

Diss. ETH No. 14038

# Large-Area Photosensing in CMOS

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES

presented by

Teddy Loeliger

Dipl. El.-Ing. ETH  
born January 23, 1969  
citizen of Münchenstein, BL

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. H. Jäckel, examiner  
Prof. Dr. P. Seitz, co-examiner

2001

# ABSTRACT

The demand for highly developed photosensors to replace and automate information sensing and processing of the human eye is steadily increasing in every domain of modern life. Beside classical imaging, the wide range of applications with large photosensing area is continuously expanding and numerous specific applications are becoming more and more important, e.g. optical spectrometry applications such as environmental control. Photodetectors in CMOS technology with on-chip analog and digital signal processing circuitry provide high functionality and offer cost efficient miniaturized system-on-a-chip solutions. In this work large-area photosensing in CMOS technology is addressed. Large photosensing area generally implies high photodetector capacitance and is a challenge for high speed and noise performance. Therefore different photodetector types, system architectures and operating modes are investigated with respect to speed, dynamic range, resolution, sensitivity, chip area and power consumption.

First, a generic model for integrating sampled-data photosensing is introduced and implemented in a corresponding software tool, thus providing noise and performance analysis. Various signal processing techniques are considered, such as the use of a bias current, a bandwidth limiting filter, ramp analog-to-digital converters (ramp ADCs), correlated double sampling (CDS) and averaging. Different ramp ADC concepts are distinguished and the noise transfer characteristic of a ramp ADC using a comparator with fixed level is investigated, which is known in the literature as the level-crossing problem or the first passage time problem. The effect of CDS on  $1/f$  noise is analyzed and a simple approximation for first-order low-pass filtered  $1/f$  noise after correlated double sampling is found. The noise performance of integrating sampled-data photosensing systems is determined with respect to the model parameters. The derived relations show that high performance with respect to thermal noise and  $1/f$  noise requires low photodetector capacitance.

Next, the basic photodetectors and architectures for large-area photosensing in CMOS technology are classified, realized and characterized. The basic photodetectors are the different types of photodiodes and the photogate. The basic photosensing architectures are the combinations of these photodetectors with the different types of integrators, which are the passive and the active integrator. Further array arrangements of the basic architectures such as active pixel sensors (APS) and photodiode arrays are investigated. Charge-coupled devices (CCDs) are discussed, but they are not realizable in the current CMOS technology. The realizable architectures are implemented in a modern  $0.6 \mu\text{m}$  CMOS process and compared with respect to the different performance parameters.

Then, advanced photodetectors and architectures for large-area photosensing in CMOS technology are developed. After investigating the charge transport in photogates, the sweep photogate concept is presented, which combines the low photodetector capacitance of photogates with fast charge transport and yields low noise and high speed. Different improved photogates are realized and characterized confirming the sweep photogate concept. The realized  $500 \mu\text{m}$  long shifted sweep photogate is about two decades faster than the standard photogate of the same length. Further current-mode architectures for low-voltage operation and speed and noise improvement are discussed and the photodiode current source and the current-mode transintegrator are introduced. The photodiode current source provides separation of the photodetector capacitance and the integration capacitance resulting in high speed. The current-mode transintegrator is a low-noise integrating amplifier stage with adjustable gain that yields high speed and improved noise performance. Cascode configurations such as the proposed improved regulated cascode circuit are used to improve precision, chip area and power consumption. The realized photodiode current source with current-mode transintegrator achieves noise-equivalent optical power densities in the range of  $10 \text{ nW/m}^2$  at measurement times of  $10 \text{ s}$  with a photodetector area of  $30 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ .

The integrating sampled-data photosensing model and the corresponding software are powerful tools for the design of future advanced large-area photosensing systems. The sweep photogate concept is a promising approach for improved noise performance of applications with moderate speed requirements, e.g. in optical spectrometry. Current-mode architectures are superior in different concerns, e.g. in very high speed applications such as in fiber optic transmission systems. The low-noise current-mode transintegrator with its high transfer coefficient is particularly suitable to low-level applications that do not require high resolution, e.g. for IR remote control applications.

# KURZFASSUNG

Der Bedarf an hochentwickelten Photosensoren, um die Aufnahme und Verarbeitung von Informationen durch das menschliche Auge zu ersetzen und zu automatisieren, nimmt täglich in allen Lebensbereichen stetig zu. Neben herkömmlicher Bildaufnahme vergrössert sich der breite Bereich von Anwendungen mit grosser photoempfindlicher Fläche fortlaufend, und zahlreiche spezifische Anwendungen werden immer wichtiger, wie zum Beispiel Anwendungen optischer Spektrometrie in der Umgebungsüberwachung. Photodetektoren in CMOS-Technologie mit auf dem gleichen Chip integrierter analoger und digitaler Signalverarbeitung bieten hohe Funktionalität und ermöglichen kostengünstige miniaturisierte “system-on-a-chip”-Lösungen.

In dieser Arbeit wird grossflächige Photosensorik in CMOS-Technologie behandelt. Grosse photoempfindliche Fläche bedeutet üblicherweise hohe Photodetektorkapazität und stellt eine Herausforderung an gutes Geschwindigkeits- und Rauschverhalten dar. Deshalb werden verschiedene Arten von Photodetektoren, Systemarchitekturen und Betriebsarten hinsichtlich Geschwindigkeit, Dynamik, Auflösung, Empfindlichkeit, Chip-Fläche und Leistungsverbrauch untersucht.

Zuerst wird ein generisches Modell für integrierende abgetastete Photosensorik eingeführt und in einem entsprechenden Anwendungsprogramm implementiert, was Rausch- und Leistungsauswertungen ermöglicht. Berücksichtigt werden verschiedenartige Signalverarbeitungsmethoden wie die Verwendung eines Grundstromes, ein bandbegrenzendes Filter, Rampen-Analog-Digital-Wandler (Rampen-“analog-to-digital converters”, Rampen-ADCs), korrelierte Doppelabtastung (“correlated double sampling”, CDS) und Mittelwertbildung. Verschiedene Konzepte von Rampen-ADCs werden unterschieden und das Rauschübertragungsverhalten eines Rampen-ADCs mit einem Komparator mit fester Vergleichsschwelle wird beleuchtet, was in der Literatur als “level-crossing”- oder “first passage time”-Problem bekannt ist. Die Auswirkung von

CDS auf 1/f-Rauschen wird untersucht und eine einfache Näherung für mit einem Tiefpass erster Ordnung gefiltertes 1/f-Rauschen nach CDS wird gefunden. Das Rauschverhalten integrierender abgetasteter Photosensoriksysteme mit Bezug auf die Modellparameter wird bestimmt. Die hergeleiteten Beziehungen zeigen, dass günstiges Verhalten hinsichtlich thermischem und 1/f-Rauschen tiefe Photodetektorkapazität erfordert.

In der Folge werden die grundlegenden Photodetektoren und Architekturen für grossflächige Photosensorik in CMOS-Technologie klassifiziert, realisiert und charakterisiert. Die grundlegenden Photodetektoren sind die verschiedenen Arten von Photodioden und das Photogate. Die grundlegenden Photosensorikarchitekturen sind die Kombinationen dieser Photodetektoren mit den verschiedenen Arten von Integratoren, welche der passive und der aktive Integrator sind. Weiter werden Array-Anordnungen der grundlegenden Architekturen wie Aktiv-Pixel-Sensoren ("active pixel sensors", APS) und Photodioden-Arrays untersucht. Ladungsgekoppelte Elemente ("charge-coupled devices", CCDs) werden behandelt, aber sie sind nicht realisierbar in der aktuellen CMOS-Technologie. Die realisierbaren Architekturen sind in einem modernen  $0.6 \mu\text{m}$ -CMOS-Prozess implementiert und werden hinsichtlich der verschiedenen Leistungsmerkmale verglichen.

Dann werden fortgeschrittene Photodetektoren und Architekturen für grossflächige Photosensorik in CMOS-Technologie entwickelt. Nach der Untersuchung des Ladungstransports in Photogates wird das Konzept des Sweep-Photogates vorgestellt, welches die tiefe Photodetektorkapazität von Photogates mit schnellem Ladungstransport vereint und somit tiefes Rauschen und hohe Geschwindigkeit ergibt. Das realisierte  $500 \mu\text{m}$  lange Schieberegister-Sweep-Photogate ist etwa zwei Dekaden schneller als das gleich lange einfache Photogate. Weiter werden Architekturen im Strombereich für tiefe Versorgungsspannungen und verbessertes Geschwindigkeits- und Rauschverhalten behandelt und die Photostromquelle und der Strombereich-Transintegrator werden eingeführt. Die Photostromquelle ermöglicht eine Trennung der Photodetektorkapazität und der Integrationskapazität, was hohe Geschwindigkeit bringt. Der Strombereich-Transintegrator ist eine rauscharme integrierende Verstärkerstufe mit einstellbarer Verstärkung, was hohe Geschwindigkeit und verbessertes Rauschverhalten ergibt. Kaskoden-Schaltungen wie die verbesserte regulierte Kaskode werden zur Verbesserung von Genauigkeit, Chip-Fläche und Leistungsverbrauch verwendet. Die realisierte Photostromquelle mit Strombereich-Transintegrator erreicht rauschäquivalente optische Leistungsdichten im Bereich von  $10 \text{ nW/m}^2$  bei Messzeiten von  $10 \text{ s}$  mit einer

Photodetektorfläche von  $30 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ .

Das Modell für integrierende abgetastete Photosensorik und das entsprechende Anwendungsprogramm sind leistungsfähige Werkzeuge für den Entwurf von zukünftigen fortgeschrittenen grossflächigen Photosensoriksystemen. Das Konzept des Sweep-Photogates ist ein vielversprechender Ansatz für verbessertes Rauschverhalten bei Anwendungen mit mässigen Geschwindigkeitsanforderungen, wie zum Beispiel in optischer Spektrometrie. Architekturen im Strombereich sind in verschiedener Hinsicht überlegen, zum Beispiel in sehr schnellen Anwendungen wie in faseroptischen Übertragungssystemen. Der rauscharme Strombereich-Transintegrator mit seinem hohen Übertragungsmass ist besonders geeignet für Kleinstsignalanwendungen, welche keine hohe Auflösung benötigen, wie zum Beispiel für Infrarot-Fernbedienungen.