
Summary

This thesis describes high-speed photodiodes in standard CMOS technology which allow monolithic integration of optical receivers for short-haul communication. The electronics for (multiple users) long-haul communication is very expensive (InP, GaAs), but the usage is justified by the large number of users. For short distance communication, the number of users is small, and more cost-effective solutions were needed. An integrated optical receiver in standard CMOS technology is a viable candidate. As a result, the optical communication can be enabled directly to CMOS chips. Moreover, there is a possibility to implement matrices of optical detectors that operate on many parallel optical channels. Using parallel channels, the overall data-rate is significantly increased. An important advantage of monolithically integrated optical receiver is that ground-bounce issues and bond-wire inductance-capacitance problems are largely eliminated.

The first part of the thesis presents the advantages of optical communication in comparison with the copper-wired communication. The main disadvantage of the latter one is that at high data-rates major problems occur: poor impedance matching results in distorted signals, signal losses due to conduction and radiation losses, significant Electro-Magnetic interference noise which degrades the system performances. Using optical communication system these problems are circumvented. The main focus of the thesis is given at the receiver side; the objective was to design a low-cost Gb/s optical detector that can be easily

integrated with the rest of electronic circuitry.

As specified in the short-haul optical communication standard, the transmitted light has $\lambda = 850$ nm wavelength. However, on this wavelength the speed of the photodiodes in standard CMOS is in the low MHz range. Therefore, it is the speed limiting component in the overall Gb/s optical receiver design. This low speed is intrinsic to CMOS photodiodes, due to the occurrence of slow diffusive carriers. Designing p+/nwell photodiode (ignoring the p-substrate), the photodiode bandwidth is in the low GHz range, but the responsivity is very low: 18 dBm smaller than specified in communication standard, which makes them non-applicable for short-haul communication. On the other side, photodiodes that meet the specified responsivity have bandwidth that is two orders of magnitude too low.

A solution for increasing the bandwidth for more than two orders of magnitude is introduced in chapter 4. Using an analog equalizer, which equalizes in gain and phase the photodiode intrinsic characteristics, the bandwidth is increased more than two orders of magnitude. The presented circuit enables usage of the slow photodiodes for data-rates in the low GHz range, without reducing responsivity. The analytical analyses and a number of measurements are presented illustrating the correct operation and robustness of the proposed method. Although the presented design is for $\lambda = 850$ nm, the approach is suitable for all wavelengths in the CMOS sensitivity range from $\lambda = 400 - 850$ nm.

Samenvatting

Dit proefschrift beschrijft het ontwerp van hoge snelheids fotodiodes in een standaard CMOS technologie. Het doel is monolithische integratie van optische ontvangers voor hoge snelheids communicatie over korte afstanden.

Voor lange afstands optische communicatie waar InP en GaAs technologie wordt gebruikt worden de hoge kosten van de zender en ontvanger gerechtvaardigd door het grote aantal gebruikers.

Voor korte afstands optische communicatie is het aantal gebruikers veel kleiner, en is er behoefte aan een goedkopere oplossing. Een geïntegreerde optische ontvanger, gerealiseerd in een standaard CMOS proces is hier een haalbaar alternatief.

Behalve de voordelen van prijstechnische aard biedt een optische ontvanger in CMOS nog andere voordelen: omdat een matrix aan optische ontvangers op een IC gerealiseerd kan worden, wordt grootschalig parallelisme, teneinde de communicatiesnelheid nog verder te verhogen, mogelijk. Een ander voordeel van een geïntegreerde optische ontvanger is dat de ontvanger in de directe nabijheid van de verdere bewerkingselektronica geplaatst kan worden, en er zo veel parasitaire problemen voorkomen worden.

In het eerste deel van dit proefschrift wordt korte-afstands optische communicatie vergeleken met klassieke elektrische communicatie. Het blijkt dat optische communicatie, vooral bij hogere datasnelheden, veel voordelen biedt. Minder verlies, eenvoudiger detectie door het grotendeels uitblijven van vervorming, en

minder problemen met overspraak veroorzaakt door EM straling behoren tot de belangrijkste. De nadruk van het eerste deel ligt op de optische ontvanger; het doel was het ontwerp van een prijsgunstige Gb/s optische detector die eenvoudig met de rest van de signaalverwerkende elektronica geïntegreerd kon worden.

De standaarden voor korte-afstands optische communicatie specificeren dat het gebruikte licht een golflengte heeft van $\lambda = 850$ nm. Dit is voor een CMOS fotodiode ongunstig; gangbare ontwerpen halen een bandbreedte van slechts enkele MHz vanwege de langzame diffusie van mobiele ladingsdragers in het CMOS. De beperkte snelheid van de fotodiode is hiermee een van de belangrijkste knelpunten bij de realisatie van een Gb/s optisch communicatiesysteem in CMOS.

De bandbreedte van een CMOS fotodiode kan vergroot worden tot het lage GHz gebied door gebruik te maken van een p+/nwell fotodiode (waarbij het p-substraat genegeerd wordt), maar dit gaat ten koste van de gevoeligheid. Er zijn ontwerpen bekend die weliswaar de benodigde snelheid halen, maar met 18 dB minder gevoeligheid dan vereist. Dit maakt ze als ontvanger voor korte-afstands communicatie onbruikbaar. Aan de andere kant bestaan er fotodiodes die wel de vereiste gevoeligheid bezitten, maar een bandbreedte die twee ordes van grootte te klein is.

In hoofdstuk vier presenteren we een oplossing die tegelijkertijd aan de bandbreedte en aan de gevoeligheidseis voldoet. Met behulp van een analoge equalizer die de amplitude en fasekarakteristiek van de fotodiode compenseert, blijken we de bandbreedte van de fotodiode met meer dan twee ordes van grootte te kunnen vergroten, zonder dat dit ten koste gaat van de gevoeligheid. Hiermee is de gepresenteerde schakeling geschikt voor gebruik tot snelheden van een paar GHz.

Aan de hand van zowel een analytische beschouwing als meetresultaten wordt gedemonstreerd dat de gepresenteerde oplossing naar behoren functioneert en ook robuust is. Hoewel het huidige prototype werkt op $\lambda = 850$ nm, is de methode geschikt voor alle golflengten waar CMOS gevoelig is, van $\lambda = 400 - 850$ nm.



Biography

Saša Radovanović was born on August 11, 1974, in Peć, Serbia. He received the Graduate engineer degree in 1997 and M.Sc. degree in 2000 at the University of Niš, Serbia. In January 2000, he joined the IC-design group of the MESA+ Research Institute, University of Twente, The Netherlands, where he received his PhD degree in December 2004. He is currently working with National Semiconductor BV, Delft, The Netherlands. His research interest include design of high-frequency transmitters and receivers for optical storage and optical communication systems.

