

Kapitel 6

Zusammenfassung

Als Basis für zukünftige Sensor- und Schaltungsentwicklungen wurden die wichtigsten in der Fachliteratur vorgestellten Schaltungskonzepte für CMOS-Photosensoren und deren Auslese auf ihre Eigenschaften bezüglich Rauschen, Dynamikbereich, Zugriffsgeschwindigkeit und „Fixed Pattern Noise“ hin analytisch untersucht. Dabei wurde insbesondere geklärt, durch welche schaltungstechnischen Maßnahmen eine Optimierung dieser Eigenschaften erreicht werden kann.

Bei CMOS-Photosensoren kann grundsätzlich zwischen integrierenden und nichtintegrierenden Sensoren unterschieden werden. Nichtintegrierende Photosensoren lassen sich ferner in solche mit linearer und mit nichtlinearer Übertragungscharakteristik unterteilen, wobei eine logarithmische Übertragungscharakteristik für nichtlineare Photosensoren typisch ist. Die Realisierung einer logarithmischen Übertragungscharakteristik beruht bei allen in der Fachliteratur vorgestellten Systemen auf dem exponentiellen Zusammenhang zwischen dem Drainstrom und den Klemmenpotentialen eines MOS-Transistors in schwacher Inversion. Integrierende Photosensoren nutzen dagegen die Sperrschichtkapazität der Photodiode zur Integration des Photostromes und sind deswegen immer linear. Die akkumulierte Ladungsmenge kann im Fall integrierender Photosensoren direkt mit Hilfe eines Ladungsverstärkers am Ende der Leseleitung, oder indirekt über die Spannung an der Integrationskapazität gemessen werden. Im ersten Fall spricht man von der sogenannten Ladungsauslese, im zweiten Fall von der sogenannten Spannungsauslese.

Die Rauschanalysen zu den verschiedenen Photosensoren und deren Auslese haben gezeigt, daß mit integrierenden linearen Photosensoren gegenüber logarithmierenden Photosensoren wesentlich bessere Signal-Rausch-Abstände erzielt werden können. Der Vorteil logarithmierender Photosensoren liegt dagegen in einem sehr viel größeren Dynamikumfang. Es wurde gezeigt, daß der Grund für die besseren Rauscheigenschaften integrierender Photosensoren die mit der Integration des Photostromes verbundene Begrenzung

der Sensorbandbreite ist. Während die Bandbreite integrierender Photosensoren über die Integrationszeit in weiten Grenzen eingestellt werden kann, ist sie im Fall logarithmischer Photosensoren durch die Bauelementeparameter im Pixel festgelegt. Um mit logarithmierenden Photosensoren gleich gute Rauscheigenschaften zu erreichen wie mit integrierenden Photosensoren, muß die Bandbreite der Ausleseschaltung außerhalb des Sensors entsprechend gesenkt werden.

Potentielle Anwendungsgebiete für logarithmierende Photosensoren finden sich vor allem in der maschinellen Bildverarbeitung und der industriellen Inspektion, da hier von einer vereinfachten Extraktion der für Bildverarbeitungsalgorithmen relevanten Kontrastinformation und vom hohen Dynamikbereich profitiert werden kann. Aufgrund der logarithmischen Signalkompression und der schlechten Rauscheigenschaften sind diese Sensoren jedoch weniger für hochwertige Bildwiedergabesysteme geeignet.

In bezug auf die Rauscheigenschaften der zwei untersuchten Ausleseverfahren für integrierende Photosensoren zeigte sich, daß die Spannungsauslese gegenüber der Ladungsauslese deutlich bessere Eigenschaften aufweist. Der Grund hierfür ist, daß im Fall der Ladungsauslese das eingangsbezogene Rauschen des im Integrator verwendeten Operationsverstärkers um das Verhältnis der Kapazität der Leseleitung und der Gegenkopplungskapazität des Integrators verstärkt wird. Im Rahmen der Arbeit wurde gezeigt, daß durch eine geeignet dimensionierte Kompensationskapazität am Verstärkerausgang und durch korrelierte Doppelabtastung (CDS) der Rauschbeitrag des Verstärkers so weit reduziert werden kann, daß er kleiner wird, als der unvermeidliche kTC -Rauschbeitrag der Detektorkapazität. Dem bei der Ladungsausleseschaltung erforderlichen Schaltungsaufwand zur Dämpfung des zeitlichen Rauschens steht bei der Spannungsausleseschaltung die Notwendigkeit zur Kompensation des Ortsrauschens (Fixed Pattern Noise) durch mehrfache Abtastung des Ausgangssignals gegenüber, so daß sich unter Berücksichtigung von zeitlichem Rauschen und von Ortsrauschen für beide Ausleseverfahren ein vergleichbarer Schaltungsaufwand ergibt.

Bezüglich Linearität, dem erzielbaren minimalen Pixelpitch und den erzielbaren minimalen Zeilen-Zugriffszeiten weist die Ladungsauslese dagegen klare Vorteile auf, so daß ihre Verwendung insbesondere für meßtechnische Zwecke und für die Realisierung hochauflösender Bildsensoren (z.B. für HDTV-Anwendungen) vorteilhaft erscheint. Die Verwendung einer Spannungsauslese kann für den Fall hoher Leitungskapazitäten am Eingang des Ausleseverstärkers von Vorteil sein, falls die Realisierung sehr großer Kompensationskapazitäten zur Verbesserung der Rauscheigenschaften nicht praktikabel ist. Ein weiteres Vorteil der Spannungsausleseschaltung liegt in der geringeren Anfälligkeit gegenüber Störeinkopplungen auf die Leseleitung.

Anhand zweier integrierter Schaltungen, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und

gefertigt wurden, wurden die Vorteile, die sich bei der Entwicklung von 2D-Bildsensoren durch die Realisierung in CMOS ergeben, verdeutlicht. Bezüglich der beiden vorgestellten Systeme sind insbesondere die freie Wahl des Abtastschemas, die freie Wahl der Sensor-Übertragungscharakteristik, wahlfreie Pixeladressierung und die Möglichkeit der On-Chip-Integration von Signalverarbeitung zu nennen.

Als Beispiel für einen CMOS-Bildsensor mit sehr großem Eingangsdynamikbereich wurde ein Kamera-Testchip mit 32×32 auf einem hexagonalen Abtastgitter angeordneten Photosensoren und logarithmischer Sensorcharakteristik vorgestellt. Er weist einen Eingangsdynamikbereich von 7 Dekaden sowie ein gegenüber den in der Fachliteratur vorgestellten Systemen wesentlich verbessertes dynamisches Verhalten auf. Der Bildsensor wurde einerseits für den Einsatz in optischen Inspektionssystemen, andererseits im Rahmen eines Medizintechnik-Projektes (Retina-Implant) als Teil eines bionischen Bildverarbeitungssystems zur Nachbildung der Funktionalität der menschlichen Retina entwickelt. Auf der Grundlage des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten neuen Schaltungskonzeptes wurden am Fraunhofer Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme weitere CMOS-Bildsensoren mit 128×128 Photosensoren und 300×400 Photosensoren mit Erfolg gefertigt.

Als Beispiel für einen CMOS-Bildsensor mit integrierter Signalverarbeitung wurde ein Kamerachip mit 128×128 Pixeln und lokaler Helligkeitsadaptation vorgestellt, bei dem der Signalstrom einer Photodiode auf dessen gewichteten räumlichen Mittelwert in der Umgebung des jeweiligen Pixels bezogen wird. Da der Bildentstehung eine multiplikative Verknüpfung des Reflexionsfaktors der abgebildeten Oberfläche und der beleuchtenden Bestrahlungsstärke zugrundeliegt, wird der Einfluß der Beleuchtung der aufgenommenen Szene auf das Ausgangssignal des Bildsensors durch dieses Verfahren weitgehend eliminiert. Die gewichtete räumliche Mittelung (beziehungsweise Tiefpaßfilterung) des Eingangsbildes erfolgt massiv-parallel durch eine laterale Verkopplung der Pixel mit MOS-Transistoren im Arbeitsbereich der schwachen Inversion. Einen Schwerpunkt bildete bei der Entwicklung dieser Schaltung die Analyse der so entstehenden zweidimensionalen translinearen Mittelungsnetzwerke, da eine detaillierte mathematische Analyse in der Fachliteratur bisher ausblieb. Es konnte gezeigt werden, daß translineare Mittelungsnetzwerke sich für Ströme als Ein- und Ausgangsgrößen linear verhalten, und es konnte ein Ausdruck für deren Impulsantwort hergeleitet werden.