

ZUSAMMENFASSUNG

Empfindlichkeit und opto-elektronische Bandbreite (O/E-Bandbreite) bei der Detektion von optischen Signalen zu vereinbaren, ist die Motivation bei der Nutzung von Lawinenphotodioden (APD). In dieser Arbeit werden monolithisch integrierte Lawinenphotodioden auf Basis von InP-Substrat entwickelt, welche hohe Übertragungsraten bis zu 56 GBaud bei den typischen Wellenlängen von 1310 nm und 1550 nm ermöglichen. Es werden unterschiedliche wellenleiterintegrierte APD (WG APD) Designs hinsichtlich der epitaktischen Schichtenfolge, und der verwendeten Verbindungshalbleiter hergestellt und untersucht. Durch eine gezielte Reduktion der Verarmungsschicht, werden APD mit 3-dB Bandbreiten bis zu 39 GHz realisiert. Um einen Ausgleich zwischen hoher Bandbreite und Empfindlichkeit herzustellen, werden zwei neue Designkonzepte näher untersucht.

Als Gemeinsamkeit weisen alle entwickelten Dioden eine evaneszent koppelnde Wellenleiterstruktur und den p-Kontakt auf der substrat-nahen Seite auf (p-side down), sodass das Licht durch den p-Kontakt hindurch in die absorbierende Schicht geführt wird, um eine hohe Quanteneffizienz zu erreichen. Entsprechend dem aktuellen Kenntnisstand, ist es das erste Mal, dass dieses Konzept für wellenleiterintegrierte Photodioden demonstriert wurde.

Darüber hinaus wird ein neues epitaktisches Design demonstriert, welches das Verstärkungs-Bandbreiten-Produkt (GBP) für schnelle APDs erweitert. Die Implementierung einer nicht-absorbierenden Niederfeld-Transitschicht kann die verarmte Absorptionsschicht minimieren und ermöglicht kurze Durchlaufzeiten der Ladungsträger, ohne die RC-Begrenzung zu vermindern. Das Konzept, in dieser Arbeit als SACMCT Design bezeichnet, wird erstmals mit InAlAs-Material demonstriert.

Alle APD Typen sind bezüglich der Empfindlichkeit, der Verstärkung und der Bandbreite charakterisiert worden. Alle Eigenschaften können spannungsabhängig durch eine genaue Modellierung der elektrischen Feldverteilung innerhalb der Struktur sehr gut abgebildet werden. Die Kenngrößen der prozessierten APD mit integrierter Wellenleiterstruktur (WG APD) werden auf Designaspekte und Materialeigenschaften zurückgeführt, sodass Limitierungen und Möglichkeiten verschiedener Designs aus den Simulationsergebnissen abgeleitet werden können.

Die APD nach dem SACMCT Design zeigt mit 38 GHz eine leicht geringere maximale 3-dB Bandbreite gegenüber der 39 GHz für eine APD im konventionellem Design. Allerdings zeigt das vorgestellte SACMCT das höchste Gain-Bandbreite Produkt (GBP) mit 323 GHz, und ein Empfindlichkeits-Gain-Bandbreite Produkt (eRGBP) von 11.1 A/W GHz.

WG APD mit hoher Bandbreite, die dem SACMCT Design entsprechen, werden darüber hinaus in einem Übertragungsexperiment für 112 Gb/s evaluiert und ihr Einfluss auf die Leistungsbilanz durch den Vergleich mit herkömmlichen PIN-Photodioden bemessen.

ABSTRACT

Reconciling sensitivity and optical-to-electrical bandwidth (O/E-bandwidth) in the detection of optical signals is the motivation behind the use of avalanche photodiodes (APD). In this work, monolithically integrated avalanche photodiodes based on InP substrate are developed, which enable high transmission rates of up to 56 GBaud at the typical wavelengths of 1310 nm and 1550 nm. Different waveguide integrated (WG APD) designs are fabricated and investigated with respect to the epitaxial layer sequence, and the compound semiconductors used. By intentionally reducing the depletion layer, APDs with 3-dB bandwidths of up to 39 GHz can be realized. In order to improve the trade-off between high bandwidth and sensitivity, two novel design concepts will be investigated in more detail.

As a common feature, all developed diodes have an evanescent coupling waveguide structure and the p-contact on the side close to the substrate (p-side down), so that the light is guided through the p-contact into the absorbing layer for achieving higher quantum efficiencies. According to the current state of knowledge, it is the first time that this concept has been demonstrated for waveguide-integrated photodiodes.

Moreover, a new epitaxial design is demonstrated, which is extending the gain-bandwidth product (GBP) limitations for high-speed APD. The implementation of a non-absorbing low field transit layer can minimize the depleted absorbing region and enables short carrier times without sacrificing the RC limitation. The concept, in this work named SACMCT design, is demonstrated the first time with InAlAs material.

All APD types have been characterized in terms of sensitivity, gain and bandwidth. All properties can be reproduced very well in a voltage-dependent manner by accurately modeling the electric field distribution within the structure. The characteristics of the processed waveguide integrated APD (WG APD) are attributed to design aspects and material properties, so that limitations and possibilities of different designs can be derived from the simulation results.

The APD incorporating the SACMCT design demonstrates a marginally lower maximum 3-dB bandwidth of 38 GHz compared to the 39 GHz of an APD in the conventional design. However, the presented SACMCT shows the highest gain-bandwidth product (GBP) of 323 GHz, and a sensitivity-gain-bandwidth product (eRGBP) of 11.1 A/W GHz.

High bandwidth WG APDs in SACMCT design are further evaluated in a transmission experiment for 112 Gb/s and their impact on the power budget is compared by benchmarking against conventional PIN photodiodes.
