



Doctoral Thesis

InP double heterojunction bipolar transistors for driver circuits in fiber optical communication systems

Author(s):

Bauknecht, Raimond

Publication Date:

1998

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001895582> →

Rights / License:

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

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH 2x. B

DISS. ETH Nr. 12455

InP Double Heterojunction Bipolar Transistors for Driver Circuits in Fiber Optical Communication Systems

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

Raimond Bauknecht
Dipl. phys. ETH
born on August 8th, 1964
citizen of Ulm, Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. H. Melchior, examiner
Prof. Dr. H. Jäckel, co-examiner



1998

Abstract

With the increasing data rates in multigigabit optical fiber communication systems for large-capacity transmission systems and high-speed local area networks the performance requirements for the electronic circuits for transmitting, receiving and processing of digital optical signals become more and more stringent. High-speed electronic driver circuits for optical switches and modulators, laser diodes and semiconductor optical amplifiers (SOA's) are key elements in these systems, however, they place great demands on the fabrication technologies and design strategies needed for their realization. InP double heterojunction bipolar transistors (DHBT's), with their excellent high-speed and power-handling capabilities, are emerging candidates for these applications. This thesis focuses on the development of an advanced InP DHBT technology and on the assessment of the performance-potential of this technology for the implementation of monolithically integrated high-bitrate, high output current and high output voltage driver circuits.

We propose in this work a novel InP DHBT structure based on an abrupt base-collector heterojunction, the δ^+ -layer composite collector structure. Following an evaluation of different base-collector heterostructure approaches, we identified this structure to be effective to suppress current blocking at the base-collector heterojunction, to result into high base-collector breakdown voltages and to be relatively uncritical in terms of epitaxial growth and etching techniques required for its implementation in the InP/InGaAs material system. A theoretical investigation of particular physical effects relevant to DHBT's was performed combining current blocking, high-current injection and saturation effects, with particular emphasis on the δ^+ -layer composite collector structure. No significant differences in maximum collector current density for double HBT's compared to single HBT's were identified, however the DHBT's were found to exhibit better switching performance under saturation conditions and lower zero collector current forward offset voltages. An optimization of the vertical transistor structure was made based on the maximum admissible collector current density to base-collector capacitance ratio, an important figure of merit for driver circuit applications with relatively large output voltage swings. Moderately doped collectors were found to be superior to non-intentionally doped collectors.

Refined metal-organic-vapor-phase-epitaxial (MOVPE) growth techniques

optimized for DHBT structures which require high-quality heterojunctions and hyperabrupt doping profiles were developed. Key achievements combine very abrupt base doping profiles using Zn as dopant having high peak concentrations with very good uniformity across two-inch wafers and the first successful implementation of low thermal resistance InP-subcollectors for high-performance InP DHBT's. Abnormal Zn diffusion via the kick-out mechanism was suppressed by the introduction of growth delays and by optimizing the growth conditions for the Zn-doped base. These results constitute an important new contribution towards the exploitation of the higher throughput capabilities of the MOVPE technique compared to molecular-beam-epitaxy (MBE) -related techniques for the realization of high-performance InP HBT's. Further advanced fabrication techniques developed in this work include self-aligned base- and emitter-metallization deposition techniques for base resistance reduction and the undercut of the base-metallization for extrinsic base-collector junction capacitance reduction as well as ultra low-resistance contact schemes for emitter, base and collector contacts. We achieved a reproducible, high-yield fabrication process on two-inch InP wafers from which we obtained long-term reliable InP DHBT's.

DHBT's with high maximum collector current densities and low saturation voltages were realized, which are both comparable to the best values reported for InP DHBT's using compositionally graded base-collector heterojunctions. Our transistors exhibit high base-collector breakdown voltages, with an only minor breakdown voltage penalty compared to ideal abrupt p^+/N^- InGaAs/InP heterostructures. The beneficial impact of introducing low thermal resistance InP subcollectors on the transistor characteristics is considerable, leading to reduced leakage and breakdown effects caused by self-heating. The resulting stability of our DHBT's at high currents and high voltages is among the best reported to date for InP HBT's. State-of-the-art small-signal RF characteristics have been obtained for these transistors, despite of the relatively high collector doping level required in our structures to achieve high current densities, which in fact limits the high-speed performance. From these results it is concluded that in our DHBT's an excellent trade-off has been achieved between current-handling capability, base-collector breakdown and high-speed performance. Multifinger DHBT power cells thermally stabilized with emitter ballasting resistors show very high maximum collector currents and reduced current-gain collapse. These cells exhibit very good small-signal and large-signal RF performances with record RF-power densities for InP HBT's at X-band frequencies.

The excellent characteristics of the DHBT's developed in this work are exploited in several monolithically integrated driver circuits. The first is a driver for capacitive loads of ~ 5 pF designed for operating two-electrode electro-optical switches and modulators. This circuit has a low power dissipation and operates up to 2.5 Gbit/s with switching voltages in excess of 6 V. Successful operation with InGaAsP/InP Mach-Zehnder-Interferometer (MZI) optical waveguide switches has been demonstrated. The second circuit can be employed for a wide range of loads up to 25Ω and can be used for a number of photonic devices, which include laser diodes, SOA's and electro-optical modulators and switches. It is capable of delivering output voltages of 3.5 V and currents of 140 mA at bitrates up to 12 Gbit/s. The third is optimized for low impedance loads, typically $5\text{--}10 \Omega$, and very high modulation currents reaching 240 mA, which render this circuit particularly suitable for the driving of SOA gates. Operation up to 8 Gbit/s has been achieved for this circuit and successful operation with SOA gates has been demonstrated. The modulation currents of the latter two circuits are record values for monolithically integrated drivers realized in any technology at the corresponding bitrates. Applications of our driver circuits have been demonstrated with fully packaged modules combining DHBT driver circuits, optical fiber arrays and MZI waveguide switches or SOA's, respectively, which have successfully been employed in optical network demonstrators. This work constitutes an important step in the exploitation of the performance margin of the InP DHBT technology compared to other promising technologies, such as SiGe HBT's and GaAs HBT's, for high-bitrate driver circuit applications. Based on our results, we believe that InP DHBT's are likely to play a leading role for the realization of driver circuits at even higher bitrates in future optical fiber transmission systems.

Zusammenfassung

Mit den zunehmenden Übertragungsraten in der faseroptischen Kommunikation - so zum Beispiel in Transmissionssystemen mit hoher Kapazität und in schnellen Lokalnetsen - werden die Anforderungen an die elektronischen Schaltungen für die Transmission, Detektierung und Prozessierung digitaler optischer Signale immer höher. Schnelle Treiberschaltungen für optische Schalter und Modulatoren, Laserdioden und optische Halbleiterverstärker sind Schlüsselemente in solchen Systemen. Sie stellen jedoch hohe Anforderungen bezüglich der benötigten Herstellungstechnologien und Entwurfstrategien für ihre Realisierung. InP Doppel-Heterostruktur-Bipolartransistoren (DHBT), mit ihren sehr guten Hochfrequenzeigenschaften und günstigen Eigenschaften bei hohen Leistungen, sind neue und besonders interessante Bauelemente für solche Anwendungen. Diese Dissertation behandelt die Entwicklung einer fortgeschrittenen InP-DHBT-Technologie und die Evaluation des Leistungspotentials dieser Technologie für die Implementation von monolithisch integrierten Treiberschaltungen mit hohen Ausgangsströmen und -spannungen für hohe Bitraten.

Wir führten in dieser Arbeit eine neuartige InP-DHBT-Struktur ein, welche auf einer abrupten Basis-Kollektor-Heterostruktur basiert, die Komposit-Kollektor-Struktur mit δ^+ -dotierter Schicht. Eine Analyse von verschiedenen Basis-Kollektor-Heterostrukturen ergab, dass diese Struktur die Blockierung von Ladungsträgern am Basis-Kollektor-Übergang sehr effizient unterdrückt, hohe Durchbruchspannungen ergibt und relativ unkritisch bezüglich ihrer Herstellung im InP/InGaAs Materialsystem ist. Wir führten weiter eine theoretische Untersuchung besonderer physikalischer Effekte in DHBT durch, so die Blockierung von Ladungsträgern am Basis-Kollektorübergang, Hochstromeffekte und Sättigungsphänomene. Dabei ergab sich, dass DHBT ähnliche maximale Stromdichten wie Einfach-HBT aufweisen, dagegen jedoch bessere Schalteigenschaften unter Sättigungsbedingungen und kleinere Offsetspannungen haben. Aufgrund einer wichtigen Grösse für Treiberschaltungen mit relativ hohen Ausgangsspannungen - das Verhältnis von maximaler Kollektorstromdichte zu Basis-Kollektorkapazität - führten wir eine Optimierung der vertikalen Transistorstruktur durch. Dabei stellten sich moderat dotierte Kollektoren gegenüber nominell undotierten Kollektoren als überlegen heraus.

Wir entwickelten in dieser Arbeit fortgeschrittene Metallorganische-Gasphasen-Epitaxie (MOVPE) -Techniken, die optimiert sind für DHBT, welche hoch-

qualitative Heterostrukturübergänge und extrem abrupte Dotierungsprofile benötigen. Schlüsselergebnisse beinhalten sehr abrupte Basis-Dotierungsprofile mit Zn als Dotierstoff mit hohen Maximaldotierungen und sehr guter Homogenität über zwei-Zoll InP-Scheiben sowie die erste erfolgreiche Implementation von InP Subkollektoren mit tiefem thermischem Widerstand für InP-DHBT. Abnorme Zn-Diffusion über den Kick-Out Mechanismus konnte durch die Einführung von Wachstumsstopps und die Optimierung der Wachstumsbedingungen unterdrückt werden. Diese Resultate stellen einen wichtigen Beitrag dar zur Realisierung von Hochleistungs-InP-DHBT vermittelt der MOVPE-Technik, was wegen des grösseren Durchsatzvermögens dieser Methode gegenüber der Molekularstrahl-Epitaxie (MBE) -Technik von grosser Bedeutung ist. Weitere fortgeschrittene Herstellungs-Techniken, die in dieser Arbeit entwickelt wurden, sind selbst-justierende Depositionstechniken für die Emitter- und Basismetallisierungen, die Unterätzung der Basis-Kollektorstruktur zur Reduktion der Basis-Kollektorkapazität und Kontakte mit sehr geringem Übergangswiderstand für Emitter-, Basis- und Kollektorkontakte. Wir erzielten einen reproduzierbaren Prozess mit hoher Ausbeute auf zwei-Zoll InP-Scheiben und realisierten Transistoren mit einer sehr guten Langzeit-Lebensdauer.

Die experimentelle Charakterisierung unserer Transistoren ergab die folgenden Resultate: Wir erreichten InP-DHBT mit hohen maximalen Kollektorstromdichten und tiefen Sättigungsspannungen, welche beide vergleichbar sind mit den besten Werten, die publiziert wurden für Basis-Kollektorstrukturen mit variabler Materialzusammensetzung. Unsere Transistoren haben hohe Basis-Kollektor-Durchbruchspannungen mit nur geringfügig verringerten Werten verglichen mit idealen, abrupten InGaAs/InP p^+/N^- Heterostrukturen. Durch die Einführung von InP-Subkollektoren mit tiefen thermischen Widerständen werden die Leckstrom- und Durchbrucheffekte, die durch Selbst-Aufheizungseffekte verursacht werden, stark reduziert. Daraus resultiert eine ausgezeichnete Stabilität unserer Transistoren bei hohen Strom- und Spannungswerten, welche zu den besten gehört, die jemals für InP HBT publiziert wurden. Die Kleinsignal-Hochfrequenzcharakteristiken unserer Transistoren entsprechen dem aktuellen Stand der Technik für InP-DHBT, trotz der relativ hohen Kollektordotierung, welche für die geforderten hohen Kollektorstromdichten benötigt wird. Aufgrund dieser Resultate schliessen wir, dass in unseren Transistoren ein ausgezeichneter Kompromiss zwischen hoher Kollektorstromdichte, hoher Basis-Kollektordurchbruchspannung und guter Hochfrequenzcharakteristik erzielt worden ist. Mehrfinger-DHBT-Leistungselemente mit Emitter-Ballastwiderständen zur thermischen

Stabilisierung zeigen sehr hohe Maximalströme und geringe Neigung zu Stromverstärkungs-Kollaps-Effekten. Diese Leistungstransistoren haben sehr gute Kleinsignal- und Grosssignal-Hochfrequenzeigenschaften und weisen Rekord-Leistungsdichten für InP-DHBT bei X-Band-Frequenzen auf.

Das Potential unserer InP-DHBT für die Herstellung von monolithisch integrierten, schnellen Treiberschaltungen wurde anhand von drei Beispielen demonstriert: Die erste Schaltung ist ein Treiber für kapazitive Lasten von ~ 5 pF für die Ansteuerung von elektro-optischen Schaltern und Modulatoren mit zwei Elektroden. Diese Schaltung hat eine geringe Leistungsaufnahme und arbeitet bis 2.5 Gbit/s mit Schaltspannungen von mehr als 6 V. Diese Schaltung wurde erfolgreich für die Ansteuerung von InGaAsP/InP Mach-Zehnder Interferometern (MZI) eingesetzt. Die zweite Schaltung kann verwendet werden für einen grossen Bereich von Lastimpedanzen bis zu 25Ω und ist geeignet für Laserdioden, optische Halbleiterverstärker und elektro-optische Schalter und Modulatoren. Ausgangsspannungen von 3.5 V und Ausgangsströme von 140 mA bei 12 Gbit/s werden erreicht. Die dritte Schaltung ist optimiert für Lasten mit tiefer Impedanz, typischerweise $5-10 \Omega$, und sehr hohe Schaltströme von bis zu 240 mA. Diese Schaltung ist besonders geeignet für die Ansteuerung von optischen Halbleiterverstärkern. Die maximale Bitrate beträgt 8 Gbit/s. Die Schaltströme der beiden letztgenannten Schaltungen sind Rekordwerte bei den entsprechenden Bitraten, und zwar unter allen publizierten monolithisch integrierten Treiberschaltungen jeglicher Herstellungstechnologie. Komplette Module mit Glasfasern, DHBT Treiberschaltungen und MZI-Schaltern respektive optischen Halbleiterverstärkern wurden realisiert und in Demonstratoren in optischen Netzwerken erfolgreich eingesetzt.

Diese Arbeit stellt einen wichtigen Schritt dar zur Demonstration der Überlegenheit der InP-DHBT Technologie, verglichen mit anderen Technologien wie SiGe HBT und GaAs HBT, für die Realisierung von schnellen Treiberschaltungen für die faseroptische Kommunikation. Aufgrund unserer Resultat erwarten wir, dass InP-DHBT eine entscheidende Rolle spielen werden für zukünftige Transmissionsysteme bei noch höheren Bitraten.