

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für mikroelektronische Schaltungen und Systeme in Duisburg.

Die Arbeit wäre sicherlich ohne freundschaftliche Unterstützung und fachliche Anregung von vielen Freunden und Kollegen am Fraunhofer-Institut nicht möglich. Danken in diesem Zusammenhang möchte ich insbesondere Matthias Hillebrand, Dr. Andreas Teuner, José Emilio Santos Conde, Uri Iurgel und Carsten Prokop, von denen die meisten auch an dem Korrekturlesen des Manuskripts beteiligt waren.

Mein ganz besonderer Dank gilt Prof. B. J. Hosticka, Ph. D. für die Anregung zu der sehr interessanten Themenstellung der Arbeit sowie für seine engagierte wissenschaftliche Betreuung des Promotionsvorhabens.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Jörg Pfeiderer danke ich für die freundliche und sehr gewissenhafte Übernahme des Korreferates und für seine Unterstützung während des Promotionsverfahrens.

Außerdem bin ich meinen Eltern zum Dank verpflichtet, daß sie mir diesen Bildungsweg ermöglicht haben und mir stets zur Seite standen.

Meiner Frau Barbara danke ich für ihr Verständnis und die liebevolle Unterstützung, wodurch die Anfertigung dieser Arbeit erst ermöglicht wurde.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und wissenschaftliche Zielsetzung	1
1.2	Gliederung der Arbeit	3
2	Klassische Kamerasysteme für Hochgeschwindigkeitsaufnahmen	5
2.1	Opto-Mechanische Systeme	5
2.2	Elektro-Optische Systeme	8
2.3	Systeme mit kurzer Szenenausleuchtung	11
2.4	Zusammenfassung	12
3	Hochgeschwindigkeitskamerasysteme mit Halbleiter-Bildsensoren auf CCD-Basis	13
3.1	Das Prinzip der CCD-Bildsensoren	14
3.2	Die CCD-Bildsensoren für hohe Bildraten	19
3.2.1	Frame-Transfer CCD-Sensoren	19
3.2.2	Interline-Transfer CCD-Sensoren	24
3.2.3	Frame-Interline-Transfer CCD-Sensoren	27
3.2.4	Burst-Modus-CCD-Sensoren	28
3.3	Zusammenfassung	29
4	Grundlagen der schnellen CMOS 2D-Bildsensorik	31
4.1	Funktionalität und charakteristische Größen von CMOS-Bildsensoren	32

4.1.1	Übertragungscharakteristik	33
4.1.2	Empfindlichkeit und Responsivität	34
4.1.3	Rauschen	34
4.1.4	Signal-Rausch-Verhältnis und Dynamikbereich	38
4.1.5	Auflösung und Modulationsübertragungsfunktion MTF	39
4.1.6	Blooming und Smearing	40
4.2	Lichtempfindliche Bauelemente im CMOS-Prozeß	40
4.2.1	Photodiode	41
4.2.2	Photogate	44
4.2.3	Vergleich Photodiode vs. Photogate	45
4.3	CMOS-Bildelemente für kurze Belichtungszeiten	47
4.3.1	Pixel mit elektronischem Shutter	48
4.3.2	Pixel für synchrone Integration und Auslese	54
4.4	Grundsätze der rauscharmen CMOS-Schaltungstechnik für 2D-Bildsensorik	60
4.4.1	Rauschmodell für MOS-Transistor	60
4.4.2	Rauschmodell für den Operationsverstärker	62
4.4.3	Korrelierte Doppelabtastung	63
4.5	Zusammenfassung	68
5	CMOS-Bildsensorlösungen für Hochgeschwindigkeitsbildaufnahmen	70
5.1	Das schnelle CMOS-Sensorsystem mit externer Bildverbesserung	71
5.1.1	Motivation	71
5.1.2	Schaltungstechnische Realisierung	72
5.1.3	Statische Übertragungsfunktion und „Matching“-Verhalten	73
5.1.4	Rauschverhalten	76
5.1.5	Sensorarchitektur	83
5.1.6	Meßergebnisse und Chipdaten des 128×128 Bildsensors	84
5.1.7	Systemkonzept für die Kamera mit reduzierter Auflösung	87

5.2	Das schnelle CMOS-Sensorsystem mit On-Chip Bildverbesserung	89
5.2.1	Motivation	90
5.2.2	Schaltungstechnische Realisierung	91
5.2.3	Statische Übertragungsfunktion und „Matching“-Verhalten	95
5.2.4	Rauschverhalten	99
5.2.5	Sensorarchitektur	106
5.2.6	Meßergebnisse und Chipdaten des 256×256 Bildsensors	108
5.2.7	Systemkonzept für die Kamera mit sehr hohen Datenmengen	112
5.3	Zusammenfassung	112
6	Anwendungsmöglichkeiten von Hochgeschwindigkeits-CMOS-Bildsensoren	115
6.1	Aufzeichnung von schnell ablaufenden Ereignissen	115
6.2	Maschinelles Sehen	119
6.3	1D- und 2D-Abstandsmesstechnik	121
6.3.1	Aktive Triangulation	122
6.3.2	Laufzeitbasierte Abstandmessung	125
6.4	Überwachung mit schnellen Kurzzeitbelichtungssensoren	136
6.5	Zusammenfassung	138
7	Zusammenfassung und Ausblick	141
A	MOS-Feldeffekt-Transistor	145
B	Abkürzungen und Formelzeichen	149

Abbildungsverzeichnis

2.1	Prinzipieller Aufbau der Framing Kamera mit rotierendem Prisma.	6
2.2	Prinzipieller Aufbau der Framing-Kamera mit rotierendem Spiegel.	7
2.3	Prinzipieller Aufbau der nah-fokussierten Diodenröhre und zwei Elektronröhren mit Multikanalplatten („intensifier tubes“).	9
3.1	Prinzip des Ladungstransfers bei einem CCD-Sensor.	15
3.2	Die verschiedenen CCD-Typen: FT-CCD, IL-CCD, FIT-CCD (von links nach rechts).	20
3.3	Der horizontale (links) und der vertikale (rechts) Antiblooming-Mechanismus beim FT-CCD-Sensor.	21
3.4	Reset- und Integrationszeit-Ansteuerung beim FT-CCD-Sensor.	22
3.5	Der horizontale (links) und der vertikale (rechts) Antiblooming-Mechanismus beim IL-CCD-Sensor.	25
3.6	Reset- und Integrationszeit-Ansteuerung beim IL-CCD-Sensor.	27
4.1	Architektur eines CMOS-Bildsensors.	32
4.2	Die Übertragungscharakteristik eines linearen CMOS-Bildsensors mit seinen Rauschanteilen.	38
4.3	Schematischer Aufbau von Photodioden im Standard-CMOS-Prozeß: n^+ -Diffusion- p -Substratdiode (links) und n -Wanne- p -Substratdiode (rechts).	42
4.4	Kennlinie einer Photodiode.	43
4.5	Rauschersatzschaltbild einer Photodiode.	44
4.6	Aufbau eines Photogates.	45

4.7	Gemessener Quantenwirkungsgrad zweier Photodioden und eines Photogates, realisiert in einem $2\ \mu\text{m}$ CMOS-Prozeß [74]. Die Einbrüche in den Kurven sind auf den Einfluß von durch die Oberflächenstrukturen parasitär gebildeten Interferenzfiltern zurückzuführen.	47
4.8	Pixelstruktur mit elektronischem Shutter für High-Speed Anwendungen. . . .	48
4.9	Zeitschema des Pixels für Standard- und S/H-Modus.	50
4.10	Pixelstruktur mit einem zusätzlichen Schalter für eine synchrone Integration und Auslese (oben) und das dazu gehörige Zeitschema.	55
4.11	Pixelstruktur mit einem zusätzlichen Verstärker für eine synchrone Integration und Auslese (oben) und dazu gehöriges Zeitschema (unten).	57
4.12	Zwei Pixelstrukturen für synchrone Integration und Auslese mit einem zusätzlich eingebauten Verstärker. Der Verstärker A1 sowie der Selekttransistor M4 sind hier nicht gezeigt.	59
4.13	Rauschersatzschaltbild des MOS-Transistors.	61
4.14	Rauschersatzschaltbild des Operationsverstärkers.	63
4.15	Prinzipschaltbild der Schaltung für korrelierte Doppelabtastung.	64
4.16	Die Übertragungsfunktion der CDS-Schaltung aus Abbildung 4.15.	65
5.1	Pixel mit synchronem elektronischen Shutter und Stromausleseschaltung. . .	73
5.2	Das Rauschersatzschaltbild zur Stromauslese-Schaltung.	76
5.3	Das vereinfachte Rauschersatzschaltbild zur Stromauslese-Schaltung.	78
5.4	Architektur des CMOS-Bildsensors mit Stromausleseprinzip.	83
5.5	Das Chipphoto des 128×128 Pixel großen CMOS-Bildsensors.	85
5.6	Die gemessene Übertragungscharakteristik des 128×128 Bildsensors.	85
5.7	Das gemessene örtliche Rauschen des 128×128 Bildsensors einer homogen hellen Szene (links) und einer homogen dunklen Szene (rechts).	86
5.8	Aufnahmen der CMOS-Kamera mit 128×128 Pixel bei Integrationszeiten von $50\ \mu\text{s}$ bzw. $100\ \mu\text{s}$ und einer Bildrate von 1030 Bilder/s.	87
5.9	Das Blockschaltbild des entwickelten Kamerasystems mit einem 128×128 Pixel großen CMOS-Bildsensor für Hochgeschwindigkeitsanwendungen. . . .	89
5.10	Das Pixel mit elektronischem Shutter und Spannungsauslese und die S/H-Schaltung.	92

5.11	Zeitschema der Steuersignale für die korrelierte Doppelabtastung (CDS), angewendet auf aller Pixel i -ter Zeile.	93
5.12	Zeitschema der synchronen Auslese im versetzten Pipelinebetrieb.	94
5.13	Schaltung zur Realisierung des CDS-Verfahrens mit den zugehörigen Rausch- einflüssen.	97
5.14	Das Rauschsignalersatzschaltbild der Spannungsausleseschaltung mit CDS und seine Vereinfachung (unten).	100
5.15	Das Rauschsignalersatzschaltbild der Schaltung für die Signalauslese.	101
5.16	Das Rauschsignalersatzschaltbild der Schaltung für die Resetauslese.	102
5.17	Architektur eines schnellen CMOS-Bildsensors mit On-Chip Bildverbesserung.	107
5.18	Das Chipphoto des 256×256 Pixel großen CMOS-Bildsensors.	109
5.19	Das Layout des eingesetzten Pixels im realisierten CMOS-Bildsensor.	109
5.20	Die gemessene Übertragungscharakteristik des 256×256 Bildsensors.	111
5.21	Aufnahmen der CMOS-Kamera mit 256×256 Pixeln bei Integrationszeiten von $50 \mu s$ bzw. $100 \mu s$ respektive und einer Bildrate von 1040 Bilder/s.	112
6.1	Sequenz eines in Wasser fallenden Objektes aufgenommen mit dem 128×128 Pixel CMOS-Bildsensor bei einer Integrationszeit von $100 \mu s$ und einer Bildrate von 1030 Bilder/s.	117
6.2	Sequenz von aufeinanderfolgenden Bildern eines platzenden Ballons aufge- nommen mit dem 128×128 Pixel CMOS-Bildsensor bei einer Integrationszeit von $100 \mu s$ und einer Bildrate von 1030 Bilder/s.	117
6.3	Aufgenommene Sequenz des mit Wasser gefüllten platzenden Ballons, bei dem jedes zweite Bild innerhalb der Sequenz ausgeblendet ist. Die Aufnahme ist mit dem 256×256 Pixel CMOS-Bildsensor bei Integrationszeiten von $100 \mu s$ und einer Bildrate von 1040 Bilder/s durchgeführt worden.	118
6.4	Sequenz von aufeinanderfolgenden Bildern eines platzenden Ballons aufge- nommen mit dem 256×256 Pixel CMOS-Bildsensor bei Integrationszeiten von $100 \mu s$ und einer Bildrate von 1040 Bilder/s.	118
6.5	Testbilder, die mit dem entwickelten 128×128 Pixel CMOS-Bildsensor bei einer Bildrate von 100 Hz und 9 ms Integrationszeit (links) und mit dem entwickelten 256×256 Pixel CMOS-Bildsensor bei einer Bildrate von 200 Hz und 4 ms Integrationszeit (rechts) aufgenommen wurden.	121

6.6	Geometrische Darstellung des Triangulationsverfahrens.	123
6.7	Die mit dem 128×128 CMOS-Bildsensor (als Lichtschnittsensor) aufgenommenen Bilder des Beifahrersitzes in einem Kfz mit einer Person in verschiedenen Positionen und die dazu gehörige ermittelte Information über den Abstand von dem Sensor.	125
6.8	CCD-Pixelstruktur für die Laufzeitmessung nach [112].	127
6.9	Struktur des CCD-Pixels für die Laufzeitmessung aus [112] mit dem zugehörigen Messprinzip.	129
6.10	Pixelstruktur eines CMOS-Bildsensors für die Laufzeitmessung aus [116]. . .	130
6.11	Das Zeitdiagramm einer der beiden Messungen für die mit 128×128 Pixel CMOS-Sensor realisierte direkte Laufzeitabstandsmessung.	132
6.12	Der mit dem Laufzeitverfahren gemessene Abstand vs. tatsächlichem Abstand.	133
6.13	Die Pixelstruktur eines CMOS-Bildsensors für die Laufzeitmessung mit On-Chip analoger Mittelung.	135
6.14	Vordergrundextraktion des relevanten Bereiches einer Bildsequenz, die mit einer gewöhnlichen CCD-Kamera aufgenommen wurde. a) zeitrekursive Filtermethode [117], b) Kalman-Filtermethode [119], c) adaptiv-zeitrekursive Filtermethode [118] d) Originalbild. Die Verwendung der Kamera mit dem schnellen CMOS-Bildsensor mit aktiver Beleuchtung gewährleistet die Ermittlung der verfälschungsfreien Vordergrundinformation (wie in c)), unabhängig von dem verwendeten Algorithmus.	137
A.1	Schematischer Aufbau eines MOS-Transistors.	145
A.2	Kleinsignalersatzschaltbild eines MOS-Transistors.	147

Tabellenverzeichnis

4.1	Vergleich der Pixelstrukturen für die Hochgeschwindigkeitsanwendungen. . .	69
5.1	Technische Daten des 128×128 CMOS-Bildsensors für Hochgeschwindigkeitsanwendungen.	86
5.2	Technische Daten des 256×256 CMOS-Bildsensors für Hochgeschwindigkeitsanwendungen.	111
A.1	Kleinsignalparameter des MOS-Transistors in der starken Inversion.	148