



Bild 1. Ein Kamera-Modul mit CCD-Bildaufnehmer und kompletter Elektronik. Die Verbindungen zwischen den einzelnen Platinen sind hier flexibel ausgeführt.

Dr. Albert J. P. Theuwissen

Charge-Coupled Devices als Bildaufnehmer

Viele Vorteile gegenüber Bildaufnahmeröhren

Die CCD-Bildaufnehmer haben in Videokameras die früher ausschließlich verwendeteten Bildaufnahmeröhren heute weitgehend verdrängt. Ihre Überlegenheit zeigt sich vor allem in den kleineren Abmessungen und im geringeren Gewicht, daneben in mechanischer Unempfindlichkeit. Im Laufe der Entwicklungsgeschichte haben sich mehrere verschiedene Typen herauskristallisiert, jeder mit seinen eigenen Vor- und Nachteilen. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über ihren Aufbau und ihre Funktionsweise.

Die ersten Ladungsverschiebeschaltungen (Charge Transfer Devices), die sog. Eimerkettenschaltungen oder BBIDs (Bucket Brigade Devices), wurden 1969 durch Sangster und Teer [1] zum erstenmal vorgestellt. Mit ihren Charge-Coupled Devices präsentierte Boyle und Smith [2] Ende 1970 eine Weiterentwicklung dieser Technik. Die CCDs waren für die verschiedensten Anwendungen vorgesehen: elektronische Laufzeitfilter mit einstellbarer Laufzeit, Analogspeicher, Analogfilter mit einstellbaren Frequenzcharakteristiken sowie Halbleiter-Bildsensoren.

Vor allem zu Beginn der 70er Jahre wurde viel Zeit und Energie in die Erforschung und Entwicklung der CCD-Technik investiert. Da an die Fertigung von CCDs hohe Ansprüche gestellt wurden, verzögerte sich ihre Vermarktung. So wurde der erste CCD-Bildaufnehmer, der mit der herrschenden Fernsehnorm ohne Einschränkung kompatibel war, 1974 von RCA [3] in einer Reihe von Laborexemplaren hergestellt. Erst 1983 brachte Sony dann den ersten Kamerarecorder auf den Markt für Unterhaltungselektronik. Die lange Zeit, die zwischen der Erfindung der CCDs und ihrer Markteinführung verstrichen war, führte dazu, daß andere integrierte Schaltungen Absatzmärkte eroberten, die ursprünglich für die CCDs vorgesehen waren. Der Markt für Speicherbauelemente etwa, für den die CCDs ein potentieller Anwärtler waren, wurde vollständig von Digitalispeichern, den DRAMs und SRAMs, besetzt, wäh-

rend sich die CCD-Technik noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase befand. Selbst auf sehr speziellen Anwendungsgebieten, für die CCDs aufgrund ihrer Funktionsweise geradezu prädestiniert waren – in erster Linie handelt es sich dabei um analoge und serielle Speicher, z. B. Videospeicher –, verdrängten DRAMs den CCD-Speicher. Das gleiche Schicksal ereilte die CCD-Technik im Bereich der Filteranwendungen. Enorme Fortschritte in der digitalen MOS-Technologie verhalfen dem Digitalfilter zu einer steilen „Karriere“, mit der die Anwendungsmöglichkeiten von CCDs erheblich geschmälert wurden. Heute beherrschen daher CCD-Bildsensoren den gesamten CCD-Markt, während Laufzeitketten und Analogfilter nur einen kleinen Restanteil halten.

CCD kontra Bildaufnahmeröhre

Trotz ihrer späten Markteinführung konnten die CCDs aufgrund ihrer eindeutigen Vorzüge die Elektronenröhre aus der Videokamera verdrängen. CCDs dominieren den Videomarkt inzwischen so stark, daß kein einziger Kamerahersteller beim Bau von Kameras, die für den Unterhaltungselektronikmarkt bestimmt sind, noch Elektronenröhren verwendet. Das gleiche gilt für die Hersteller professioneller tragbarer Kameras (sog. Electronic News Gathering Cameras, ENGs); Röhren werden heute nur noch in Fernsehstudios verwendet, doch auch hier gewinnen die CCDs an Bedeutung.

Wie bereits gesagt, haben CCDs eindeutige, je nach Kamera-Anwendung mehr oder weniger starke Vorteile im Vergleich zu klassischen Aufnahmeröhren:

- Kameras, die für den Heim-Videomarkt bestimmt sind, müssen leicht und handlich sein. CCDs sind wesentlich besser dazu geeignet, diese beiden Anforderungen zu erfüllen, als herkömmliche Aufnahmeröhren (Bild 7). Sie haben eine geringere Leistungsaufnahme, kommen mit einer niedrigeren Versorgungsspannung aus und senken den Energieverbrauch der Kamera, so daß sich das Gewicht der Batterie reduziert oder die Aufnahmezeit der Kamera verlängert. Für Anwendungen in der Automatisierungstechnik, z. B. Roboter- und CNC-Maschinen, ist vor allem die stabile Geometrie der CCDs von Bedeutung. Die Kamera kann dort z. B. als Meßinstrument eingesetzt werden. Absolute Messungen sind nur dann möglich, wenn die lichtempfindlichen Zellen (Pixel) des Aufnahmelements eine stabile Geometrie aufweisen. Die einzelnen Zellen werden bei der Herstellung des CCD-Sensors buchstäblich in die Siliziumoberfläche eingebrannt; dadurch entsteht eine äußerst stabile Geometrie. Bei Bildaufnahmeröhren hingegen sind Ort und Geometrie der Pixel sowohl zeit- als auch temperaturabhängig.

- Ein weiteres typisches Merkmal von CCDs ist ihre Unempfindlichkeit gegenüber externen elektromagnetischen Feldern. Dies bedeutet, daß z. B. ein Roboter, in dessen Hand eine CCD-Kamera eingebaut wurde, in Umgebungen operieren kann, die die Funktion einer Röhrenkamera stören würden.



Bild 2. Anwendungsbereiche von CCD-Bildaufnehmern, abhängig von der Leistung

- Professionelle Anwender schätzen insbesondere das Fehlen jeglicher Trägheitseffekte. Situationen, in denen Röhren große Probleme mit Nachzieheffekten (Image-lag) haben oder gar Schäden durch besonders helle Lichtpunkte wie die Sonne (Burn-in) aufreufen können, stellen für einen Halbleiter-Bildsensor keine Schwierigkeit dar. Das Prinzip, worauf diese Eigenschaft zurückzuführen ist, wird später näher erläutert.
- Die positiven Eigenschaften des Sensors werden im verkürzten Integrationsmodus noch verstärkt. Darunter ist zu verstehen, daß das CCD anstelle der entsprechend der europäischen Fernsehnorm üblichen Integrationszeit von 20 ms nur einen Bruchteil dessen, z. B. 2 ms, zur Verfügung hat. Die Aufnahmezeit reduziert sich damit von $\frac{1}{50}$ s auf $\frac{1}{500}$ s. Diese Technik produziert schärfere Aufnahmen, vor allem bei Bewegungsabläufen. Besonders bei Sportübertragungen erweist sich das CCD damit der Röhre überlegen, die diese Möglichkeit nicht hat.

Hohe Lichtempfindlichkeit, mechanische Robustheit und niedrige Kosten sind weitere Eigenschaften, die das CCD der Röhre überlegen machen. Nur in bezug auf das Auflösungsvermögen schneidet die Röhre im Vergleich zum heute gebräuchlichen Halbleiter-Bildaufnehmer etwa gleich gut oder sogar besser ab; dies gilt ausschließlich für HDTV.

Anwendungen von CCDs

Die Anwendungsbereiche, für die CCD-Bildaufnehmer in Frage kommen, sind in Bild 2 schematisch dargestellt; die Vertikalachse gibt die an das CCD gestellten Leistungsanforderungen an. Die Werte der Vertikalachse sind direkt proportional zum Preis des

Sensors. Die Anwendungen in Bild 2 können in drei Gruppen unterteilt werden:

- *Große Stückzahlen, niedrigere Leistung:*

Zu dieser Kategorie zählen Bildtelefonkameras, CCDs für Kinderspielzeug, Baby-Videoфоны, mit denen Kleinkinder ständig beobachtet werden können, elektronische Türspione (door watchers), Anwendungen in der optischen Datenverarbeitung für Roboter und Computer und sogar elektronische Rückspiegel für Lastkraftwagen und Autobusse. Die für derartige Anwendungen geeigneten CCDs zeichnen sich durch ihre kleine Chipfläche aus, die selten mehr als 200 000 Bildpunkte enthält; ihr Preis ist dementsprechend niedrig.

- *Große Stückzahlen, höhere Leistung:*

CCDs dieser Kategorie werden in der Unterhaltungselektronik überall dort eingesetzt, wo Farbbildaufnehmer benötigt werden: der mittlerenweile zum Gemalgut gewordene Camcorder, Dia-Scanner, mit denen Dias abgetastet und auf herkömmlichen Fernsehbildschirmen wiedergegeben werden können, elektronische Standbild-Aufnehmer (Electronic Still Picture), bei denen der CCD-Bildsensor mit einer

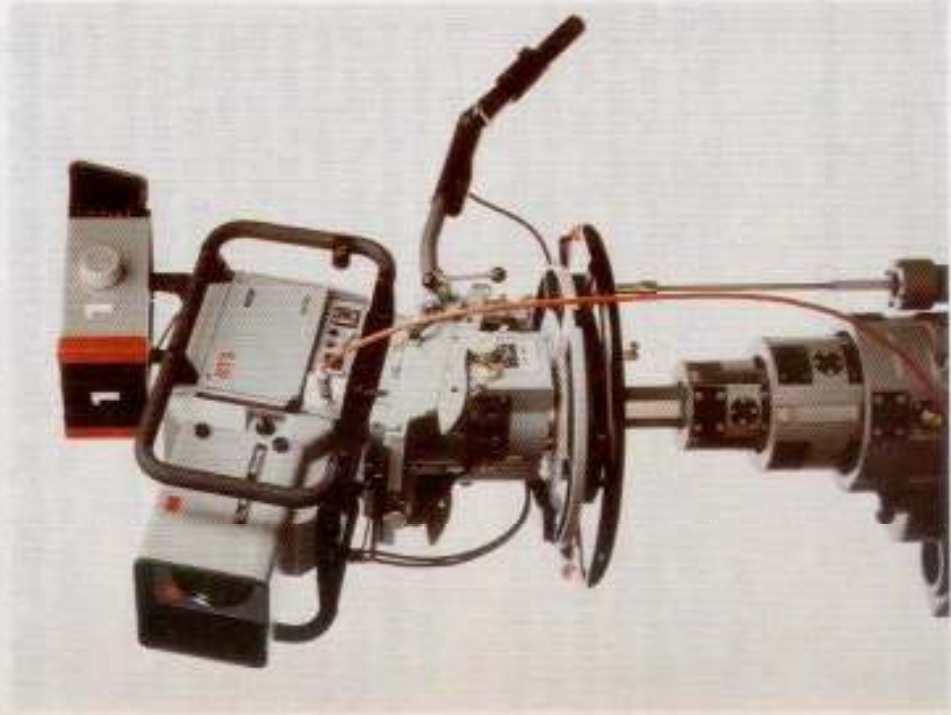


Bild 4. „Electronic Field Production“-Kamera (EFF) mit drei Frame-Transfer-CCDs, die unmittelbar an einem farbtrahnenförmigen Prisma angebracht sind.



Bild 3. „Electronic News Gathering“-Kamera (ENG) mit drei Frame-Transfer-CCD-Chips in Verbindung mit einem mechanischen Verschluss, wodurch ein völlig smear-freies Bild erzeugt wird. Zur Auftrennung der Farben Rot, Grün und Blau dient ein Farbprisma.

Floppy Disc kombiniert wird, die die aufgenommenen Bilder speichert. Für derartige Anwendungen werden Bildaufnehmer mit 400 000 bis 600 000 Bildpunkten benötigt. Zwar kann mit 600 000 Pixels noch immer nicht die Qualität eines 35-mm-Dias erreicht werden, doch können aufgrund von Neuentwicklungen im Bereich der CCD-Technologie in Verbindung mit Bildverarbeitungstechniken heute bereits elektronische Standbilder erzeugt werden, die z. B. für die Ansprüche im Zeitungsgewerbe ausreichend sind.

- *Kleine Stückzahlen, extrem hohe Leistung:*

Unter diese Kategorie fallen alle professionellen Anwendungen von der „Electronic News Gathering“-Kamera (Bild 3) bis zur „Electronic Field Production“-Kamera (Bild 4) zur Übertragung von Fernsehaufnahmen.

Die gesamte Entwicklung im Bereich der CCD-Technologie wurde – und wird noch immer – durch den Markt für Camcorder bestimmt. Dies ist auch der Grund dafür, daß Bildsensoren heute vor allem in Camcordern eingesetzt werden. An dieser Situation wird sich in nächster Zeit wenig ändern. Langfristig jedoch werden den Erwartungen zufolge andere Anwendungen an Bedeutung gewinnen und eventuell den Camcorder-Markt sogar übertreffen.

Die Funktionsweise eines CCD

Im CCD-Chip spielen sich die folgenden Vorgänge ab:

1. Licht, das in Form von Photonen auf die Oberfläche des CCD trifft, wird vom Silizium absorbiert und erzeugt auf diese Weise Elektronen und Löcher.
2. Die Elektronen und die Löcher werden durch Anlegen eines elektrischen Feldes getrennt; die Löcher werden abgeleitet, während sich die Elektronen in einem elektrischen Potentialtopf sammeln.
3. Nach Ablauf einer bestimmten Integrationszeit werden die gesammelten Elektronen in Form isolierter

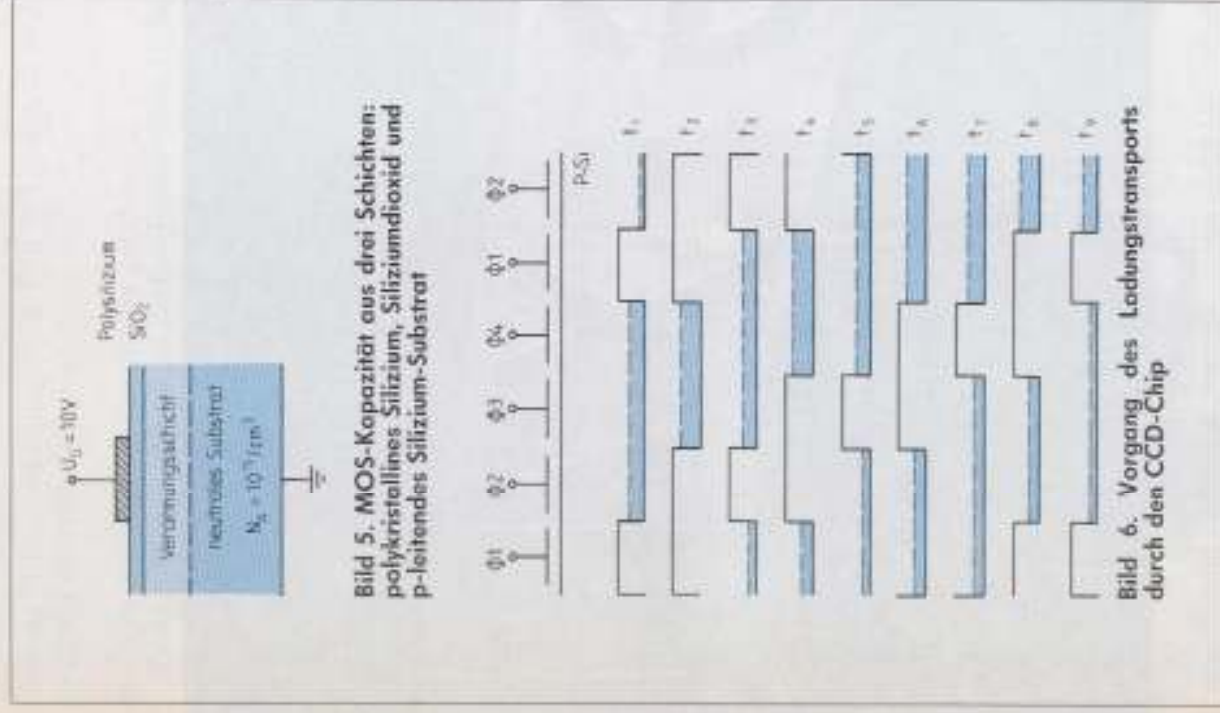


Bild 5. MOS-Kapazität aus drei Schichten: polykristallines Silizium, Siliziumdioxid und p-leitendes Silizium-Substrat

Bild 6. Vorgang des Ladungstransports durch den CCD-Chip

sches Feld entsteht, das die erzeugten Löcher von den erzeugten Elektronen trennt. Die Löcher werden über das p-leitende Substrat abgeführt, während sich die Elektronen unter dem Einfluß des elektrischen Feldes unter den positiven Gates an der Siliziumoberfläche sammeln.

Die Anzahl der Elektronen, die sich nach einer bestimmten Integrationszeit angesammelt haben, ist direkt proportional zur Anzahl der im selben Zeitraum erzeugten Elektronen und demnach auch direkt proportional zur Anzahl der eingefallenen Photonen. Dies bedeutet, daß die Größe des Ladungspakets im MOS-Kondensator ein Maß für die Anzahl von Photonen ist, die auf den MOS-Kondensator getroffen sind. An dem Punkt, wo sich der MOS-Kondensator befindet, wird also die Lichtintensität gemessen bzw. abgetastet. Durch zweidimensionale Abtastung an mehreren Punkten können auf einem Chip mehrere Ladungspakete erzeugt werden, die ein Maß für die in Form eines Bildes auf den Chip projizierte räumliche Information darstellen.

Um die in Form von Ladungspaketen vorliegende Bildinformation z. B. auf einem Monitor wiedergeben zu können, müssen die Ladungspakete zu einer Ausgangsstufe transportiert werden. Dies erfolgt mit Hilfe des ladungsgekoppelten (Charge-Coupled) Transportprinzips. Dieses beruht auf der Möglichkeit, Ladungspakete auf kontrollierte Weise von einer Kapazität zur anderen zu transportieren. Dieser Vorgang ist schematisch in *Bild 6* dargestellt, wo sich mehrere MOS-Kapazitäten, eingeteilt in vier Gruppen oder Phasen, auf einem p-leitenden Siliziumsubstrat befinden. Im Beispiel steht Gruppe 1 in der Ausgangsposition 0 V, während sich die anderen Phasen auf einem Niveau von 10 V befinden. Deutlich sind die Potentialtöpfe bei den Phasen mit hoher Gate-Spannung und die Isolierung der verschiedenen Potentialtöpfe durch die Phase mit 0 V Gate-Spannung zu erkennen. Wird jedoch anschließend die an Phase 2 anliegende Spannung von 10 V auf 0 V reduziert, so werden die Potentialtöpfe kleiner und die Sperrschichten werden breiter. Der umgekehrte Effekt tritt auf, wenn anschließend die Spannung an Phase 1 von 0 V auf 10 V erhöht wird: Die Potentialtöpfe wachsen, die Sperrschichten werden kleiner. Das Ergebnis jedoch ist, daß die Ladungspakete, die sich ursprünglich bei Phase 2, 3 und 4 befanden, nach Phase 3, 4 und 1 verschoben wurden. Dies bedeutet, daß die Ladungspakete über eine Distanz von 1 Gate bzw. $\frac{1}{4}$ CCD-Zelle gewandert sind. Selbstverständlich lassen sich Gate-Spannungen beliebig oft verschieben, so daß die Ladungspakete langsam entlang der Siliziumoberfläche wandern. Der Transport kann demnach willkürlich gesteuert werden, so daß alle Pakete beim Transport zur Ausgangsstufe voneinander isoliert bleiben. Die Ausgangsstufe wandelt die Elektronenpakete (über einen Kondensator, der an eine kleine elektronische Schaltung gekoppelt ist) in eine meßbare Größe, z. B. eine elektrische Spannung, um. Diese wiederum kann dann durch externe elektronische Schaltungen weiterverarbeitet (verstärkt, gefiltert) und auf dem Fernsehmonitor wiedergegeben oder auf einem magnetischen Speichermedium festgehalten werden.

Ladungspakete über die Siliziumoberfläche zu einer Ausgangsstufe transportiert.

4. Diese Ausgangsstufe wandelt die Elektronenpakete in eine meßbare elektrische Spannung um.

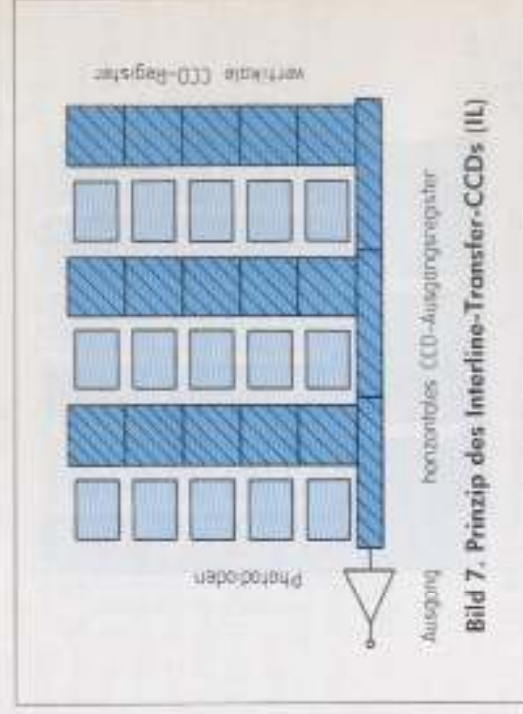
Bild 5 veranschaulicht diesen Vorgang anhand der dargestellten MOS-Kapazität. Die obere Schicht besteht aus polykristallinem Silizium (Polysilizium), als Isolator dient SiO_2 , und bei der unteren Schicht handelt es sich um das p-leitende Siliziumsubstrat. Wird am Polysilizium-Gate eine positive Spannung U_G angelegt, so entsteht an der Elektrode eine positive Ladung. Diese wird im Normalfall durch eine gleich starke, negative Ladung ausgeglichen. Die p-Si-Schicht verfügt jedoch nur über sehr wenig freie Elektronen, so daß die negative Ladung nicht unmittelbar aufgebaut werden kann. Der MOS-Kondensator befindet sich daher in einem Zustand des Ungleichgewichts, wobei in der p-Si-Schicht ein elektri-

Praktische Ausführungen von Halbleiter-Bildsensoren

Wie bereits erwähnt, besteht ein CCD-Bildsensor aus einer zweidimensionalen Matrix lichtempfindlicher Zellen oder Pixel. Diese Matrix wird in folgenden Bauelementen auf verschiedene Weise realisiert: Ladungsinjektionsschaltungen, MOS-X-Y-adressierbare Bildaufnehmer, Interline-Transfer- und Frame-Transfer-Bildaufnehmer und Frame-Interline-Transfer-Bildaufnehmer. Im Bereich der Unterhaltungselektronik spielen nur die letzten drei Versionen eine Rolle. Im folgenden werden daher ausschließlich diese beschrieben.

Den schematischen Aufbau eines II-Sensors zeigt **Bild 7**. Der Bildaufnehmer besteht aus einer Parallelschaltung aus verschiedenen elementaren Zeilensensorkanälen, wobei jede CCD-Zelle mit einem Pixel versehen ist. Nach Ablauf der Integrationszeit (für die europäische Fernsehnorm 20 ms) werden sämtliche Ladungen aller Pixels über die vertikalen Transportkanäle zu den jeweils benachbarten CCD-Zellen befördert. Diese sind durch eine Aluminiumschicht gegen das Licht abgeschirmt. Sobald also die Ladungen von den Pixels in die CCD-Kanäle gewandert sind, ist die Integration des vorangehenden Bildes beendet, und es beginnt die des neuen Bildes. Anschließend werden sämtliche Ladungspakete von den vertikalen CCDs zeilenweise zum horizontalen Lose-CCD befördert. Am Ende dieser Parallelserien-Umsetzung, bei der das horizontale Register mit Videoinformationen aus den vertikalen CCDs geladen wird, werden die Ladungspakete zur Ausgangsstufe transportiert und dort in eine elektrische Spannung umgewandelt.

Den schematischen Aufbau eines FT-Sensors zeigt **Bild 8**, eine praktische Ausführung zeigt **Bild 9**. Dieser



Typ kombiniert die Lichtsensorik mit dem Transport. Die im Verlauf der Integration in den vertikalen CCD-Registern aufgebaute Signalladung wird nach Ablauf der Integrationszeit parallel zum Speicherteil des Sensors verschoben. Dieser Speicherteil ist gegen das Licht abgeschirmt. Die Anzahl seiner CCD-Zellen entspricht der Anzahl von Pixels, über die der lichtempfindliche Sensorteil verfügt. Nach dem Transport vom lichtempfindlichen Teil zum Speicherteil ist die Integration des nächsten Bildes abgeschlossen, die Integration des nächsten Bildes kann beginnen. Der weitere Transportverlauf vom Speicherteil des Sensors aus ist identisch mit dem Transportprozeß beim II-Bildaufnehmer.

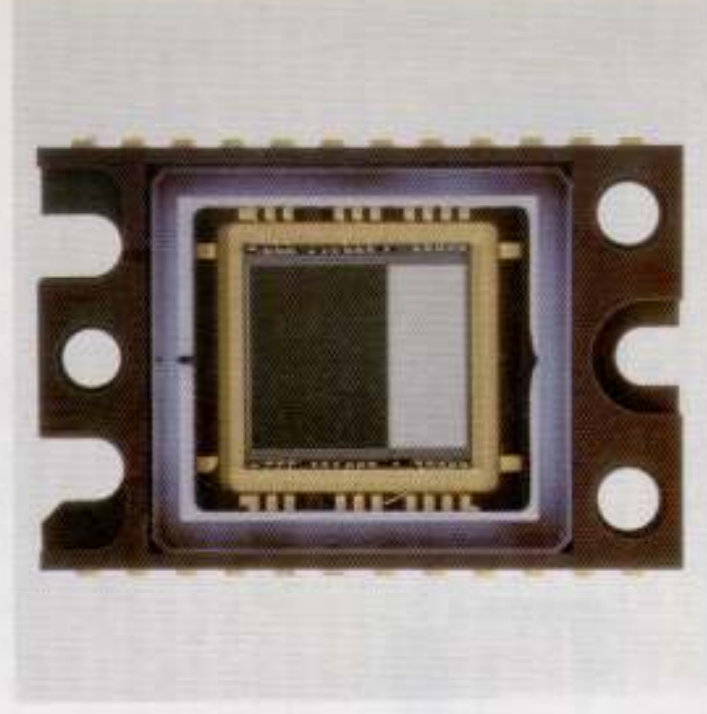
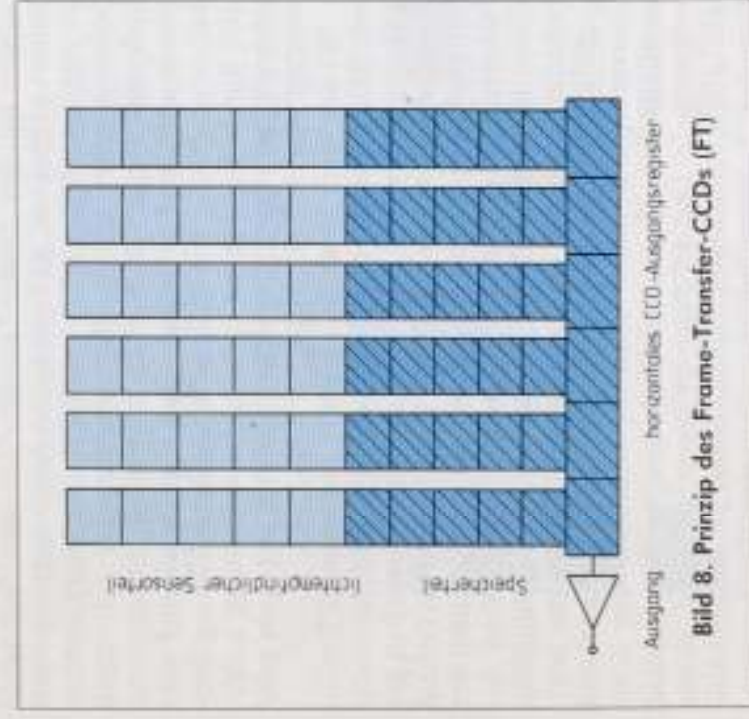


Bild 9. Praktische Ausführung eines Frame-Transfer-CCDs

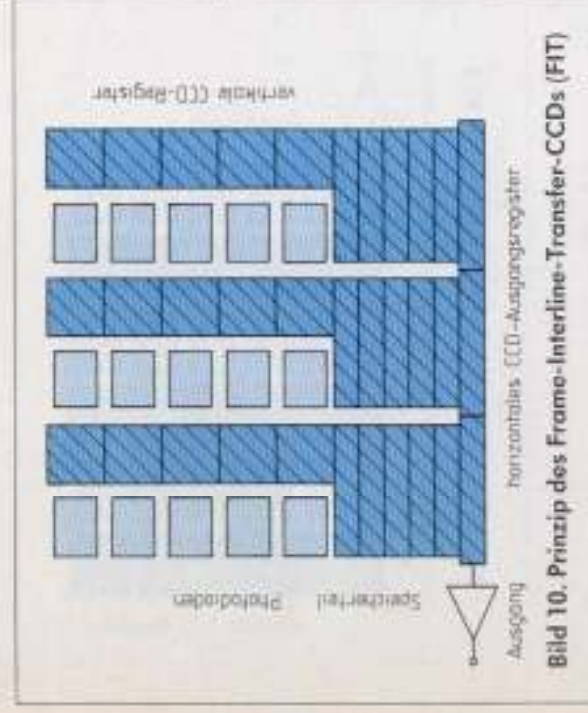


Bild 10. Prinzip des Frame-Interline-Transfer-CCDs (FIT)

Dabei ist jedoch zu beachten, daß beim FIT-Bildaufnehmer auch während des vertikalen, parallelen Transports vom lichtempfindlichen Teil zum Speicherteil des Sensors noch Licht auf die Bildmatrix fallen kann. Dies führt dazu, daß die gerade verarbeitete Information gestört wird. Um diese Störung, das sog. Smear, auf ein Minimum zu reduzieren, wird der vertikale Transport möglichst schnell durchgeführt; zur vollständigen Beseitigung von Smear-Erscheinungen kann der Sensor während des vertikalen Transports einfach mit einem Shutter lichtundurchlässig abgedeckt werden.

Wider Erwarten kann auch beim IL-Bildaufnehmer eine bestimmte Form des Smear auftreten, die zwar andere Ursachen als beim FIT-Bildaufnehmer hat, jedoch auf dem Fernsehbildschirm den gleichen Effekt erzeugt. Bei einem IL-Bildaufnehmer ist Smear auf „verlorene“ Photonen und „verlorene“ Elektronen zurückzuführen, die auf optischem oder elektrischem Wege in die vertikalen Register gelangen, während das eigentliche Ziel die Pixels sind. Die relativ lange Zeit, die die Ladungspakete in den vertikalen Registern neben den Pixels verbringen, ist einer der Gründe dafür, daß ein kleiner, konstanter Strom „verlorener“ Photonen und/oder „verlorener“ Elektronen ein relativ starkes Smear-Signal verursachen kann. Smear-Signale bei IL-Bildaufnehmern lassen sich durch Verkürzung der Zeit, die die Ladungspakete in den vertikalen CCD-Registern verbringen, und durch Verlagerung des Ortes, an dem die Ladungspakete vor dem Lesen gespeichert werden, zwar teilweise, niemals aber vollständig unterdrücken.

Dieselbe Lösung wird auch beim Frame-Interline-Transfer-Bildaufnehmer (FIT), Bild 10, verwendet. Bei diesem Sensor handelt es sich eigentlich um einen Interline-Transfer-Bildaufnehmer, der mit dem Speicher eines Frame-Transfer-Bildaufnehmers ausgestattet ist. Die Funktionsweise entspricht daher einer Kom-

bination aus einem IL mit einem FT. Nach Ablauf der Integrationszeit wird der Inhalt der Pixel in die vertikalen Register übertragen; von dort aus erfolgt relativ schnell der vertikale Transport zum Speicher, woraufhin die Ladungspakete auf die bereits beschriebene Art und Weise zum Ausgang transportiert werden.

Vergleich Frame-Transfer-/Interline-Transfer-Bildaufnehmer

Selbstverständlich haben alle drei Halbleiter-Bildsensoren ihre eigenen Vor- und Nachteile. Für einen Vergleich ihrer Eigenschaften und/oder Charakteristiken müssen Sensoren gewählt werden, die das gleiche optische Format, d. h. eine gleich große lichtempfindliche Oberfläche, haben. Die Sensoren, die in den Bildern 7, 8 und 10 dargestellt sind, entsprechen dieser Anforderung.

Beim Vergleich des Interline-Transfer-CCD [5] mit dem Frame-Transfer-CCD [4] fällt sofort auf, daß die Chipfläche des IL viel kleiner ist. Dies ist darauf zurückzuführen, daß das IL sowohl die lichtempfindlichen Pixel als auch die vertikalen Speicher-CCDs auf einer Oberfläche zusammenfaßt, während sich auf der Oberfläche eines FTs nur der lichtempfindliche Teil befindet. Beide Konzepte haben ihre Vorteile: Für das IL gilt, daß die Kosten für das IC um so niedriger sind, je kleiner die Chipfläche ist, während beim FT gilt, daß das Sensorsignal um so stärker ist, je mehr lichtempfindliches Silizium die Oberfläche enthält. Bei beiden Typen, also beim FT und beim IL, tritt Smear auf, wobei sich die Ursachen jedoch unterscheiden.

Das IL und das FT haben jeweils eine eigene, spezifische Pixelstruktur. Beim IL sind die Pixel durch Zwischenräume getrennt, während sie beim FT direkt nebeneinanderliegen. Das Interline-Transfer-CCD zeichnet sich daher durch ein höheres Auflösungsvermögen als das Frame-Transfer-CCD aus, dem steht jedoch gegenüber, daß ein hohes Auflösungsvermögen zu verstärkten Moiré-Effekten führt. (Als Moiré werden Störungen bezeichnet, die typischerweise z. B. dann auftreten, wenn auf dem Bildschirm ein Ansager mit einem auffallend gestreiften oder karierten Hemd oder Jacket erscheint. Die feinen Details der Kleidung können durch den Sensor nicht mehr vollständig aufgenommen werden und erzeugen dadurch ein mehr oder weniger starkes Störmuster im Bild.)

Bei der Wahl zwischen einem IL und einem FT müssen daher immer die jeweiligen Vor- und Nachteile abgewogen werden: für das FT spricht in jedem Fall der einfache Aufbau der CCD-Zelle. Diese besteht im Prinzip nur aus der Definition des Kanals und der Definition der Isolierung zwischen zwei Kanälen. Der Aufbau bei einem IL ist wesentlich komplizierter, denn schließlich befindet sich neben dem vertikalen CCD noch das lichtempfindliche Pixel. Neben der Definition von Kanal und Sperrschicht ist daher noch die Definition des lichtempfindlichen Pixels und einer zweiten Sperrschicht erforderlich. Das FT-Pixel ist somit aufgrund seines wesentlich einfacheren Aufbaus besser für die hochauflösenden, hochempfindlichen Sensoren des bevorste-

henden HDTV-Zeitalters geeignet als sein Konkurrent, das IL.

Der dritte Typ aus der Reihe der Halbleiter-Bildsensoren, das Frame-Interline-Transfer-CCD, wurde entwickelt, um die Smear-Probleme des Interline-Transfer-Bildaufnehmers drastisch zu reduzieren. Dafür ist jedoch ein hoher Preis zu bezahlen: Das FIT kombiniert alle Nachteile des FT und des IL - große Chipfläche, beschränkter lichtempfindlicher Teil des Pixels sowie komplizierter Pixelaufbau.

Farbsensoren

Neben der Schwarzweißtechnik hat sich in den letzten zehn Jahren vor allem der Einsatz in Ein-Chip-Kameras (Camcorder der Heim-Video-technik, die nur einen einzigen Farbfächensensor haben) zu einem wichtigen Anwendungsgebiet für CCD-Sensoren entwickelt. Dies hat nicht nur die Entwicklung der CCDs, sondern auch die On-Chip-Farbfiltertechnik stark beeinflusst. Zur Darstellung von Farb-Videoinformationen auf einem Bildschirm muß die optische Eingangsinformation bereits vor der Projektion auf die CCD-Pixel in ihre Farbkomponenten zerlegt sein. Zur Farbzerlegung bei Ein-Chip-Anwendungen werden Farbfilter verwendet, die entweder direkt auf dem Chip oder auf einem separaten Glasplättchen, das nachträglich auf den CCD-Chip geklebt wird, untergebracht sind.

Da Farbmonitore mit den drei Grundfarben R, G und B (Rot, Grün, Blau) arbeiten, ist es naheliegend, diese Farben auch als Grundlage für das CCD-Filter zu verwenden. Abgewechselt werden jeweils drei Pixel mit einem R-Filter, einem G-Filter und einem B-Filter abgedeckt. Zwar verringert sich dabei die Auflösung des Sensors erheblich, doch enthält das am Sensorausgang anliegende elektrische Signal bereits die zur weiteren Verarbeitung in Richtung TV-Monitor geeigneten Farbkomponenten R, G und B.

Für die Farbzerlegung sind jedoch nicht nur RGB-Filter geeignet, sondern auch solche, die mit den Kom-

plementärfarben arbeiten. In diesem Fall werden von jeweils drei Bildpunkten einer mit einem Cyan-Filter (Cy), der zweite mit einem Gelb-Filter (Ye) und der dritte mit einer Kombination beider Filter versehen. Der erste Bildpunkt ist demnach empfindlich für cyanfarbiges Licht $Cy (-G + B)$, der zweite für gelbes Licht $Ye (-G + R)$ und der dritte für die gemeinsame Komponente G. Mit Hilfe dieser drei Pixel lassen sich die drei Primärkomponenten, die für den Monitor bestimmt sind, leicht rekonstruieren:

$$\begin{array}{rcc} & & B - Cy - G \\ & & / \quad \backslash \\ Cy (-B + G) & & \\ & & / \quad \backslash \\ & G & \\ & & R = Ye - G \\ & & / \quad \backslash \\ & & Ye (-R + G) \end{array}$$

Neben der Chrominanz-Information muß das Videosignal jedoch auch eine Luminanz-Komponente enthalten:

○ Für einen Sensor mit Grundfarbfilter gilt:

$$Y_p = 0,59 \cdot G + 0,30 \cdot R + 0,11 \cdot B$$

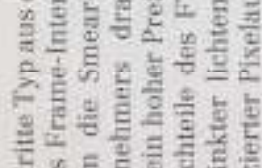
○ Für einen Sensor mit Komplementärfarbfiler gilt:

$$Y_c = 0,30 \cdot Ye + 0,28 \cdot G + 0,11 \cdot Cy$$

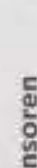
Zusätzlich zu dieser niederfrequenten Y_c -Komponente erhält man durch Filtern des vollständigen CCD-Ausgangssignals (CyGYe) mit einem HF-Filter noch eine hochfrequente Y_c^* -Komponente. Dies rührt daher, daß jeder Bildpunkt das hochfrequente G-Signal enthält. Da außerdem das Zentrum des sichtbaren Spektrums mit der Wellenlänge von grünem Licht übereinstimmt, liefert ein CyGYe-Filter mehr Luminanz-Information ($Y_c + Y_c^*$) als ein RGB-Filter (nur Y_p).

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Kamera bei Verwendung von Primärfarben die Signale

FLUKE 70er-Serie
Jauch hoch in
Taschformat
Messwerte speichern -
weiter ablesen!



FLUKE 80er-Serie
Mit Spezialsonde
die tiefer auch
Labor-Chips
verarbeiten können!



FLUKE 45er-Serie
Das erste "true-DMM" mit
Doppel-Anzeige!



FLUKE 300er-Serie
3 1/2 Digit
3 1/2 Digit



FLUKE 46er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 47er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 48er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 49er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 50er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 51er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 52er-Serie
3 1/2 Digit




FLUKE 53er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 54er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 55er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 56er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 57er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 58er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 59er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 60er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 61er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 62er-Serie
3 1/2 Digit




FLUKE 63er-Serie
3 1/2 Digit




FLUKE 64er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 65er-Serie
3 1/2 Digit




FLUKE 66er-Serie
3 1/2 Digit



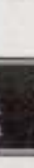
FLUKE 67er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 68er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 69er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 70er-Serie
3 1/2 Digit




FLUKE 71er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 72er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 73er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 74er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE 75er-Serie
3 1/2 Digit



FLUKE UND PHILIPS - IHRE PARTNER FÜR DIE TEST & MESSTECHNIK

FLUKE



PHILIPS

Spitzentechnologie bei Ihrem Distributor:

FLUKE 70er-Serie
Jauch hoch in
Taschformat
Messwerte speichern -
weiter ablesen!



FLUKE 45er-Serie
Das erste "true-DMM" mit
Doppel-Anzeige!



Philips FM 3205/89
Sachtestes und Superleistung - professionelle Leistungsmessung
in der 30/40 MHz-Band
Mehr bei Ihrem Distributor



PK elektronik
Lietzenburger Straße 91
1000 Berlin 15
Telefon (0 30) 883 10 58
Telefax (0 30) 883 81 05

PK elektronik
Jahnstraße 1 A
6330 Wetzlar 26
Telefon (0 64 41) 10 19
Telefax (0 64 41) 10 22

PK elektronik
Pierdiesstraße 3
8020 Dresden
Telefon (00 51) 4 76 10 37

PK elektronik
Münchauerstraße 23
8500 Nürnberg 80
Telefon (09 11) 61 36 53
Telefax (09 11) 65 15 95

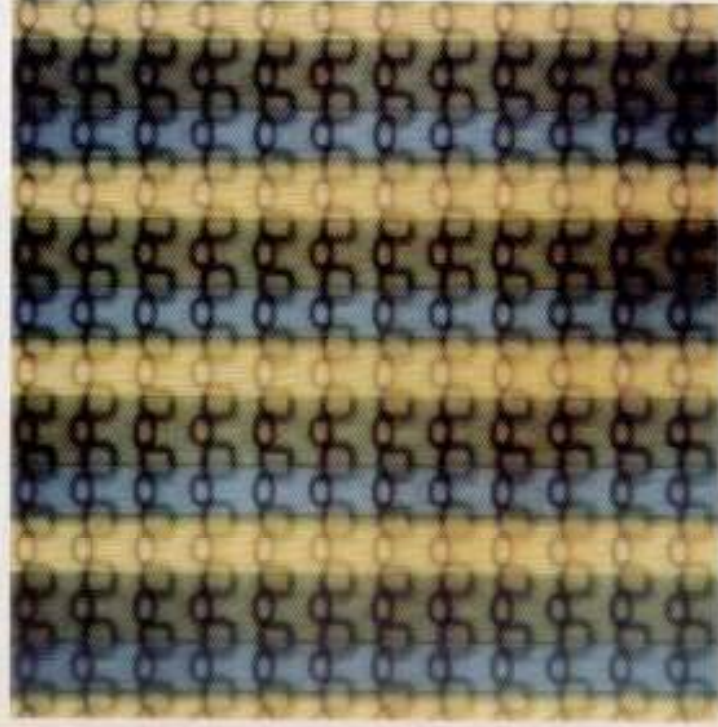


Bild 11. CCD-Pixel mit den in Streifen darüberliegenden Farbfiltern (Cyan, Grün, Gelb). Die Maße des einzelnen Pixel sind $8,2 \times 16,7 \mu\text{m}^2$.

leichter verarbeiten kann, jedoch nutzen Komplementärfarben die einfallende Lichtmenge wesentlich effektiver und reduzieren Moiré-Effekte, da jedes Pixel für grünes Licht empfindlich ist. (Die grüne Wellenlänge ist ja auch gleichzeitig das Zentrum des sichtbaren Lichtspektrums und dient daher als Hauptkomponente bei der Erzeugung des Video-Luminanzsignals.) Um Rot und Blau zu erhalten, sind bei Komplementärfarben Gelb und Zyaninblau erforderlich; dadurch wird jedoch das Signal/Rausch-Verhältnis bei der Signalverarbeitung negativ beeinflusst.

Ein weiterer, im Bereich der Filtertechnologie häufig diskutierter Punkt ist die Anordnung der Filter, die sowohl streifen- als auch mosaikförmig erfolgen kann. Bei einem Streifenfilter (Bild 11) werden die Dreier-

gruppen (R, G und B oder Cy, G und Ye) in vertikalen Streifen über dem CCD angeordnet:

R G B R G B	Cy G Ye Cy G Ye
R G B R G B	Cy G Ye Cy G Ye
R G B R G B	oder
R G B R G B	Cy G Ye Cy G Ye
R G B R G B	Cy G Ye Cy G Ye

Bei einem Mosaikfilter wird eine sich wiederholende Matrix aus 2×2 Farben über dem CCD angeordnet, z. B.:

R G B G	Cy G Cy G
G B G B	G Ye G Ye
R G R G	oder
G B G B	Cy G Cy G
	G Ye G Ye

Die Wahl zwischen Mosaik- und Streifenfiltern wird hauptsächlich durch die jeweilige Sensorarchitektur bestimmt: Mosaikfilter werden meistens mit IL-Bildaufnehmern kombiniert. Dies hängt mit der möglichen horizontalen Auflösung des jeweiligen Sensortyps zusammen. Ein Frame-Transfer-CCD hat ein höheres horizontales Auflösungsvermögen und erlaubt somit die Anwendung von Streifenfiltern. Dies wiederum vereinfacht die Signalverarbeitung. Wo die Filtertechnologie dies erlaubt, ist es natürlich vorteilhaft, Farbfilter optional herzustellen, da die Positionierung von Off-Chip-Farbfiltern zwischen Filterträger und CCD recht kompliziert und aufwendig ist.

Ausblick

Die Technologie der CCD-Bildaufnehmer hat sich seit Erfindung der Bucket Brigade Devices und Charge-Coupled Devices [9] so rasant entwickelt, daß auf eine detaillierte Beschreibung dieser lichtempfindlichen Elemente verzichtet werden muß. Daß Forschung und Entwicklung im Bereich der CCDs noch keineswegs abgeschlossen ist und regelmäßig neue Grunderkenntnisse liefern, wird durch jährlich stattfindende wissenschaftliche Kongresse, z. B. das IEDM (International Electron Devices Meeting [6]), die ISSCC (International Solid State Circuits Conference [7]) und die SPIE-Konferenzen (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers [8]) bewiesen. Für weitergehende Information sei daher an dieser Stelle auf die Proceedings dieser Kongresse und Konferenzen verwiesen.

Literatur

- [1] Sanyal, P., *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol. SC-4, S. 131 (1969).
- [2] Boyle, W., Smith, G., *Bell Syst. Techn. J.*, Vol. 49, S. 589 (1970).
- [3] Rodgers, R., *Int. Conv. and Exp.*, Mar. 26-29, S. 1 (1974).
- [4] Von der Steeg, M., u. a., *IEEE Transact. Electr. Dev.*, Vol. ED-32, S. 1430 (1985).
- [5] Oda, E., u. a., *IEEE Transact. Electr. Dev.*, Vol. ED-36, S. 46 (1989).
- [6] Bosters, J., u. a., *IEDM '88*, San Francisco, S. 70 (1988).
- [7] Theunissen, A., u. a., *ISSCC '88*, San Francisco, S. 48 (1988).
- [8] *Hywerek, F. SPIE 1071*, Los Angeles, S. 134 (1989).
- [9] Torr, K., *Sangster, F. U.S. Patent 27951*, Apr. 17, 1969, granted Mar. 26, 1974.



Dr. Albert J. P. Theunissen, oost. en
lézants (Belgien), studeerde Elektro-
techniek an der Katholischen Universi-
teit in Leuven (Belgien). Na het Erwerb
des Diploms im Jahre 1977 promou-
verte er 1983 an seinem Institut. Seit
1983 arbeitet er am Physik-For-
schungslaboratorium in Erndhoven,
gegenwärtig als Leiter des HDTV-
Sensor-Projektes.