

Flexible a-IGZO Thin-Film Technology: Transistors, Sensors and Varactors

Doctoral Thesis**Author(s):**

Knobelspies, Stefan

Publication date:

2018

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000298842>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Funding acknowledgement:

160347 - W I S D O M: Wireless Indium-Gallium-Zink-Oxide Transmitters and Devices on Mechanically Flexible Thin-Film Substrates (SNF)

Flexible a-IGZO Thin-Film Technology: Transistors, Sensors and Varactors

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES OF ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
STEFAN DIETER KNOBELSPIES

MSc. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
born 19.04.1989
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Gerhard Tröster, ETH Zurich, examiner
Prof. Dr. Thomas Riedl, University of Wuppertal, co-examiner

2018

Abstract

Since the invention of the transistor in 1947 and the subsequent demonstration of the thin-film transistor (TFT) in 1962, electronics underwent a rapid development. Driven by the demand for higher performance, lower fabrication cost and higher integration density, research, as well as industry, mainly focused on downscaling of the device dimensions as predicted by Moore in 1965.

Nowadays, electronics are omnipresent in daily life. Well known devices, such as cellphones, light bulbs, coffee machines or even clothing became “smart” by integrating displays, touch interfaces or wireless communication to connect them to the Internet-of-Things. This new generation of ubiquitous electronic devices, where also form factors become more important, poses new challenges on the key component: the TFT. In addition to a high electrical performance, some applications require mechanical flexibility.

Furthermore, the incorporation of new functionalities into the TFT is desired. This can include the usage of the TFT as sensing device to e.g., monitor the user itself or factors in the user’s surrounding.

Among the technologies used to realize flexible electronics, metal oxide (MOX) semiconductors deposited on plastic foils, and in particular amorphous Indium-Gallium-Zinc-Oxide (a-IGZO), offer an appealing approach. This semiconductor exhibits interesting electrical properties, such as a carrier mobility $>10 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, a wide bandgap of 3.05 eV and the possibility for room temperature (RT) deposition.

In the first part of this thesis, flexible a-IGZO TFTs and circuits fabricated on polyimide substrates are demonstrated. A fabrication method for short-channel (250 nm) TFTs based on focused ion beam (FIB) milling is evaluated. Then, a plasma treatment for the contact interface of a-IGZO and the source/drain metalization is presented, which results in a decrease of the contact resistance R_C by a factor of 13.4, accompanied by an increased effective field-effect mobility and transconductance. In addition, when integrating the proposed treatment into the fabrication process flow, a TFT channel length reduction occurs, which prospects the fabrication of high-performance short-channel TFTs, while still utilizing standard ultraviolet-light (UV-light) lithography.

Secondly, the flexible a-IGZO TFT is employed as a UV-light or Nitrogen dioxide (NO_2) gas sensor. Information about the actual UV-

intensity and the accumulated UV-dosage seen by the sensor was acquired by utilizing a novel measurement and evaluation scheme, and charge trapping effects. For UV power densities between 0 to $2.4 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$, which resemble typical values for everyday exposure on earth, the UV-sensor showed a linear response.

The optoelectronic properties of the a-IGZO, in combination with its chemosensitive characteristics, enable the realization of a gas sensor working at RT. The photo-induced response of a a-IGZO TFT to 2 - 5 ppm NO_2 (20% background oxygen, RT) was evaluated, showing a linear dependency on the gas concentration. Both sensor principles were explained with the help of the electronic band structure of the respective device stacks.

Finally, to realize complex flexible circuits, and especially in wireless communication systems, tunable capacitors (varactors) are also among the key components. So far, there is no report about MOX based flexible varactors. However, a solution compatible with the TFT fabrication process flow could pave the way to reduced costs and higher integration densities within the circuits. In this context, a novel approach and device structure to realize a-IGZO based thin-film varactors is presented. A capacitance tunability up to 93.7 was achieved and the devices were characterized at frequencies up to 1 MHz.

Zusammenfassung

Seit der Erfindung des Transistors im Jahr 1947 und der anschliessenden Demonstration des Dünnschichttransistors in 1962 begann eine schnell anschreitende Entwicklung von elektronischen Bauelementen. Angetrieben vom Anspruch nach gesteigerter Leistungsfähigkeit, geringeren Herstellungskosten und höherer Integrationsdichte, fokussierten sich die Forschung und Industrie hauptsächlich auf die Verringerung der Transistor Gatelänge. Dieser Trend wurde im Jahre 1965 von G. Moore vorhergesagt.

Heutzutage ist Elektronik in unserem täglichen Leben omnipräsent. Altbekannte Geräte wie Telefone, Glühlampen, Kaffeemaschinen oder sogar Kleidung wurden durch die Integration von Bildschirmen, Touchscreen-Schnittstellen oder drahtloser Kommunikation "intelligent", und an das "Internet-der-Dinge" angeschlossen. Diese neue Generation von allgegenwärtigen elektronischen Geräten, in der auch der Formfaktor wichtig wird, stellt neue Herausforderungen an das Hauptelement: den Dünnschichttransistor. Zusätzlich zu einer hohen Leistungsfähigkeit fordern einige Anwendungen mechanische Flexibilität.

Des Weiteren ist die Einbindung neuer Funktionalitäten in den Dünnschichttransistor ein interessanter Aspekt. Dies kann die Nutzung des Dünnschichttransistors als Sensor beinhalten, um z.B. den Benutzer selbst, oder die Umgebung des Benutzers zu überwachen.

Unter den verwendbaren Technologien für biegbare Elektronik bieten Metalloxid-Halbleiter, und im speziellen amorphes Indium-Gallium-Zink-Oxid (a-IGZO) abgeschieden auf Plastikfolien, einen ansprechenden Ansatz. Dieser Halbleiter weist interessante elektrische Eigenschaften auf, wie eine Ladungsträgerbeweglichkeit $>10 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, eine grosse Bandlücke von 3.05 eV und die Möglichkeit zur Abscheidung bei Raumtemperatur (RT).

Im ersten Teil dieser Arbeit werden biegbare a-IGZO Dünnschichttransistoren und Schaltungen gezeigt. Eine Herstellungsmethode für Kurzkanal-Dünnschichttransistoren (250 nm) durch fokussierte Ionenstrahl-Abtragung wird demonstriert. Anschliessend wird eine Plasma-Behandlung der Kontaktfläche zwischen a-IGZO und der Source/Drain-Metallisierung des Dünnschichttransistors vorgestellt. Diese Plasma-Behandlung resultierte in einer Verringerung des Kon-

taktwiderstandes R_C um einen Faktor von 13.4, einer erhöhten Feldeffektmobilität und gesteigerten Transkonduktanz. Durch die Integration der Plasma-Behandlung in den Dünnschichttransistor-Herstellungsprozess wurde eine Kanallängenverkürzung beobachtet, welche die Herstellung von Kurzkanal-Dünnschichttransistoren mittels Standard-UV-Licht Lithographie in Aussicht stellt.

Anschliessend wird der biegbare a-IGZO Dünnschichttransistor als UV-Licht und Stickstoff-Dioxid (NO_2) Gassensor verwendet. Durch ein neuartiges Mess- und Auswertungsschema und Ladungsfalleneffekte konnten Informationen über die aktuelle UV-Intensität und über die totale UV-Dosis, welche vom Sensor aufgenommen wurde, gewonnen werden. Der Sensor zeigte eine lineare Antwort auf UV-Intensitäten im Bereich von 0 - $2.4 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$. Dieser Bereich repräsentiert alltägliche Intensitätswerte auf der Erdoberfläche.

Die optoelektronischen und chemosensitiven Eigenschaften von a-IGZO ermöglichten die Realisierung eines Gassensors, welcher bei Raumtemperatur arbeitet. Die lichtinduzierte Sensorantwort auf 2 - 5 ppm NO_2 (bei 20% Hintergrund-Sauerstoffkonzentration und RT) wurde ausgewertet. Eine lineare Abhängigkeit zwischen Sensorsignal und Gaskonzentration wurde gezeigt. Beide Sensorprinzipien werden mit der Hilfe der elektronischen Bandstruktur erklärt.

Um komplexe biegbare Schaltungen, im speziellen für drahtlose Kommunikation, zu realisieren, werden weitere Bauelemente wie steuerbare Kapazitäten (Varaktoren) benötigt. Bisher gibt es keine Berichte über flexible Metalloxid-basierte Varaktoren. Jedoch könnte eine zum Herstellungsprozess des Dünnschichttransistors kompatible Lösung den Weg zu reduzierten Herstellungskosten und höherer Integrationsdichte dieser Schaltungen aufzeigen. In diesem Zusammenhang wird ein neuer Ansatz und eine neue Struktur für a-IGZO basierte Dünnschichtvaraktoren vorgestellt. Eine Kapazitätsänderung um den Faktor 93.7 wurde erreicht und die Varaktoren wurden für Frequenzen bis 1 MHz charakterisiert.