

## Abstract

Through the last decades, telecommunication via optical fiber has been established as the backbone of intra- as well as intercontinental networks and has therefore enabled the rapid growth of the World Wide Web. Nowadays, the Internet is experiencing a revolution by the growth of social networking, streaming services, and the emerging Internet of Things. As a result, the demand for large bandwidth rises not only in long-distance communication applications but also with regard to short and medium distances reaching from a couple of meters to a few kilometers.

Silicon-based photonics has the potential to revolutionize the optical communication application domain by offering high volume fabrication while being cost efficient at the same time. Further, it allows for the realization of complex and reliable systems. The combination of photonic functionality with microelectronics is seen as a key technology for future transceiver systems. Therefor monolithic integration is a very promising approach as it allows for the realization of fast and complex transceiver frontends as single chip solutions. This enables not only easy testing but also avoids additional assembly costs.

The photo detector (PD) is a key component in optical communication applications. It provides the conversion from the optical to the electronic domain on the receiver side. The most widely used wavelength region in communication applications lays in the near-infrared (NIR). Here, well suited light sources are available and the attenuation in the silica fiber is sufficiently low. Through the availability of optical amplifiers optical communication over long-haul distances is enabled too. Since silicon is transparent in the near-infrared wavelength region, germanium has proven to be a well suited detector material within silicon-based photonics.

In this thesis, the monolithic integration of a germanium photo detector (GePD) into a high-performance SiGe BiCMOS technology is demonstrated and discussed. The biggest integration challenge was to reach high detector performance despite certain restrictions with regard to the detector construction and fabrication which result from pursuing the goal of a modular detector integration. This means that the integration is done in a way which leaves the device parameters and yield of the BiCMOS devices nearly unchanged compared to the baseline process. In this way, the re-use of BiCMOS device models and libraries of the parent BiCMOS baseline process is enabled for the new “photonic” BiCMOS process.

The main results of this work are as follows:

1. Germanium photo detectors with bandwidths ranging from 30 to more than 70 GHz and responsivities of more than 1 A/W were modularly integrated in a state-of-the-art SiGe BiCMOS process for the first time.
2. The integrated diodes can be fabricated with sufficiently low reverse bias dark-currents and excellent yield.
3. The minority carrier diffusion effect was identified as an important limiting factor to the overall bandwidth of practical germanium photo detectors.
4. The implantation of non-doping elements was used for the first time to improve the RF performance of germanium photo detectors.
5. A novel germanium photo detector was developed which provides simultaneously a bandwidth of more than 70 GHz and a responsivity of more than 1 A/W in the C-band and around 0.8 A/W in the L-band. This is a combined performance not demonstrated before for a germanium photo detector.
6. The integration of the novel germanium photo detector in IHP’s SG25H1-based photonic BiCMOS process enabled, for the first time, the fabrication of monolithically integrated O/E receivers for data rates up to 56 Gbps.

## Zusammenfassung

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Telekommunikation über Glasfaserkabel als Rückgrat für intra- und interkontinentale Netzwerke etabliert, was letztlich das rasante Wachstum des World Wide Web ermöglicht hat. Das Internet erlebt derzeit eine Revolution, bedingt durch das Aufkommen sozialer Netzwerke, Video-on-Demand-Diensten sowie die Entwicklung des sogenannten Internets der Dinge (Internet of Things). Hierdurch steigt die Nachfrage nach höheren Bandbreiten auch für kürzere Übertragungsstrecken, also im Bereich von wenigen Metern und Kilometern.

Die Silizium-basierte Photonik hat das Potential, den gesamten Bereich der optischen Kommunikation zu revolutionieren, da sie die kosteneffiziente Fertigung komplexer, leistungsfähiger und gleichzeitig zuverlässiger Anwendungen in großen Stückzahlen ermöglicht. Die Kombination von optischer Funktionalität mit schneller Mikroelektronik wird als Schlüsseltechnologie zur Umsetzung zukünftiger Kommunikationsanwendungen gesehen. Die monolithische Integration ist ein hierfür geeigneter Ansatz. Sie ermöglicht die Fertigung von schnellen und komplexen Sender- und Empfängerschaltungen als sogenannte Ein-Chip-Lösungen, wodurch insbesondere die Montagekosten zur Verbindung separat gefertigter Chips eingespart werden können.

In optischen Kommunikationsanwendungen spielt der Fotodetektor eine besondere Rolle, da mit dessen Hilfe auf der Empfängerseite die Umwandlung der optischen in elektrische Signale erfolgt. In optischen Kommunikationsanwendungen kommen größtenteils Wellenlängen des nahen-Infrarotbereichs zur Anwendung, da für diese nur sehr geringe Dämpfungsverluste in der Glasfaser auftreten und zusätzlich optische Verstärker verfügbar sind. Silizium, als Basis für Mikroelektronik, ist in diesem Wellenlängenbereich transparent und als Detektor somit ungeeignet. Germanium hingegen ist ein sehr geeignetes Material und ermöglicht so die Fertigung von Fotodetektoren in der Silizium-basierten Photonik.

In der vorliegenden Arbeit wird die Integration eines Germanium Fotodetektormoduls in eine moderne SiGe BiCMOS Technologie präsentiert und diskutiert. Die größte Herausforderung für die Integration bestand darin, trotz gewisser Einschränkungen hinsichtlich der Konstruktion und Fertigung, die sich aus dem Ziel einer modularen Integration ergaben, leistungsfähige Fotodetektoren zu ermöglichen. Insbesondere sollten die Eigenschaften und Ausbeuten der Bauelemente der zugrundeliegenden BiCMOS Technologie möglichst unverändert bleiben, was die weitere Anwendung sämtlicher Modelle und Bibliotheken im Schaltungsentwurf in der neuen photonischen BiCMOS Technologie ermöglicht.

Die wichtigsten Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sind wie folgt:

1. Fotodetektoren mit Bandbreiten von 30 bis mehr als 70 GHz und Responsivitäten von über 1 A/W wurden erstmalig modular in eine moderne SiGe BiCMOS Technologie integriert.
2. Diese integrierten Fotodetektoren können mit ausreichend geringen Leckströmen und hervorragender Ausbeute gefertigt werden.
3. Es wurde nachgewiesen, dass die Minoritätsladungsträgerdiffusion die Bandbreite von Germanium Fotodetektoren entscheidend beeinflussen kann.
4. Erstmals wurde die Anwendung von nicht-dotierenden Elementen zur Verbesserung der Frequenzeigenschaften von Ge-Fotodetektoren demonstriert.
5. Eine neuartige Detektorstruktur wurde entwickelt, die gleichzeitig höchste Bandbreiten von über 70 GHz zusammen mit Responsivitäten über 1 A/W im C-Band und 0.8 A/W im L-Band ermöglicht. Eine derartige Kombination von Bandbreite und Responsivität wurde bisher für Ge-Fotodioden noch nicht demonstriert.
6. Die Integration des neuen Ge-Fotodetektors in den SG25H1-basierten photonischen BiCMOS des IHP ermöglichte erstmalig die Fertigung von monolithisch integrierten optischen Empfängern für Datenraten von 56 Gbps.