

Elektronik von der Rolle

Organische Transistoren bilden die Grundlage für gedruckte Elektronik.

Walter Fix

Die Idee, elektronische Schaltungen ähnlich wie die tägliche Zeitung zu drucken, fasziniert Forscher und Entwickler bereits seit Ende der 90er-Jahre. In großen Stückzahlen und preiswert hergestellt, würde die gedruckte Elektronik ganz neue Anwendungen ermöglichen: Funketiketten als Ersatz für den optischen Barcode, intelligente Joghurtbecher, die auf das abgelaufene Haltbarkeitsdatum hinweisen, elektronisches Papier oder fälschungssichere Verpackungen von Medikamenten.

Kein Verfahren zur Strukturierung oder Beschichtung ist schneller als das Drucken. Daher liegt es nahe, auch elektronische Schaltungen zu drucken, insbesondere wenn es um große Stückzahlen und niedrige Kosten geht. Die gedruckte Elektronik, die auf leitfähigen und halbleitenden Polymeren basiert, würde einen riesigen Massenmarkt für neuartige elektronische Produkte eröffnen. Ein aussichtsloses Unterfangen wäre es dagegen, wollte die Polymerelektronik neue Supercomputer hervorbringen oder der Siliziumelektronik Konkurrenz machen.

Die große Herausforderung in der gedruckten Elektronik liegt darin, elektronische Tinten zu entwickeln, die sich zum Drucken eignen und die gleichzeitig je nach Anforderung halbleitend oder leitend sind. Meist enthalten Drucktinten viele Additive, welche die Verdrückbarkeit verbessern. Durch solche Additive bleibt eine rote Farbe rot, aber eine halbleitende Tinte in der Regel nicht halbleitend.

Wie lässt sich überhaupt eine halbleitende Tinte herstellen? Man braucht dazu ein halbleitendes Material, das sich in Lösung oder Dispersion bringen lässt. Hier kommen die organischen Halbleiter, allen voran die halbleitenden Polymere, ins Spiel, da sie sehr leicht lösbar sind. In den letzten Jahren gab es große Fortschritte in der Entwicklung gedruckter Elektronik: Als bisheriger Höhepunkt gelang es im September 2007, einen (bis auf die Antenne) kompletten RFID-Transponder für eine Arbeitsfrequenz von 13,56 MHz mit dem Rollenverfahren zu drucken [1] (Abb. 1). Bei der „Radio Frequency Identification“ (RFID) dient ein an einem Gegenstand angebrachter Transponder zu dessen Identifizierung. Trotz dieser Fortschritte fehlt es aber noch an Grundlagenwissen und -verständnis über die Funktionsweise organischer bzw. polymerer Transistoren.

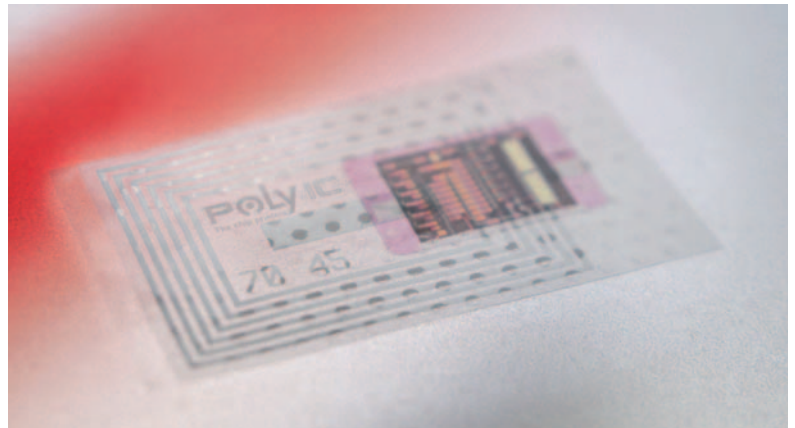


Abb. 1 Dieses „Etikett“ für das RFID-Verfahren besteht aus organischen Transistoren und wurde komplett in einem Rollenverfahren gedruckt.

Ein Feldeffekt-Transistor (FET) besteht im Wesentlichen aus vier verschiedenen Komponenten: einem elektrisch leitenden, einem isolierenden und einem halbleitenden Material sowie einem Substrat als Träger. Ein FET wird schon dann als „organisch“ bezeichnet, wenn nur die halbleitende Schicht aus organischen Molekülen oder Polymeren besteht, obwohl geeignete organische Materialien für alle Komponenten existieren.

Die Bezeichnung „organischer Transistor“ ist somit nicht klar abgegrenzt, sondern ein Sammelbegriff für höchst unterschiedliche Transistorkonzepte: vom Transistor mit nur einem organischen Halbleiter bis hin zum voll-organischen Transistor. Die verschiedenen Konzepte unterscheiden sich nach dem Halbleitermaterial (kleine Moleküle oder Polymere), nach dem Anteil der anorganischen Komponenten (Substrat, Isolator, Elektroden) und nach dem Aufbau (Gate-Elektrode oben oder unten, engl. top gate, bottom gate).

KOMPAKT

- Basiselement für die gedruckte Elektronik sind organische Feldeffekt-Transistoren, die eine oder mehrere polymere Komponenten enthalten.
- Elektronische Tinten müssen sowohl die gewünschten elektrischen Eigenschaften aufweisen (isolierend, halbleitend, leitend) als auch zum Drucken geeignet sein.
- Im Gegensatz zum gewöhnlichen Zeitungsdruck setzt gedruckte Elektronik durchgängige Linienstrukturen statt einzelner Bildpunkte und Auflösungen im Mikrometer-Bereich voraus.

Dr. Walter Fix, PolyIC GmbH & Co. KG, Tucherstraße 2, 90763 Fürth

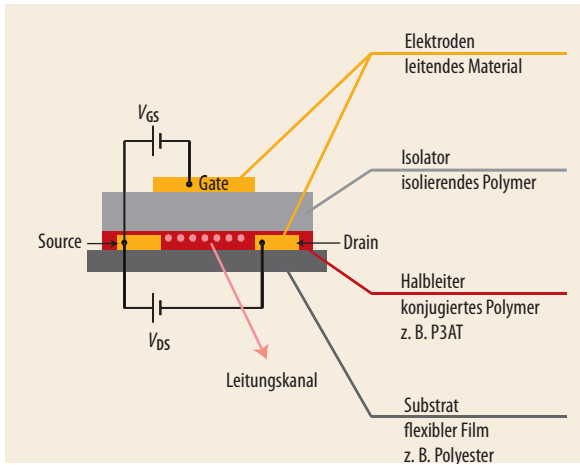


Abb. 2 Querschnitt durch einen polymeren Feldeffekt-Transistor. Das Polyesterfoliensubstrat ist typischerweise 100 µm dick, die Elektroden sind 40 nm dick, die Halbleiterschichten 50 – 100 nm, der Isolator 300 – 1000 nm.

Bei einem gedruckten Transistor werden auf eine Polyesterfolie die Source- und Drain-Elektroden aufgebracht, anschließend die halbleitende Schicht aus dem polymeren Polythiophen, darauf die Isolatorschicht aus polymeren Isolatoren und als letzte Schicht die Gate-Elektrode (Abb. 2). Eine große Herausforderung bei der Herstellung der organischen Transistoren besteht darin, eine geeignete Kombination von Materialien und Lösungsmitteln zu finden, die sich nicht gegenseitig angreifen oder auflösen.

Die grundlegende Funktionsweise organischer Transistoren ist sehr einfach und mit der herkömmlicher Dünnschicht-Transistoren (TFT) vergleichbar (Abb. 3). Ohne angelegte Gate-Spannung fließt kein Strom zwischen Source- und Drain-Elektrode, da die Halbleiterschicht undotiert und damit nichtleitend ist. Mit angelegter Gate-Spannung entsteht ein sehr dünner, leitfähiger Kanal an der Halbleiter/Isolator-Grenzschicht durch Akkumulation von Ladungsträgern, sodass ein Strom von der Source- zur Drain-Elektrode fließen kann. Die Stromstärke hängt ab von der Gate-Spannung, welche die Zahl der Ladungsträger bestimmt, und von der Ladungsträgerbeweglichkeit.

Diese Materialeigenschaft des Halbleiters ist ein Maß für die Ladungsträgergeschwindigkeit.

Bisher gibt es nur organische Transistoren, die auf dem Prinzip der Ladungsträgerakkumulation basieren. Im Gegensatz dazu basieren anorganische Transistoren fast ausschließlich auf dem Prinzip der Ladungsträgerinversion, d. h. zwischen zwei n-dotierten Bereichen (Source- und Drain-Elektrode) befindet sich eine p-dotierte Schicht. In dieser wird mit der Gate-Elektrode ein n-Kanal erzeugt („Inversion“), und es fließt Strom von Source nach Drain. Zwar ist Ladungsträgerakkumulation auch in anorganischen Transistoren möglich, allerdings sind damit Nachteile verbunden wie höhere Leck- bzw. Off-Ströme und die geringere Möglichkeit, Transistoreigenschaften durch gezielte Dotierung einzustellen. Die für Anwendungen vorteilhaftere Ladungsträgerinversion ließ sich bei organischen Transistoren noch nicht beobachten bzw. nachweisen.

Ein weiterer Unterschied liegt im Typ der Ladungsträger: Bei Si- oder GaAs-FETs haben Elektronenleiter die besseren Eigenschaften, bei organischen Halbleitern ist es umgekehrt. Lochleiter oder p-Typ-Halbleiter leiten den Strom besser und sind außerdem wesentlich stabiler als n-Typ-Halbleiter. Daher sind die meisten organischen FETs vom p-Typ (PFET).

Die maximale Schaltfrequenz f_{max} eines Transistors ist begrenzt durch die Laufzeit der Ladungsträger im Kanal der Länge L zwischen Source- zur Drain-Elektrode. Das Maß für die Ladungsträgergeschwindigkeit pro elektrischem Feld ist die Beweglichkeit μ der Ladungsträger. Je kleiner L und je höher μ , desto schneller schalten die Transistoren, wobei die Kanallänge sogar quadratisch eingeht:

$$f_{max} \sim \mu U_{ds} / L^2.$$

Dabei ist U_{ds} die Drain-Source-Spannung. Die Prozesstechnik begrenzt die Kanallänge L , die Ladungsträgerbeweglichkeit μ ist im Wesentlichen eine Materialeigenschaft, die aber auch vom Ordnungsgrad im organischen Halbleiter abhängt. Die bisher höchsten Löcherbeweglichkeiten von einigen cm^2/Vs wiesen aufgedampfte Schichten aus kleinen organischen Mo-

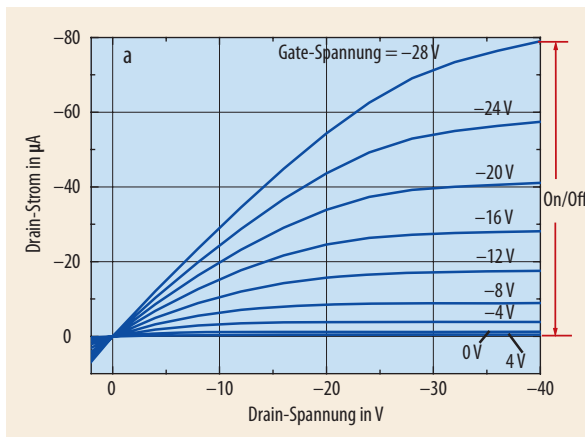
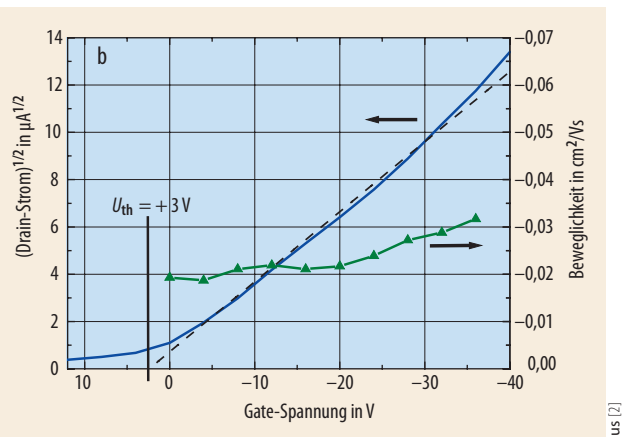


Abb. 3 Ausgangskennlinie eines polymeren Transistors: Der Drain-Strom hängt von der Drain-Spannung mit der Gate-Spannung als Parameter ab (a). Aus der Übertragungskenn-



linie, d. h. der Änderung des Drain-Stromes mit der Gate-Spannung, lässt sich die Ladungsträgermobilität berechnen (b, rechte Achse).



Abb. 4 Sowohl die „elektronischen Tinten“ als auch die Druckprozesse müssen hohe Anforderungen erfüllen, um elektronische Bauteile von der Rolle drucken zu können.

lekülen auf, in Polymeren liegen sie meist zwischen 10^{-4} und $10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Vs}$.¹⁾

Elektrische Messungen an PFETs zeigen eine gute Sättigung des Drain-Source-Stromes und ein hohes On/Off-Verhältnis (Abb. 3a). Beides, vor allem aber ein niedriger Off-Strom, ist wichtig für digitale Schaltungen. Aus der Übertragungskennlinie, d. h. dem Drain-Source-Strom über der Gate-Spannung (Abb. 3b), ergibt sich eine Schwellenspannung U_{th} von +3 V. Oberhalb dieser Spannung ist der Transistor ausgeschaltet, darunter, also bei negativen Spannungen, beginnt er einzuschalten. Wichtig ist, wie schnell er einschaltet, d. h. wie groß die Stromänderung pro Gate-Spannung ist. Diese Steigung (engl. transconductance) wird durch die Ladungsträgerbeweglichkeit und die Transistorgeometrie bestimmt, d. h. aus der Steigung lässt sich bei bekannter Geometrie die Ladungsträgerbeweglichkeit bestimmen (Abb. 3b).

Elektronik drucken

Moderne Druckmaschinen sind High-Tech-Maschinen, die mit den historischen Druckpressen nur noch wenig gemein haben. Mittlerweile lassen sich Auflösungen und Registergenauigkeiten von $20 \mu\text{m}$ und weniger erreichen. Mit einer Druckgeschwindigkeit von über 500 Metern pro Minute könnte man in wenigen Minuten eine Fläche bedrucken, die der Jahresproduktion an Chips einer ganzen Siliziumfabrik entspricht. Natürlich ist diese Rechnung vereinfacht, aber dennoch eröffnen sich durch kontinuierliche Druckverfahren neue Welten in der Elektronikherstellung. Diese Druckverfahren sind bei Plastikchips prinzipiell möglich, wenn anstelle der üblichen Farben gelöste leitfähige, halbleitende oder isolierende Polymere als „elektronische Tinte“ zum Einsatz kommen.

Doch leider ist dieser Prozess nicht ganz so einfach, wie es zunächst erscheint. Es ist schwierig, elektronische Tinten herzustellen („Formulierung“), da diese

ihre elektronischen Eigenschaften sehr leicht durch Additive verlieren. Diese Additive sind aber nötig, um Formulierungen an die Druckprozesse anzupassen. Außerdem sind die üblichen Druckverfahren für Bilder zur Betrachtung mit dem menschlichen Auge optimiert. Hierbei reicht einerseits eine Auflösung im Bereich von $100 \mu\text{m}$ aus, und andererseits entstehen die Bilder durch einzelne nebeneinander liegende oder nur leicht überlappende Bildpunkte, die im Auge „zusammenwachsen“. Gedruckte Plastikchips setzen hingegen durchgängige Linienstrukturen für die Drain/Source-Elektroden mit einer Auflösung im μm -Bereich voraus. Halbleiter und Isolator müssen als sehr dünne, homogene und defektfreie Schichten übereinanderliegen, und die Gatestruktur ist möglichst passgenau über den Drain/Source-Strukturen aufzubringen. Dies sind enorme Anforderungen sowohl an die Maschinen als auch an die Materialien (Abb. 4).

1) Zum Vergleich: Kristallines Silizium hat Löcherbeweglichkeiten bis $500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, vgl. den Artikel von W. Brütting und W. Rieß in diesem Heft.

Anwendungs- und Zukunftsperspektiven

RFID-Tags gibt es für verschiedene Anwendungszwecke und Einsatzbereiche: Je nach Kundenwunsch liegt der Fokus z. B. auf Diebstahlschutz, Echtheitsnachweis, Logistikverfolgung oder Indikatorfunktion, wobei kombinierte Multifunktions-Tags durchaus im Rahmen des Möglichen liegen. Erste Produkte sind bereits im Einsatz.

In der Präsenzerkennung leisten RFID-Tags gute Dienste, sei es in der Produktion, in der Distribution und Lagerlogistik oder auch im Handel und im Dienstleistungssektor. Selbst wo sie an sich nur zu rein logistischen Steuerungsfunktionen nötig wären, liefern RFID-Labels auch das vertrauenswürdige „Echtheits-Zertifikat“ gleich mit. Bei der drahtlosen Identifizierung haben äußerlich perfekt gefälschte „Doppelgänger“ keine Chance, unerkannt zu bleiben (Abb. 5).

Gedruckte Polymerelektronik kann schon bald einer weiteren Vision zur Realität verhelfen [3]: Automatisch erscheinende Infosymbole, die beim Eintauchen in das aktivierende Feld mit farbigen Effekten aufwarten, dürften in naher Zukunft vielerlei Anwendungen finden. Die außerordentlich hohe Attraktivität solcher Visualisierungshilfen wird originelle Applikationen (wie z. B. interaktive Verpackungen) hervorbringen, die heute noch nicht einmal ansatzweise existieren!



Abb. 5 RFID-Etiketten ließen sich auch zum Markenschutz einsetzen.

Eine Entwicklung steht für die Zukunft bereits fest: Das „Item Level Tagging“, also die individuelle Kennzeichnung jedes einzelnen Gutes bis hin zum einzelnen Joghurtbecher. Dafür wird der 96 Bit tiefe „Electronic Product Code™“ entwickelt, der den optischen Strichcode elektronisch ersetzt.

Visionärer ist dagegen die Aussicht, künftig Elektronik direkt auf Produkte oder deren Verpackung drucken zu können. Die noch bestehenden technischen Herausforderungen sind unter anderem fertigungstechnischer Natur, denn geringwertige Massenprodukte zu kennzeichnen, darf diese natürlich nicht nennenswert verteuern. Auch seitens Material und Technologie steckt noch viel Potenzial in gedruckten Polymerschaltkreisen.

Doch bis diese neue elektronische Revolution stattfinden kann, sind noch einige Hindernisse zu überwinden. Besonders gefragt ist das physikalische Verständnis über Polymertransistoren, speziell der Ladungstransport in Polymerschichten und der Einfluss der Grenzflächen auf die Transistoreigenschaften. Darauf aufbauend sind Simulationsmodelle als Grundlage für komplexe Schaltungen unerlässlich. Auch müssen Physik, Chemie und Drucktechnik gemeinsam die derzeitigen Grenzen der Drucktechnik überwinden, mit dem Ziel, die leistungsfähigen Schaltungen aus dem Labor mittels kontinuierlicher Rolle-zu-Rolle-Druckprozesse herzustellen. Nur so lässt sich dieses Ziel erreichen. Dann steht uns eine neue Art von Elektronik zur Verfügung, die unser Leben in vielen Bereichen vereinfachen kann.

*

Mein Dank gilt allen, die zu den beschriebenen Ergebnissen beigetragen haben, sowie dem BMBF und der EU, welche durch Förderprojekte diese Entwicklung unterstützen.

Literatur

- [1] *W. Fix*, Polymer based 13 MHz RFID transponders, Organic Electronics Conference 2007, Frankfurt
- [2] *W. Clemens, W. Fix, J. Ficker, A. Knobloch* und *A. Ullmann*, Journal of Materials Research **19**, 1963 (2004)
- [3] *M. Boehm, A. Ullmann, D. Zipperer, A. Knobloch, W. H. Glauert* und *W. Fix*, Printable Electronics for Polymer RFID Applications, IEEE International Solid-State Circuits Conference 2006, Digest of technical paper, Session 15.1. (2006)

DER AUTOR

Walter Fix (FV Halbleiterphysik) ist Prokurist und Leiter der Abteilung Technology bei PolyIC. An der Universität Erlangen-Nürnberg hat er Physik und Mathematik studiert und anschließend über optische Transistoren promoviert. Im Jahr 2000 wechselte er zur Abteilung Material und Produktion im Bereich Corporate Technology der Siemens AG, die Polymerelektronik entwickelte. Seit der Ausgründung der PolyIC GmbH & Co. KG im November 2003 ist Fix verantwortlich für die Entwicklung gedruckter Elektronik-Produkte, d. h. für die Prozesse, das Bauteil-, Chip- und Systemdesign sowie für Materialtests und -auswahl.

