

# MICRO-ELECTRONIC LIGHT SENSORS

Light is the most important medium through which we humans perceive our world. The predominant part of all sensory input we use for orienting ourselves in our environment and for communicating with other human beings is received visually. Through our eyes, we can sense the spatial distribution and temporal variations of the intensity and color of the ambient light. From this stream of information, our brain derives conclusions about distances, motion and properties of objects and decodes the contents of written and symbolic modes of communication. Consequently, for the ubiquitous electronic information and automation technologies that shape our life today, light plays a major role as information carrier for man-machine and machine-to-machine communication.

## Photodiodes in Electronic Devices

Light-based electronic sensors and communication systems require both light-emitting components, such as LEDs or displays, as well as devices called photodiodes, which are capable of converting light signals into electrical signals for further processing. It may not always be as obvious as in the case of the megapixel image sensors built into digital cameras: light sensors – consisting of photodiodes and electronic readout circuits – can nowadays be found in a wide variety of industrial and consumer devices, such as TV remote controls, DVD players, home cinema systems, notebooks, or mobile phones. As these devices are continually becoming smaller, more powerful, more energy-efficient, and cheaper at the same time, the performance requirements for light sensors keep increasing proportionally. Electronic light sensors have to be integrated in ever less space and offer higher sensitivity and switching speed while consuming less power. To ensure cost-efficient mass production, they should be manufactured using standard fabrication processes for silicon integrated circuits.



©IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.

## Optimization of Integrated Photodiodes

Within in an industrial collaborative research project supported by the federal state of Thuringia, IMMS and X-FAB Semiconductor Foundries AG jointly developed methods for integrating photodiodes efficiently into existing low-cost CMOS and BiCMOS processes for the production of microelectronic circuits. The aim of this project was to optimize the light sensitivity and switching speed of silicon photodiodes over a wide spectral range from red light to blue light. A photo detector integrated circuit, or PDIC (which is the type of laser light sensor used in PC data drives for reading and writing Blu-ray Discs, DVD, and CD media), was chosen as a particularly challenging lead application for demonstrating the industrial practicability of the research results. Based on the first results on photodiode process integration, a PDIC for high-speed Blu-ray Disc drives was designed by IMMS during the first project year and manufactured successfully by X-FAB (see the Annual Report 2009 for a detailed description of the PDIC).

## Further Applications for Light Sensors

During the second and final year of the project, further application areas for CMOS-based light sensors have been explored, some of which differ greatly from Blu-ray Disc PDICs in terms of the corresponding technical requirements. In this context, an integrated receiver for fiber-optical data communication with bit rates of greater than 100 MBit/s as well as an ambient light sensor (ALS) have been developed. The ALS evaluates the brightness of the ambient light according to the characteristic of the human eye and can be used in applications such as smart building lighting systems or mobile displays for controlling – and reducing – energy consumption (see page 46 in this publication). While the primary requirement for Blu-ray Disc PDICs and optical data receivers is high switching speed, the focus during the development of an ambient light sensor is on matching its spectral responsivity to that of the human eye as well as on energy efficiency. Switching speed plays only a secondary role. Within the framework of the project, functional solutions based on monolithically integrated photodiodes and CMOS/BiCMOS readout circuits were demonstrated successfully for all considered applications.

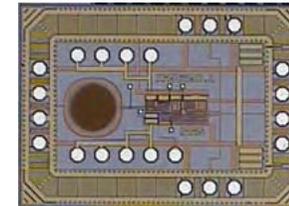


Figure 1: Integrated optical receiver D3005A

## Measurement Technology for Characterization and Modeling of Photodiodes

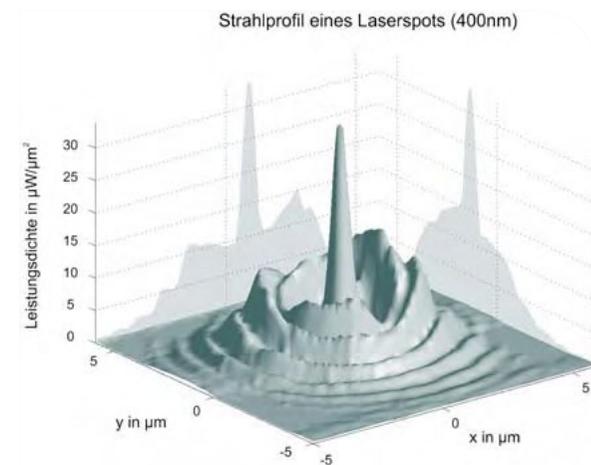


Figure 2: Beam profile of the laser image on the wafer ( $\lambda = 400$  nm)

In addition, IMMS focused on methodology development for measuring and modeling the characteristics of optoelectronic devices and circuits, which is a prerequisite for the design of integrated light sensors in an industrial setting. The physical behavior of photodiodes and sensor circuits must be measured precisely and modeled mathematically to provide circuit designers with accurate simulation models for the basic components from which integrated light sensors can be constructed. Precise characterization of optoelectronic devices also requires very good knowledge of the characteristics of the measurement rig setup itself.

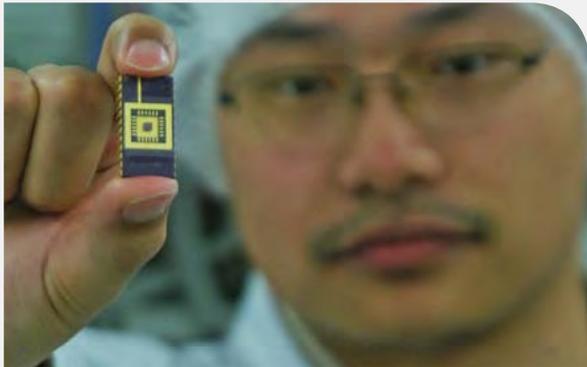


Figure 3: Optimization of micro-electronic circuits at the IMMS

Parameters such as the diameter and brightness profile of the laser beam used to stimulate the photodiodes, as well as the properties of the materials used to fabricate the devices under test, have great influence on the precision of the measurement results.

To quantify and understand these influence factors one at a time, a set of test structures for the characterization of photodiodes and laser beam profiles have been developed using several semiconductor manufacturing processes from X-FAB. With the measurement results thus obtained, the optical measurement rig was calibrated and, subsequently, used to determine the characteristics of the optoelectronic components and circuits developed within the project with the desired accuracy.

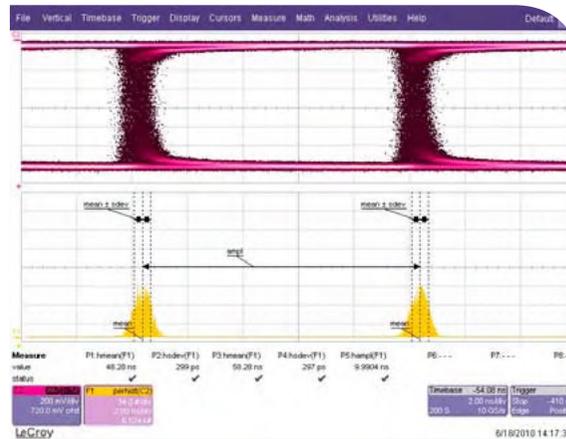


Figure 4: Measured eye diagram for 100 Mbps PRBS pattern

## Innovative Sensor Systems

Over the course of the project, the institute's existing skills in design, simulation and test of integrated CMOS light sensors have been enhanced significantly. The know-how gained during the development and characterization of the demonstrator circuits (PDIC, data receiver, ALS) can be transferred to further application areas such as industrial sense-and-control or biomedical systems. It will enable IMMS to offer a wider range of R&D services for innovative optoelectronic sensor system solutions in these and related fields. Project partners are invited to share IMMS's experiences and service offerings within national and international R&D collaboration programs.

Project title: "Modeling and optimization of photodiodes and DVD front end amplifier circuits"

Short title: TAB DVD photo diode

Grant no.: 2006 VF 0046

## Contact:

**Dr.-Ing. Eckhard Hennig**

eckhard.hennig@imms.de

# MIKROELEKTRO- NISCHE LICHT- SENSOREN

Licht ist für uns Menschen das wichtigste Medium zur Wahrnehmung unserer Umwelt. Den überwiegenden Teil aller Sinneseindrücke, die wir zur Orientierung in unserer Umgebung und zur Kommunikation mit anderen Menschen nutzen, erhalten wir auf dem visuellen Weg. Über unsere Augen erfassen wir die räumliche Verteilung und zeitliche Änderung von Intensität und Farbe des Umgebungslichts und gewinnen daraus Erkenntnisse über die Distanzen, Bewegungen und Eigenschaften von Objekten sowie über die Inhalte schriftlicher und symbolischer Kommunikationsformen. In unserem von elektronischer Informations- und Automatisierungstechnik geprägten Leben spielt daher der Umgang mit Licht als Informationsträger für die Kommunikation zwischen Menschen und elektronischen Geräten, von Geräten untereinander und für die Maschine/Umwelt-Interaktion eine bedeutende Rolle.



## Fotodioden im Alltag

Lichtbasierte elektronische Messwert-Erfassungs- und Kommunikationssysteme erfordern sowohl Licht aussendende Komponenten, z. B. Leuchtdioden oder Displays, als auch Bauelemente namens Fotodioden, die Lichtsignale empfangen und zu ihrer Weiterverarbeitung in elektrische Signale umsetzen können. Auch wenn es nicht immer so offensichtlich ist wie im Fall der Megapixel-Bildsensoren in Digitalkameras: Lichtsensoren – bestehend aus Fotodioden und elektronischen Schaltungen zu deren Auswertung – finden sich heute in einer Vielzahl von Alltagsgeräten, wie zum Beispiel TV-Fernbedienungen, DVD-Spielern, Heimkino-Anlagen, Notebooks oder Mobiltelefonen, wieder. In dem Maße, wie diese Geräte gleichzeitig kleiner, leistungsfähiger, energieeffizienter und preiswerter werden sollen, steigen auch die entsprechenden Anforderungen an die Lichtsensoren. Auch sie müssen auf immer engerem Raum integriert werden, hohe Empfindlichkeit und Schaltgeschwindigkeit aufweisen und dabei wenig Strom aufnehmen. Im Hinblick auf eine ökonomische Serienproduktion sollten die Sensoren dabei möglichst ausschließlich unter Verwendung von Standard-Fertigungsprozessen für Halbleiterschaltungen auf Basis des Materials Silizium hergestellt werden.

© IMMS GmbH. Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.

## Optimierung integrierter Fotodioden

Im Rahmen eines vom Land Thüringen geförderten industriellen Verbundforschungsprojekts wurde in Zusammenarbeit mit der X-FAB Semiconductor Foundries AG untersucht, wie sich Fotodioden effizient in bestehende, kostengünstige CMOS- und BiCMOS-Prozesse zur Fertigung mikroelektronischer Schaltungen integrieren lassen. Ziel des Projekts war es dabei, die Lichtempfindlichkeit und Schaltgeschwindigkeit von Silizium-Fotodioden über ein weites Farbspektrum von langwelligem roten bis hin zu kurzwelligem blauen Licht zu optimieren und die Anwendbarkeit der Forschungsergebnisse in industriellen Applikationen nachzuweisen. Als besonders herausfordernde Leitanwendung wurden hierzu Lichtsensoren gewählt, wie sie in Computeraufwerken zum Lesen und Beschreiben von Blu-ray Disc-, DVD- und CD-Medien eingesetzt werden. Auf der Grundlage der ersten Zwischenresultate aus der Fotodiodenentwicklung wurde im ersten Projektjahr ein Fotodetektor (PDIC) für Hochgeschwindigkeits-Blu-ray-Disc-Laufwerke am IMMS entworfen und von X-FAB erfolgreich gefertigt; hierüber wurde bereits im Jahresbericht 2009 ausführlich berichtet.

## Weitere Anwendungen für Lichtsensoren

Im abschließenden zweiten Projektjahr wurden weitere Anwendungsfelder für CMOS-Lichtsensoren erschlossen, die sich in Bezug auf die Anforderungen an die Fotodioden z. T. erheblich von der Applikation Blu-ray Disc unterscheiden. So wurden unter anderem ein integrierter Empfänger für die faseroptische Datenkommunikation mit Datenraten von 100 MBit/s sowie ein Ambient Light Sensor (ALS) entwickelt. Der ALS bewertet die Helligkeit des Umgebungslichts nach dem Empfinden des menschlichen Auges und kann damit zur Einsparung von Energie bei der Beleuchtung von Räumen oder Displays beitragen (siehe Seite 46 in dieser Publikation). Während Blu-ray-Disc-PDICs und Datenempfänger in erster Linie hohe Schaltgeschwindigkeiten erfordern, kommt es bei einem Umgebungslichtsensor hingegen auf eine auf die Farbwahrnehmung des menschlichen Auges abgestimmte spektrale Empfindlichkeit sowie auf sehr geringen Energiebedarf der Schaltung an. Die Schaltgeschwindigkeit spielt hier nur eine untergeordnete Rolle. Im Rahmen des Projekts konnten für alle betrachteten Anwendungsfälle funktionsfähige Lösungen auf der Basis monolithisch integrierter Fotodioden und CMOS/BiCMOS-Auswerteschaltungen demonstriert werden.

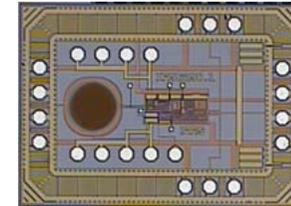


Abbildung 1: Integrierter optischer Datenempfänger D3005A

## Messtechnik zur Charakterisierung und Modellierung von Fotodioden

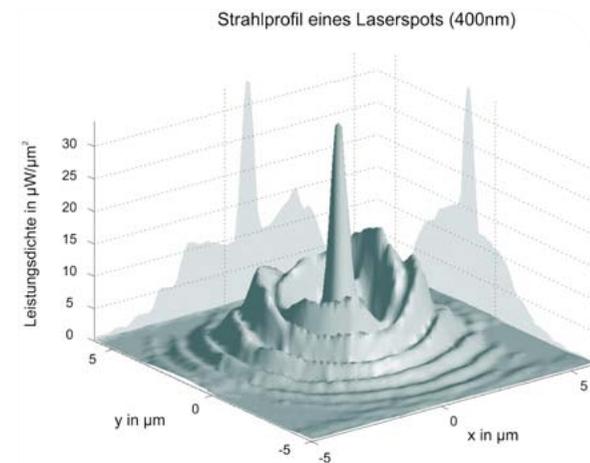


Abbildung 2: Strahlprofil der Laserabbildung auf dem Wafer ( $\lambda = 400 \text{ nm}$ )

Darüber hinaus konzentrierten sich die Arbeiten des IMMS auf die für den industriellen Entwurf von Lichtsensoren notwendige Methodik zur Messung und

Modellierung der Eigenschaften optoelektronischer Bauelemente und Schaltungen. Zur Unterstützung des Entwurfs ist es erforderlich, das physikalische Verhalten von Fotodioden und Sensorschaltungen genau zu vermessen und in mathematischen Modellen nachzubilden, die Schaltungsentwickler zur Simulation ihrer Entwürfe verwenden können. Eine präzise Vermessung optoelektronischer Bauelemente erfordert aber auch eine sehr gute Kenntnis der Eigenschaften der Messapparatur selbst. So muss unter anderem genau bekannt sein, welchen Durchmesser und welche Helligkeitsverteilung der zur Beleuchtung der Fotodioden verwendete Laserstrahl hat und welchen Einfluss die auf dem zu vermessenden Chip verarbeiteten Materialien auf die Präzision der Messergebnisse haben.

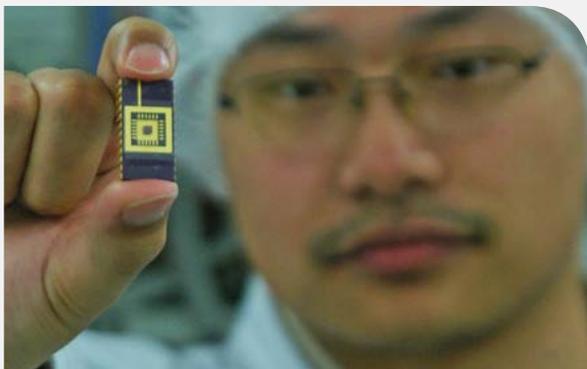


Abbildung 3: Optimierung mikroelektronischer Schaltungen am IMMS

Um diese Fragen jeweils gezielt beantworten zu können, wurden mehrere Teststrukturen für die Charakterisierung von Fotodioden und Laserstrahlprofilen in diversen Fertigungsprozessen der X-FAB entworfen und vermessen. Mit Hilfe der Resultate konnte die optische Messtechnik kalibriert werden, so dass anschließend die präzise Bestimmung der Eigenschaften der im Projekt entworfenen optoelektronischen Bauelemente und Schaltungen erfolgen konnte.

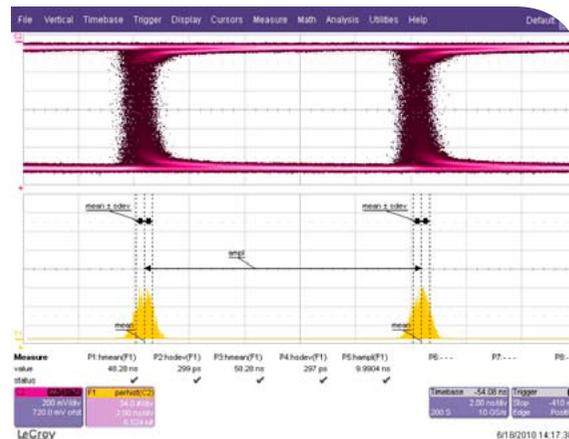


Abbildung 4: Gemessenes Augendiagramm des Datenempfängers D3005A für PRBS-Muster bei 100 MB/s

## Innovative Sensorik-Systeme

Im Verlauf des Projekts konnten die am IMMS bereits vorhandenen Kompetenzen im Entwurf, in der Simulation und im Test von integrierten CMOS-Lichtsensoren weiter erheblich ausgebaut werden. Das bei der Entwicklung und der Charakterisierung der Demonstrator-schaltungen (PDIC, Datenempfänger, ALS) gewonnene Know-how lässt sich auf weitere Anwendungsfelder übertragen und ermöglicht innovative Sensorik-Systemlösungen u. a. im Bereich der industriellen Mess-, Steuer- und Regelungstechnik, der Medizintechnik und der Bioanalytik. Die hiermit verbundenen Erfahrungen und Leistungen stellt das IMMS nationalen und internationalen Projektpartnern im Rahmen von Forschungs-kooperationen zur Verfügung.

Förderprojekt: "Modellierung und Optimierung von Fotodioden und DVD-Front-End-Verstärkerschaltungen"

Kurztitel: TAB DVD Fotodiode

Förderkennzeichen 2006 VF 0046

## Kontakt:

**Dr.-Ing. Eckhard Hennig**

eckhard.hennig@imms.de