

DISS. ETH NO. 23197

Development and Optimization of High-Speed InP/GaAsSb Double Heterojunction Bipolar Transistors

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

presented by

Maria Alexandrova

MSc, Moscow Institute of Physics and Technology

born on 18.07.1986

citizen of the Russian Federation

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. C. R. Bolognesi, examiner

Prof. Dr. G. Meneghesso, co-examiner

2015

Abstract

Thanks to their staggered band alignment, GaAsSb-based InP double heterojunction bipolar transistors (DHBTs) feature excellent electron transport characteristics. DHBTs with InP as collector material not only allow ballistic electron injection into the collector, but also provide a high breakdown voltage as well as a good thermal conductance. Therefore, GaAsSb-based DHBTs have a great potential for high-speed mixed signal integrated circuits applications.

The aim of the present work was to further improve the high-frequency figures-of-merit of InP/GaAsSb DHBTs. This goal was reached by two approaches: Firstly, an improvement was made by means of developing a novel fabrication process while maintaining the reproducibility and the high yield in the device fabrication. Secondly, the design of the DHBT epitaxial layer structure was optimized by changing the material composition as well as the thickness of the semiconductor layers.

The development efforts resulted in a record InP/GaAsSb DHBT with an $f_{\text{MAX}} = 779$ GHz and a simultaneous $f_{\text{T}} = 503$ GHz. The improved RF performance is attributed to the reduced base access resistance and the decreased base-collector capacitance. The device features a $0.2 \times 4.4 \mu\text{m}^2$ emitter area and a $0.4 \times 5.5 \mu\text{m}^2$ collector area, a peak common-emitter current gain of $\beta = 17$, and a breakdown voltage of $BV_{\text{CEO}} = 4.1$ V at a collector current density of $J_{\text{C}} = 1$ kA/cm². The devices were fabricated in a combination of Ar sputtering and wet etching in a self-aligned emitter formation process, which was developed in order to reduce the base access distance.

Optimizations of the epitaxial layer structure demonstrated that the f_{T} can be improved by introducing a GaInP emitter launcher with a high Ga content as well as by reducing the base layer thickness. Further refining the GaAsSb base design in combination with vertical device scaling should allow the InP/GaAsSb DHBTs to reach THz bandwidth.

Zusammenfassung

Dank ihrer gestaffelten Band-Anordnung besitzen GaAsSb-basierte InP Doppel-Heteroübergang-Bipolartransistoren (DHBT) ausgezeichnete Elektronentransport-Eigenschaften. DHBT mit InP als Kollektormaterial erlauben nicht nur eine ballistische Elektronen-Injektion, sie bieten auch eine hohe Durchbruchspannung sowie eine gute thermische Leitfähigkeit. Daher haben GaAsSb-basierte DHBT grosses Potenzial für Hochgeschwindigkeits-Mischsignal-Schaltungen.

Ziel dieser Arbeit war es, die Hochfrequenz-Leistungsmerkmale der InP/GaAsSb DHBT zu verbessern. Dies wurde durch zwei Herangehensweisen erreicht: Erstens durch die Entwicklung eines neuartigen Fabrikationsprozesses, bei dem die Reproduzierbarkeit und die Ausbeute der Transistor-Produktion verbessert wurde. Zweitens wurde die Epitaxie der DHBT optimiert, indem die Zusammensetzung der Materialien sowie die Dicke der Halbleiter-Schichten verändert wurden.

Die Bemühungen führten zu einem rekordbrechenden InP/GaAsSb DHBT mit einer $f_{\text{MAX}} = 779$ GHz und einer gleichzeitigen $f_{\text{T}} = 503$ GHz. Die verbesserte RF-Leistung ist auf den verringerten Basis-Zugangswiderstand sowie die verringerte Basis-Kollektor Kapazität zurückzuführen. Der Transistor weist eine $0.2 \times 4.4 \mu\text{m}^2$ grosse Emittierfläche und eine $0.4 \times 5.5 \mu\text{m}^2$ grosse Kollektorfläche auf, sowie eine maximale Stromverstärkung in der Emitterschaltung von $\beta = 17$ und eine Durchbruchspannung von $BV_{\text{CEO}} = 4.1$ V bei einer Kollektor-Stromdichte von $J_{\text{C}} = 1$ kA/cm². Die Transistoren wurden mittels einer Kombination von Ar-Ionen Beschuss und Nass-Ätzen in einem automatisch ausgerichteten Fabrikationsprozess hergestellt. Der Prozess wurde entwickelt, um die Basis-Zugangs-Distanz zu verringern.

Die Optimierung der epitaxialen Schicht-Struktur zeigt auf, dass die f_{T} verbessert werden kann, indem man eine GaInP Energie-Schanze mit hohem Ga-Gehalt einführt. Die f_{T} kann ausserdem verbessert werden, indem man die Dicke der Basis-Schicht verringert. Durch eine weitere Verfeinerung des GaAsSb Basis Designs in Verbindung mit einer vertikalen Transistor-Skalierung sollten InP/GaAsSb DHBT THz Bandweiten erreicht werden können.