren mit halbleitenden Nanopartikeln, die den Aufbau elektronischer Schaltungen auf isolierenden Substraten ermöglichen. Mit Blick auf alternative Herstellungsverfahren für flexible Träger-

materialien wird der maximal zulässige Temperaturbereich bereits in dieser Arbeit berücksichtigt. Unter diesen Maßgaben werden sowohl Dünnschicht- als auch Einzelpartikeltransistoren integriert, charakterisiert, Prozess- und Materialeinflüsse analysiert und die Leistungsfähigkeit bzw. Eignung der Bauelemente anhand von Standardtransistorparametern bewertet. Dieses ermöglicht die Selektion einer geeigneten Transistorarchitektur und Prozessführung. Die Vorgehensweise soll letztendlich zur Integration eines Inverters als einfache logische Schaltung führen. Die Materialauswahl konzentriert sich auf Silizium als Elementhalbleiter und Zinkoxid als transparenten Verbindungshalbleiter. Für den Halbleiter Silizium beschäftigen sich bisherige Arbeiten nahezu ausschließlich mit vertikal integrierten Einzelpartikelbauelementen, also Transistoren mit einer Kanallänge in der Dimension des Nanopartikeldurchmessers. Von Nachteil ist der vertikale Aufbau der Transistoren, der mit einer aufwändigen Prozessführung und einer nicht bestimmaren Position der Bauelemente einhergeht, so dass eine gezielte Verschaltung einzelner Transistoren nicht möglich ist. Nanopartikelartiges Zinkoxid als Halbleitermaterial wird in bisherigen Forschungsarbeiten nur als Dünnschichtmaterial eingesetzt. Die Erhöhung der Ladungsträgerbeweglichkeit – jedoch unter Vernachlässigung der Kontakteigenschaften – ist ein zentraler Punkt der aktuellen Forschung. Berichte über Zinkoxid in Einzelpartikelarchitekturen sind aus der Literatur nicht bekannt.

In der vorliegenden Arbeit werden daher lateral aufgebaute Einzelpartikeltransistoren sowohl mit Silizium- als auch Zinkoxid-Nanopartikeln vorgestellt. Darüber hinaus werden Dünnschichttransistoren mit beiden Partikelarten integriert, wobei eine Steigerung der Leistungsfähigkeit zunächst nicht im Vordergrund stehen soll.

1.2 Gliederung

Zunächst werden in Kapitel 2 ausgewählte physikalische Grundlagen erläutert, die für die Funktionsweise der Transistoren eine entscheidende Rolle einnehmen. Hauptaugenmerk liegt auf dem Metall-Halbleiter-Kontakt, der das zentrale Element in der Gruppe der SCHOTTKY-Barrieren-Drain-/Source-Feldeffekttransistoren (SB-(MOS)FET) darstellt, zu der auch die vorgestellten Feldeffekttransistoren mit halbleitenden Nanopartikeln zählen. Weiterhin wird auf Ladungsträgertransportmechanismen eingegangen, die im Zusammenhang mit stöstellenbehafteten Nanopartikeln und Grenzflächen auftreten. Daraufhin werden die Herstellungsverfahren von Nanopartikeln aus Halbleitermaterialien und der Einfluss einer Überführung des Feststoffs in kolloidale Suspensionen behandelt. Neben den allgemei-

nen Eigenschaften von Nanopartikeln und den Unterschieden zu den Materialien in ihrer Makroform werden Untersuchungen zur Grundcharakterisierung der verwendeten Silizium- und Zinkoxid-Nanopartikel vorgestellt.

Im darauf folgenden Kapitel 3 werden typische Bauformen von Dünnschicht-Transistoren erläutert. Diese werden anschließend auch auf Einzelpartikeltransistoren übertragen und bewertet. Da die in dieser Arbeit zu präsentierenden Bauelemente auf dem Konzept der Feldeffekttransistoren beruhen, die pn-Übergänge konventioneller *MOSFET* aber durch Metall-Halbleiter-Kontakte ersetzt werden, wird sowohl das Funktionsprinzip der *SB-MOSFET* als auch die Herleitung stark vereinfachter Modellgleichungen erklärt. Zum Abschluss des Kapitels werden die Methoden zur Ermittlung der elektrischen Transistorparameter ausgeführt. Ein Standard für nanopartikelbasierte Transistoren steht bislang nicht zur Verfügung.

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, wird sich der Dünnschichtprozess der herkömmlichen Halbleitertechnologie bedient, um Bauelemente zu integrieren. Insbesondere im Zusammenhang mit der großflächigen und effizienten Integration von Einzelpartikeltransistoren wird die technologisch realisierbare Schwelle auf herkömmlichem Wege überschritten, so dass die Problematiken der Strukturierungstechnik in Kapitel 4 kurz diskutiert und das sogenannte Kantenabscheideverfahren als alternative Lösung zur großflächigen Nanostrukturierung vorgestellt wird.

Inhalt des 5. Kapitels ist die Präsentation der Ergebnisse der experimentellen Integration von Feldeffekttransistoren mit Silizium-Nanopartikeln. Die Resultate unter Verwendung von Zinkoxid-Nanopartikeln werden in Kapitel 6 vorgestellt. In beiden Fällen sind die Transistoren sowohl als Dünnschicht- als auch als Einzelpartikeltransistoren in verschiedenen Architekturen mit gemeinsamer Rückseiten-Gate-Elektrode aufgebaut. Hierdurch ist es möglich, die Herstellungsverfahren und grundlegenden Eigenschaften zu untersuchen. Das Verhalten der Bauelemente und die Einflüsse der Prozesstechnik – beispielsweise die Auswirkungen einer thermischen Behandlung der Nanopartikel – auf die elektrische Charakteristik werden diskutiert. Anhand der gewonnenen Resultate wird im Hinblick auf den Schaltungsaufbau anschließend der Übergang zu frei beschaltbaren Transistoren mit ZnO-Nanopartikeln vollzogen.

Anhand der in den Kapiteln 5 und 6 gewonnenen Ergebnisse wird ein zum Schaltungsaufbau geeignetes Transistorkonzept ausgewählt und eine Inverterschaltung auf Silizium- bzw. Glassubstrat integriert. Die Charakterisierung und Bewertung der Inverterschaltungen wird in Kapitel 7 behandelt, wobei die Performance der Schaltungen zunächst zweitrangig ist; im Vordergrund steht die Demonstration der Realisierbarkeit.