

Flexible oxide semiconductor electronics on plastic substrates

A dissertation submitted to

ETH ZÜRICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

NIKO STEPHAN MÜNZENRIEDER

Dipl.-Phys. TU München
born June 17, 1983
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Gerhard Tröster, ETH Zürich, examiner
Prof. Dr. Arokia Nathan, University of Cambridge, co-examiner

Abstract

Since hundreds of years it is known that the world is not flat but spherical. Similarly, most of the objects in our daily life are not planar, but bendable and foldable like documents and textiles. The integration of electronic functionality into everyday objects can improve their benefit to the user, and also give rise to new applications such as flexible displays and smart textiles. The main obstacle which prevents the combination of electronics with deformable objects is the fact that electronic devices are fabricated on rigid substrates. The attachment of rigid electronics to flexible substrates restricts the bendability, is contrary to our aesthetic demands, and additionally causes problems with the localization of strain between flexible and stiff areas. One possibility to overcome these limitations is the fabrication of flexible electronic devices like thin-film transistors (TFTs) on plastic foils.

The thermal properties of plastic have to be considered during the fabrication. Therefore amorphous Indium-Gallium-Zinc-Oxide (IGZO) is a promising semiconductor since it provides a carrier mobility $>10 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ when deposited at room temperature.

In this thesis, IGZO based TFTs were fabricated on free standing $50 \mu\text{m}$ thick polyimide substrates. Double gate structures and self-alignment was used to improve the electrical performance of the TFTs. Double gate TFTs exhibited an improved DC performance when compared to single bottom gate reference TFTs. In particular, a subthreshold swing as low as 69 mV/decade was demonstrated. On the other hand self-alignment enabled the fabrication of flexible IGZO TFTs with channel lengths of $0.5 \mu\text{m}$. The short channel and the simultaneously reduced parasitic capacities resulted in a transit frequency of 135 MHz .

Bending of flexible electronics induces strain. This strain can not only cause changes in device performance, but also trigger the formation of cracks and lead to the failure of the electronics. Under tensile and compressive strain IGZO TFTs stayed functional down to a bending radius of $\approx 4 \text{ mm}$ (strain $\epsilon \approx +0.6 \%$) and $\approx 1.1 \text{ mm}$ ($\epsilon \approx -2.2 \%$) respectively. At these bending radii, tensile strain increased the effective mobility by $\approx 4 \%$ while compressive strain decreased the effective mobility by $\approx 8 \%$. It was also found that illumination amplifies the influence of strain by a factor up to 5. In addition, the effects of up to 20 000 repeated bending and reflattening cycles were investigated.

To reduce the minimal possible bending radius of flexible IGZO TFTs the increase of the ductility of the TFT, and the reduction of the

strain induced by bending have been evaluated. Focused ion beam images showed that the use of ductile metals to fabricate the TFT gate contact is a practicable way to enable smaller bending radii. This finding led to TFTs with Cu gate contacts, which could be bent to a tensile radius of 1.7 mm. A reduction of the by bending induced strain was possible by the reduction of the substrate thickness. IGZO TFTs on a 1 μm thin parylene membrane could be placed on nearly any kind of surface, such as a 2 mm radius plastic rod.

For applications like the rectification of an AC signal diodes are beneficial. Room temperature deposited nickel oxide was evaluated as a potential oxidic p-type material for flexible electronics. Nickel oxide in combination with IGZO was used for the fabrication of flexible oxidic pn diodes. The resulting diodes exhibited a threshold voltage of 1.1 V, and could be operated while bend to a radius of 10 mm.

As a step towards the application of flexible electronics, digital and analog circuits were demonstrated. Prior to the fabrication of circuits, a set of design rules was compiled. These design rules guarantee the functionality of the circuits even when they are bent to a radius of 5 mm. Based on these rules logic gates, a 1-bit SRAM cell, as well as different amplifiers were fabricated. In particular, common source amplifiers exhibited a cutoff frequency of 1.2 MHz while bent, and thereby demonstrated operation in the megahertz regime.

Zusammenfassung

Seit Hunderten von Jahren ist es eine bekannte Tatsache, dass die Erde selbst die Form einer Kugel hat. Genau so sind die meisten Objekte, welchen wir in unserem täglichen Leben begegnen, nicht flach. Dokumente oder Textilien sind beispielsweise flexibel und können gefaltet werden. Gleichzeitig verspricht die Kombination von elektronischen Bauelementen mit Alltagsgegenständen einen grossen Nutzen für die Anwender und sogar neue Applikationen wie flexible Bildschirme oder elektronische Textilien. Die Integration von Elektronik mit derartigen Objekte scheitert meist daran, dass sich integrierte Schaltungen praktisch immer auf starren Halbleitersubstraten befinden. Werden starre elektronische Bauelemente auf flexible Substrate aufgebracht, ergeben sich dort versteifte Bereiche. Diese Bereiche reduzieren die Biegsamkeit des Substrates und stören das ästhetische Empfinden des Benutzers. Zudem können mechanische Spannungen am Übergang von starren zu flexiblen Bereichen zum Versagen der Elektronik führen. Die Lösung dieser Probleme liegt in der Herstellung von elektronischen Bauelementen auf flexiblen Substraten. Ein vielversprechender Ansatz für die Verwirklichung von flexibler Elektronik ist die Herstellung von Dünnschichttransistoren (TFTs) auf Plastikfolien.

Durch die limitierten thermischen Eigenschaften von Plastik muss die Herstellung von elektronischen Bauelementen auf Plastiksubstraten bei niedrigen Temperaturen erfolgen. Dies führt zur Verwendung von amorphem Indium-Gallium-Zink-Oxid (IGZO), welches bei Raumtemperatur abgeschieden werden kann, und dabei eine Ladungsträgerbeweglichkeit $>10 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ aufweist.

Die vorliegende Arbeit behandelt auf $50 \mu\text{m}$ dickem Polyimid hergestellte IGZO TFTs. Doppel-Gate Strukturen und selbstausgerichtete Kontakte wurden verwendet, um die elektrischen Eigenschaften der Transistoren zu verbessern. Doppel-Gate TFTs zeigten verbesserte DC Eigenschaften als vergleichbare TFTs mit unten liegendem Gate-Kontakt. Insbesondere war es möglich, den Subthreshold-Swing auf einen Wert von 69 mV/Dekade zu reduzieren. Gleichzeitig ermöglichte die Selbstausrichtung von Kontakten TFTs mit einer Kanallänge von $0.5 \mu\text{m}$ und verkleinerten parasitären Kapazitäten, was zu TFTs mit einer Transitfrequenz von 135 MHz führte.

Die Biegsamkeit von flexibler Elektronik stösst an ihre Grenzen, sobald mechanische Spannungen zur Bildung von Rissen in den Bauelementen führen. Aber auch kleinere Spannungen können

die Eigenschaften von flexiblen, elektronischen Bauelementen beeinflussen. Zugspannung zerstört einen IGZO TFT bei einem Biegeradius von ≈ 4 mm (Dehnung $\epsilon \approx +0.6\%$) und führt zusätzlich zu einer Erhöhung der effektiven Ladungsträgerbeweglichkeit von bis zu $\approx 4\%$. Druckspannung andererseits zerstört einen IGZO TFT erst bei einem Biegeradius von ≈ 1.1 mm ($\epsilon \approx -2.2\%$) und verringert die effektive Ladungsträgerbeweglichkeit bei diesem Radius um $\approx 8\%$. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass die Beleuchtung der TFTs den Einfluss von mechanischer Spannung um einen Faktor 5 verstärken kann. Abschliessend wurden auch die Auswirkungen von bis zu 20 000 wiederholten Biege- und Entspannungsvorgängen auf die TFTs untersucht.

Zur Reduzierung des minimalen Biegeradius wurden zwei Ansätze verfolgt: die Erhöhung der Duktilität der TFTs, und eine Verringerung der durch Verformungen verursachten Spannungen. Untersuchungen der gebogenen TFTs zeigten, dass der Gate-Kontakt verantwortlich für die Entstehung von Rissen ist. Folglich kann die Biegsamkeit von IGZO Transistoren durch duktilere Gate-Metalle verbessert werden, was zu IGZO TFTs mit Cu Gate-Kontakten und einem minimalen Biegeradius von 1.7 mm (Zugspannung) führte. Durch die Reduzierung der Dicke des Substrates war es möglich, die durch Biegen verursachten Spannungen zu verringern. IGZO TFTs auf einer 1 μ m dicken Parylene Membran konnten auf verschiedenen Objekten, wie hier einem Plastikstab mit 2 mm Radius, platziert werden.

Anwendungen, wie die Gleichrichtung von Wechselstrom, profitieren von der Verfügbarkeit von Dioden. Zur Realisierung von flexiblen pn-Dioden wird ein p-Typ Halbleiter benötigt, welcher sich analog zu IGZO bei niedrigen Temperaturen abscheiden lässt. Dazu wurde die Brauchbarkeit von Nickeloxid erforscht. Die Kombination von Nickeloxid und IGZO führte zu pn-Dioden mit einer Schwellspannung von 1.1 V. Diese pn-Dioden konnten ausserdem betrieben werden, während sie zu einem Radius von 10 mm gebogen waren.

Die Anwendung flexibler Elektronik wurde durch verschiedene digitale und analoge Schaltungen untersucht. Um die Biegsamkeit der auf IGZO TFTs basierenden integrierten Schaltungen zu maximieren, wurden Regeln bezüglich deren Design erarbeitet. Diese Regeln garantierten die Funktionsfähigkeit aller Schaltungen auch bei Biegeradien von 5 mm. Die hergestellten Schaltungen umfassen Logikgatter, eine 1-bit SRAM Zelle, sowie mehrere Verstärker. Insbesondere flexible Common-Source Verstärker zeigten eine Grenzfrequenz von 1.2 MHz und ermöglichen damit Betrieb im Megahertzbereich.