

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 between APDs with avalanche and tunneling breakdown for various reverse bias voltages 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 -3dBe Bandbreite liegt bei $6.7 - 11.8\text{GHz}$ und das Verstärkungsbandbreiteprodukt ist höher als 80GHz . Die gemessene Sensitivität eines Prototypempfängers bei $10^{\text{Gbit/s}}$ für eine BER von 10^{-9} ist besser als -27dBm . 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 Durchbruchspannung, 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 und nicht-lokale Stossionisierung werden analysiert. Dies ermöglicht die Optimierung des Entwurfs zukünftiger APDs.

Contents

Abstract	v
Zusammenfassung	vii
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 Scope	2
I Design of Avalanche Photodiodes	3
2 Avalanche Photodiode	5
2.1 Fields of Application	5
2.1.1 Fiber-to-the-Home	5
2.1.2 Optical Ethernet Link	7
2.1.3 Optical Interconnects	7
2.2 Avalanche Multiplication	8
2.3 Non-local Impact Ionization	11
2.4 SACM APD	12
2.4.1 Device Structure and Fabrication	13
2.4.2 Multiplication Layer Material	15
2.4.3 Reliability and Reproducibility	16
2.5 Basic Functional Principle	17
2.6 Steady-State Characteristics	18
2.6.1 Quantum Efficiency and Responsivity	18
2.6.2 Dark and Photo Current	19

2.6.3	Punch-Through Voltage	21
2.6.4	Avalanche Breakdown Voltage	22
2.6.5	Field Control Layer	23
2.7	Sensitivity	24
2.7.1	Excess Noise Factor	24
2.7.2	Optimal Operation Point	25
2.8	Device Bandwidth	27
2.9	Transient Characteristics	28
2.9.1	RC-Limitation	28
2.9.2	Dielectric Relaxation Time	29
2.9.3	Transit Time Limitation	29
2.9.4	Avalanche Build-Up Time	32
2.10	k-Ratio Improvement	33
2.10.1	Multiplication Layer Thickness	34
2.10.2	Band Gap Engineering	34
3	APD Design	37
3.1	Design of Epitaxial Structure	37
3.2	APD Devices	39
4	Measurement Analysis Results	43
4.1	Capacitance-Voltage Characteristics	43
4.2	Stationary VI-characteristics	44
4.2.1	Definitions	44
4.2.2	Setup	45
4.2.3	Dark Current	46
4.2.4	Photo Current	48
4.2.5	Responsivity	48
4.2.6	Multiplication Gain	49
4.2.7	Breakdown Voltage Temperature Dependence	50
4.2.8	Dark Current Temperature Dependence	52
4.2.9	Dark Current Dependence on Diameter	54
4.3	Dynamic Characteristics	55
4.3.1	Frequency Domain Measurement Setup	55
4.3.2	S11 Results	56
4.3.3	S12 Results	59
4.3.4	Time Domain Measurement Setup	65
4.3.5	Rise- and Fall-Time	66

4.3.6	Rise- and Fall-Time Measurement	66
4.3.7	Sensitivity	69
4.3.8	Eye Diagram	69
4.4	Summary	72
4.4.1	Design	72
4.4.2	Analysis	72
II	Simulation of Avalanche Photodiodes	75
5	Simulation of Avalanche Photodiodes	77
5.1	Simulation Model Requirements	77
5.1.1	Non-Equilibrium Transport	77
5.1.2	Non-Local Impact Ionization	81
5.1.3	Carrier Energy	81
5.1.4	Summary	82
5.2	Boltzmann Transport Equation	83
5.3	State-of-the-art APD Simulations	85
5.4	Monte Carlo Method	87
5.4.1	Introduction	87
5.4.2	Physical Models	87
5.4.3	Statistical Enhancement	90
5.4.4	Self-Scattering Reduction	93
5.4.5	Poisson Equation	94
5.4.6	Carrier Propagation	95
5.4.7	Simulator Overview	96
6	Monte Carlo Calibration Results	101
6.1	Bulk Properties	101
6.1.1	Simulation Procedure	102
6.1.2	Bulk Mean Carrier Velocity and Energy	102
6.1.3	Bulk Impact Ionization Rate	106
6.2	PIN Diode	107
6.2.1	Simulation Procedure	107
6.2.2	Simulation Results	109

7	APD Simulation Results	115
7.1	Capacitance vs. Voltage	115
7.1.1	Introduction	115
7.1.2	CV-Fit	116
7.2	FFMC Computation Time	119
7.3	FFMC w/o Band Diagram Offset	120
7.3.1	Gain vs. Voltage	120
7.3.2	Multiplication Excess Noise	122
7.3.3	Impact Ionization Profile	123
7.3.4	Carrier Arrival Time	124
7.3.5	Gain-Bandwidth Characteristics	127
7.4	FFMC with Band Diagram Offset	130
7.4.1	Carrier Arrival Time	130
7.4.2	Gain-Bandwidth Characteristics	132
7.5	SCMC	134
7.5.1	General Remarks	134
7.5.2	Computation Time	134
7.5.3	Device A	135
7.5.4	Device B	138
7.6	Summary	142
III	Conclusion	145
8	Conclusion and Outlook	147
8.1	Conclusion	147
8.2	Outlook	148
A	MC Simulation Flow	151
B	Scattering Rate Formula	153
B.1	Polar Optical Phonon Scattering	153
B.2	Non-Polar Optical Phonon Scattering	154
B.3	Elastic Acoustic Phonon Scattering	154
B.4	Alloy Scattering	155
B.5	Impact Ionization	155
B.6	Electron Intervalley Scattering	156

C Monte Carlo Material Parameters	157
C.1 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	157
C.2 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	160
D Scattering Rates	163
E Drift-Diffusion Simulation Parameters	169
F Static Dielectric Constant	171
Bibliography	173
Curriculum Vitae	189