

Technologie und Modellierung monolithisch integrierter
Photodioden, LEDs und MESFETs zur Realisation
optoelektronischer integrierter Schaltkreise

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von
Klaus Thelen
Diplom-Ingenieur, RWTH Aachen

geboren am 2. Juni 1963
in Aachen
(Deutschland)

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. W. Bächtold (ETH Zürich), Referent
PD Dr. B. D. Patterson (PSI Zürich), Korreferent

Technology and Modeling Monolithically Integrated Photodiodes, LEDs, and MESFETs for the Realization of Optoelectronic Integrated Circuits

Abstract

Optoelectronic integrated circuits (OEICs) were realised by monolithically integrating MESFETs, *pin*-Photodiodes and surface emitting LEDs. As an example a threshold amplifier with optical in- and output is presented.

The devices were realised in an epitaxial GaAs/GaAlAs material system. The LED layers consist of a quantum-well double-heterostructure grown on a *n*-doped GaAs substrate and capped with a highly *p*-doped contact layer. This is followed by a slightly *p*-doped GaAs buffer layer, the *n*-type MESFET channel, a GaAlAs etch-stop-layer and a highly *n*-doped contact layer. The *p-n* junction between the contact-layer and the *n*-doped MESFET layers is used as a photodiode.

The MESFETs were isolated by mesa etching. The photodiodes and LEDs were electrically and optically isolated in a second etch step. After deposition of the *n*-contact metals and subsequent annealing, the structure was passivated with a laterally structured silicon nitride layer. A second metallization is used for the first wiring level, as a *p*-metal for the photodiodes and the LEDs, as a Schottky-gate-metal, and to connect the *p*⁺-contact layer lying beneath each MESFET. After the deposition of an additional passivation layer, a second wiring metal was deposited. The common cathodes of the LEDs are contacted by a *n*-metallization which was deposited on the substrate side of the chip.

The electrical behaviour of the MESFET is influenced by the voltage which is applied to the *p*⁺-backgating-contact of the MESFET. To quantitatively determine this backgating effect an analytical two-section model was developed to describe the potential distribution in the MESFET channel below the gate contact. The model also considers the voltage drop across the gate-drain and gate-source path. The backgating effect is negligible if a thick buffer and a low doped buffer-layer is used. If the buffer doping is $N_i < 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ and the buffer thickness is larger than 500 nm the backgating transconductance becomes less than 20 % of the gate transconductance.

The individual devices showed the following characteristics: The OEIC-MESFETs with 1 μm gate length have a transconductance of 80 mS/mm. The threshold voltage is -1.2 V. The measured transit frequency is 1.2 GHz. The photodiode has a responsivity of 0.65 A/W and an area capacitance of 2.5 pF/(100 μm)². The emission wavelength of the LED is 790 nm with a spectral width of 35 nm (FWHM). The maximal power efficiency of a 100x100 μm^2 sized LED is 1 % at 10 mA drive current.

SPICE equivalent circuits were developed describing the individual devices. To simulate the MESFETs, the well established Curtice-I model was modified by adding an additional voltage source to the internal gate node which is controlled by the backgating-source voltage. The developed equivalent circuit of the photodiode includes the parasitic LED lying beneath it.

The optoelectronic threshold amplifier has a differential input stage consisting of two photodiodes. The input stage is followed by a symmetrical driver unit for the LED. The threshold is controlled by the current through an additional LED which is optically coupled to one of the input photodiodes. With this circuit an optoelectronic gain of $3.5 \cdot 10^3$ was achieved. The switching energy is 6 pJ, the switching power varies between 5 and 80 nW depending on the chosen reference light intensity. The dissipated electrical power of the circuit is 30 mW.

Kurzfassung

Mit einer monolithischen Integration von MESFETs, *pin*-Photodioden und oberflächenemittierenden Leuchtdioden (LEDs) wurden optoelektronische integrierte Schaltkreise (optoelectronic integrated circuits, OEICs) realisiert. Als Beispiel wird ein Schwellwertverstärker mit optischem Ein- und Ausgang demonstriert.

Die Integration der Bauelemente wurde mit einer epitaktischen GaAs/GaAlAs Struktur auf einem *n*-dotierten GaAs Substrat realisiert: Die zuunterst liegenden LED-Schichten bestehen aus einer Quantenfilm-Doppel-Heterostruktur und sind mit einer p^+ -Kontakt-Schicht abgeschlossen. Darauf folgt eine schwach *p*-dotierte GaAs Buffer-Schicht. Auf diese ist der MESFET-Kanal, eine GaAlAs Ätzstoppschicht und eine n^+ -Kontakt-Schicht aufgebracht. Der *p-n* Übergang zwischen der Kontakt-Schicht der LED und den *n*-dotierten Schichten des MESFETs wird als Photodiode benutzt.

Die MESFETs wurden durch Ätzung von Mesas elektrisch isoliert. Die elektrische und optische Isolation der Photodioden und LEDs erfolgte in einem zweiten Ätzschritt. Nach der Deposition der *n*-Kontaktmetalle für Source, Drain und die Kathoden der Photodioden und deren Einlegierung wurden die Oberflächen der Bauteile durch eine lateral strukturierte Siliziumnitrid-Schicht passiviert. Eine weitere Metallisierung diente sowohl als Verdrahtungsschicht, als auch als *p*-Kontaktmetall für die Photodioden und die LEDs, als Schottky-Gate-Metall sowie zur Kontaktierung der unterhalb eines jeden MESFETs befindlichen p^+ -Kontaktschicht. Nach der Deposition einer weiteren Passivierungsschicht wurde zum Abschluß ein zweites "Verdrahtungsmetall" aufgebracht. Die gemeinsame Kathode der LEDs wurde über eine auf der Rückseite des Chips aufgebrachte Metallisierung kontaktiert.

Das elektrische Verhalten des MESFETs wird durch das am p^+ -Kontakt angelegte Backgating-Potential mitbestimmt. Zur quantitativen Beschreibung dieses Effektes wurde ein analytisches Modell entwickelt. Es beschreibt die Potentialverteilung im Kanal unter dem MESFET-Gate in einem Zwei-Sektionen-Modell und berücksichtigt den Spannungsabfall der Gate-Source- und Gate-Drain-Strecke. Um eine möglichst kleine Beeinflussung des Drainstromes durch die Backgating-Spannung zu erreichen, muß die Buffer-Dotierung N_i tief und die Bufferdicke x_i groß sein. Bei $N_i < 1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ und $x_i > 500 \text{ nm}$ ist die Backgating-Steilheit kleiner als 20 % der Gate-Steilheit.

Es wurden folgende charakteristische Daten der einzelnen Bauteile ermittelt: Die im OEIC realisierten MESFETs zeigen bei einer Gate-Länge von $1 \mu\text{m}$ eine Steilheit von 80 mS/mm . Die Schwellspannung liegt bei -1.2 V . Die Transitfrequenz beträgt 1.2 GHz . Die Photodiode zeigt bei einer Wellenlänge von 850 nm eine Responsivität von 0.56 A/W und eine spezifische Kapazität von $2.5 \text{ pF}/(100 \mu\text{m})^2$. Die Wellenlänge der $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ großen LED beträgt 790 nm bei einer spektralen Emissionslinienbreite von 35 nm (FWHM). Die Leistungseffizienz beträgt 1% bei 10 mA Treiberstrom.

Es wurden SPICE Ersatzschaltbilder (ESB) zur Beschreibung der Einzelkomponenten entwickelt. Zur Simulation der MESFETs wurde das Curtice-I-Modell unter Berücksichtigung des Backgating-Effekts modifiziert. Hierzu wurde dem internen Gate-Knoten eine spannungsgesteuerte Spannungsquelle hinzugefügt, deren Wert sich proportional zur Backgating-Source-Spannung ändert. Das ESB der Photodiode berücksichtigt die darunter befindliche LED.

Der optoelektronische Schwellwertverstärker besitzt eine aus zwei Photodioden bestehende differentielle Eingangsstufe. Dieser folgt eine symmetrische Treiberstufe für die LED. Der Schwellwert läßt sich durch den Strom einer zusätzlichen LED steuern, die optisch an die erste Photodiode gekoppelt ist. Mit dieser Schaltung wurde eine maximale optoelektronische Verstärkung von $3.5 \cdot 10^3$ erreicht. Die Schaltenergie beträgt 6 pJ, die Schaltleistung beträgt je nach Schwellwert zwischen 5 und 80 nW. Die elektrische Verlustleistung der Schaltung beträgt 30 mW.