

Halbleiterdrähte und -bänder als flexible Bauelemente für die Hochleistungselektronik

Alfred J. Baca, Jong-Hyun Ahn, Yugang Sun, Matthew A. Meitl, Etienne Menard, Hoon-Sik Kim, Won Mook Choi, Dae-Hyeong Kim, Young Huang und John A. Rogers*

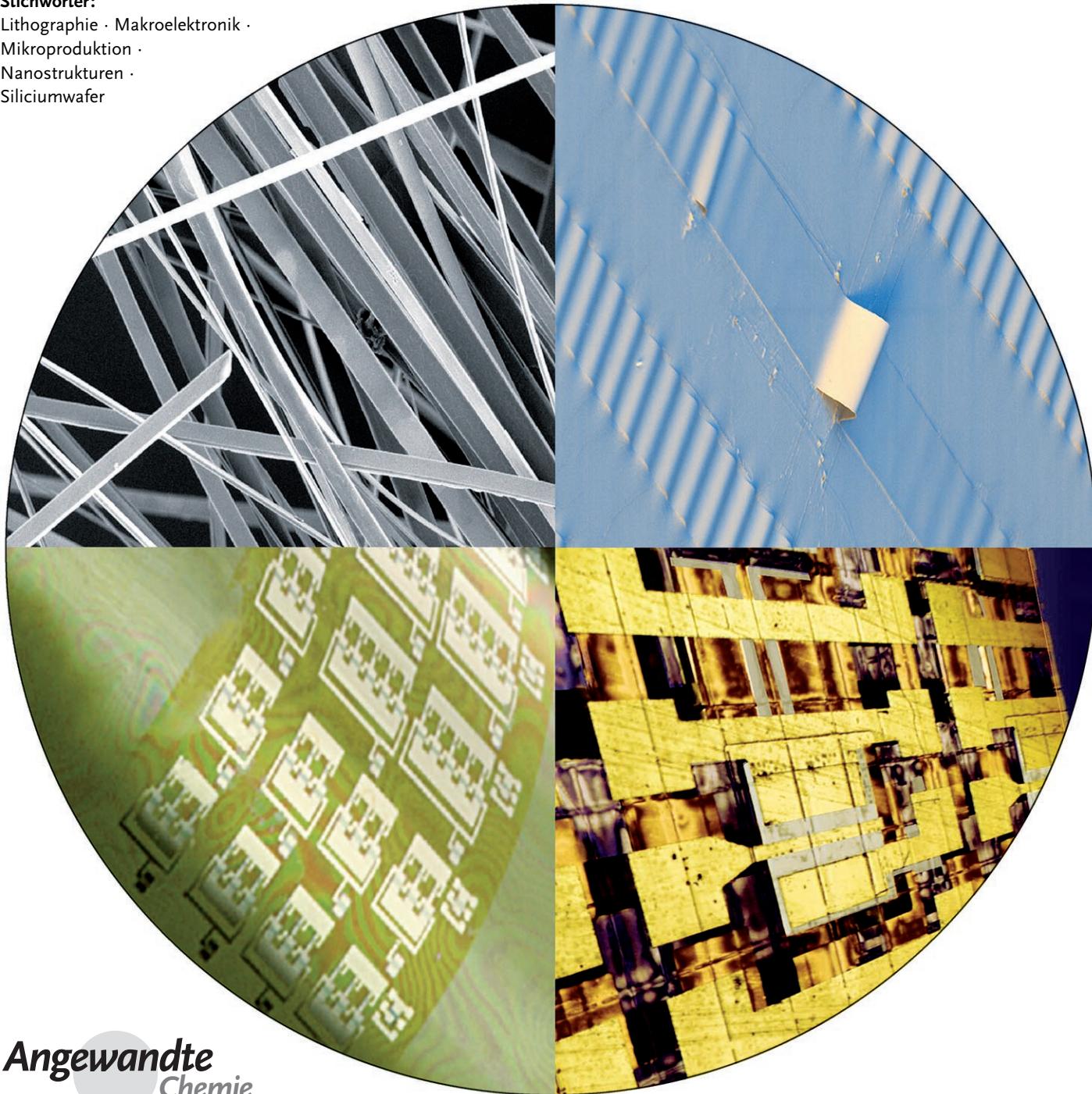
Stichwörter:

Lithographie · Makroelektronik ·

Mikroproduktion ·

Nanostrukturen ·

Siliciumwafer



In diesem Aufsatz werden die Eigenschaften und die Herstellung anorganischer Halbleitermaterialien behandelt, die als aktive Elemente für Hochleistungstransistoren und Stromkreise in großflächigen, flexiblen und biegestabilen elektronischen Bauteilen eingesetzt werden können. Die Realisierung hoher Leistungsdichten auf Niedertemperaturpolymeren ist eine technische Herausforderung für die Makroelektronik. Die Produktion qualitativ hochwertiger anorganischer Materialien in Form von Drähten, Bändern, Membranen, Schichten und Stäben nach „Bottom-up“- und „Top-down“-Verfahren und die Strategien zur Montage dieser Bauteile auf plastischen Substraten werden daher besonders betont. Wichtige Fortschritte auf dem Gebiet dehnbarer und biegsamer anorganischer Halbleitermaterialien und die Grundlagen dieser mechanischen Stabilität sowie dreidimensionale Konstruktionen werden diskutiert. Abschließend werden die Perspektiven dieses vielversprechenden Forschungsfelds beleuchtet.

1. Einleitung

Im Laufe der letzten fünf Jahrzehnte hat eine massive Reduzierung der Kanallängen und dielektrischen Abstände von Transistoren in der Mikroelektronik für einen enormen Anstieg in Geschwindigkeit, Funktionalität und Rechenkapazität gesorgt. Dieser Trend wird sich auch weiterhin fortsetzen und zu Systemen mit beispiellosen Betriebscharakteristika führen. In den vergangenen zehn Jahren hat eine weitere Klasse der Elektronik – die „Makroelektronik“ – neben der konventionellen Mikroelektronik ein beachtliches Marktvolumen erobert.^[1–8] Bei dieser Technologie, in der die Stromkreise häufig über Substrate verteilt sind, die vielfach größer als der größte Halbleiterwafer sind, wird Fortschritt oft anhand der Gesamtgröße des Systems definiert, anstatt die Dimensionen der einzelnen Bauteile zu betrachten.^[9,10] Das wichtigste Produkt der Makroelektronik sind Flachbildschirme mit Dünnschichttransistoren (thin film transistor, TFT) auf Glasträgern zur aktiven Adressierung der einzelnen Bildpunkte. Der wirtschaftliche Erfolg dieser Verbundbildschirme kann zu weiteren Anwendungen der Makroelektronik führen, unter anderem in digitalen Röntgengeräten, flexiblen Solarzellen, dünnen Bildschirmen und in der Materialprüfung, wobei ein geringes Gewicht und eine hohe Flexibilität den Transport und die Nutzung entscheidend erleichtern.^[9–18] Diese und weitere Möglichkeiten schaffen ein beträchtliches Interesse an der Entwicklung neuer Materialien und Konstruktionsprozesse für elektronische Bauteile direkt auf flexiblen Trägern wie Metallfilmen oder dünnen Filmen organischer Polymere, die für viele Verbraucheranwendungen ideal sind. Dabei stellen die Charakteristika des Substrats und der Wunsch nach möglichst großen Flächen häufig kritische Randbedingungen an die Materialauswahl und die Produktionsprozesse. Beispielsweise zersetzen sich die meisten billigen organischen Polymere oberhalb von 300 °C, sodass sie mit den üblichen Abscheidungsmethoden für anorganische Halbleiter inkompatibel sind.

Aus dem Inhalt

1. Einleitung	5607
2. Mechanische Biegsamkeit und Dehnbarkeit	5608
3. Herstellung von Mikro- und Nanohalbleiterelementen	5609
4. Montage von Mikro- und Nanohalbleiterelementen	5612
5. Anwendungen in flexiblen elektronischen Bauteilen	5615
6. Heterogene Bauelemente	5617
7. Anwendungen in dehnbaren elektronischen Systemen	5618
8. Zusammenfassung und Ausblick	5621

Aussichtsreiche Materialien für derartige Anwendungen sind molekulare und polymere Halbleiter, die mechanisch

[*] Prof. J. A. Rogers

Department of Chemistry
Materials Science and Engineering
Mechanical Science and Engineering
Electrical and Computer Engineering
Beckman Institute for Advanced Science and Technology and
Frederick Seitz Materials Research Laboratory
University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL 61801 (USA)
Fax: (+1) 217-333-2736
E-Mail: jrogers@uiuc.edu

Prof. Y. Huang

Department of Civil/Environmental Engineering and
Department of Mechanical Engineering
Northwestern University, 2145 Sheridan Road, Evanston, IL 60208
(USA)

A. J. Baca

Department of Chemistry and
Frederick Seitz Materials Research Laboratory
University of Illinois at Urbana-Champaign
Urbana, IL 61801 (USA)

Dr. J.-H. Ahn,^[+] Dr. M. A. Meitl, Dr. E. Menard, H.-S. Kim,
Dr. W. M. Choi, D.-H. Kim

Department of Materials Science and Engineering and
Frederick Seitz Materials Research Laboratory
University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL 61801 (USA)

Dr. Y. Sun

Center for Nanoscale Materials
Argonne National Laboratory, Argonne, IL 60439 (USA)

[+] Derzeitige Adresse:

School of Advanced Materials Science and Engineering
Sungkyunkwan University, Suwon 440-746 (Korea)

flexibel sind, bei niedrigen Temperaturen verarbeitet werden können und zudem inhärent kompatibel mit Kunststoffen sind.^[11,19,20] Transistoren auf der Basis solcher Materialien finden Anwendungen in flexiblen und starren Leuchtdiodenbildschirmen,^[21,22] elektrophoretischen Tinten,^[11] polymergestützten Flüssigkristallen^[23] und weiteren Bereichen^[24–26] sowie der Produktkennung durch Radiofrequenzgeber^[27] und Sensoren.^[28] Es ist aber nicht einfach, Produkte mit hohen Mobilitäten zu erhalten. Diese Einschränkung lässt sich umgehen, indem man die organischen Halbleiter durch polykristallines Silicium ersetzt, das mithilfe von Hochleistungs-UV-Lasern aus dünnen amorphen Siliciumfilmen oder aus Siliciumfilmen, die aus Lösungen abgeschieden wurden, erzeugt werden kann.^[29] Thermische Schutzschichten können dabei in gewissem Umfang das durch den Laserpuls erhitzte Silicium von der Unterlage abschirmen, sodass diese Technik auf bestimmten Hochtemperaturkunststoffen anwendbar ist (z. B. Polyimide).^[30] Diese Verfahren führen zu Transistoren mit beeindruckenden Charakteristika,^[31–37] doch die Arbeitsschritte sind kompliziert, und es wird viel Aufwand erfordern, größere Flächen ohne Qualitätsschwankungen zu bearbeiten. Eine andere Technik beruht auf dem direkten Einbau einkristalliner anorganischer Halbleiter in Form von separaten hergestellten Mikro- oder Nanostrukturen. Dabei kann es sich um Nanokristalliten handeln,^[38,39] aber Formen wie Drähte, Bänder und Plättchen eignen sich besser, da sie die Barrieren für den Ladungstransport an den Grenzflächen von Bauelementen gering halten.^[40–42] Derartige Materialien können entweder aus molekularen Vorstufen durch Synthese in der Gasphase oder in Lösung aufgebaut werden („bottom-up“)^[43–47] oder durch kontrolliertes Ätzen makroskopischer Einkristallwafer oder dünner Filme gewonnen werden („top-down“)^[42,48–52].

Dieser Aufsatz beschreibt die Herstellung einkristalliner anorganischer Halbleiterdrähte und -bänder durch „Bottom-up“- und „Top-down“-Verfahren und deren Verwendung in flexiblen elektronischen Funktionseinheiten. In den Abschnitten 2 und 3 werden zunächst Anforderungen an die mechanische Flexibilität derartiger Bauelemente benannt und die zugehörigen Herstellungsmethoden beschrieben. Die Abschnitte 4 und 5 zeigen Strategien zur Integration dieser Bauteile in funktionelle Systeme und Stromkreise sowie einige elektrische Eigenschaften der Produkte. Abschnitt 6 stellt die Leistungscharakteristika derartiger Baugruppen vor, die nicht nur mechanisch flexibel, sondern auch reversibel



John A. Rogers studierte Chemie und Physik an der University of Texas, Austin, und am MIT, wo er 1995 in physikalischer Chemie promovierte. Bis 1997 war er Junior Fellow der Harvard University Society of Fellows, und gegenwärtig ist er Flory-Founder Professor of Engineering an der University of Illinois in Urbana-Champaign. Seine Forschungsaktivitäten umfassen Grundlagen und Anwendungsaspekte der Fabrikation von molekularen und Nanomaterialien sowie Strukturierungsmethoden für großflächige elektronische und ungewöhnliche photoni sche Systeme.

dehnbar sind, und zeigt Perspektiven für die zukünftige Entwicklung auf.

2. Mechanische Biegsamkeit und Dehnbarkeit

Der Einbau von mikro- oder nanostrukturierten anorganischen Halbleitern in flexible elektronische Elemente hängt entscheidend davon ab, dass sie viele Biege- und Dehnungszyklen ohne Bruch durchlaufen können. Dabei treten während der Biegung in konvexe oder konkave Formen oder bei Dehnung innerhalb des Materials Zug- und Kompressionsspannungen auf. Typische anorganische Halbleiter brechen bei Zugspannungen von 0,5–1,0 %. Weitere Schädigungen elektronischer Elemente in flexiblen Polymeren sind Versatzbrüche oder Abblättern bei Bewegung der Schichten der einzelnen Komponenten parallel oder senkrecht zueinander. Bei der Herstellung zuverlässiger Produkte müssen daher die mechanischen Eigenschaften sowohl der Komponenten als auch des Gesamtsystems berücksichtigt werden. Hier stellen wir Aspekte der Biegung und Dehnung solcher elektronischer Baueinheiten vor.

Die Biegemechanik von Halbleiterdrähten, -bändern, -stäben oder -membranen im Mikro- oder Nanometermaßstab wird durch ihre Größe und die mechanischen Eigenschaften der Materials bestimmt.^[53] Durch die flächige Anordnung dieser Elemente in den Anwenderprodukten und die vergleichsweise hohe Starrheit der Kunststoffsubstrate senkrecht zur Fläche können wir seitliche Deformationen vernachlässigen, für die die Breite ausschlaggebend ist. In Abbildung 1 A ist dargestellt, wie ein Band der Dicke t um einen Radius r gebogen wird, was in den unteren und oberen Schichten zu Kompressions- bzw. Zugspannungen führt. Ist t viel kleiner als r , so gilt für die Maximalspannung der einfache Ausdruck in Gleichung (1).^[54]

$$\varepsilon = \frac{t}{2r} \times 100\% \quad (1)$$

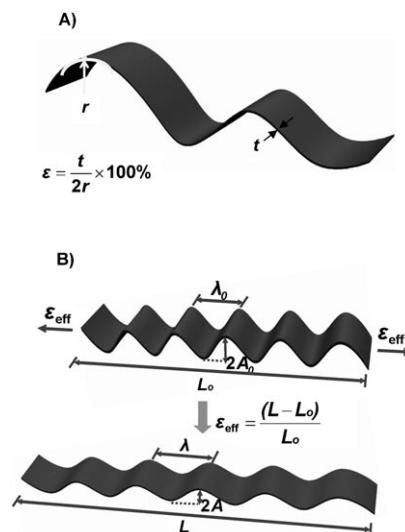


Abbildung 1. Biegsame (A) und dehbare Halbleiterbauteile (B). In den meisten Anwendungen liegt zumindest die Dicke t im Mikro- oder Nanometerbereich.

Bei Siliciumbändern mit $t \approx 0.1 \mu\text{m}$ führt die Zugspannung zum Bruch, wenn r unter ca. $7 \mu\text{m}$ liegt. Für viele Anwendungen ist aber ein derartige Dehnung nicht erforderlich, und $r \approx 1 \text{ cm}$ reicht bereits aus. Bei Verbundbauelementen müssen derartige Bänder jedoch auf der Ober- oder Unterseite beispielsweise eines Kunststoffbauteils montiert werden. Wird ein solches Band gebogen, so ist in Gleichung (1) für t angenähert die Gesamtdicke des Substrats anzusetzen. Eine Gesamtdicke von $50 \mu\text{m}$, typisch für viele vorgesehene Anwendungen, führt dann bei $r \approx 3.5 \text{ mm}$ zu Oberflächenspannungen von 0.7% , wobei vorausgesetzt wird, dass die Kontaktfläche zwischen Halbleiter und Substrat dieser Belastung standhält. Als Faustregel für das praktische Design kann eine Spannung von weniger als 0.1% angesetzt werden, was im Beispiel zu einer Biegsamkeit mit $r \approx 2.5 \text{ cm}$ führt, die in vielen Fällen ausreicht. Die Flexibilität lässt sich natürlich auch durch Verringerung der Substratdicke verbessern. So würde ein $25 \mu\text{m}$ dickes Substrat für Siliciumbänder einen Biegeradius um 1.25 cm gestatten. Diese Strategie kann von Nutzen sein, doch profitieren viele praktische Anwendungen von einer gewissen Starrheit des Substrats. Alternative Wege zu erhöhter Biegsamkeit beruhen auf einfachen physikalischen Prinzipien. So stehen in einem gebogenen Band Ober- und Unterseite unter Zug- beziehungsweise Kompressionsspannung. Diese Spannungen gehen innerhalb des Substrats in etwa linear ineinander über, sodass die Spannung in einer mittleren Schicht im Rahmen der Anwendbarkeit von Gleichung (1) null beträgt (mechanisch neutrale Fläche).^[55,56] Durch Aufbringen auf einer Polymeroberfläche und nachfolgendes Abdecken mit einer weiteren Polymerschicht mit ähnlicher Dicke und vergleichbaren mechanischen Eigenschaften lassen sich elektrische Bauelemente in der mechanisch neutralen Fläche montieren.^[55,56]

Die Schlüsselstrategien bestehen also darin, entweder dünne Halbleiterschichten auf dünnen Unterlagen oder Halbleiterelemente in der mechanisch neutralen Fläche zu montieren. Eine größere Herausforderung stellt die Dehnbarkeit dar. Das Interesse an dehnbaren Elektronikbauteilen beruht nicht nur auf der hohen erreichbaren Biegsamkeit, sondern auch auf der Möglichkeit einer Integration in komplexe Oberflächen, wie in elektronischen Augen, in Flugzeugtragflächen (zur Materialprüfung), in medizinischen Anwendungen, Implantaten, Sensoren oder tragbaren elektronischen Geräten. Für diese Einsatzgebiete reicht Flexibilität alleine nicht aus – Dehnbarkeit ist ein Muss. Ein Ansatz in diese Richtung beruht auf dünnen Einzelbauteilen^[57–59] und Verbindern,^[60,61] die gewellt angeordnet sind. Bei diesem Design kann das Gesamtsystem reversibel stark gedehnt werden, ohne dass es zu Materialschäden kommt, da die Spannungen durch Verschiebungen der gewellten Struktur aufgefangen werden.^[57–61] Die exakte Beschreibung solcher Wellenstrukturen erfordert eine detaillierte Behandlung, doch qualitativ stimmt deren Verhalten mit demjenigen eines Akkordeons überein, für das die Wellenlänge (λ) und die Amplitude (A) gemäß Gleichung (2) und (3) von der effektiven Spannung abhängen.

$$\lambda \approx \lambda_0(1 + \varepsilon_{\text{eff}}) \quad (2)$$

$$\lambda_0 = \int_0^{\lambda} \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 A^2}{\lambda^2} \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right)} dx \quad (3)$$

λ_0 ist die Wellenlänge in der entspannten Anordnung, A die Amplitude und ε_{eff} die angewandte Spannung, sofern ε_{eff} klein im Vergleich zu der Spannung ist, die benötigt wird um eine Struktur der Wellenlänge λ_0 zu erzeugen (Abbildung 1B).

3. Herstellung von Mikro- und Nanohalbleiter-elementen

Flexible und dehnbare Halbleiterbaugruppen auf der Basis von Silicium, Germanium, Kohlenstoff und III-V-Verbindungen wie GaAs, InP und GaN sind besonders erfolgversprechend für zukünftige Anwendungen. Die folgenden Abschnitte fassen die Methoden zur „Bottom-up“-Synthese und „Top-down“-Produktion solcher Bauteile zusammen. Beide Vorgehensweisen haben sich bei der Herstellung von Mikro- und Nanohalbleiterelementen für die Makroelektronik bewährt.

3.1. „Bottom-up“-Ansätze

Wie vor kurzem zusammengefasst, erfordert die Synthese ein- oder zweidimensionaler Einkristallhalbleiter prinzipiell die Fähigkeit, die Atome, aus denen die Halbleiterstruktur aufgebaut ist, unter Bruch der Symmetrie des Kristallgitters zu kondensieren und zu aggregieren.^[47,62] Am aussichtsreichsten ist hierbei die ursprünglich von Wagner und Ellis entwickelte Dampf-flüssig-fest-Methode (vapor-liquid-solid, VLS),^[63] die auf der präzisen Kontrolle der Bedingungen bei der Reaktion einer gasförmigen Vorstufe mit katalytischen Metallnanopartikeln beruht. Die Halbleiterzusammensetzung, der Katalysator und die Reaktionstemperatur werden dabei vom binären Phasendiagramm der beteiligten Materialien vorgegeben.^[45,47] Zunächst werden monodisperse Metallcluster auf einem Substrat angeordnet und dann die gasförmige Halbleitervorstufe zudosiert. Bei einer bestimmten Temperatur beginnen sich Halbleiteratome auf der Oberfläche der Nanopartikel abzuscheiden. Wenn es zur Übersättigung der Halbleiteratome auf den katalytischen Metallclustern kommt, schmelzen die Nanopartikel unter Bildung von Legierungstropfen. Fortgesetzte Zufuhr der Halbleitervorstufe führt dann zur Abscheidung einer festen Halbleiterphase aus diesen Legierungstropfen. Mit einer derartigen Epitaxie gelingt die Herstellung geordneter Nanodrahtstrukturen auf der Substratoberfläche.^[64–66] Durch Kombination dieses geordneten Wachstumsprozesses mit einer Vororientierung der Katalysatorpartikel ist es möglich, die Position, Orientierung und Dichte der Nanodrähte zu beeinflussen. Bei einer anderen Strategie werden Katalysatorpartikel auf der Oberfläche von Nanodrähten^[67] oder Nannostäben auf Quantenpunkten^[68] für die Herstellung verzweigter Nanostrukturen genutzt.^[67] So gestaltet die Abscheidung eines Metallkatalysators niedrigen Schmelzpunkts

auf Bleiselenid (PbSe) während des Wachstumsprozess die Herstellung eines verzweigten Netzwerks von Nanodrähten.^[69]

Zusätzlich zur Form und Position lassen sich auch die Materialzusammensetzungen, entweder radial oder axial, über die Wachstumsbedingungen kontrollieren. So sind Kern-Schale-Nanodrähte zugänglich, wenn die gasförmigen Vorstufen so zugeführt werden, dass sie sich bevorzugt auf der Oberfläche der Nanodrähte abscheiden.^[70] Analog lassen sich Nanostrukturen aus mehreren unterschiedlichen Schichten durch sequenzielle Zufuhr von Vorstufen und Dotierungsreagentien unterschiedlicher Zusammensetzungen erzeugen.^[70] Ähnliche heterogene Metall-Halbleiter-Strukturen wurden kürzlich durch Abscheidung von Ni auf durch VLS erzeugten Si-Nanodrähten erhalten.^[71] Dieser Prozess führt auch zum Einbau von Metallkontakte (über Metallsilicid-Bildung), was die Einbindung der Nanodrähte in elektrische Schaltkreise vereinfacht.

Eine der VLS verwandte Technik ist der Lösung-flüssig-fest-Prozess (solution-liquid-solid, SLS). Hierbei erfolgt die Synthese in einer flüssigen Phase mit Nanopartikeln aus einem niedrigschmelzenden Metall als Katalysator,^[72,73] wobei die Halbleiter durch die Thermolyse gelöster Organometallvorstufen in hochsiedenden Lösungsmitteln erhalten werden. Mithilfe des SLS-Prozesses können Silicium-nanodrähte^[74,75] und auch III-V-Verbindungen^[72,73] erzeugt werden. Ein Beispiel ist die Herstellung von GaAs-Nanodrähten mit 10–150 nm Durchmesser durch Alkaneliminierung gemäß Gleichung (4).



M steht hier für ein Element der Gruppe III, E für ein Element der Gruppe V und ME für den Nanodraht der III-V-Verbindung. In katalytisch wirkenden protischen Lösungsmitteln werden die III-V-Nanodrähte ausgehend von Tri(*tert*-butyl)gallan und -indan in 50–100 % Ausbeute erhalten. Bei Verwendung von Indiumnanopartikeln als Katalysatoren liefert dieser Prozess Nanodrähte mit engen Durchmesser-Verteilungen (14–16 % Varianz) und geringer Dicke (ca. 6 nm).^[73]

Ein weiteres interessantes Konzept, das sich von VLS und SLS unterscheidet, nutzt molekulare Nanostrukturen wie Kohlenstoffnanoröhren^[76] oder DNA-Moleküle^[77,78] als Träger oder auch Stufenkanten auf Substraten wie geordnetem pyrolytischen Graphit^[79–81] zur Bildung 3 nm dünner Drähte aus anderen Materialien.^[78] Metallnanodrähte aus Au, Pd, Fe, Al und Pb,^[82] MoGe^[83,84] sowie Nb^[76] wurden an Nanoröhren hergestellt. Diese Strukturen lassen sich durch Elektronenbeschuss in die kristalline Phase überführen.^[78] Auch DNA ist zur Herstellung derartiger Strukturen nutzbar.^[77,78] Die so erzeugten Nanodrähte sind homogen und bei tiefen Temperaturen supraleitend.^[77,78] Die Fähigkeit von DNA-Molekülen zum selbstorganisierten Aufbau komplexer Strukturen impliziert Zugänge zu geordneten Bündeln und ähnlichen Anordnungen von Drähten, die für Anwendungen interessant sein können.

3.2. „Top-down“-Verfahren

„Bottom-up“-Ansätze können Mikro- oder Nanostrukturen, vor allem Nanodrähte, mit ungewöhnlichen heterogenen Strukturen und geringen Abmessungen in großen Materialmengen liefern. So erzeugte Drähte sind jedoch häufig recht kurz (< 100 µm),^[45,47,72–74,85,86] und die Größenverteilungen, insbesondere bei Bändern, sind sehr breit.^[87–100] Auch die Kontrolle von Oberflächeneigenschaften, Reinheit, Heterogenität und Konzentration eventueller Zusätze ist wesentlich weniger weit entwickelt als bei der Wafertechnologie in der Halbleiterindustrie. Insbesondere aufgrund der leistungsfähigen und zuverlässigen Prozesstechnik bieten Wafer ein Potenzial für die Makroelektronik. Der folgende Abschnitt beschreibt Strategien für die Erzeugung von Mikro- und Nanohalbleiterbauelementen auf der Grundlage von qualitativ hochwertigen Einkristallwafern und -filmen durch „Top-down“-Verfahren. Wir benennen derartige Materialien demnach als mikrostrukturierte Halbleiter (μ-sc, von „semiconductor“), beispielsweise mikrostrukturiertes Silicium (μ-Si) oder Galliumarsenid (μ-GaAs).

Zur Herstellung der Bauelemente können lithographische Verfahren und Ätztechniken genutzt werden. Beim einfachsten Ansatz werden beschichtete Wafer, etwa Silicium auf einem Isolator (SOI), GaAs/AlAs/SiGaAs oder AlGaN/GaN/Si, als Substrate benutzt, die mit Strukturen aus einer Kunstharzschicht belegt und anschließend geätzt werden, um eine Opferschicht zu entfernen oder die Unterlage zu verändern (z. B. SiO₂ bei SOI, AlAs bei GaAs/AlAs/SiGaAs und Si bei AlGaN/GaN/Si), was zu Band-, Draht-, Stapel- oder Stabstrukturen führen kann.^[42,49,51,58,59,101] Diese lithographischen Prozesse zur Festlegung der räumlichen Anordnung von Halbleiterelementen beruhen häufig auf etablierten Verfahren wie Photolithographie^[42,51,102] und Elektronenstrahlolithographie^[103–105] oder neueren Methoden wie der weichen Lithographie^[51,106] und dem lithographischen Nano-Druck.^[107,108] Durch eine exakte Abstimmung der Verfahrensweise lassen sich extrem glatte Oberflächen und hervorragende mechanische Eigenschaften erzielen,^[42,51] wobei Dicken um 10 nm^[42,51,108,109] und Objektweiten bis hinunter zu 17 nm erreichbar sind.^[102,108,110]

Die Breite derartiger Strukturen kann sehr klein (um 20 nm für Drähte) und sehr groß sein (Membranen im Zentimeterbereich). Ein Beispiel für die lithographische Erzeugung extrem kleiner Strukturen ist die Übertragung von Nanodrahtmustern (superlattice nanowire pattern transfer, SNAP).^[101] Bei diesem Verfahren wird die angeätzte Kante eines aus GaAs/AlGaAs-Schichten bestehenden Übergitters mit einer Metallschicht bedampft und mit einem adhäsiv beschichteten Substrat, beispielsweise ein SOI-Wafer, in Kontakt gebracht. Anschließend wird die Metallschicht durch selektives Ätzen der GaAs-Schicht von der Übergitterstruktur entfernt, sodass die auf das SOI-Substrat übertragene Metallschicht als Maske für folgende Ätzschritte zur Herstellung definierter Nanodrähte dienen kann.

Auch große freistehende Einkristallplättchen^[109,111] und -röhren^[112–116] können aus Wafern mit eingebetteter Freisetzungsschicht hergestellt werden. So lassen sich elastisch gespannte SiGe-Nanomembranen auf SOI-Wafern erzeugen

und auf unterschiedliche Substrate überführen,^[109] wobei auch Polymere für flexible elektronische Elemente verwendbar sind.^[117,118] Nanoröhren und andere ungewöhnliche Strukturen lassen sich auch durch Abscheidung von Schichten aus Ge, GaAs und ähnlichem auf Substraten (z. B. Silicium) mithilfe von Molekularstrahlepitaxie erhalten,^[113–115] wobei die Durchmesser der Röhren durch die Schichtdicken und die Spannungen bestimmt werden.^[113] Die Herstellung von Mikro- und Nanostrukturen auf Wafers mit zusätzlichen Opferschichten ist ein einfaches und vielseitiges Verfahren. Nachteile liegen in den Kosten, die bei elektronischen Elementen aus einer Vielzahl von Einzelteilen durchaus beträchtlich sein können. Es ist daher erstrebenswert, direkte Herstellungswege für Mikro- und Nanobauteile aus Halbleiterwafern zu untersuchen.

Nach einer dieser Methoden, dem anisotropen chemischen Ätzen von III-V-Verbindungen mit (100)-Oberfläche und kubisch-flächenzentrierter Zinkblende-Struktur, lassen sich freistehende Drähte mit Dreiecksquerschnitt erzeugen.^[52,119] Abbildung 2A zeigt die Schritte bei der Herstellung

Teil von Abbildung 2A zeigt die partiell unterschnittenen GaAs-Drähte und im unteren Bild sind die vollständig unterschnittenen Drähte mit zufälliger Anordnung auf dem Muttersubstrat erkennbar, was zugleich deren schon in Abschnitt 2 diskutierte Flexibilität demonstriert.^[52,119]

Ein verwandtes Konzept unterliegt der Herstellung von band-, stapel- und stabförmigen Siliciumeinkristallen aus größeren Siliciumwafern.^[50,120,121] Für Bänder mit rechteckigem Profil beginnt das Verfahren mit dem Aufbringen von parallelen Kunstharzlinien senkrecht zur (110)-Fläche des Siliciums mit nachfolgendem Ätzen des exponierten Siliciums (Abbildung 2B, oben). Die aufeinanderfolgende Abscheidung von SiO_2 (ca. 60 nm) und Si_3N_4 (ca. 300 nm) führt zu einer doppelten Schutzschicht auf den Siliciumflächen. Anschließend werden mithilfe von Elektronenstrahlverdampfung dünne Schichten von Titan (3 nm) und Gold (50 nm) auf die Waferoberfläche aufgebracht, und das unbedampfte $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ wird entfernt, was zu (110)-Siliciumschichten führt (zweites Bild von Abbildung 2B). Dabei greift das verwendete Ätzmittel KOH diese Fläche des Siliciums gemäß der Netto-Redoxreaktion (6) bevorzugt an.^[122]



In diesem Prozess wird die Siliciumoberfläche durch OH^- -Ionen oxidiert; dabei werden Wassermoleküle verbraucht und molekularer Wasserstoff freigesetzt. Ein wesentlicher Nachteil von KOH besteht in einer möglichen Kontamination durch mobile Metallionen, die bei elektronischen Anwendungen empfindlich stören.^[123] CMOS-kompatible Ätzmittel wie Tetramethylammoniumhydroxid (TMAOH) werden daher vorgezogen.^[120,123] Der Ätzprozess mit TMAOH verläuft ähnlich wie in Gleichung (6), doch TMAOH ätzt langsamer und weist andere Charakteristika hinsichtlich Oberflächenmorphologie und Waferorientierung auf.^[124]

In beiden Fällen verlaufen die Ätzfronten am Si(110) in horizontaler Richtung. Wenn sie sich schließlich treffen, vervollständigen sie den Unterschnitt und setzen Mikro- oder Nanostrukturen aus einkristallinem Silicium mit rechtwinkligem Querschnitt frei (drittes Bild in Abbildung 2B). Das vierte Bild in Abbildung 2B zeigt 500 nm dicke, 200 μm lange und 7 μm breite Siliciumbänder, und im unteren Bild sind bis zu 6 cm lange Siliciumbänder zu erkennen. Die Abbildungen belegen die einheitliche Morphologie und die gute mechanische Stabilität der durch diese Verfahren hergestellten Bandstrukturen. Durch sorgfältige Kontrolle der Prozessparameter können flexible und dehnbare Bänder, Stapel und Stäbe erzeugt werden, deren Abmessungen zwischen 100 nm und der Dicke und dem Durchmesser des Wafers variieren können.^[120] Verwandte Strategien gestatten die Produktion derartiger Elemente in größeren Mengen, wobei entweder die obigen Arbeitsgänge wiederholt werden oder andere Techniken zum Einsatz kommen. Eines dieser Verfahren beruht auf der Bildung von Riffelmustern auf den Seitenwänden der senkrechten Furchen, die im ersten Schritt geätzt wurden (Abbildung 3A und B). Die Muster können durch induktiv gekoppeltes Ätzen mit einem Plasma (inductively coupled plasma reactive ion etching, ICPRIE) erzeugt

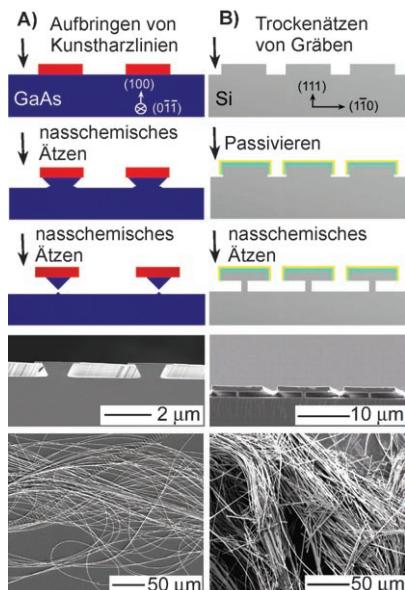


Abbildung 2. Herstellung von Drähten und Bändern im Mikro- und Nanometerbereich aus einkristallinem GaAs (A) und Si (B) durch anisotropes nasschemisches Ätzen größerer Einkristalle. Im unteren Teil sind rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen gezeigt.

derartiger Drähte aus GaAs-Wafern. Der obere Teil der Abbildung zeigt eine auf der GaAs (100)-Fläche entlang der (011)-Richtung aufgebrachte Kunstharzmaske. Darunter sind die Flächen nach Ätzen mit $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ gemäß der Netto-gleichung (5) sichtbar.



Das GaAs wird zunächst chemisch durch Wasserstoffperoxid oxidiert, und die oxidischen Produkte werden anschließend durch Phosphorsäure entfernt. Nach Beendigung des Ätzvorgangs und Entfernen der Polymerschicht verbleiben freistehende GaAs-Drähte auf der Unterlage. Der vierte

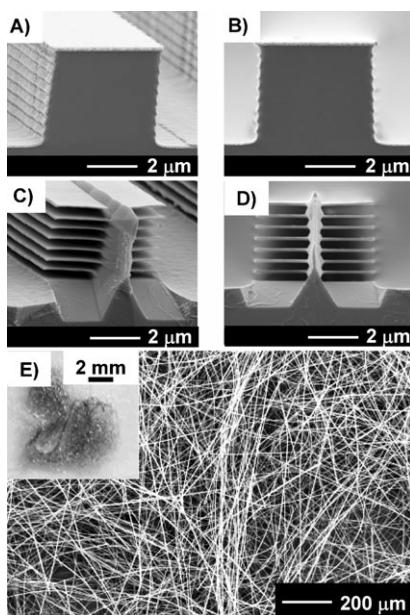


Abbildung 3. Rasterelektronenmikroskopische Seitenansichten (A und C) und Querschnitte (B und D) mehrlagiger Siliziumstrukturen vor (A und B) und nach (C und D) Ätzen mit KOH. Nach Abschluss des Ätzvorgangs lösen sich makroskopische Mengen einkristalliner Siliziumbänder von den Wafers ab (E). Wiedergabe mit Genehmigung der American Chemical Society nach Lit. [121].

werden.^[121] Das anschließende Bedampfen der Riffeln mit einem Metall führt zu Schattierungen, sodass nach einem weiteren Ätzschritt Stapel von vielen Lagen halbleitender Nanodrähte erhalten werden (Abbildung 3C und D). Abbildung 3E zeigt auf diesem Weg im Milligramm-Maßstab erzeugtes Material.^[121]

Die in diesem Abschnitt beschriebenen „Top-down“-Verfahren lassen sich auch auf andere Materialien als GaAs und Si anwenden. So zeigt Abbildung 4 Strukturen aus diesen beiden Halbleitern sowie aus InP (Abbildung 4C),^[52,119] GaN (Abbildung 4D)^[125] dickeren Siliziumstäben (Abbildung 4E)^[120] und Diamant (Abbildung 4F).^[126] Diese Mikro-

und Nanostrukturen weisen homogene Oberflächen, gleichmäßige Morphologien und gute Materialqualitäten auf, wobei sich die Formen bei der Herstellung leicht einstellen lassen. Die größten Einschränkungen dieses „Top-down“-Verfahrens sind: 1) die Beschränkung auf Materialien, die in Form von Wafern oder dünnen Filmen verfügbar sind, 2) eine durch den Ätzprozess bedingte Rauheit der Oberfläche und 3) eine Mindestbreite von ca. 10 nm aufgrund praktischer Begrenzungen der Lithographie- und Ätzschritte.

4. Montage von Mikro- und Nanohalbleiter-elementen

Der Einbau in „Bottom-up“- oder „Top-down“-Ansätzen erzeugter Mikro- oder Nanohalbleiterelemente in verwendbare makroelektronische Bauteile stellt besondere Herausforderungen. Der Idealfall ist eine perfekte Ausrichtung von horizontalen Anordnungen an gewünschten Stellen auf dem Bauelement. Die folgenden Abschnitte stellen Herstellungsmethoden für solche Baugruppen vor, die einige dieser Anforderungen erfüllen.

4.1. Ansätze mit Selbstorganisation

Häufig liegen Mikro- und Nanostrukturen aus „Bottom-up“-Verfahren in Lösung oder auf einer Oberfläche in rein zufälliger oder vertikaler Orientierung vor; keine dieser Anordnungen lässt sich einfach in herkömmliche elektronische Funktionseinheiten integrieren. Mithilfe externer Kräfte wie mikrofluider Scherströmungen, Oberflächenkompression (d.h. Langmuir-Blodgett-Filme), elektrischer oder magnetischer Felder lassen sich in Lösung hergestellte Nanodrähte und -bänder in geordnete Strukturen überführen.^[127–131]

Über diese Lösungsverfahren hinaus sind kürzlich zwei neue Methoden zur großflächigen Integration eingeführt worden.^[132,133] Die erste beruht auf einem mechanischen Prozess mit nachfolgendem Trockendruck zum Aufbringen geordneter Filme aus Nanodrähten auf einem Substrat.^[132] Hierbei werden die Nanodrähte auf einem Muttersubstrat hergestellt, das anschließend in direkten Kontakt mit dem zu belegenden Substrat gebracht wird. Dieses Substrat wurde zuvor mit einer Zwischenschicht strukturiert (beispielsweise aus Kunstharz), die die Anordnung der Nanodrähte festlegt. Nach Anlegen von Druck (in Form von Scherkräften) und anschließendem Entfernen des Muttersubstrats verbleibt eine geordnete Anordnung von Nanodrähten, die für weitere Anwendungen genutzt werden kann.^[132] Die zweite Methode sieht die Expansion von Nanodrähten in einer Polymersuspension zu einer Ballonform vor.^[133] Bei diesem Prozess treten Deformationen des Polymers auf, und die Drähte nehmen daher eine geordnete Anordnung ein, die von den Ballons auf andere Substrate übertragen werden kann.^[133]

Das Potenzial dieser Methoden ist unzweifelhaft, aber es werden weitere Fortschritte notwendig sein, um auch größere Flächen für elektronische Anwendungen schnell und mit hoher Qualität beschichten zu können. So führen die meisten

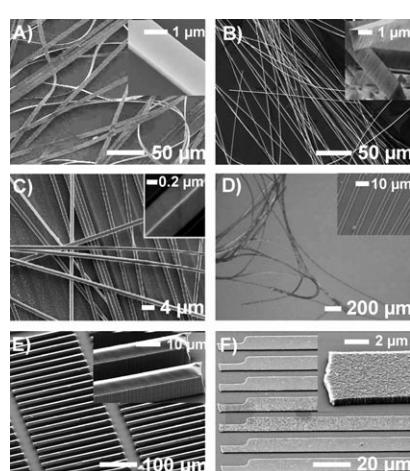


Abbildung 4. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen mikrostrukturierter Halbleiterelemente: μ -Si (A), μ -GaAs (B), μ -InP (C), μ -GaN (D), dickeres μ -Si (E) und μ -Diamant (F). Wiedergabe von (A) mit Genehmigung des American Institute of Physics nach Lit. [51].

der oben beschriebenen Methoden zu einer relativ schlechten Ausrichtung der Drahtenden, und auch die Abstände zwischen benachbarten Drähten lassen sich nur schwer steuern. Zudem könnten aus der Verwendung in der Elektronik noch nicht etablierter Lösungsmittel, Tenside und Polymere Nachteile entstehen.

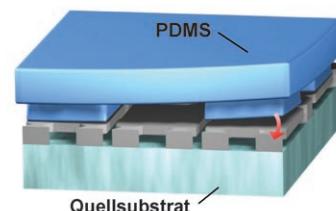
4.2. Transfer durch Trockendruck

Eine alternative Strategie ist der Trockendruck von Mikro- und Nanohalbleitern.^[49–52, 57–59, 102, 119–121, 125, 134–143] Hierbei wird mithilfe von weicher Lithographie^[144] eine Gummimaske hergestellt, mit der die Halbleiterelemente von einem Quellsubstrat auf das flexible Zielsubstrat übertragen werden.^[42, 49–51, 57–59, 102, 119–121, 125, 134–143] Anders als bei den im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Methoden, die auf einer selbständigen Anordnung der Halbleiterelemente beruhen, erhält der Trockendruck während des gesamten Produktionsprozesses einen mechanischen Kontakt zur Halbleiterstruktur aufrecht. Trockendruckverfahren sind daher geeignet, um höchste Transferausbeuten bei minimaler Positions- und Orientierungsfehlordnung zu erzielen. In Kombination mit Halbleiterelementen aus den oben beschriebenen „Top-down“-Verfahren oder geordneten Elementen aus der „Bottom-up“-Synthese kann der Trockendruck nahezu perfekte Halbleiterelemente auf so gut wie jedes Substrat bringen. Die folgende Diskussion konzentriert sich auf μ -sc-Bausteine.

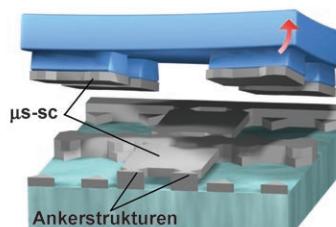
Abbildung 5 skizziert den Trockendruckprozess: Zu Beginn wird ein Stempel aus Polydimethylsiloxan (PDMS) mit der μ -sc-Struktur auf dem Quellsubstrat in Kontakt gebracht. Der Stempel kann entweder die gesamte Oberfläche des Substrats berühren (flacher Stempel) oder nur einen bestimmten Teil (Reliefstempel).^[137] Der Stempel mit dem anhaftendem μ -sc wird dann vom Quellsubstrat getrennt und auf ein Empfänger- oder Zielsubstrat nahezu beliebiger Form und Zusammensetzung gedrückt. Das Entfernen des Stempels von diesem Substrat schließt den Transfer des μ -sc ab.

Leistungsfähige Verfahren erfordern die Beherrschung der physikalischen Prozesse, die den Transfer von μ -sc-Elementen auf den Stempel und deren spätere Ablösung bestimmen. Chemische, geometrische und kinetische Betrachtungen spielen eine wichtige Rolle für die Richtung des Transfers, d.h. die bevorzugte Ablösung der Halbleiterstruktur vom Quellsubstrat auf den Stempel und anschließend die bevorzugte Ablösung von letzterem und Adhäsion auf dem Zielsubstrat. Die Wechselwirkungen zwischen einem PDMS-Stempel und μ -sc-Strukturen werden in der Regel durch Van-der-Waals(VdW)-Kräfte bestimmt,^[145–147] doch können chemische Manipulationen der Oberfläche des Stempels dessen Belegung fördern, was bis hin zu direkten Anwendungen in flexiblen Elektronikbauteilen reicht (siehe Abschnitt 6). PDMS besteht aus dreidimensional vernetzten $-(\text{CH}_3)_2\text{SiO}_2$ -Einheiten; die Oberflächen sind in der Regel mit Methylgruppen ($-\text{CH}_3$) gesättigt und folglich hydrophob.^[148] Eine Oxidation der PDMS-Oberfläche durch aktive Sauerstoffspezies wie O_2^+ , O_2^- und O aus Sauerstoffplasma, Photolyse von Ozon oder anderen Verfahren liefert eine PDMS-

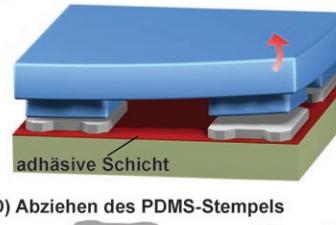
A) Aufsetzen des PDMS-Stempels



B) Abnehmen der Mikrostrukturen



C) Transfer der Mikrostrukturen



D) Abziehen des PDMS-Stempels

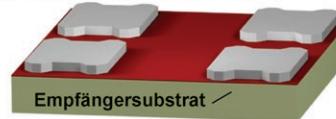


Abbildung 5. Gezieltes Ablösen von Mikro- oder Nanostrukturen von einem Halbleiterwafer mithilfe eines Gummistempels und Transfer auf ein Empfängersubstrat.

Oberfläche, die bereits bei bloßem Kontakt oder bei leicht erhöhter Temperatur mit vielen Materialien, z.B. mit Keramiken oder Oxiden, starke chemische Bindungen aufbaut.^[52, 57, 119, 143, 149] Die erhöhte Reaktivität wird dabei auf die Bildung von Silanolgruppen (-Si-OH) zurückgeführt, was zur Umwandlung von einer hydrophoben in eine extrem hydrophile Oberfläche führt.^[149, 150] Bei diesen chemischen Verfahren lässt sich durch den Grad der Bedeckung mit Silanolgruppen eine unterschiedliche starke Adhäsion zwischen dem Stempel und den Halbleiterelementen einstellen.^[52, 139]

Bei Druckverfahren muss der Oxidationsgrad der Stempeloberfläche sorgfältig kontrolliert werden, damit der Stempel/ μ -sc-Kontakt nicht nur erzeugt, sondern auch wieder gelöst werden kann.^[52, 139] Meist reichen schon die VdW-Kräfte unbehandelter PDMS-Stempel zum Ablösen der μ -sc-Elemente vom Quellsubstrat aus, vor allem, wenn die Trennung der Oberflächen rasch erfolgt. Die Adhäsion zwischen PDMS und μ -sc ist aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften von PDMS sehr stark von der Ablösegeschwindigkeit abhängig.^[102, 151] Bei langsamer Trennung der Oberflächen ist der Energiebedarf zum Entfernen eines starren Objekts von der PDMS-Oberfläche wegen dessen geringer Oberflächenenergie ($\approx 20 \text{ mJ m}^{-2}$) vergleichsweise klein.^[152] Bei schnellerem Abziehen ist die Energie zur Trennung der Oberflächen jedoch deutlich größer. Das rasche

Entfernen des Stempels vom Quellsubstrat kann die Effizienz des μ -sc-Ablösens daher merklich erhöhen. Die Ausbeuten der μ -sc-Übertragung wurden weiterhin durch sorgfältiges Design der Halbleiterstrukturen verbessert.^[138] Vor ihrer Ablösung vom Quellsubstrat sind Strukturen aus „Top-down“-Verfahren meist freistehend, sie werden jedoch häufig teilweise auf dem Quellsubstrat verankert, um die lithographische Orientierung noch bei kompletter Unterschneidung durch Ätzen aufrechtzuerhalten. Das Ablösen dieser Strukturen vom Quellsubstrat beim Transfer erfolgt unter Bruch dieser Verankerungen. Die Effizienz des Übertragungsprozesses lässt sich durch gezielte Einbindung von Sollbruchstellen (Spannungszentren) optimieren.^[138]

Während des Druckvorgangs können die oben angeführten Kondensationsreaktionen oder auch andere chemische Prozesse^[153] genutzt werden, um eine starke Adhäsion zwischen dem μ -sc und dem Empfängersubstrat aufzubauen. Ebenfalls nützlich zur Erzeugung einer solcher Adhäsion sind die Wechselwirkung zwischen Thiolen und Edelmetallen oder III-V-Halbleitern^[153–155] sowie durch das Kaltlöten von Metallfilmen.^[155–159] Die im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen viskoelastischen und kinetischen Effekte steigern in diesen Fällen die Zuverlässigkeit des Druckverfahrens bei langsamer Ablösung des Stempels vom Empfängersubstrat.^[102, 160] Über die Chemie der Grenzfläche und die kinetischen Effekte hinaus muss beim Druckvorgang außerdem berücksichtigt werden, dass die μ -sc-Elemente zumindest mit Teilbereichen des Empfängersubstrats in vollem konformalem Kontakt stehen. Der niedrige Modul des PDMS-Elastomers begünstigt den konformalen Kontakt mit den μ -sc-Elementen, doch kann während des Drucks ein derartiger Kontakt auch durch Gegenstückpassung oder auf dem Empfängersubstrat aufgebrachte Adhäsionsschichten erzielt werden. Ein wichtiges Beispiel für Gegenstückpassung ist der Kontakt glatter Oberflächen (Rauheit im Nanometerbereich) von μ -sc-Elementen mit glatten Empfängersubstraten. Die Übertragung der μ -sc-Strukturen erfolgt dabei, in Analogie zur direkten Waferbindung, durch nichtspezifische Oberflächenwechselwirkungen einschließlich VdW-Wechselwirkungen.^[102, 161, 162] Abbildung 6 präsentiert einige Beispiele für solchermaßen aufgedruckte makroelektronische Bauteile.

Die Abbildungen 6A und B zeigen heterogene Silicium-III-V-Bauteile, die durch Druckverfahren erhalten wurden. In Abbildung 6A sind direkt auf Si (100) gedruckte Stäbe aus μ -GaN ($2 \times 5 \times 180 \mu\text{m}^3$) und in Abbildung 6B direkt aufgedruckte μ -Si-Bänder ($3 \times 25 \times 250 \mu\text{m}^3$) auf GaAs-Wafern zu sehen.^[102] Mit einem derartigen „adhäsionslosen“ Trocken- druck lassen sich μ -sc-Elemente sogar auf gekrümmte Oberflächen bringen (Abbildungen 6C und D), wenn ein zylindrisches Substrat über den Stempel gerollt oder ein sphärisches Substrat in einen weichen Stempel gepresst wird, der mit glatten Silicium-Mikrostrukturen kompatibel ist.^[102] Auch die Übertragung auf strukturierte Oberflächen ist möglich, sofern ein ausreichender Teil der Substratoberfläche mit dem Stempel in direkten Kontakt gebracht werden kann, wie in den „adhäsionslos“ gedruckten Siliciumscheiten in Abbildung 6E.

Wenn keine komplementäre Passung vorliegt oder eine oder mehrere Strukturen nicht ausreichend glatt sind, können

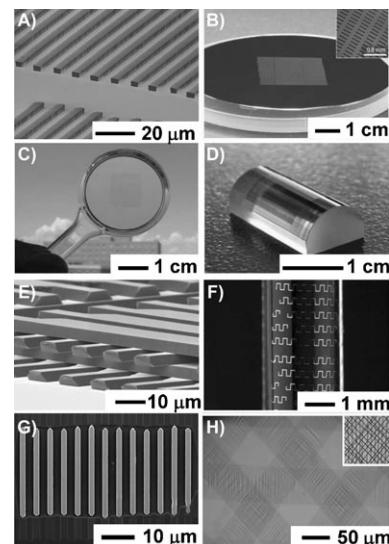


Abbildung 6. Auf verschiedenartige Substrate gedruckte einkristalline anorganische Drähte und Stäbe: μ -GaN-Stäbe auf einem Wafer aus Si(100) (A); μ -Si-Bänder auf einem GaAs-Wafer (B); μ -Si-Elemente auf einer sphärischen Polycarbonatlinse (C) sowie einer zylindrischen Linse aus Glas (D); mehrlagige Stapel von μ -Si-Stäben (E); μ -Si-Bänder auf einem Glasstab (F); Drähte aus μ -InP (G) und μ -GaAs (H) auf dünnen Kunststoffsubstraten. In den Fällen (A–E) wurde kontrollierter Druck ohne Adhäsion eingesetzt, bei (F–H) steuerten adhäsive Polymerfilme den Transfer. Wiedergabe mit Genehmigung der Nature publishing group nach Lit. [102] (A–D) und der American Chemical Society nach Lit. [52] (G und H).

Dünnfilm-Techniken zur Steuerung des Druckvorgangs genutzt werden. Die hierbei verwendeten weichen, typischerweise polymeren Materialien ermöglichen einen vollständigen konformalen Kontakt zwischen den μ -sc-Elementen und den Empfängersubstraten und verbessern die Druckeffizienz deutlich. Meistens stehen dabei der Stempel und die zu drückende Struktur mit diesen Materialien in Kontakt, sofern diese im ungeheilten oder partiell geheilten Zustand fließfähig sind. Solange der Stempel mit dem Substrat in Kontakt ist, kann auch durch Licht, Wärme oder eine Kombination externer Stimuli eine starke Bindung zwischen der Unterlage und den μ -sc-Elementen aufgebaut werden. Beispiele für derartige Filmadhäsive beim Trocken- druck sind Polyimid,^[134, 136] Polyurethan,^[52, 119, 137] Benzocyclobuten-haltige Polysiloxane (BCB),^[163] PDMS^[120] und Epoxide.^[42, 50, 142] Die Abbildungen 6F–H zeigen einige Halbleitersysteme, die unter Verwendung von Filmadhäsiven aufgedruckt wurden: μ -Si-Bänder auf PDMS-Film auf einem Glasstab (Abbildung 6F) sowie μ -InP- (Abbildung 6G) und μ -GaAs-Drähte (Abbildung 6H) auf Polyurethanfilmen mit PET-Unterlage.^[52, 119]

Diese Art des Trocken- drucks kann im einfachsten Fall manuell ausgeführt werden. Eine bessere Kontrolle wird mithilfe von mechanischen Druckvorrichtungen erzielt (Abbildung 7), die in x-, y- und z-Richtung beweglich sind und Neigungs- und Rotationsvorrichtungen enthalten, um den Stempel relativ zum Quell- und Zielsubstrat mit reproduzierbarer Geschwindigkeit zu verschieben. Durch Beladungszellen und integrierte optische Vorrichtungen lassen

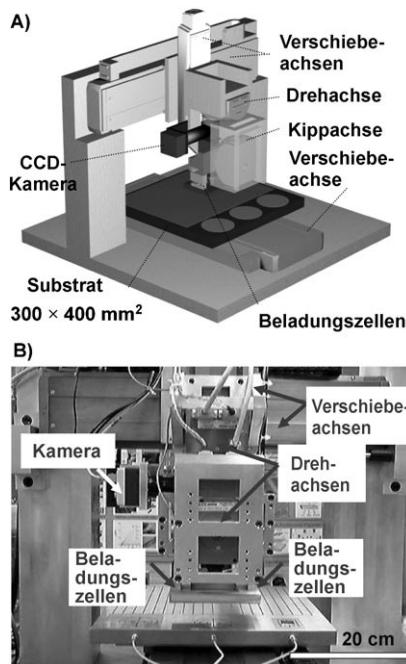


Abbildung 7. Skizze (A) und Photographie (B) eines μ -sc-Druckautomaten.

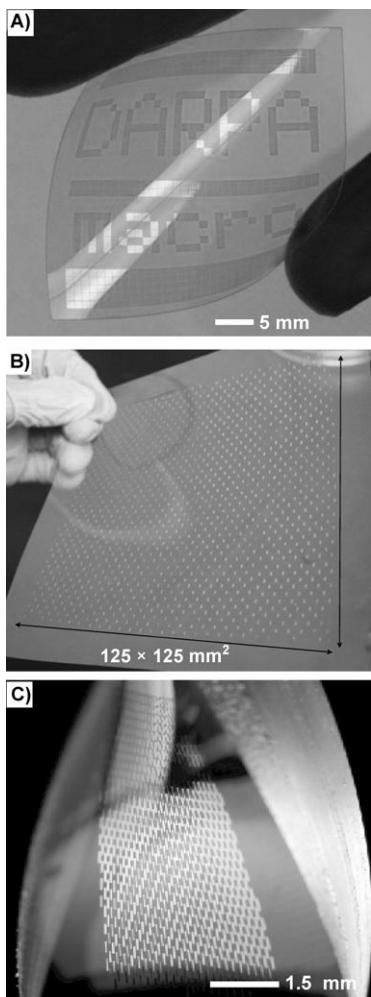


Abbildung 8. μ -Si auf Substraten aus Plastik (A, B) und Gummi (C).

sich Ausrichtung und Kontaktstärke von Stempel und Substrat steuern. Bei Verwendung eines laminierten Stempels (dünne Elastomerschicht auf einer Unterlage mit hohem Modul) zur Vermeidung von Verzerrungen^[164-166] erzielt die Apparatur in Abbildung 7 Auflösungen bis ca. 2 μm auf Stempel-Substrat-Kontaktflächen von einigen Quadratzentimetern bei Substratstärken bis 400 μm . Dieses und verwandte Geräte aus der weichen Lithographie oder Nanodruckverfahren^[164,167] weisen den Weg für zukünftige Maschinen zum Hochleistungstrockendruck in der industriellen Produktion. Derartige Drucker mit weichen Stempeln entfernen beim Kontakt einen bestimmten Anteil an μ -sc-Elementen von der dichtgepackten Anordnung des Quellssubstrats und können diese auf größere plastische Substrate übertragen. Der Prozess wird vom Drucker für die auf dem Quellssubstrat verbliebenen μ -sc-Elemente wiederholt. Das Ergebnis ist ein „selektiver Transfer“ oder eine „Oberflächenmultiplikation“ für großflächige Makroelektronikbauteile.^[120,137] Die Abbildungen 8 A und B zeigen als Beispiele zwei lockere Anordnungen von μ -Si-Bändern, die durch einen lichtempfindlichen Film eines Polyurethanadhäsis auf ein flexibles PET-Substrat übertragen wurden; Trocken-druckverfahren sind folglich auf Flächen mit beträchtlicher Größe anwendbar.^[137] Abbildung 8 C stellt die Überführung von Siliciumbausteinen auf PDMS-Stempel dar, die gedehnt, komprimiert und in komplexe Anwendungen integriert werden können, wie in Abschnitt 6 beschrieben wird.

5. Anwendungen in flexiblen elektronischen Bauteilen

5.1. Nanostrukturen aus „Bottom-up“-Verfahren

Halbleiterstrukturen aus „Bottom-up“-Verfahren ermöglichen die Entwicklung neuartiger elektronischer und photonischer Bauteile für zahlreiche potenzielle Einsatzbereiche.^[168] Die wesentlichen Merkmale dieses Ansatzes umfassen die Trennung aller Hochtemperaturprozesse (z. B. Wachstum der Nanodrähte, Dotierung) von den Niedertemperaturschritten (z. B. Anordnung der Nanodrähte) bei der Produktion. Kürzlich wurde auch gezeigt, wie unter milden Bedingungen homo- und heterogene Nanodrähte auf starren oder flexiblen Substraten aufgebracht werden können, um photonische Elemente wie Leuchtdioden, Laser, aktive Hohlleiter und integrierte elektrooptische Modulatoren und Sensoren auf einem Chip herzustellen.^[64,108,169-173]

Ähnliche Nanodrähte sind in einer Reihe anderer elektronischer Anwendungen zum Einsatz gekommen. So lassen sich logische Schaltungen (z. B. OR, AND, NOR) aus in Lösung assoziierten Silicium- und GaN-Nanodrähten erzeugen,^[174] wobei die Nanodrähte sowohl aktive Kanäle als auch Gatterelektroden sind. Durch gesteuerte Abscheidung aus Lösungen lassen sich auch geordnete Filme von Siliciumnanodrähten auf Kunststoffsubstraten für Hochleistungs-transistoren erhalten.^[175] Weil die Nanobausteine einkristallin sind, weisen diese Produkte auch hohe Ladungsträgermobilitäten und Durchleitfähigkeiten auf. Für Transistoren aus einzelnen Nanodrähten sind auf flexiblen Kunststoffsubstraten

ten Mobilitäten bis $365 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ möglich, wobei sich die elektrischen Eigenschaften bei einem Biegsradius von ungefähr 0.3 cm auf einem Poly(ethylenterephthalat)-Träger mit 100 μm Dicke nur geringfügig ändern.^[176] Mithilfe von Siliciumnanodrähten auf Glas ließen sich auch Stromkreise mit dreistufigen Ringoszillatoren und Frequenzen um 12 MHz bei Spannungen von ca. 40 V realisieren.^[177]

Aus Ge, Si und anderen Materialien aufgebaute Kern-Schale-Nanodrähte erzielen verbesserte Leistungscharakteristika.^[178] Anordnungen von GeSi-Nanodrähten sind durch die zuvor beschriebenen mechanischen Kontaktverfahren erhältlich.^[132] Derartige Materialien sind auch gut für dünne Halbleiterfilme in Feldeffekttransistoren geeignet, die sich zwei- oder dreidimensional über 10 Lagen anordnen lassen.^[132] Solche Anordnungen lassen sich nicht nur in der Elektronik, sondern auch in Sensoren für den markierungsfreien Nachweis biologischer und chemischer Substanzen verwenden.^[179–183]

5.2. Nanostrukturen aus „Top-down“-Verfahren

Die in Abschnitt 3.2 beschriebenen Materialien ermöglichen die Konstruktion von Hochleistungstransistoren und anderen elektronischen Elementen. Als Beispiel zeigt Abbildung 9 Si-MOSFETs auf einem ca. 25 μm dünnen Polyimidblättchen (PI; Kapton) sowie GaAs-MESFETs und GaN-HEMTs auf PET-Substraten (180 nm), wobei $\mu\text{-Si}$ -Bänder ($W = 87 \mu\text{m}$, $L = 250 \mu\text{m}$, 290 nm Dicke), $\mu\text{-GaAs}$ -Drähte ($W = 2.1 \mu\text{m}$, $L = 250 \mu\text{m}$, 2.1 μm Dicke) und $\mu\text{-GaN}$ -Stäbe ($W = 10 \mu\text{m}$, $L = 150 \mu\text{m}$, 1.2 μm Dicke) verwendet wurden. In allen Beispielen wurden die für die Kontaktbildung notwendigen Schritte (d.h. das Dotieren von Zu-

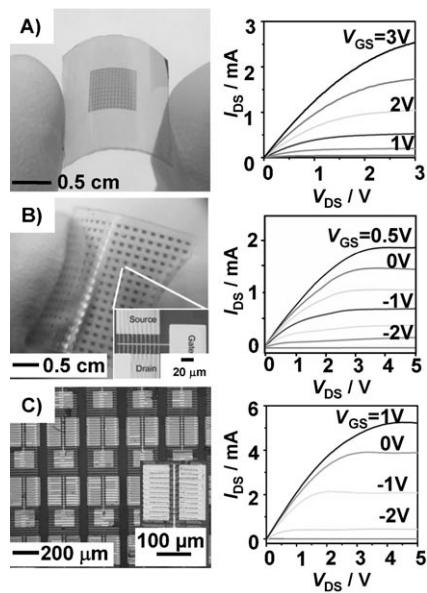


Abbildung 9. Bilder und Strom-Spannungs-Kurven von Feldeffekttransistoren: MOSFETs aus $\mu\text{-Si}$ -Bändern (A); MESFETs aus $\mu\text{-GaAs}$ -Drähten (B) und auf $\mu\text{-GaN}$ -Bändern basierende HEMTs (C). I_{DS} ist der Strom von der Zu- zur Ableitungselektrode, V_{DS} ist die Potentialdifferenz zwischen diesen Elektroden, und V_{GS} ist die Gatterspannung. Wiedergabe mit Genehmigung der IEEE nach Lit. [136].

und Ableitung bei MOSFETs und die Bildung des Ohmschen Kontakts bei MESFETs und HEMTs) bei höheren Temperaturen direkt auf den Wafern ausgeführt, auf denen die $\mu\text{-sc}$ -Elemente hergestellt wurden, um die Zielsubstrate aus Kunststoff zu schonen. Die folgenden Schritte (also das Aufbringen der Gatterkontakte bei MOSFETs und die Erzeugung von Schottky-Kontakten bei MESFETs und HEMTs) wurden nach Trockendruck der vorbehandelten Halbleiterelemente auf dem Kunststoffsubstrat ausgeführt. Die effektive Mobilität der Kanäle lässt sich aus der Variation des Zu- und Ableitstroms (I_{DS}) mit der Gatterspannung (V_{GS}) ermitteln. Im linearen Bereich liegen die Mobilitäten zwischen 500 und 600 $\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ mit ca. 500 $\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ im Sättigungsbereich, was an die Werte ähnlicher Elemente auf SOI-Wafern heranreicht und lasergeheiltem polykristallinem Silicium auf Kunststoff überlegen ist.^[136] Die gute Leistungscharakteristik ermöglicht auch den Betrieb bei hohen Frequenzen. Die in einer gemeinsamen Referenzanordnung gemessenen Verstärkerstromfrequenzen f_T von $\mu\text{-Si-MOSFETs}$ und $\mu\text{-GaAs-MESFETs}$ auf Plastikträgern betragen ca. 500 MHz^[136] bzw. 1.5 GHz^[141] bei einfach aufgebauten Elementen mit relativ langen Kanälen ($L_c > 2 \mu\text{m}$). Ein verbessertes Design der Bauteile ermöglicht f_T -Werte im GHz-Bereich.^[184] Diese Ergebnisse belegen, dass die Frequenzantwort für TFTs mit $\mu\text{-sc}$ -Elementen auf Kunststoffsubstraten vergleichbar zu üblichen Wafersystemen sein kann.^[184]

Mehrere Bauelemente dieses Typs können zu integrierten Schaltkreisen kombiniert werden. Abbildung 10 zeigt einige Beispiele für analoge und digitale Elektronik unter Verwendung von $\mu\text{-Si-MOSFETs}$ und $\mu\text{-GaAs-MESFETs}$. Abbildung 10A zeigt einen Ringoszillator aus fünf ebenfalls auf PI montierten NMOS-Umwandlern und zugehörige elektrische Messungen. Der Oszillator arbeitet bei einer Frequenz von ca. 8 MHz, was bei einer Betriebsspannung $V_{DD} = 4 \text{ V}$ einer Stufenverzögerung von 12 ns entspricht. Derartige Betriebsspannungen sind deutlich niedriger als für Ringoszillatoren auf flexiblen Substraten unter Verwendung von polykristal-

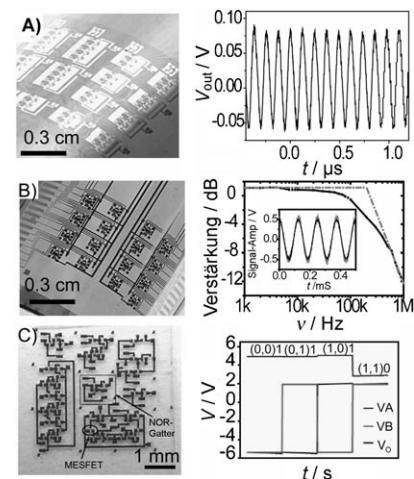


Abbildung 10. Einfache elektronische Stromkreise, die durch Druck von $\mu\text{-sc}$ auf Kunststoff erhalten wurden. Fünfstufiger Ringoszillator aus $\mu\text{-Si}$ -Bändern (A); Differenzverstärker aus $\mu\text{-Si}$ -Bändern (B); NOR-Gatter auf Basis von $\mu\text{-GaAs}$ -Drähten (C). Wiedergabe von (A) und (B) mit Genehmigung des American Institute of Physics nach Lit. [135].

linem Silicium oder von Nanodrahttransistoren auf starren Glassubstraten, was auf die Möglichkeit energiesparender logischer Schaltkreise hinweist.^[20,30,177,185] In Abbildung 10B sind ein Bild und die Leistungscharakteristik eines Differenzverstärkers auf einer PI-Folie gezeigt. Das System besteht aus einer Stromquelle, einem Stromregelkreis, einem Differenzpaar und einem Ladeteil mit einer Verstärkung um 1.3 bei einem Eingangssignal mit 0.5 V Maximalspannungsdifferenz. Abbildung 10C zeigt die Kombination von μ -GaAs-MESFETs zu einem NOR-Schaltkreis.^[140] Ein MESFET (oben) dient als Ladeteil und zwei identische parallele MESFETs (unten) als Schaltungstransistoren. Eine weitere Integration von logischen Schaltkreisen und/oder anderen passiven Elementen (z.B. Widerstände, Kondensatoren, Induktoren usw.) erscheint vielversprechend hinsichtlich schneller großflächiger Elektroniksysteme auf Kunststoffträgern.

Durch elektrische Verbindung von NMOS-TFTs mit PMOS-TFTs aus μ -Si-Bändern lassen sich auf flexiblen Kunststoffsubstraten aus komplementären Metalloxidhalbleitern (complementary metal-oxide semiconductor, CMOS) logische Schaltkreise mit niedrigem Strombedarf und hoher Leistung erzeugen. Abbildung 11A zeigt die Transfercharakteristika von p-Kanal-Elementen mit Kanallängen L_c zwischen 2 und 24 μ m, Überlappungskontakten L_o von 1.5–5.5 μ m und Kanalweiten W von 180 μ m.^[186] Der Einschub zeigt die typischen Charakteristika eines Bauteils mit $L_c = 9 \mu$ m. Die An-Aus-Verhältnisse, die effektiven linearen Mobilitäten und die Schwellenspannungen betragen ca. 10⁶, (200 \pm 20) $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ bzw. $-(2.5 \pm 0.5)$ V. Abbildung 11B stellt einen CMOS-Umwandler auf einem flexiblen Kunst-

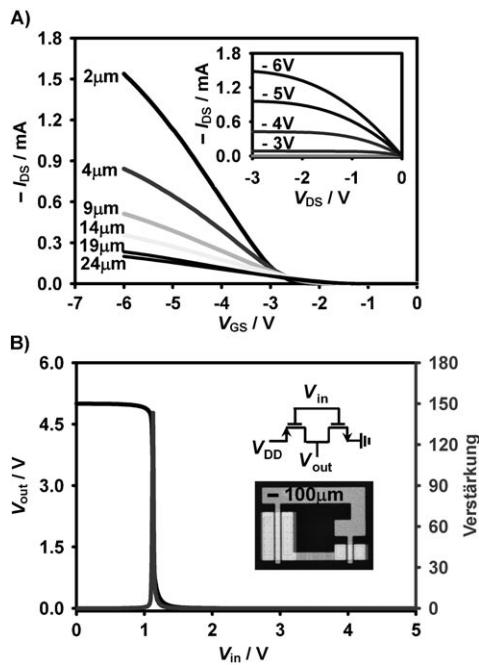


Abbildung 11. Strom-Spannungs-Kurven von PMOS-Transistoren (A) und CMOS-Umwandlern (B) auf Kunststoffsubstraten. Der Einschub in (A) zeigt die Strom-Spannungs-Kurven eines PMOS-Transistor bei Gatterspannungen zwischen -3 und -6 V. Der Einschub in (B) zeigt den Stromkreis und eine Mikrophotographie. Wiedergabe mit Genehmigung der IEEE nach Lit. [186].

stoffsubstrat dar, wobei die Spannungscharakteristik, eine Fotografie und der Stromkreis zu sehen sind. Der scharfe Spannungstransfer führt zu hohen Verstärkungen (bis 150) und großer Rauschdynamik (im unteren und oberen Rauschbereich) um 4.7 V bei einer Betriebsspannung von 5 V.^[186]

6. Heterogene Bauelemente

Die Druckverfahren für flexible Elektronikbauteile aus μ -sc eignen sich auch zur Verwendung unterschiedlicher Klassen von Halbleitern, was zu integrierten heterogenen Systemen führt. Diese Art der Integration ist für Mikrofluidsysteme mit integrierter Elektronik interessant, die in chemischen oder biologischen Sensoren einsetzbar sind. Dazu werden neue Materialien mit herkömmlichen elektronischen Bauteilen auf Siliciumbasis und photonischen oder optoelektronischen Elementen aus Halbleitern wie GaAs und GaN mit Silicium-Versorgungselektronik kombiniert. Diese Prozesse beruhen auf der wiederholten Anwendung der oben beschriebenen Druckverfahren und Produktionsschritte, wobei die μ -sc-Elemente für unterschiedliche Zwecke von verschiedenen Quellsubstraten stammen.^[134] Die so erzeugten Stromkreise sind entweder zweidimensionale Anordnungen oder dreidimensionale Mehrschichtarchitekturen. Im letztgenannten Fall wird das Substrat nach dem Druck der ersten Lage mit einer glättenden dünnen Polymerschicht bedeckt, die zugleich als isolierende Adhäsionsschicht für die nächste Lage dient. Da diese Trennschichten dünn sein können, lassen sich Bauteile in verschiedenen Lagen durch gezieltes Ätzen leicht verbinden.^[134] Abbildung 12 A zeigt eine hochauflöste Aufsicht eines dreilagigen μ -Si-

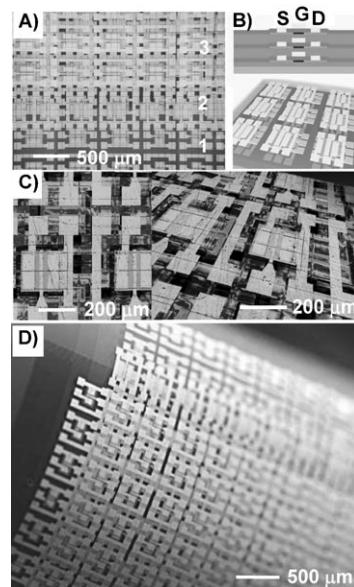


Abbildung 12. Dreilagige Stapel von μ -Si-Transistoren, die durch wiederholten Transferdruck auf einem Kunststoffsubstrat erzeugt wurden. Photographie von oben (A) sowie Seitenansicht und Querschnitt (B; schematisch), Aufsicht und Seitenansicht im konfokalen Mikroskop (C) und ein Bild des um einen zylindrischen Träger gebogenen Systems (D). Wiedergabe mit Genehmigung der AAS aus Lit. [136].

MOSFET-Stapels, der in dieser Weise auf einem PI-Substrat hergestellt wurde, wobei auch die Zwischenschichten aus dem Polymer PI sind. Eine 90°-Drehung der zweiten Lage relativ zur ersten und dritten hilft bei der Festlegung des Layouts des Systems. Abbildung 12B zeigt schematische Querschnitte und Seitenansichten der Stapelstrukturen, Abbildung 12C enthält Aufsichten und Seitansichten, die mithilfe eines optischen Konfokalmikroskops erhalten wurden, und Abbildung 12D gibt ein großflächiges Bild der 3D-Stapel von μ -Si-MOSFETs wieder, wobei Bänder mit $W = 87 \mu\text{m}$, $L = 250 \mu\text{m}$ und 290 nm Dicke verwendet wurden. Die Bauteile in jeder der drei Schichten zeigen hervorragende Eigenschaften (lineare Mobilitäten von $(470 \pm 30) \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$, An-Aus-Verhältnisse über 10^4 und Schwellenspannungen von $-(0.1 \pm 0.2) \text{ V}$), ohne dass zwischen den verschiedenen Lagen systematische Abweichungen auftreten.

Abbildung 13 stellt ein ähnliches Beispiel dar, doch tragen die verschiedenen Lagen hier unterschiedliche Funktionen: μ -GaN-HEMTs ($W = 10 \mu\text{m}$, $L = 150 \mu\text{m}$ bei 1.2 μm Dicke), einwandige Kohlenstoffnanoröhren (SWNT) als Dünnschichttransistoren (TFTs; mittlere Röhrendurchmesser und -längen ca. 1.5 nm bzw. 10 μm) sowie μ -Si-MOSFETs.^[134] Die Abbildungen 13A und B zeigen hochaufgelöste

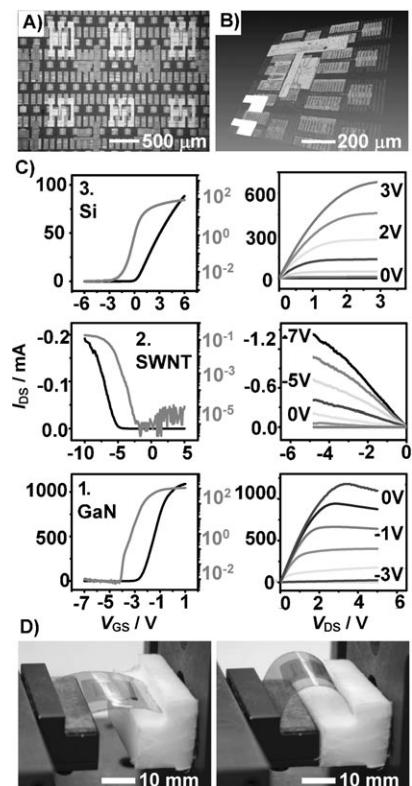


Abbildung 13. Aufnahmen einer auf ein Polyimidsubstrat gedruckten dreidimensionalen Anordnung von heterogenen elektronischen Bauteilen aus μ -Si, μ -GaN und einwandigen Kohlenstoffnanoröhren mit einem optischen Mikroskop (A) und einem konfokalen Rastermikroskop (B). Elektrische Eigenschaften der Elemente in den drei verschiedenen Lagen (C). Ermüdungstests beim Biegen der dreilagigen Anordnung aus μ -Si, μ -GaN und SWNT-Transistoren auf einer dünnen Kunststoffschicht: Abbildung der Testapparatur (D) und eines Bauteils bei geringer (links) und moderater Biegung (rechts). Wiedergabe mit Genehmigung der AAS aus Lit. [136].

optische und konfokale Aufnahmen der Bauteilanordnungen. Die μ -GaN-HEMTs haben das gleiche Design wie in Abbildung 9C. Die SWNT-TFTs der zweiten Lage nutzen SiO_2 und ein Epoxidpolymer als dielektrische Zwischenschicht und Cr/Au für die Zuleitungs-, Ableitungs- und Gatterelektroden. Das Design der μ -Si-MOSFETs entspricht demjenigen in Abbildung 12. Die Bauteile weisen ähnliche Leistungscharakteristika auf wie Elemente, die auf den Quellwafern erzeugt wurden (Abbildung 13C): Die Silicium-MOSFETs haben Schwellenspannungen $V_{\text{th}} = (0.2 \pm 0.3) \text{ V}$, An-Aus-Verhältnisse über 10^4 und lineare Mobilitäten von $(500 \pm 30) \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$; die SWNT-TFTs haben Schwellenspannungen $V_{\text{th}} = -(5.3 \pm 1.5) \text{ V}$, An-Aus-Verhältnisse über 10^5 und lineare Mobilitäten von $(5.9 \pm 2.0) \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$; die HEMTs (untere Diagramme in Abbildung 13C) haben Schwellenspannungen $V_{\text{th}} = -(2.4 \pm 0.2) \text{ V}$, An-Aus-Verhältnisse über 10^6 und Durchleitfähigkeiten von $(0.6 \pm 0.5) \text{ mS}$. Wie einfache einlagige Systeme aus nur einem Material müssen auch die heterogenen Bauelemente für Anwendungen ein gutes Biegeverhalten aufweisen. In Abbildung 13D sind einige Fotos von Tests gezeigt, in denen wir die Flexibilität dreilagiger Anordnungen aus μ -Si, μ -GaN und SWNT bei Vor- und Rückwärtsbiegung untersucht haben. Die effektiven Durchleitfähigkeiten dieser Elemente (normalisiert auf den ungebogenen Zustand) zeigen bis zu einem Biegeradius von 3.7 mm keine wesentlichen Änderungen, wobei die Gesamtdicke der Schichtstruktur einschließlich des Substrats weniger als 30 μm beträgt. (Die Gesamtdicke der Arbeitsschichten beträgt 1.7 μm , die PI-Zwischenschichten sind zusammen ungefähr 1.5 μm dick, und der PI-Träger hat eine Dicke von 25 μm .)

7. Anwendungen in dehnbaren elektronischen Systemen

Mechanische Flexibilität ist eine nützliche Eigenschaft, die durch den Einsatz dünner Bauelemente und Träger oder durch Design (z.B. Einbau in die mechanisch neutrale Fläche) erzielt werden kann. Dehnbarkeit lässt sich durch die Montage dünner „gewellter“ Strukturen, die sich mechanisch ähnlich wie ein Akkordeon verhalten, auf PDMS-Substrate erreichen, wobei auch brüchige Halbleitermaterialien eingesetzt werden können. Die Änderungen in Amplitude und Wellenlänge bei der Bewegung werden vom PDMS aufgefangen.

Abbildung 14 stellt die Produktion solcher Systeme dar. Der Prozess beginnt mit der Erzeugung von μ -sc-Bändern durch ein „Top-down“-Verfahren. Anschließendes Bebeschichten der Bänder mit einem vorgespannten PDMS-Substrat (ε_{pre}) entlang der ε_{pre} -Achse bewirkt einen konformalen Kontakt und eine Bindung zwischen den Bändern und dem PDMS. Beim Ablösen des PDMS werden alle Bänder auf die Oberfläche des PDMS übertragen. Relaxation von ε_{pre} führt zu Kompressionsspannungen mit nichtlinearen Instabilitäten, die Aufbuckelungen der Bänder zu Sinuswellen zur Folge haben (Abbildung 14B, unten).^[57,59,187] In diesem Beispiel wurden μ -Si-Bänder (Dicke ca. 100 nm, Breite ca. 20 μm) mit 3 % Vorspannung verwendet. Eine genauere Betrachtung der

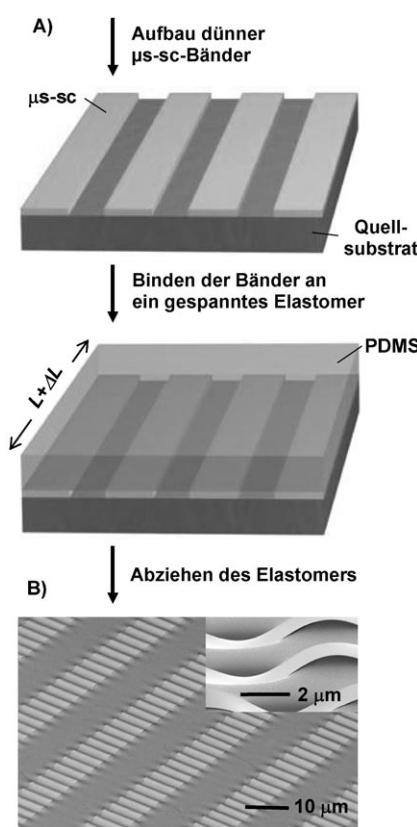


Abbildung 14. A) Herstellung gewellter μ -sc-Bänder (schematisch). B) Rasterelektronenmikroskopische Bilder der gewellten μ -Si-Bänder auf PDMS (Einschub: vergrößerter Bereich).

Grenzschicht von PDMS und Bändern in den erhabenen Regionen (Einschub in Abbildung 14B) belegt den engen Kontakt beider Komponenten. Der Grad der Vorspannung, die mechanischen Eigenschaften von PDMS und Silicium sowie die Breiten, Längen und Dicken der Bänder legen die Amplituden und Wellenlängen der Strukturen fest. Ähnliche Prozeduren lassen sich auf andere μ -sc als Silicium anwenden, so wie die Bedeckung ihrer Oberflächen mit SiO_2 oder anderen Schichten, die mit der PDMS-Oberfläche reagieren können. In diesen Fällen können gezielt Bindungen aufgebaut werden, die stark genug sind, um die μ -sc mit dem PDMS zu entfernen.

Die in Abbildung 14 gezeigten AFM-Bilder derartig hergestellter Strukturen belegen, dass die Wellenprofile rein sinoidal sind,^[57] was genau wie die erhaltenen Amplituden und Wellenlängen mit Rechnungen unter Berücksichtigung finiter Deformationen und geometrischer Nichtlinearitäten übereinstimmt.^[188] Nach diesem Modell gelten die Gleichungen (7)–(13) für den vertikalen Versatz (y_{wavy}) in Abhängigkeit von der Position (x) entlang der Bänder.

$$y_{\text{wavy}} = A_{\text{wavy}} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_{\text{wavy}}} x\right) \quad (7)$$

$$\lambda_{\text{wavy}} = \frac{\lambda_0}{(1 + \varepsilon_{\text{pre}})(1 + \xi)^{1/3}} \quad (8)$$

$$A_{\text{wavy}} = \frac{A_0}{\sqrt{1 + \varepsilon_{\text{pre}}(1 + \xi)^{1/3}}} \quad (9)$$

$$\lambda_0 = \frac{\pi h}{\sqrt{\varepsilon_c}} \quad (10)$$

$$A_0 = h \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{pre}}}{\varepsilon_c} - 1} \quad (11)$$

$$\xi = \frac{5\varepsilon_{\text{pre}}(1 + \varepsilon_{\text{pre}})}{32} \quad (12)$$

$$\varepsilon_c = 0.52 \left[\frac{E_{\text{PDMS}}(1 - \nu_{\text{ribbon}}^2)}{E_{\text{ribbon}}(1 - \nu_{\text{PDMS}}^2)} \right]^{2/3} \quad (13)$$

Dabei sind ε_c die kritische Aufbuckelungsspannung, ε_{pre} die Vorspannung sowie λ_{wavy} und A_{wavy} die Wellenlänge und Amplitude der resultierenden Wellenstrukturen. Das Poisson-Verhältnis ν , der Young-Modul E und die Banddicke h sind, mit den entsprechenden Indizes, Eigenschaften der Bänder und des PDMS. Wie bereits in Abschnitt 2 beschrieben, resultieren sehr ähnliche physikalische Verhältnisse wie bei einem Akkordeon.

Zweidimensionale (2D) Wellenstrukturen in μ -sc-Membranen sind durch die in Abbildung 14 gezeigte Produktionstechnik zugänglich, wobei aber die PDMS-Substrate biaxial vorgespannt werden.^[143] Ein SOI-Wafer dient als Quelle der Membranen; das unterschneidende Ätzmittel HF gelangt durch kleine Öffnungen zum verborgenen Oxid. 2D-Wellenmembranen dieses Typs sind entlang jeder Achse dehnbar (Abbildung 15).

Derartige Verbundstoffe tolerieren Spannungen von 10–20%. Solche Dehnbarkeiten sind schon nützlich, aber noch nicht optimal. Die wesentliche Begrenzung der zuvor beschriebenen Ansätze besteht darin, dass die Mechanik der Systeme das Layout der Wellenstrukturen vorgibt, derartige Layouts aber nicht optimal für höchste Dehnbarkeit sind. Durch Aufbringen von Strukturen aus Adhäsionszentren –

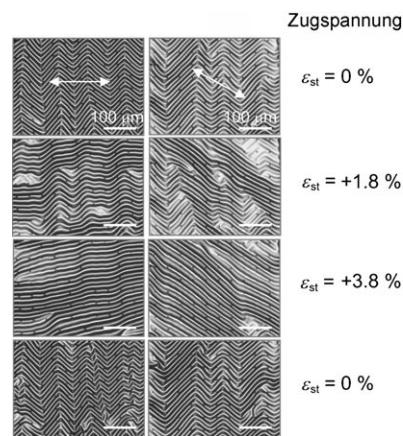


Abbildung 15. Mikrophotographien von gewellten μ -Si-Nanomembranen unter einseitigem Zug aus zwei verschiedenen Richtungen (Pfeile). Die Abbildungen zeigen den Ausgangszustand vor Belastung (oben) sowie die Membran bei einseitiger Zugspannung von 1.8 und 3.8% und den relaxierten Zustand nach der Streckung (unten). Wiedergabe mit Genehmigung der American Chemical Society nach Lit. [143].

durch Manipulation der PDMS-Oberfläche oder der μ -sc – eröffnet sich eine Möglichkeit, diese Begrenzung zu umgehen.^[187] Abbildung 16A zeigt einen solchen Prozess, wobei mithilfe modernster Methoden der weichen Lithographie das

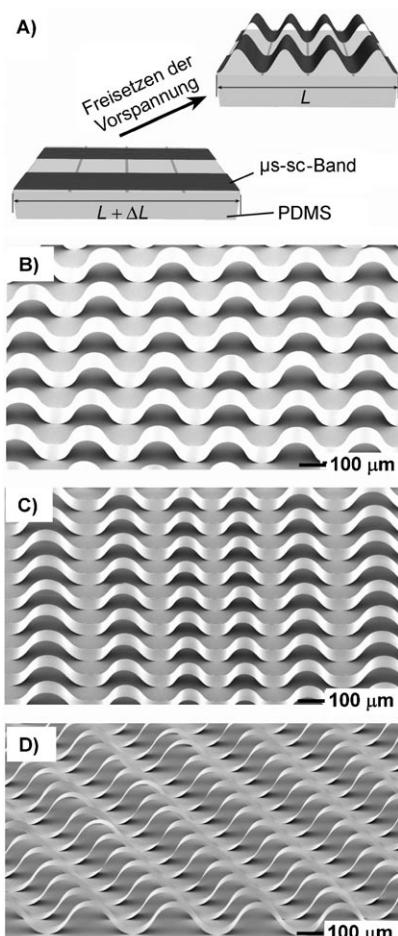


Abbildung 16. Bildung von gewellten μ -sc-Bändern auf einem Elastomer mit lithographisch erzeugten Adhäsionsstrukturen (A; schematisch). Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme periodischer Strukturen mit lokализierten μ -GaAs-Phasen (B), geriffelter μ -Si-Strukturen (C) und periodischer μ -Si-Strukturen mit Phasenverschiebung (D). Wiedergabe von (B)–(D) mit Genehmigung der Nature Publishing Group nach Lit. [58].

PDMS-Substrat an bestimmten Positionen oxidiert wird,^[58, 150] sodass die Adhäsion des μ -sc nur in diesen Regionen erfolgt. Biegen und Freisetzen der Vorspannung führen anschließend zu gewellten Strukturen unter kompletter Ablösung der Bänder vom PDMS in den nichtoxidierten Regionen. Abbildung 16B zeigt gewellte μ -GaAs-Bänder (ca. 270 nm Dicke mit einem Belag von 30 nm SiO_2 ; ca. 100 μm Breite), die auf PDMS mit einer Vorspannung von 60 % durch Oxidation bestimmter Regionen (Oberflächenaktivierung) in parallelen Streifen (Breite, $W_{\text{act}} = 10 \mu\text{m}$) aufgebracht und durch breite nichtoxidierte (inaktive) Regionen ($W_{\text{in}} = 400 \mu\text{m}$) getrennt sind. Der vertikale Versatz dieser Buckel (relativ zur glatten Oberfläche des PDMS-Stempels) lässt sich durch die Gleichungen (14)–(17) beschreiben.^[189]

$$y = \frac{1}{2} A_{\text{buckled}} \left(1 + \cos \frac{\pi}{L_1} x \right) \quad (14)$$

$$A_{\text{buckled}} = \frac{4}{\pi} \sqrt{L_1 L_2 \left(\frac{h^2 \pi^2}{12 L_1^2} \right)} \quad (15)$$

$$L_1 = \frac{W_{\text{in}}}{2(1 + \varepsilon_{\text{pre}})} \quad (16)$$

$$L_2 = L_1 + \frac{W_{\text{act}}}{2} \quad (17)$$

Die Breite der anfänglichen Buckel beträgt $2 L_1$ bei einer Periode von $2 L_2$. Da $h^2 \pi^2 / 12 L_1^2$ viel kleiner als ε_{pre} ist (in den meisten Fällen über 10 %), lässt sich bei $h < 1 \mu\text{m}$ die Amplitude vereinfacht als $4/\pi \sqrt{L_1 L_2 \varepsilon_{\text{pre}}}$ beschreiben und ist somit von den Eigenschaften des Bands (Dicke, chemische Zusammensetzung, Young-Modul usw.) unabhängig. Als Konsequenz wird die Form der Aufbuckelungen vor allem durch die Anordnung der Adhäsionszentren und die Vorspannung bestimmt. Die maximale Zugspannung in den gewellten Bändern in Abbildung 16B beträgt gemäß Gleichung (18) nur 0.61 %, was ungefähr ein hundertstel von ε_{pre} ist.

$$\varepsilon_{\text{buckled}}^{\text{peak}} = \frac{h}{4} A_{\text{buckled}} \left(\frac{\pi}{L_1} \right)^2 \quad (18)$$

Dieser mechanische Vorteil lässt sich mit durchgängig verbundenen Materialien nicht erreichen. Die Einbettung derartiger Strukturen in PDMS durch Guss und Ausheilen ergibt elektronische Bauelemente, die auf mechanische Belastung robust und reversibel reagieren.^[58]

Neben diesen relativ einfachen Mustern sind auch komplexere Anordnungen realisiert worden, wie gewellte Strukturen, in denen sich die Abstände und Höhen der benachbarten Buckel in jedem der Bänder unterscheiden (Abbildung 16C) oder Strukturen mit Phasen in den Buckeln, die linear mit dem Abstand senkrecht zur Länge der Bänder variieren (Abbildung 16D). Für Funktionseinheiten sind auch mehrlagige Elemente aus μ -sc-Schichten und anderen Materialien (z.B. Metallfilme als Elektroden, dielektrische Schichten usw.) möglich, wobei die Herstellung dieser zusätzlichen Lagen vor dem Transfer auf das PDMS noch auf dem Quellwafer erfolgen sollte. So lassen sich aus 2.5 μm dicken und 50 μm breiten gewellten μ -Si-Bändern dehnbare MOSFETs mit integrierten Metallelektroden, SiO_2 -Dielektrika und dotierten Kontakten herstellen.^[57–59] Abbildung 17A zeigt ein solches Bauteil bei unterschiedlicher Belastung. Die elektrischen Eigenschaften ändern sich bei einer Kompression oder Dehnung bis ungefähr 10 % nicht signifikant (< 20 % im Sättigungsstrom, Abbildung 17B), und die Funktion bleibt mit Mobilitäten um $100 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ auch nach Hunderten von Kompressions-Dehnungs-Zyklen erhalten.

Abbildung 18A zeigt ein gewelltes μ -GaAs-MESFET bei unterschiedlicher Spannungsbelastung. Diese MESFETs werden aus μ -GaAs-Bändern (ca. 270 nm Dicke und ca. 100 μm Breite) gebildet, wobei die Ohmschen Zu- und Ableitungselektroden (Ge (70 nm)/Ni (10 nm)/Au (70 nm)) und

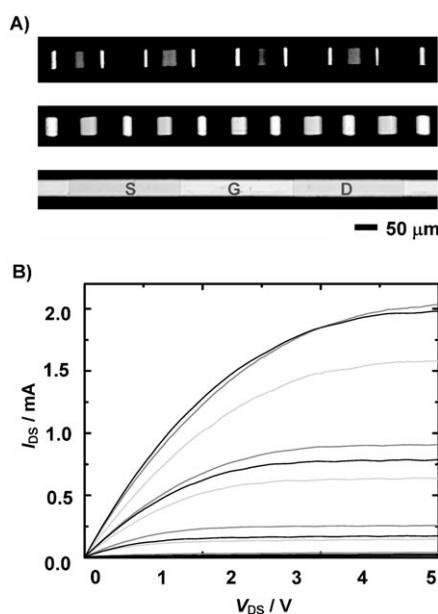


Abbildung 17. A) Gewellter Transistor aus einem μ -Si-Band auf einem Elastomerträger im ungespannten (oben), komprimierten (Mitte) und gestreckten Zustand (unten). B) Elektrische Eigenschaften des Bauteils bei unterschiedlichen Spannungen. Die Kurvescharen stammen aus Messungen an unterschiedlichen gespannten Funktionseinheiten (ca. -10, 10 und 0% für die oberen, mittleren bzw. unteren Kurven) bei unterschiedlichen Gatterspannungen. Wiedergabe mit Genehmigung der Royal Society of Chemistry nach Lit. [187].

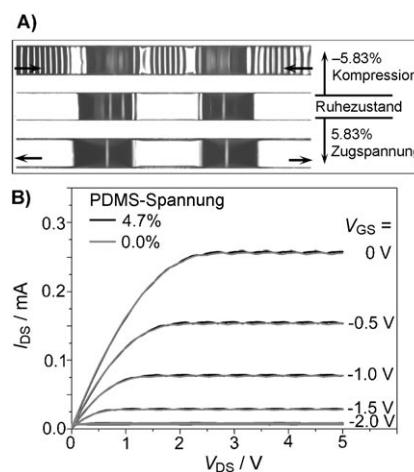


Abbildung 18. A) Bilder von in einer PDMS-Matrix eingebetteten GaAs-MESFETs; ungespannt (Mitte), um 5.83 % gespannt (unten) und um 5.83 % komprimiert (oben). B) Strom-Spannungs-Kurven unterschiedlich stark gedehnter MESFETs.

Schottky-Gatterkontakte (Cr (75 nm)/ Au (75 nm)) integriert sind.^[59] In diesem Fall werden die μ -GaAs-Bänder nur durch Van-der-Waals-Wechselwirkungen auf dem PDMS-Substrat festgehalten. Dieser Umstand sowie lokale Unterschiede in der Flexibilität aufgrund der eingebrachten Metallelektroden führen bei Freisetzung der Vorspannung in den Regionen mit reinem GaAs zur Ablösung vom PDMS. Nach Einbetten der gewellten Strukturen in PDMS sind Dehnung und Kom-

pression um bis ca. 6 % möglich, ohne dass die Bänder brechen (Abbildung 18 A). Bei starker Kompression bilden sich in den Bereichen der Elektroden periodisch gewellte Strukturen. Abbildung 18 B zeigt die elektrischen Eigenschaften eines solchen Bauteils auf PDMS mit $\epsilon_{pre} = 4.7\%$ bei Spannungen von 0 % und 4.7 %.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Mikro- und Nanostrukturen aus anorganischen Halbleitern können in flexible Substrate eingebaut und dabei definiert angeordnet werden, um hochwertige elektronische Funktionseinheiten zu erhalten. Der Einsatz dieser Materialien in der Makroelektronik kann verbreitete Ansätze, beispielsweise mit organischen Halbleitern oder laserbehandeltem Silicium, ergänzen. Die Designmöglichkeiten und die mit anorganischen Halbleitern erreichbare Materialvielfalt kann zu Anwendungen in der Makroelektronik führen, die anders schwer zu realisieren sind. Besonders interessant wäre in dieser Hinsicht die Kombination aus der Integration heterogener Baugruppen in 2D- oder 3D-Anordnungen mit ungewöhnlichen Materialeigenschaften wie Dehnbarkeit. Die Entwicklung neuer Materialien für solche Systeme, weitere Studien zum Biege-, Dehn- oder Streckverhalten sowie die Implementierung von Drucktechniken für die Produktion derartiger makroelektronischer Elemente stellen Herausforderungen für zukünftige Forschungen dar.

Abkürzungen

CMOS	Komplementäre Metalloxidhalbleiter
HEMT	Transistor mit hoher Elektronenmobilität
μ -sc	Mikrostrukturierter Halbleiter
MESFET	Metallhalbleiter-Feldeffekttransistor
MOSFET	Metalloxidhalbleiter-Feldeffekttransistor
PDMS	Polydimethylsiloxan
PET	Polyethylenterephthalat
PI	Polyimid
SLS	gelöst-flüssig-fest
SOI	Silicium auf Isolator
TFT	Dünnschichttransistor
VLS	Gas-flüssig-fest

Wir danken A. R. Banks und K. Colravy vom Frederick Seitz Materials Research Laboratorium. Dieser Aufsatz umfasst Arbeiten, die von der National Science Foundation (Projekt DMI-0328162), dem U.S. Department of Energy, Division of Materials Sciences (Projekt DEFG02-91ER45439) und dem Frederick Seitz MRL sowie dem Center for Microanalysis of Materials an der University of Illinois in Urbana-Champaign gefördert wurden. A. J. Baca und M. A. Meitl danken für Graduiertenförderung durch das Science, Mathematics and Research for Transformation (SMART) Program des Department of Defense bzw. die Fannie-und-John-Hertz-Stiftung. Die Arbeiten von Y. Sun wurden vom U.S. Department of Energy, Office of Science unterstützt (DE-AC02-06CH11357). D.-H. Kim bedankt sich bei der Samsung Scholarship Foun-

dation. *A. J. Baca dankt Janet Hanlon, Dahl-Young Khang, Heung Cho Ko und Tae Ho Kim für die Bereitstellung von Abbildungen.*

Ein eingegangen am 19. Juli 2007
Übersetzt von Dr. Detlef Schröder, Prag

- [1] E. Chuang, *DIGITIMES*, **2007**.
- [2] D. Hsieh, *Shanghai Intl. Industry Fair*, Shanghai, China, **2005**.
- [3] D. Hsieh, Display Trends: Large FPDs **2006**, Spring 06, 29.
- [4] <http://www.displaysearch.com/>.
- [5] <http://www.isuppli.com/>.
- [6] B. R. Chalamala, F. E. Libsch, R. H. Reuss, B. E. Gnade, *Proc. IEEE* **2002**, 90, 447.
- [7] D. E. Mentley, *Proc. IEEE* **2002**, 90, 453.
- [8] Flexible Displays Technology Report **2006**, Display Search, 1.
- [9] R. H. Reuss, B. R. Chalamala, A. Mousessian, M. G. Kane, A. Kumar, D. C. Zhang, J. A. Rogers, M. Hatalis, D. Temple, G. Moddel, B. J. Eliasson, M. J. Estes, J. Kunze, E. S. Handy, E. S. Harmon, D. B. Salzman, J. M. Woodall, M. A. Alam, J. Y. Murthy, S. C. Jacobsen, M. Oliver, D. Markus, P. M. Campbell, E. Snow, *Proc. IEEE* **2005**, 93, 1239.
- [10] R. H. Reuss, D. G. Hopper, J.-G. Park, *MRS Bull.* **2006**, 31, 447.
- [11] J. A. Rogers, Z. Bao, K. Baldwin, A. Dodabalapur, B. Crone, V. R. Raju, V. Kuck, H. Katz, K. Amundson, J. Ewing, P. Drzaic, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2001**, 98, 4835.
- [12] G. H. Gelinck, H. E. A. Huitema, E. Van Veenendaal, E. Cantatore, L. Schrijnemakers, J. B. P. H. Van Der Putter, T. C. T. Geuns, M. Beenhakkers, J. B. Giesbers, B.-H. Huisman, E. J. Meijer, E. M. Benito, F. J. Touwslager, A. W. Marsman, B. J. E. Van Rens, D. M. De Leeuw, *Nat. Mater.* **2004**, 3, 106.
- [13] T. Someya, Y. Kato, S. Iba, Y. Noguchi, T. Sekitani, H. Kawaguchi, T. Sakurai, *IEEE Trans. Electron Devices* **2005**, 52, 2502.
- [14] T. Someya, Y. Kato, T. Sekitani, S. Iba, Y. Noguchi, Y. Murase, H. Kawaguchi, T. Sakurai, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2005**, 102, 12321.
- [15] T. Someya, T. Sekitani, S. Iba, Y. Kato, H. Kawaguchi, T. Sakurai, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2004**, 101, 9966.
- [16] A. Nathan, B. Park, A. Sazonov, S. Tao, I. Chan, P. Servati, K. Karim, T. Charania, D. Striakhilev, Q. Ma, R. V. R. Murthy, *Microelectron. J.* **2000**, 31, 883.
- [17] M.-S. Kim, J.-S. Kim, J. C. Cho, M. Shtain, L. J. Guo, J. Kim, *Appl. Phys. Lett.* **2007**, 90, 123113.
- [18] B. R. Chalamala, D. Temple, *IEEE Spectrum* **2005**, 42, 50.
- [19] A. Dodabalapur, *Mater. Today* **2006**, 9, 24.
- [20] N. Stingelin-Stutzmann, E. Smits, H. Wondergem, C. Tanase, P. Blom, P. Smith, D. De Leeuw, *Nat. Mater.* **2005**, 4, 601.
- [21] H. Sirringhaus, N. Tessler, R. H. Friend, *Science* **1998**, 280, 1741.
- [22] R. J. Visser, *Phillips J. Res.* **1998**, 51, 467.
- [23] C. D. Sheraw, L. Zhou, J. R. Huang, D. J. Gundlach, T. N. Jackson, M. G. Kane, I. G. Hill, M. S. Hammond, J. Campi, B. K. Greening, J. Franci, J. West, *Appl. Phys. Lett.* **2002**, 80, 1088.
- [24] A. Dodabalapur, Z. Bao, A. Makhija, J. G. Laquindanum, V. R. Raju, Y. Feng, H. E. Katz, J. A. Rogers, *Appl. Phys. Lett.* **1998**, 73, 142.
- [25] T. N. Jackson, Y.-Y. Lin, D. J. Gundlach, H. Klauk, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **1998**, 4, 100.
- [26] J. Jang, *Mater. Today* **2006**, 9, 46.
- [27] Y. Watanabe, K. Kudo, *Appl. Phys. Lett.* **2001**, 87, 223505.
- [28] B. Crone, A. Dodabalapur, A. Gelperin, L. Torsi, H. E. Katz, A. J. Lovinger, Z. Bao, *Appl. Phys. Lett.* **2001**, 78, 2229.
- [29] T. Shimoda, Y. Matsuki, M. Furusawa, T. Aoki, I. Yudasaka, H. Tanaka, H. Iwasawa, D. H. Wang, M. Miyasaka, Y. Takeuchi, *Nature* **2006**, 440, 783.
- [30] M. G. Kane in *IEEE Tech. Dig. Int. Electron Dev. Meet.*, IEEE, Piscataway, NJ, **2005**, S. 939.
- [31] T. Afentakis, M. Hatalis, A. T. Voutsas, J. Hartzell, *IEEE Trans. Electron Devices* **2006**, 53, 815.
- [32] J. K. Cheon, J. H. Choi, J. H. Hur, J. Jang, H. S. Shin, J. K. Jeong, Y. G. Mo, H. K. Chung, *IEEE Trans. Electron Devices* **2006**, 53, 1273.
- [33] M. G. Kane, A. H. Firester, in *USDC Flexible Microelectronics and Displays Conference*, Phoenix, AZ, **2005**.
- [34] M. G. Kane, L. Goodman, A. H. Firester, P. C. van der Wilt, A. B. Limanov, J. S. Im, *IEEE Tech. Dig. Int. Electron Dev. Meet.* **2005**, 939.
- [35] M. Troccoli, T. Afentakis, M. K. Hatalis, A. T. Voutsas, M. Adachi, J. W. Hartzell, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **2003**, 769, 93.
- [36] M. Troccoli, A. J. Roudbari, T.-K. Chuang, M. Hatalis, *Solid-State Electron.* **2006**, 50, 1080.
- [37] P. C. van der Wilt, M. G. Kane, A. B. Limanov, A. H. Firester, L. Goodman, J. Lee, J. R. Abelson, A. M. Chitu, J. S. Im, *MRS Bull.* **2006**, 31, 461.
- [38] B. A. Ridley, B. Nivi, J. M. Jacobson, *Science* **1999**, 286, 746.
- [39] D. M. Talapin, C. B. Murray, *Science* **2005**, 310, 86.
- [40] X. Duan, *MRS Bull.* **2007**, 32, 134.
- [41] M. C. McAlpine, R. S. Friedman, C. M. Lieber, *Proc. IEEE* **2005**, 93, 1357.
- [42] E. Menard, R. G. Nuzzo, J. A. Rogers, *Appl. Phys. Lett.* **2005**, 86.
- [43] Z. R. Dai, Z. W. Pan, Z. L. Wang, *Adv. Funct. Mater.* **2003**, 13, 9.
- [44] M. Law, J. Goldberger, P. Yang, *Annu. Rev. Mater. Res.* **2004**, 34, 83.
- [45] C. M. Lieber, *Solid State Commun.* **1998**, 107, 607.
- [46] Z. L. Wang, *Nanowires and Nanobelts: Materials, Properties and Devices*, Band I und II, Kluwer, Boston, **2003**.
- [47] Y. Xia, P. Yang, Y. Sun, Y. Wu, B. Mayers, B. Gates, Y. Yin, F. Kim, H. Yan, *Adv. Mater.* **2003**, 15, 353.
- [48] E. Delamarche, M. Geissler, J. Vichiconti, W. S. Graham, P. A. Andry, J. C. Flake, P. M. Fryer, R. W. Nunes, B. Michel, E. J. O'Sullivan, H. Schmid, H. Wolf, R. L. Wisniew, *Langmuir* **2003**, 19, 5923.
- [49] K. J. Lee, M. A. Meitl, J. H. Ahn, J. A. Rogers, R. G. Nuzzo, V. Kumar, I. Adesida, *J. Appl. Phys.* **2006**, 100, 124507.
- [50] S. Mack, M. A. Meitl, A. J. Baca, Z.-T. Zhu, J. A. Rogers, *Appl. Phys. Lett.* **2006**, 88, 213101.
- [51] E. Menard, K. J. Lee, D. Y. Khang, R. G. Nuzzo, J. A. Rogers, *Appl. Phys. Lett.* **2004**, 84, 5398.
- [52] Y. G. Sun, J. A. Rogers, *Nano Lett.* **2004**, 4, 1953.
- [53] J. Lewis, *Mater. Today* **2006**, 9, 38.
- [54] Z. Suo, E. Y. Ma, H. Gleskova, S. Wagner, *Appl. Phys. Lett.* **1999**, 74, 1177.
- [55] Y. L. Loo, T. Someya, K. W. Baldwin, Z. N. Bao, P. Ho, A. Dodabalapur, H. E. Katz, J. A. Rogers, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2002**, 99, 10252.
- [56] T. Sekitani, S. Iba, Y. Kato, Y. Noguchi, T. Someya, T. Sakurai, *Appl. Phys. Lett.* **2005**, 87, 173502.
- [57] D.-Y. Khang, H. Jiang, Y. Huang, J. A. Rogers, *Science* **2006**, 311, 208.
- [58] Y. G. Sun, W.-M. Choi, H. Jiang, Y. G. Huang, J. A. Rogers, *Nat. Nanotechnol.* **2006**, 1, 201.
- [59] Y. G. Sun, V. Kumar, I. Adesida, J. A. Rogers, *Adv. Mater.* **2006**, 18, 2857.
- [60] S. P. Lacour, J. Jones, S. Wagner, T. Li, Z. Suo, *Proc. IEEE* **2005**, 93, 1459.
- [61] S. P. Lacour, S. Wagner, Z. Y. Huang, Z. Suo, *Appl. Phys. Lett.* **2003**, 82, 2404.
- [62] Y. Sun, J. A. Rogers, *Adv. Mater.* **2007**, 19, 1897.
- [63] R. S. Wagner, W. C. Ellis, *Appl. Phys. Lett.* **1964**, 4, 89.

- [64] M. H. Huang, S. Mao, H. Feick, H. Yan, Y. Wu, H. Kind, E. Weber, R. Russo, P. Yang, *Science* **2001**, 292, 1897.
- [65] Y. Wu, H. Yan, M. Huang, B. Messer, J. H. Song, P. Yang, *Chem. Eur. J.* **2002**, 8, 1261.
- [66] Z. H. Wu, X. Y. Mei, D. Kim, M. Blumin, H. E. Ruda, *Appl. Phys. Lett.* **2002**, 81, 5177.
- [67] P. X. Gao, Z. L. Wang, *J. Phys. Chem. B* **2002**, 106, 12653.
- [68] D. J. Milliron, S. M. Hughes, Y. Cui, L. Manna, J. Li, L.-W. Wang, A. P. Alivisatos, *Nature* **2004**, 430, 190.
- [69] J. Zhu, H. Peng, C. K. Chan, K. Jarausch, X. F. Zhang, Y. Cui, *Nano Lett.* **2007**, 7, 1095.
- [70] L. J. Lauhon, M. S. Gudiksen, D. Wang, C. M. Lieber, *Nature* **2002**, 420, 57.
- [71] Y. Wu, J. Xiang, C. Yang, W. Lu, C. M. Lieber, *Nature* **2004**, 430, 61.
- [72] T. J. Trentler, K. M. Hickman, S. C. Goel, A. M. Viano, P. C. Gibbons, W. E. Buhro, *Science* **1995**, 270, 1791.
- [73] H. Yu, W. E. Buhro, *Adv. Mater.* **2003**, 15, 416.
- [74] J. D. Holmes, K. P. Johnston, R. C. Doty, B. A. Korgel, *Science* **2000**, 287, 1471.
- [75] X. Lu, T. Hanrath, K. P. Johnston, B. A. Korgel, *Nano Lett.* **2003**, 3, 93.
- [76] A. Rogachev, A. Bezryadin, *Appl. Phys. Lett.* **2003**, 83, 512.
- [77] D. S. Hopkins, D. Pekker, P. M. Goldbart, A. Bezryadin, *Science* **2005**, 308, 1762.
- [78] M. Remeika, A. Bezryadin, *Nanotechnology*, **2005**, 16, 1172.
- [79] B. J. Murray, E. C. Walter, R. M. Penner, *Nano Lett.* **2004**, 4, 665.
- [80] E. C. Walter, B. J. Murray, F. Favier, G. Kaltenpoth, M. Grunze, R. M. Penner, *J. Phys. Chem. B* **2002**, 106, 11407.
- [81] M. P. Zach, K. Ng, R. M. Penner, *Science* **2000**, 290, 2120.
- [82] Y. Zhang, H. Dai, *Appl. Phys. Lett.* **2000**, 77, 3015.
- [83] C. N. Lau, N. Markovic, M. Bockrath, A. T. Bezryadin, M. Tinkham, *Phys. Rev. Lett.* **2001**, 87, 217003.
- [84] A. Bezryadin, C. N. Lau, M. Tinkham, *Nature* **2000**, 404, 971.
- [85] A. M. Morales, C. M. Lieber, *Science* **1998**, 279, 208.
- [86] J. Westwater, D. P. Gosain, S. Tomiya, S. Usui, H. Ruda, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1997**, 15, 554.
- [87] W. Shi, H. Peng, N. Wang, C. P. Li, L. Xu, C. S. Lee, R. Kalish, S.-T. Lee, *J. Am. Chem. Soc.* **2001**, 123, 11095.
- [88] R.-Q. Zhang, Y. Lifshitz, S.-T. Lee, *Adv. Mater.* **2003**, 15, 635.
- [89] Y. Shan, A. K. Kalkan, C.-Y. Peng, S. J. Fonash, *Nano Lett.* **2004**, 4, 2085S.
- [90] Z. W. Pan, Z. R. Dai, Z. L. Wang, *Science* **2001**, 291, 1947.
- [91] Y. B. Li, Y. Bando, T. Sato, K. Kurashima, *Appl. Phys. Lett.* **2002**, 81, 144.
- [92] M. S. Arnold, P. Avouris, Z. W. Pan, Z. L. Wang, *J. Phys. Chem. B* **2003**, 107, 659.
- [93] Z. R. Dai, Z. W. Pan, Z. L. Wang, *J. Phys. Chem. B* **2002**, 106, 902.
- [94] X. Wen, S. Wang, Y. Ding, Z. L. Wang, S. Yang, *J. Phys. Chem. B* **2005**, 109, 215.
- [95] X. Y. Kong, Z. L. Wang, *Solid State Commun.* **2003**, 128, 1.
- [96] S. Y. Bae, H. W. Seo, J. Park, H. Yang, J. C. Park, S. Y. Lee, *Appl. Phys. Lett.* **2002**, 81, 126.
- [97] Z. Q. Wang, J. F. Gong, J. H. Duan, H. B. Huang, S. G. Yang, X. N. Zhao, R. Zhang, Y. W. Du, *Appl. Phys. Lett.* **2006**, 89, 033102.
- [98] S. Kar, S. Chaudhuri, *J. Phys. Chem. B* **2005**, 109, 3298.
- [99] C. Ma, Y. Ding, D. Moore, X. Wang, Z. L. Wang, *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, 126, 708.
- [100] Y. Ding, C. Ma, Z. L. Wang, *Adv. Mater.* **2004**, 16, 1740.
- [101] N. A. Melosh, A. Boukai, F. Diana, B. Geradot, A. Badolato, P. M. Petroff, J. R. Heath, *Science* **2003**, 300, 112.
- [102] M. A. Meitl, Z. T. Zhu, V. Kumar, K. J. Lee, X. Feng, Y. Y. Huang, I. Adesida, R. G. Nuzzo, J. A. Rogers, *Nat. Mater.* **2006**, 5, 33.
- [103] K. Kurihara, K. Iwadate, H. Namatsu, M. Nagase, K. Murase, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1995**, 13, 2170.
- [104] K. Kedzierski, J. Bokor, C. Kisielowski, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1997**, 15, 2825.
- [105] A. J. Storm, J. H. Chen, X. S. Ling, H. W. Zandbergen, C. Dekker, *Nature* **2003**, 2, 537.
- [106] Y. Yin, B. Gates, Y. Xia, *Adv. Mater.* **2000**, 12, 1426.
- [107] M. D. Austin, W. Zhang, H. X. Ge, D. Wasserman, S. A. Lyon, S. Y. Chou, *Nanotechnology* **2005**, 16, 1058.
- [108] M. C. McAlpine, H. Ahmad, D. Wang, J. R. Heath, *Nat. Mater.* **2007**, 6, 379.
- [109] M. G. Lagally, *MRS Bull.* **2007**, 32, 57.
- [110] D. Wang, B. A. Sheriff, J. R. Heath, *Nano Lett.* **2006**, 6, 1096.
- [111] M. H. Huang, C. Boone, M. M. Roberts, D. E. Savage, M. G. Lagally, N. Shaji, H. Qin, R. Blick, J. A. Baird, F. Liu, *Adv. Mater.* **2005**, 17, 2860.
- [112] M. A. Schmidt, *Proc. IEEE* **1998**, 86, 1575.
- [113] O. G. Schmidt, C. Deneke, S. Kiravittaya, R. Songmuang, H. Heidemeyer, Y. Nakamura, R. Z. Gottwick, C. Muller, N. Y. Jin-Phillipp, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **2002**, 8, 1025.
- [114] O. G. Schmidt, K. Eberl, *Nature* **2001**, 410, 168.
- [115] O. G. Schmidt, A. Rastelli, S. G. Kar, R. Songmuang, S. Kiravittaya, M. Stoffel, U. Denker, S. Stufler, A. Zrenner, D. Grutzmacher, B.-Y. Nyugen, P. Wennekers, *Physica E* **2004**, 25, 280.
- [116] V. Y. Prinz, V. A. Seleznev, A. K. Gutakovskiy, A. V. Chehovsky, V. V. Preobrazhenskii, M. A. Putyato, T. A. Gavrilova, *Physica E* **2000**, 6, 828.
- [117] H. C. Yuan, Z. Ma, M. M. Roberts, D. E. Savage, M. G. Lagally, *J. Appl. Phys.* **2006**, 100, 013708.
- [118] H. C. Yuan, G. Wang, Z. Ma, M. M. Roberts, D. E. Savage, M. G. Lagally, *Semicond. Sci. Technol.* **2007**, 22, S72.
- [119] Y. G. Sun, D. Y. Khang, F. Hua, K. Hurley, R. G. Nuzzo, J. A. Rogers, *Adv. Funct. Mater.* **2005**, 15, 30.
- [120] A. J. Baca, M. A. Meitl, H. C. Ko, S. Mack, H.-S. Kim, J. Dong, P. M. Ferreira, J. A. Rogers, *Adv. Funct. Mater.* **2007**, 17, 3051.
- [121] H. C. Ko, A. J. Baca, J. A. Rogers, *Nano Lett.* **2006**, 6, 2318.
- [122] C. Mihalcea, A. Holz, M. Kuwhara, J. Tominga, E. Oesterheld, N. Atoda, *Microelectron. Eng.* **2001**, 57–58, 781.
- [123] M. Madou, *Fundamentals of Microfabrication*, CRC, Boca Raton, FL, 1997.
- [124] M. A. Gosálvez, K. Sato, A. S. Foster, R. M. Nieminen, H. Tanaka, *J. Micromech. Microeng.* **2007**, 17, S1.
- [125] K. J. Lee, J. Lee, H. D. Hwang, Z. J. Reitmeier, R. F. Davis, J. A. Rogers, R. G. Nuzzo, *Small* **2005**, 1, 1164.
- [126] T.-H. Kim, W. M. Choi, D.-H. Kim, M. A. Meitl, E. Menard, H. Jiang, J. A. Carlisle, J. A. Rogers, *Adv. Mater.* **2008**, 20, 2171.
- [127] A. K. Bentley, J. S. Trtheway, A. B. Ellis, W. C. Crone, *Nano Lett.* **2004**, 4, 487.
- [128] Y. Huang, X. Duan, Q. O. Wei, C. M. Lieber, *Science* **2001**, 291, 630.
- [129] P. A. Smith, C. D. Nordquist, T. N. Jakson, T. S. Mayer, B. R. Martin, J. Mbindyo, T. E. Mallouk, *Appl. Phys. Lett.* **2000**, 77, 1399.
- [130] A. Tao, F. Kim, C. Hess, J. Goldberger, R. He, Y. Sun, Y. Xia, P. Yang, *Nano Lett.* **2003**, 3, 1229.
- [131] D. Whang, S. Jin, J. Wu, C. M. Lieber, *Nano Lett.* **2003**, 3, 1255.
- [132] A. Javey, S. Nam, R. S. Friedman, H. Yan, C. M. Lieber, *Nano Lett.* **2007**, 7, 773.
- [133] G. Yu, A. Cao, C. M. Lieber, *Nat. Nanotechnol.* **2007**, 2, 372.
- [134] J. H. Ahn, H. S. Kim, K. J. Lee, S. Jeon, S. J. Kang, Y. G. Sun, R. G. Nuzzo, J. A. Rogers, *Science* **2006**, 314, 1754.
- [135] J.-H. Ahn, H. S. Kim, E. Menard, K. J. Lee, Z.-T. Zhu, D. H. Kim, R. G. Nuzzo, J. A. Rogers, I. Amlani, S. G. Thomas, *Appl. Phys. Lett.* **2007**, 90, 213501.
- [136] J.-H. Ahn, H.-S. Kim, K. J. Lee, E. Menard, R. G. Nuzzo, J. A. Rogers, *IEEE Electron Device Lett.* **2006**, 27, 460.

- [137] K. J. Lee, M. J. Motala, M. A. Meitl, W. R. Childs, E. Menard, A. K. Shim, J. A. Rogers, R. G. Nuzzo, *Adv. Mater.* **2005**, *17*, 2332.
- [138] M. A. Meitl, X. Feng, J. Y. Dong, E. Menard, P. M. Ferreira, Y. Y. Huang, J. A. Rogers, *Appl. Phys. Lett.* **2007**, *90*, 083110.
- [139] Y. G. Sun, R. A. Graff, M. S. Strano, J. A. Rogers, *Small* **2005**, *1*, 1052.
- [140] Y. G. Sun, H.-S. Kim, E. Menard, S. Kim, I. Adesida, J. A. Rogers, *Small* **2006**, *2*, 1330.
- [141] Y. G. Sun, E. Menard, J. A. Rogers, H. S. Kim, S. Kim, G. Chen, I. Adesida, R. Dettmer, R. Cortez, A. Tewksbury, *Appl. Phys. Lett.* **2006**, *88*.
- [142] Z. T. Zhu, E. Menard, K. Hurley, R. G. Nuzzo, J. A. Rogers, *Appl. Phys. Lett.* **2005**, *86*, 133507.
- [143] W.-M. Choi, J. Song, D.-Y. Khang, H. Jiang, Y. Y. Huang, J. A. Rogers, *Nano Lett.* **2007**, *7*, 1655.
- [144] Y. Xia, G. M. Whitesides, *Annu. Rev. Mater. Sci.* **1998**, *28*, 153.
- [145] Y. G. Y. Huang, W. X. Zhou, K. J. Hsia, E. Menard, J. U. Park, J. A. Rogers, A. G. Alleyne, *Langmuir* **2005**, *21*, 8058.
- [146] W. Zhou, Y. Huang, E. Menard, N. R. Aluru, J. A. Rogers, A. G. Alleyne, *Appl. Phys. Lett.* **2005**, *87*.
- [147] K. J. Hsia, Y. Huang, E. Menard, J. U. Park, W. Zhou, J. Rogers, J. M. Fulton, *Appl. Phys. Lett.* **2005**, *86*.
- [148] J. Kim, M. K. Chaudhury, M. J. Owen, *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions* **1999**, *6*, 695.
- [149] D. C. Duffy, J. C. McDonald, O. J. A. Schueller, G. M. Whitesides, *Anal. Chem.* **1998**, *70*, 4974.
- [150] W. R. Childs, M. J. Motala, K. J. Lee, R. G. Nuzzo, *Langmuir* **2005**, *21*, 10096.
- [151] F. Saulnier, T. Ondarcuhu, A. Aradian, E. Raphael, *Macromolecules* **2004**, *37*, 1067.
- [152] S. H. Hur, D. Y. Khang, C. Kocabas, J. A. Rogers, *Appl. Phys. Lett.* **2004**, *85*, 5730.
- [153] Y. L. Loo, R. L. Willett, K. W. Baldwin, J. A. Rogers, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, *124*, 7654.
- [154] Y. L. Loo, J. W. P. Hsu, R. L. Willett, K. W. Baldwin, K. W. West, J. A. Rogers, *J. Vac. Sci. Technol. B* **2002**, *20*, 2853.
- [155] J. Zaumseil, M. A. Meitl, J. W. P. Hsu, B. R. Acharya, K. W. Baldwin, Y. L. Loo, J. A. Rogers, *Nano Lett.* **2003**, *3*, 1223.
- [156] G. S. Ferguson, M. K. Chaudhury, G. B. Sigal, G. M. Whitesides, *Science* **1991**, *253*, 776.
- [157] C. Kim, S. R. Forrest, *Adv. Mater.* **2003**, *15*, 541.
- [158] C. Kim, M. Shtein, S. R. Forrest, *Appl. Phys. Lett.* **2002**, *80*, 4051.
- [159] Y. L. Loo, R. L. Willett, K. W. Baldwin, J. A. Rogers, *Appl. Phys. Lett.* **2002**, *81*, 562.
- [160] X. Feng, M. A. Meitl, A. Bowen, Y. Huang, R. G. Nuzzo, J. A. Rogers, *Langmuir* **2007**, *23*, 12555.
- [161] J. Haisma, G. Spierings, *Mater. Sci. Eng. R* **2002**, *37*, 1.
- [162] Q.-Y. Tong, U. Gösele, *Semiconductor Wafer Bonding: Science and Technology*, Wiley, New York, **1999**.
- [163] S. A. Vitale, H. Chae, H. H. Sawin, *J. Vac. Sci. Technol. A* **2000**, *18*, 2770.
- [164] M. M. J. Decre, R. Schneider, D. Burdinski, J. Schellekens, M. Saalmink, R. Doma in *Materials Research Society Fall Meeting, Vol. EXS-2*, **2003**, S. M4.9.1.
- [165] E. Menard, L. Bilhaut, J. Zaumseil, J. A. Rogers, *Langmuir* **2004**, *20*, 6871.
- [166] J. A. Rogers, K. E. Paul, G. M. Whitesides, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1998**, *16*, 88.
- [167] E. Delamarche, M. Geissler, R. H. Magnuson, H. Schmid, B. Michel, *Langmuir* **2003**, *19*, 5892.
- [168] C. M. Lieber, Z. L. Wang, *MRS Bull.* **2007**, *32*, 99.
- [169] C. J. Barrelet, A. B. Greytak, C. M. Lieber, *Nano Lett.* **2004**, *4*, 1981.
- [170] X. Duan, Y. Huang, R. Agarwal, C. M. Lieber, *Nature* **2003**, *421*, 241.
- [171] S. Gradecak, F. Qian, Y. Li, H.-G. Park, C. M. Lieber, *Appl. Phys. Lett.* **2005**, *87*, 173111.
- [172] J. C. Johnson, H.-J. Choi, K. P. Knutsen, R. D. Schaller, P. Yang, R. J. Saykally, *Nat. Mater.* **2003**, *1*, 106.
- [173] M. Law, D. Sribulay, J. C. Johnson, J. Goldberger, R. J. Sakally, P. Yang, *Science* **2004**, *305*, 1269.
- [174] Y. Huang, X. Duan, Y. Cui, L. J. Lauhon, K.-H. Kim, C. M. Lieber, *Science* **2001**, *294*, 1313.
- [175] X. Duan, C. Nlu, V. Sahl, J. Chen, J. W. Parce, S. Empedocles, J. L. Goldman, *Nature* **2003**, *425*, 274.
- [176] M. C. Mcapline, R. S. Friedman, S. Jin, K.-H. Lin, W. U. Wang, C. M. Lieber, *Nano Lett.* **2003**, *3*, 1531.
- [177] R. S. Friedman, M. C. McAlpine, D. S. Ricketts, D. Ham, C. M. Lieber, *Nature* **2005**, *434*, 1085.
- [178] J. Xiang, W. Lu, Y. Hu, Y. Wu, H. Yan, C. M. Lieber, *Nature* **2006**, *441*, 489.
- [179] Y. Cui, Q. Q. Wei, H. Park, C. M. Lieber, *Science* **2001**, *293*, 1289.
- [180] J.-I. Hahm, C. M. Lieber, *Nano Lett.* **2004**, *4*, 51.
- [181] F. Patolsky, G. Zheng, O. Hayden, M. Lakadamyali, X. Zhuang, C. M. Lieber, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2004**, *101*, 14017.
- [182] W. U. Wang, C. Chen, K.-H. Lin, Y. Fang, C. M. Lieber, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2005**, *102*, 3208.
- [183] G. Zheng, F. Patolsky, Y. Cui, W. U. Wang, C. M. Lieber, *Nat. Biotechnol.* **2005**, *23*, 1294.
- [184] H. C. Yuan, Z. Ma, *Appl. Phys. Lett.* **2006**, *89*, 212105.
- [185] T. Afentakis, M. Hatalis, A. T. Voutsas, J. Hartzell, *IEEE Electron Device Lett.* **2006**, *27*, 460.
- [186] D. H. Kim, H. S. Kim, K. J. Lee, T. H. Kim, C. J. Yu, R. G. Nuzzo, J. A. Rogers, *Trans. Elect. Dev.* **2008**, *29*, 73.
- [187] Y. G. Sun, J. A. Rogers, *J. Mater. Chem.* **2007**, *17*, 832.
- [188] H. Jiang, D.-Y. Khang, J. Song, Y. G. Sun, Y. G. Huang, J. A. Rogers, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2007**, *104*, 15607.
- [189] H. Jiang, Y. G. Sun, J. A. Rogers, Y. G. Huang, *Appl. Phys. Lett.* **2007**, *90*, 133119.
- [190] Y. Sun, S. Kim, I. Adesida, J. A. Rogers, *Appl. Phys. Lett.* **2005**, *87*, 083501.