

7 Zusammenfassung und Ausblick

Integrierte Bildsensoren werden heutzutage in großer Stückzahl im Konsumerbereich in Videokameras, digitalen Fotokameras oder beispielsweise Scannern eingesetzt. Hierbei wird größtenteils auf die seit Anfang der 70er Jahre immer mehr weiterentwickelte CCD-Technologie zurückgegriffen. Diese Technologie ist eigens auf integrierte Bildsensoren spezialisiert und wird von nur wenigen Firmen auf der Welt beherrscht. Die Möglichkeit, komplexe Elektronik auf dem Chip mitzuintegrieren, ist hier allerdings nicht gegeben. Zur Ansteuerung von CCD-Bildsensoren sind z.T. hohe Spannungspegel und hohe Leistungsaufnahmen nötig, da die Steuerungseingänge von CCD-Chips große kapazitive Lasten darstellen, was die Entwicklung von Systemen mit immer geringeren Versorgungsspannungen und Leistungsverbrauch beeinträchtigt. Mit zunehmendem Maße der Prozeßminiaturisierung stellen CMOS-Bildsensoren eine ernstzunehmende Alternative zu CCD-Bildsensoren dar. Die CMOS-Technologie ist wesentlich verfügbarer als die CCD-Technologie und entwickelt sich zu immer niedrigeren Versorgungsspannungen und kleineren Strukturgeometrien hin. Darüber hinaus können in der CMOS-Technologie die Photosensoren zusammen mit weiteren elektronischen Komponenten zu komplexeren Bildsensorsystemen auf einem Chip integriert werden. Bei zweidimensionalen Photosensorarrays trifft dies jedoch nur eingeschränkt zu, da komplexere Elektronik nur sinnvoll am Rande des Photosensorarrays integrierbar ist. Im Falle eindimensionaler Photosensorarrays, welche auch den Schwerpunkt dieser Arbeit bilden, steht die zweite auf dem Chip verfügbare Dimension für eine Mitintegration von weiterer Elektronik auch direkt an den Photosensorelementen zur Verfügung. Werden diese Möglichkeiten sinnvoll ausgenutzt, führt dies insbesondere für spezielle Anwendungen zu kostengünstigen, kompakten und robusten Bildsensorsystemen.

Die vorliegende Arbeit schafft zunächst die Basis für das Verständnis der in der CMOS-Technologie zur Verfügung stehenden Photosensoren. Ein wichtiger Beitrag dazu ist neben den physikalischen Grundlagen die Definition der beschreibenden Parameter eines Photosensors oder eines Photosensorarrays. Ein einfach handhabbares analytisches Modell für die verschiedenen Photodioden bildet auch die Grundlage für das Modell des bipolaren (parasitären) Phototransistors sowie des sog. Photo-MOSFET mit nichtkontaktierter Wanne. Bei der Modellierung wurde zwischen oberflächennahen lateralen pn-Übergängen und tieferliegenden vertikalen pn-Übergängen unterschieden. Nicht vernachlässigbare Oberflächeneffekte, die auf Dunkelströme oder den spektralen Empfindlichkeitsverlauf der Photosensoren Einfluß nehmen, wurden als empirisch ermittelte Größen in die Modelle der Photosensoren eingefügt. Für das immanente zeitliche Verhalten der verschiedenen Photostromanteile eines pn-Überganges wurden Abschätzungen gemacht. Die so beschriebenen Modelle der Photosensoren sind in die Simulationsumgebung im CADENCE-

Design-Framework eingebettet und stehen so im FhG-IMS zur Simulation zusammen mit rein elektronischen Bauelementen zur Verfügung.

Der Photo-MOSFET, ein bis dahin wenig beachteter Photosensor, weist bemerkenswerte Eigenschaften auf. Während die Photodiode im Kurzschlußbetrieb zwar den wesentlich schnelleren Photosensor darstellt, zeichnet sich der Photo-MOSFET durch seine hohe Empfindlichkeit und das hohe Maß an Flexibilität wegen der Möglichkeit der Arbeitspunkt-einstellung am Gate aus. Für sehr geringe Bestrahlungsstärken wirkt der Photo-MOSFET im Bereich der starken Inversion als eine Art Photomultiplier mit gemessenen Empfindlichkeiten, die bis zu 10^6 mal höher liegen, als die einer Photodiode. In diesem Arbeitsbereich besitzt der Photo-MOSFET eine logarithmische Transfer-Charakteristik mit einem großen Dynamikbereich von über 140dB. Es wurde experimentell keine Möglichkeit gefunden (trotz dem Einsatz eines fokussierten Lasers), diesen Photosensor in einen Sättigungszustand zu bringen. Der große Dunkelstrom in starker Inversion sollte allerdings für einen effektiven Betrieb kompensiert werden. Im Arbeitsbereich der schwachen Inversion besitzt der Photo-MOSFET eine näherungsweise lineare Transfer-Charakteristik, wobei die Empfindlichkeit größer und der verbleibende Dunkelstrom geringer als bei einer Photodiode ist. Das Fixed-Pattern-Noise ist jedoch deutlich höher als das von Photodioden bei vergleichbaren Bauelementabmessungen. Daher ist der Photo-MOSFET nur für eindimensionale Photosensorarrays sinnvoll einsetzbar, bei der das Bauelement ausreichend groß dimensioniert werden kann und der Abstand der Photosensorelemente für hohe Ortsauflösungen genügend klein bleibt. Der parasitäre bipolare Phototransistor besitzt keine wesentlichen Vorteile, wenn in der CMOS-Technologie die Photodiode als schneller und der Photo-MOSFET als empfindlicher Photosensor zur Verfügung stehen.

Für allgemeine Photosensorelemente wurden Schaltungen für die Auslese von Spannungs- oder Stromsignalen vorgestellt, die auch zur Signalvorverarbeitung dienen können. Hier wurde bewußt auf die Vorstellung von Operationsverstärkern und SC-Schaltungen (Switched Capacitor) verzichtet, da diese Schaltungen ausreichend häufig in der Literatur analysiert und beschrieben sind und sie wesentlich mehr Flächenbedarf aufweisen als die in dieser Arbeit gezeigten. In den vorgestellten Ausleseschaltungen für Photosensoren, aber auch bei Treiberschaltungen zur Signalausgabe, kann man den nichtimplantierten NIMOS-Transistor mit seiner niedrigen Schwellenspannung vorteilhaft ausnutzen.

Mit Hilfe eines Laser-Scan-Mikroskops kann man die mikroskopische Apertur einzelner Photosensorelemente sehr genau bestimmen. Ist diese bekannt, ist das Verhalten des Photosensorarrays bezüglich der Bildaufnahmeeigenschaften (für die gemessene Lichtwellenlänge) vollständig charakterisiert. Man kann die mikroskopische Apertur eines Photosensorelementes durch Wahl der Photosensorgeometrie, die gezielte Verwendung von lateralen und vertikalen pn-Übergängen oder gezielte Abblendung durch Metall bzw. Polysilizium

manipulieren, so daß man für gegebene Bild- und Abbildungseigenschaften, z.B. zur Vermeidung von Unterabtastung, optimale Lösungen finden kann.

Die charakterisierten Photosensoren und Schaltungen zur Auslese und Signalausgabe stellen eine Art Werkzeugkasten dar, mit dem man leistungsfähige integrierte Bildsensoren entwickeln und auf gegebene Problemstellungen anpassen kann. Einige Anwendungen für eindimensionale Bildsensoren wurden vorgestellt, bei denen jeweils unterschiedliche Anforderungen an die Photosensoren gestellt sind. Zudem wurden konkrete Realisierungsbeispiele für integrierte Bildsensoren vorgestellt:

- Ein flexibel programmierbares Bildsensorensystem mit massiv paralleler Bildvorverarbeitungselektronik (jedes Photosensorelement besitzt einen eigenen analogen Prozessor), welches für verschiedene Anwendungen einsetzbar ist.
- Ein Bildsensorensystem mit zwei Photosensorarrays und digitalem Korrelationsprozessor zur automatischen Fokussierung von Spiegelreflexkameras.
- Ein berührungslos arbeitendes, auf dem Ortsfilterprinzip basierendes integriertes Bildsensorensystem zur Geschwindigkeitsmessung, welches zeitkontinuierlich im "Current-Mode" arbeitet und ein bandpaßförmiges Signal ausgibt, dessen Bandmittenfrequenz proportional zur gemessenen Geschwindigkeit ist. Das System ist in der Lage, selbst bei bewegten Materialien mit kleinsten Oberflächenkontrastwerten eine Geschwindigkeitsinformation zu gewinnen. Mit Hilfe dieses Bildsensorensystems ist ebenso die Geschwindigkeit von Partikelströmen in Fluiden oder Gasen oder von bewegten Objekten meßbar und es kann z.B. in der Automatisierungstechnik eingesetzt werden.

Durch die ständige Weiterentwicklung und Miniaturisierung der CMOS-Technologie (der FhG-IMS-0,5µm-CMOS-Prozeß wird z.Z. entwickelt und der FhG-IMS-0,25µm-CMOS-Prozeß befindet sich in der Planung) ergeben sich immer vielfältigere Möglichkeiten, leistungsfähige integrierte Bildsensoren mit immer mehr Photosensorelementen und ausgereifterer signalverarbeitender Elektronik zu realisieren. Durch das Verständnis der Photosensormodelle kann der Erhalt guter elektrooptischer Eigenschaften der Photosensoren bei der Weiterentwicklung der CMOS-Prozesse in gewissen Grenzen berücksichtigt werden.

Die Verwendung des Photo-MOSFET als analoger EEPROM Speicher mit einem zusätzlichen Zwischengate ist z.Z. am FhG-IMS Gegenstand der Forschung [98]. Dieser speicherbare und programmierbare Photosensor eröffnet weitere Anwendungsmöglichkeiten wie u.a. Musterspeicher oder automatischer Abgleich von ungleichmäßiger Beleuchtung.

Für das vorgestellte integrierte Bildsensorensystem zur Geschwindigkeitsmessung ist eine Folgeversion geplant, bei der eine Auswertung des Ortsfiltersignals und des Phasensignals auf dem Chip erfolgt und die gemessene Geschwindigkeit mit Richtung in digitaler Form ausgegeben wird.