

Belichtungsregelung individueller Pixel von CMOS-Bildsensoren

Stefan Tauschek,
Scantec Microelektronik GmbH, Germering

Mit der Ablösung des chemischen Films durch die elektronische Bilderfassung begann in den 90'er Jahren der Siegeszug integrierter Halbleiter-Bildsensoren, zunächst mit CCDs, inzwischen bei rasant wachsenden Stückzahlen auch mit den preisgünstigeren CMOS-Bildwandlern. Diese ermöglichen dank ihrer Dynamik selbst bei ungünstigster Beleuchtung eine hohe Aufnahmequalität. Wie dies noch optimiert werden kann, erläutert der vorliegende Beitrag.



Der weltweite Umsatz mit Bildsensoren für Mobiltelefone, Kameras und Notebooks steigt nunmehr das fünfte Jahr in Folge kontinuierlich an, zuletzt um 30% in 2006 auf 7 Mrd. US\$ (5,15 Mrd. €). Und dies trotz starker Preiserosion, wie schon aus der Stückzahl von 1,9 Milliarden deutlich wird: durchschnittlich 2,70 € pro Bildwandler. Für 2007 stehen die Prognosen erneut auf Wachstum – Strategies Unlimited sagt eine Steigerung von 14% voraus [1].

Gleichzeitig eröffnen sich weitere Märkte. So beginnt die Automobilindustrie gerade mit dem Einsatz bildgebender Verfahren für Fahrerassistenzsysteme, und auch im Sicherheitsbereich werden in steigendem Maße Bildsensoren benötigt.

Die technischen Anforderungen an Bildwandler z.B. für den Einsatz im Automobil oder in Überwachungsanlagen sind aber erheblich. Die Bausteine müssen kostengünstig sein und dennoch bei industriellen Temperaturbereichen arbeiten können, zudem wird verlangt, dass sie auch unter ungünstigsten Lichtverhältnissen brauchbare Ergebnisse liefern.

1 Halbleiter-Bildsensoren

Bereits in den 60'er Jahren wurden mit den ersten CCDs (charge coupled devices) Bildsensoren auf Halbleiterbasis eingeführt. Wenig später gab es auch Labormuster von CMOS-Bildwandlern (complementary metal oxide semiconductor); deren Qualität war aber den CCDs noch deutlich unterlegen und so wurden sie kommerziell erst in den 80'ern auf den Markt gebracht. Bis heute liefern sich die beiden Technologien ein Kopf-an-Kopf-Rennen, denn

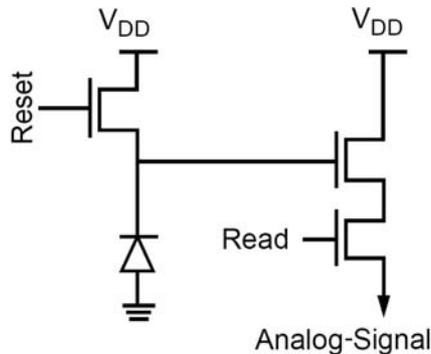


Bild 1: Der Active Pixel Sensor integriert einen Verstärker je Pixel

jede verfügt über spezifische Stärken und Schwächen.

Die Kostenvorteile der CMOS-Technologie sind attraktiv genug, um stetige Investitionen in ihre Fortentwicklung zu rechtfertigen. In den 90'ern wurden APS-Wandler (active pixel sensor) eingeführt, bei denen durch Integration je eines Verstärkers pro Pixel (**Bild 1**) Geschwindigkeit und Signal/Rausch-Verhältnis (SNR) erheblich verbessert werden konnten. **Bild 2** zeigt schematisch den Aufbau eines „aktiven Pixels“. Leider weist aber auch die APS-Technologie einige inhärente Schwächen auf. Aufgrund unvermeidlicher Prozessvariationen entstehen ungleichmäßige Spalten-ADCs (Analog-Digital-Umsetzer) und Pixel-Verstärker, was vor allem bei hochauflösenden Wandlern zu einem deutlichen „Fliegengittereffekt“ (fixed pattern noise, FPN) führt und letztlich die Empfindlichkeit des Sensors verringert. Abgesehen von der

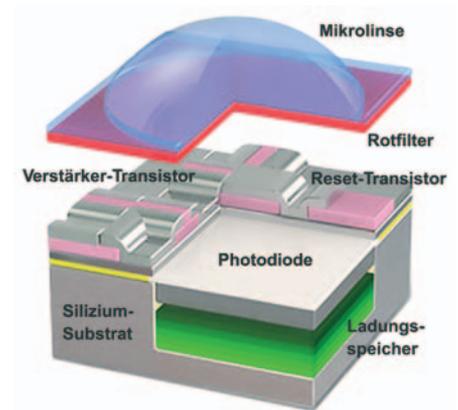


Bild 2: 3D-Darstellung eines „aktiven Pixels“

Tatsache, dass das menschliche Auge sehr sensibel auf statische Helligkeitsunterschiede reagiert, sind derartige Schwächen in anspruchsvollen Anwendungen wie z.B. der Sicherheitstechnik nicht hinnehmbar.

2 Vom analogen zum digitalen Pixel

Wie bei allen Signalverarbeitungsverfahren liegt der Schlüssel zur Verbesserung in der möglichst frühen Umsetzung analoger in digitale Werte. Der frühest mögliche Punkt in der Signalkette eines CMOS-Bildwandlers ist das einzelne Bildelement. Somit ist es naheliegend, bereits die im Pixel gespeicherte Ladung als Äquivalent des einfallenden Lichtes lokal über einen möglichst hochauflösenden ADC zu digitalisieren und dabei Wandlungstechniken anzuwenden, die auch in CMOS mit hoher Qualität realisiert werden können. Allerdings sind

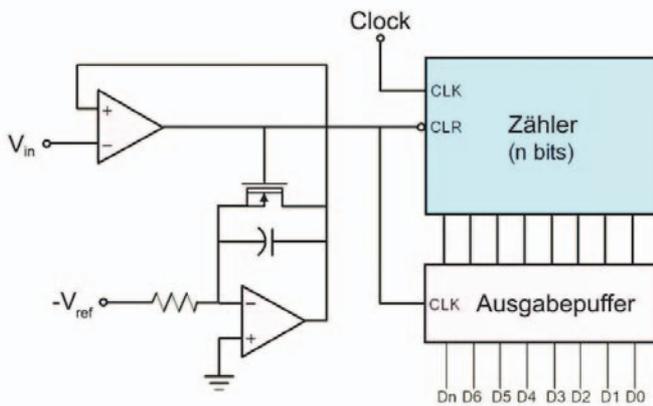


Bild 3: Single-Slope A/D-Converter

dann schon bei einem Sensor mit z.B. 720 x 540 Pixeln mehr als 350 000 ADCs zu implementieren.

Dass dies machbar ist, beweist die Firma Pixim mit ihrem patentierten DPS-Verfahren (digital pixel system), dessen Grundlagen bereits in den späten 90'er Jahren im Rahmen eines Forschungsprojektes der Stanford University entwickelt wurden [2]. 2001 konnten die Erfinder einen ersten Quarter-Frame CMOS-Sensor in 0,18µm-Technologie vorstellen, d.h. mit einer lithographischen Strukturauflösung von 180 nm [3].

Wesentliche Vorteile der DPS-Technologie sind:

- Vielfaches Abtasten innerhalb einer Bildbelichtung für hohe Wiederholrate und hohen Dynamikbereich
- Digitale Überabtastung für höchste Auflösung und Bildqualität
- Integration von Bildverarbeitungsfunktionen
- Zeitliche und räumliche Filterung für scharfe und klare Bilder
- Sehr niedrige Stromaufnahme
- Hoher Signal/Rausch-Abstand

3 Die Digitalwandlung

Hauptmerkmal der DPS-Technologie ist die Implementierung hochauflösender ADCs auf Pixelebene. Um dafür nicht mit übermäßigen Siliziumressourcen zu bezahlen, muss ein möglichst „schlankes“ Wandlungsverfahren gewählt werden. Pixim hat sich für den sog. Single-Slope A/D-Converter entschieden (**Bild 3**). Der analoge Spannungswert jedes Pixels wird mit einer außerhalb der Pixelblöcke generierten analogen Rampe verglichen, während gleichzeitig ein digitaler Zähler läuft. Jeder der Komparatoren schaltet um, sobald die analoge Rampe den Pegel seiner zugeordneten Photodiode überschreitet und initialisiert damit die Übernahme des aktuellen Zähler-

werts als Helligkeits-äquivalent in einen lokal zugeordneten Speicher.

Die Konversion ist schnell genug, um auch mehrfache Signalabtastung während einer Belichtung (1/50 bzw. 1/60 Sekunde für PAL bzw. NTSC-Formate) und damit eine hohe Dynamik zu ermöglichen.

Die Digitalwandlung wird simultan für alle Pixel ausgeführt, sobald die Integrationsphase abgeschlossen ist, die wiederum von der Intensität des einfallenden Lichts abhängt. Ganz nebenbei löst diese Form massiv-paralleler Wandlung das bei herkömmlichen CMOS-Sensoren bekannte Problem des "rolling shutters". Durch die gleichzeitige Erfassung aller Pixelwerte wird ein sog. "global shutter" realisiert, so dass sich die Verwendung mechanischer Verschlüsse erübrigt.

Der gesamte Pixelblock braucht etwa 50 Transistoren, anteilig kommen noch Steuerungsressourcen dazu, was sich in 0,18 µm recht gut fertigen lässt. **Bild 4** zeigt die stark vereinfachte Schaltungsstruktur eines Pixelblocks, hier allerdings mit 8 bit Dynamik, während die aktuellen Pixim-Sensoren 10 bit aufweisen.

Jeder Block beinhaltet ein MOS-Photogate, Reset- und Transfer-Gates, einen Speicherkondensator, einen dreistufigen Komparator und DRAM-Speicherezellen für die digitalisierten Pixeldaten. Der Komparator verfügt über einen differentiellen Eingangsverstärker, gefolgt von zwei unsymmetrischen Verstärkungsstufen für möglichst genaue Schwellendetektion. Er erreicht Einschwingzeiten von deutlich unter 100 ns.

Der Sensorbetrieb kann in vier Hauptphasen aufgeteilt werden: Reset, Integration, A/D-Wandlung und Datenübernahme (**Bild 5**). Mit dem Reset wird die Ladung der Photodioden gelöscht und die Speicher-

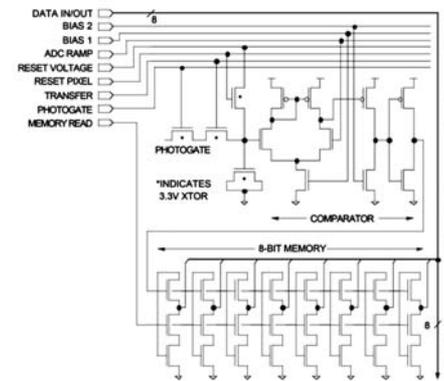


Bild 4: Schaltungsstruktur eines Pixelblocks

zellen werden zurückgesetzt. Anschließend erfolgt die Belichtung der Photozellen und ihre ein- oder mehrfache Abtastung zu digitalen Werten. Schließlich müssen die Daten noch aus den lokalen Pixelspeichern ausgelesen und zur weiteren Bildverarbeitung übertragen werden. Wegen der massiv parallelen Wandlung ist das Verfahren sehr schnell. Mit Prototypen von Quarter-Frame Sensoren wurden bereits Bildraten von 10 000 Frames/s erreicht.

4 Techniken zur Dynamiksteigerung

Bei der Bilderfassung stützt sich die DPS-Technologie auf das sog. "correlated double sampling" (CDS). Die Doppel- bzw. Mehrfachabtastung wird nicht nur wie bei anderen Systemen zur Kompensation des Dunkelstromes verwendet, sondern auch um den Anstieg der Ladungsmenge im Pixel-Photogate und damit den optimalen Zeitpunkt zur Datenübernahme festzustellen. Mit dieser raffinierten Methode arbeiten die Pixel-Photodioden stets im optimalen Bereich ihrer Kennlinie und ihre Dynamik steigt auf Werte um die 120 dB. Ein hoher Dynamikbereich aber ist der Schlüssel zur Erfassung aller Details bei kontrastreichen Lichtverhältnissen. Ein

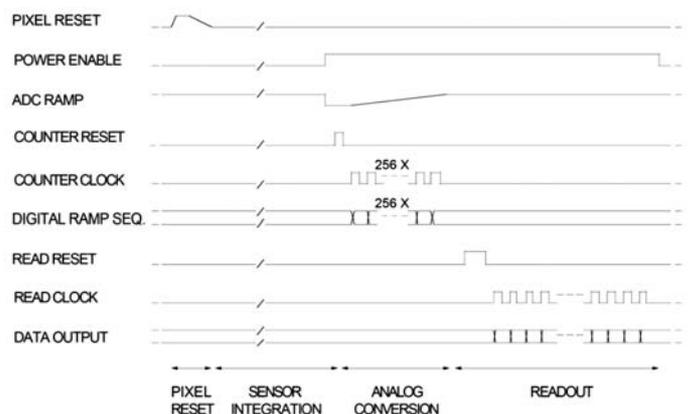


Bild 5: Phasen des Bild-erfassungsprozesses



Bild 6: Während beide Sensoren in diesem Anwendungsbeispiel die Farbtabelle im Vordergrund gut wiedergeben, überstrahlt der Hintergrund bei herkömmlichen Sensoren und löscht damit wichtige Details

Autokennzeichen zu erkennen, während z.B. das Licht der Scheinwerfer in die Kamera fällt, wäre mit normalen Systemen und Dynamikbereichen um die 70 dB (entsprechend 10 bit) nahezu unmöglich. Auch Reflexionen oder einfallendes Licht im Hintergrund führen bei solchen Bilddetektoren zu typischen Effekten einer Belichtung außerhalb des Dynamikbereichs: im Rauschsignal untergehende Bildanteile oder „blinde“ Stellen durch Sensorüber-sättigung (**Bild 6**).

Mit einem zusätzlichen Kniff lässt sich ein weiterer Vorteil realisieren: Das System

registriert die Zeit, die vergeht, bis ein Pixel nahezu in Sättigung ist – bei stark belichteten Pixeln wird dies relativ schnell geschehen. Nun wird bestimmt, ob dieses Pixel zum nächsten Auslesezeitpunkt voraussichtlich in Sättigung gehen wird. Ist dies der Fall, wird sowohl der aktuelle ADC-Wert als auch der Zeitpunkt intern als 17-bit-Wert gespeichert. Mit der Kombination dieser beiden Größen gewinnt man viel differenziertere Informationen über die tatsächlich einfallende Lichtmenge.

Bild 7 zeigt die Systematik: Innerhalb des Bildes wurden drei Bereiche mit unterschiedlichem Lichteinfall exemplarisch herausgegriffen. Bereiche „A“ und „B“ würden während der maximalen Belichtungszeit übersteuern und müssen also zu früheren Zeitpunkten abgetastet werden. Bereich „C“ ist so dunkel, dass er in der maximalen Belichtungszeit nicht an die Sättigungsgrenze kommt und daher nicht übersteuern kann. Durch diese Situation wird die sog. „WARP-Grenze“ definiert. Um den optimalen Signal/Rausch-Abstand der Photodioden auszunutzen, werden Pixel oberhalb der WARP-Grenze

ze jeweils möglichst nahe an ihrer Sättigungsgrenze betrieben. Im gezeigten Beispiel sind nur sechs Auslese-Zeitpunkte vorgegeben, DPS-Sensoren können aber bei extremen Lichteinfall auch über 100 A/D-Wandlungen pro Sekunde vornehmen.

Die kürzeste derzeit erreichbare Belichtungsdauer eines Pixels beträgt 1/64 der Frame-Bildbelichtungszeit, also etwa 1/4000 Sekunde. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass der Dynamikbereich von 1024 Werten (= 10 bit) auf 65536 Werte (= 16 bit) ansteigt. Erst bei noch stärkerem Lichteinfall ist irgendwann auch eine Grenze erreicht, ab der über eine Blende dafür gesorgt werden muss, dass der Sensor ohne Überbelichtung arbeiten kann.

Literaturhinweise:

- [1] su.pennnet.com/press_display.cfm?article_id=295615 (12.06.2007)
- [2] www.pixim.com/html/tech_about.htm
- [3] S. Kleinfelder, S.H. Lim, X. Liu, A. El Gamal, A 10,000 Frames/s 0.18 μ m CMOS Digital Pixel Sensor with Pixel-Level Memory, International Solid State Circuits Conference 2001, www.ece.uci.edu/~stuartk/ISSCC2001.pdf

Ansprechpartner:

Stefan Tauschek
 Technical Support
 Scantec
 Microelektronik GmbH
 Industriestr. 17
 D-82110 Germering
 Tel. 089/899143-32
 Fax 089/899143-27
 eMail: stefan.tauschek@scantec.de
 Internet: www.scantec.de

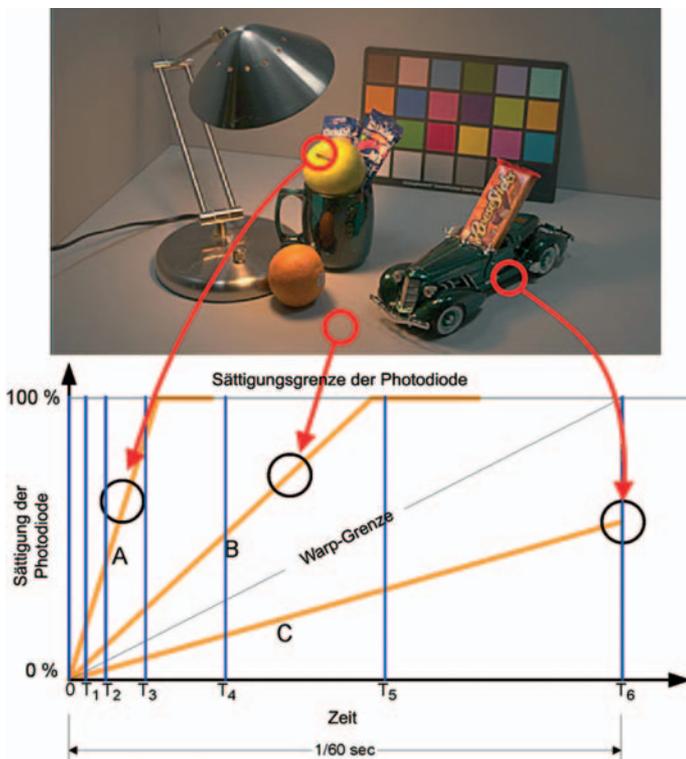


Bild 7: Die Pixel reagieren mit angepassten Auslesezeiten auf unterschiedliche Helligkeitswerte