

# **Sub-micron InP/GaAsSb/InP Double Heterojunction Bipolar Transistors for Ultra High-Speed Digital Integrated Circuits**

A dissertation submitted to

**ETH ZURICH**

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by

**URS HAMMER**

Dipl. El.-Ing. ETH

born June 7, 1976

citizen of Langendorf (SO), Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. H. Jäckel, examiner

Prof. Dr. C. R. Bolognesi, co-examiner

2009

# Abstract

Future high-speed electronic systems critically depend on ultrafast transistor and circuit technologies. Today, indium phosphide (InP) based double heterojunction bipolar transistors (DHBT) belong to the fastest transistor technologies thanks to the outstanding material properties of III/V semiconductors. In this work the high potential of InP based DHBTs with a GaAsSb base is recognized. The staggered band lineup and thus the absence of the well-known collector blocking effect makes antimonide based InP/GaAsSb DHBTs particularly suited for ultra high-speed digital circuit applications requiring high-current operation.

InP based DHBT devices have shown outstanding microwave performance even at moderate scaling levels thanks to their excellent electron transport properties. However, device downscaling has become indispensable for improved performance of III/V DHBT devices and circuits operating at clock rates of 160 Gb/s and beyond. In particular lateral device dimensions such as the emitter and base contact widths must be reduced into the sub- $\mu\text{m}$  domain while simultaneously minimizing the associated contact resistances.

The maximum clocking frequency of static frequency dividers is considered a key metric to assess the high-speed circuit performance of a transistor technology. In this work the influence of DHBT device parameters on the switching performance of static frequency dividers is analyzed by circuit simulations using a scalable transistor model. The investigations manifest that lateral device scaling and improvement of the device contact resistances play a major role in DHBT circuits with clock rates exceeding 160 Gb/s.

The main part of this work deals with the development of a sub-micron InP/GaAsSb DHBT technology for two-inch substrates. The patterning of sub-micron contacts for the DHBT emitter and base terminals is based on electron beam lithography which provides enhanced resolution and alignment accuracy compared to optical contact lithography. The use of electron beam lithography in conjunction with highly anisotropic plasma etch processes enables the fabrication of aggressively downscaled devices with an active emitter width as low

as 0.2  $\mu\text{m}$ . An overlay accuracy of 50–100 nm is achieved for the self-aligned base contact structure with respect to the sub-micron emitter contact. Device parasitics are further reduced by the implementation of a separated base contact structure which is based on a metal micro air-bridge. Benzocyclobutene (BCB) has been introduced as a low-k dielectric material for improved passivation and planarization of the sub-micron devices.

Fabricated InP/GaAsSb DHBTs show excellent DC and high-frequency characteristics. A large signal current gain  $> 50$  has been measured for devices with a 250 Å base and a 2000 Å collector. The device breakdown voltage  $BV_{CE0} = 5.8 \text{ V}$  is markedly higher than for DHBTs with the more common InGaAs base and a graded collector structure. A maximum current gain cut-off frequency  $f_t = 204 \text{ GHz}$  and a maximum oscillation frequency  $f_{\text{max}} = 165 \text{ GHz}$  have been extracted.

# Zusammenfassung

Zukünftige Systeme der Hochgeschwindigkeitselektronik werden in ausgesprochenem Masse von der Verfügbarkeit ultraschneller Transistor- und Schaltungstechnologien abhängen. Aufgrund der herausragenden Materialeigenschaften der III/V Halbleiter gehören Doppelheterostruktur-Bipolartransistoren (DHBT) basierend auf dem Indium-Phosphid (InP) Materialsystem zurzeit zu den schnellsten Transistortechnologien überhaupt. Das herausragende Potential InP basierter DHBTs mit einer GaAsSb Basis ist ein zentraler Punkt dieser Arbeit. Antimonid basierte InP/GaAsSb DHBTs eignen sich aufgrund ihres gestuften Bandverlaufs und der damit verbundenen Vermeidung des bekannten Blockiereffekts am Kollektor besonders gut für ultraschnelle Digitalschaltungen, welche in der Regel bei hohen Stromdichten betrieben werden.

Dank ihrer ausgezeichneten Elektronentransporteigenschaften zeigen InP basierte DHBT Bauelemente auch bei mässigem Skalierungsgrad hervorragende Leistungsmerkmale im Mikrowellenbereich. Für verbessertes Hochfrequenzverhalten der III/V DHBT Bauelemente und für Schaltungen, welche bei Clockraten von 160 Gb/s und mehr arbeiten, ist ein Herunterskalieren der Bauelemente unvermeidbar. Insbesondere laterale Bauteildimensionen wie die Emitter- und Basiskontaktbreiten müssen in den sub- $\mu\text{m}$  Bereich verkleinert werden, wobei gleichzeitig die zugehörigen Kontaktwiderstände minimal bleiben müssen.

Die maximale Clockfrequenz statischer Frequenzteiler wird gemeinhin als massgebendes Bewertungskriterium für das Hochfrequenzverhalten einer Transistortechnologie betrachtet. Anhand von Schaltungssimulationen mit einem skalierbaren Transistormodell wird in dieser Arbeit der Einfluss diverser DHBT Bauteilparameter auf das Schaltverhalten statischer Frequenzteiler analysiert. Die Untersuchungen ergeben, dass die laterale Bauteilskalierung zusammen mit einer Verbesserung der Kontaktwiderstände beim Entwurf von DHBT Schaltungen mit Clockraten grösser als 160 Gb/s eine entscheidende Rolle spielen.

Der Hauptteil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung einer sub-mikron InP/GaAsSb DHBT Technologie für 2"-Substrate. Die Strukturierung

von sub-mikron Kontakten für die DHBT Emitter- und Basisanschlüsse basiert auf der Verwendung von Elektronenstrahl-Lithographie, welche sich gegenüber der optischen Lithographie durch eine verbesserte Strukturauflösung sowie einer erhöhten Alignmentgenauigkeit auszeichnet. Die Verwendung von Elektronenstrahl-Lithographie in Verbindung mit stark anisotropen Plasma-Ätzprozessen ermöglicht die Herstellung aggressiv herunterskalierter Bauteile mit einer aktiven Emitterbreite von nur  $0.2\ \mu\text{m}$ . Für die selbstjustierten Basiskontaktstrukturen wird eine Justiergenauigkeit von  $50\text{--}100\ \text{nm}$  bezüglich der sub-mikron Emitterkontakte erreicht. Durch die Verwendung einer separierten Basiskontaktstruktur, welche auf einer metallischen Mikroluftbrücke beruht, werden parasitäre Bauteilelemente zusätzlich reduziert. Für die verbesserte Passivierung und Planarisierung der sub-mikron Bauteile wurde Benzocyclobutene (BCB) als Material mit niedriger Dielektrizitätszahl eingeführt.

Die hergestellten InP/GaAsSb DHBTs zeigen hervorragende DC- und Hochfrequenzeigenschaften. Für Transistoren mit einer Basisdicke von  $250\ \text{Å}$  und einer Kollektordicke von  $2000\ \text{Å}$  wurde eine Grossignal-Stromverstärkung von mehr als 50 gemessen. Die Durchbruchspannung der Bauteile ist mit  $BV_{CE0} = 5.8\ \text{V}$  deutlich höher als bei DHBTs mit einer gebräuchlichen InGaAs Basis und einer gradierten Kollektorstruktur. Die maximale Transitfrequenz der Stromverstärkung beträgt  $f_t = 204\ \text{GHz}$ , während für die maximale Oszillationsfrequenz ein Wert von  $f_{\text{max}} = 165\ \text{GHz}$  extrahiert wurde.