

Diss. ETH No. 19519

Design, Characterization and Simulation of Avalanche Photodiodes

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

HEKTOR TAAVI JOSEPH MEIER

Dipl. El.-Ing. ETH
born April 6th, 1981
citizen of Aristau AG, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Wolfgang Fichtner, examiner
Prof. Dr. Bernd Witzigmann and Dr. Markus Blaser,
co-examiner

2011

Abstract

Avalanche photodiodes (APDs) are high-sensitivity, semiconductor photo-detectors. In this work, two APDs for next generation 10 Gbit/s fiber-to-the-home (FTTH) passive optical networks (PON) are designed, characterized and analyzed. Furthermore, a prototype of a 25 Gbit/s APD is presented.

The three mesa InAlAs/InGaAs separated absorption, charge and multiplication (SACM) APDs show a low breakdown voltage with a small temperature dependence. The maximal -3 dB bandwidth is 6.7 – 11.8 GHz and the gain-bandwidth product is larger than 80 GHz. The measured sensitivity of a prototype receiver at 10 Gbit/s for a BER of 10^{-9} is better than -27 dBm which makes this devices eligible for next generation 10 Gbit/s PON.

The analysis of the temperature dependence of the dark current identifies generation-recombination within the InGaAs absorber as the dominating mechanism. The dark current activation energies of APDs with avalanche and tunneling breakdown are compared. Based on S11 and S12 measurements, the impact of RC-limitations on the bandwidth is analyzed and a transit time limited bandwidth is extracted. The effect of low electric field in the absorber region on the transport of holes and the device bandwidth is analyzed. This effect concerns SACM APDs with high punch-through and low breakdown voltage.

The analysis is supported by the simulation of carrier transport within the APD in presence of fast changing, high electric fields and transport across hetero-junction band diagram energy offsets. For this purpose, a transport simulator based on the Monte Carlo (MC) method is implemented. The band structure is represented by a

spherical, non-parabolic approximation with three conduction band and three valence band valleys. The simulation results show good agreement with measurements and give insight to performance critical physics, such as carrier velocity overshoots and non-local impact ionization. The simulator allows a quantitative design optimization of future APD devices.

Zusammenfassung

Lawinenmultiplikation-Photodioden, in engl. avalanche photodiodes (APD), sind hoch sensitive, halbleiterbasierte Photodetektoren. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Entwurf, der Charakterisierung und der Analyse der nächsten Generation dieser Dioden für die Verwendung in $10^{\text{Gbit/s}}$ passiven faseroptischen Telekommunikationsnetzwerken, in engl. fiber-to-the-home (FTTH) passive optical networks (PON). Der Prototyp einer APD für $25^{\text{Gbit/s}}$ wird präsentiert.

Drei InAlAs/InGaAs Mesa-APDs mit getrennter Absorption, Ladungs- und Multiplikationsregion, in engl. separated absorption, charge and multiplication (SACM), werden präsentiert. Die Dioden zeigen tiefe Durchbruchspannung mit einer kleinen Temperatureabhängigkeit. Die maximale -3 dBe Bandbreite liegt bei $6.7 - 11.8\text{ GHz}$ und das Verstärkungsbandbreiteprodukt ist höher als 80 GHz . Die gemessene Sensitivität eines Prototypempfängers bei $10^{\text{Gbit/s}}$ für eine BER von 10^{-9} ist besser als -27 dBm . Die APD kann daher für die nächste Generation von $10^{\text{Gbit/s}}$ PON verwendet werden.

Die Analyse der Temperaturabhängigkeit des Dunkelstroms zeigt eine Dominanz der Generation-Rekombinationsmechanismen in der InGaAs Absorberregion. Ein Vergleich der Dunkelstromaktivierungsenergien für APDs mit Lawinen- und Tunneldurchbruch wird gezeigt. Basierend auf S11 und S12 Messungen wird der Einfluss der RC-Limitierung in allen drei APDs analysiert und eine transitzeitabhängige Bandbreite ermittelt. Es zeigt sich, dass ein zu kleines elektrisches Feld in der Absorberregion, zu einer suboptimalen maximalen Bandbreite

führt, da Löchern nicht mit der Sättigungsgeschwindigkeit transportiert werden. Insbesondere SACM APDs mit hoher Durchreichspannung, engl. punch-through voltage, und tiefer Durchbruchspannung, engl. breakdown voltage, sind davon betroffen.

Die Analyse der APD wird durch die Simulation des nichtgleichgewicht Transports in Präsenz von schnell ändernden, hohen elektrischen Feldern und Heteroübergängen unterstützt. Zu diesem Zweck wurde ein Trägertransport-Simulator basierend auf der Monte Carlo (MC) Methode entwickelt. Die Bandstruktur wird durch eine sphärische, nichtparabolische Näherung repräsentiert. Die Simulationsergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit den Messresultaten. Der Simulator erlaubt den Einblick in die Physik der APD. Geschwindigkeitsüberschüsse der Ladungsträger und nicht-lokale Stossionisierung werden analysiert. Dies ermöglicht die Optimierung des Entwurfs zukünftiger APDs.