

Ladungsverschiebeelemente

1 Einleitung

Da Ladungsverschiebeschaltungen oft mit Schieberegistern verglichen werden, sei zunächst von diesen ausgegangen. Ein Schieberegister besteht aus einer Vielzahl von Speicherelementen; in ihm werden die Binärwerte 1 oder 0 bzw. H oder L von Speicherzelle zu Speicherzelle getaktet verschoben. Dieser Vorgang, einen Signalzustand verzögert weiterzuleiten, ist für die Digitaltechnik einfach zu bewerkstelligen, weil nur die beiden festen Werte H und L zu übertragen sind. Aus diesem Grund ist aber ein solches Schieberegister für analoge Aufgaben nicht verwendbar.

Bei Ladungsverschiebeschaltungen dagegen werden nun von Stufe zu Stufe Ladungspakete, die verschieden groß sein können, weitergereicht. Deshalb lassen sich solche Schaltungen für die Digitaltechnik, vor allem aber für die Analogtechnik, bei der viele unterschiedliche Amplitudenwerte zu übertragen sind, verwenden. Sie schließen hier eine Lücke, denn in der Analogtechnik werden Bauteile, die speichern und verzögern, vielfach benötigt. Beispiele dafür sind Aufnahmevorrichtungen für optische Bilder (Halbleiterkameras), bei denen eine vom Licht erzeugte Ladungsverteilung (ohne abtastenden Elektronenstrahl) zeilenweise aus einem lichtempfindlichen Halbleitersubstrat ausgelesen wird, ferner zeitliche Verzögerungseinrichtungen für Audio- oder Videosignale sowie Analogfilter.

Natürlich gibt es für die Analogtechnik schon lange geeignete Verzögerungsleitungen, z. B. LC-Netzwerke, Koaxialkabel, Ultraschallverzögerungsleitungen aus Glas u.v.a. Jedoch genügen diese nur in begrenztem Umfang den oft hinsichtlich Verzögerung und Bandbreite gestellten Bedingungen. Man bemühte sich deshalb sehr frühzeitig, eine Schieberegister für analoge Signale aufzubauen (Bild 1).

Das zu übertragende Signal wird abgetastet und sein Wert in den Kondensator C1 eingespeichert. Dieser Wert wird durch das Taktsignal dann weiter in die Speicherstufe 2 geschoben, und anschließend wird der zweite Abtastwert in den Kondensator C1 gebracht. Zwischen den Kondensatoren/Speichern müssen Schalteinrichtungen liegen, die eine unverfälschte Weitergabe des jeweiligen Signalwertes (der jeweiligen Ladung) gewährleisten.

Man spricht dabei von „Eimerkette“ in Anlehnung an das früher übliche Lösungsverfahren, obwohl zwischen ihm und der analogen Schieberegister eine gravierender Unterschied besteht. Bei der „Eimerkette“ wandern die gefüllten Eimer (die geladenen Kondensatoren), bei der Schieberegister dagegen nur die Ladungen. Letztere ist deshalb sehr viel schwieriger zu verwirklichen, da die Ladungen in schneller Folge und möglichst ohne Ladungsverlust von einer Speicherstufe in die nächste verschoben werden müssen.

Grundsätzlich kann eine Eimerkettenschaltung aus diskreten Bauelementen aufgebaut werden, in der Praxis wird die integrierte Bauweise bevorzugt [1, 2, 3, 4].

2 Gruppierung und Bezeichnung

- CTD = Charge Transfer Devices \triangleq Ladungsverschiebeelemente
- BBD = Bucket-brigade Devices \triangleq Eimerkettenschaltung = EKL \triangleq Eimerkettenleitung
- CCD = Charge-coupled Devices \triangleq Ladungsgekoppelte Elemente
- SCCD = Surface Channel Charge-coupled Devices \triangleq Oberflächenladungsgekoppelte Elemente
- BCCD = Bulk Channel Charge-coupled Devices oder Buried Channel Charge-coupled Devices \triangleq CCD mit versenktem Kanal ¹⁾
- CID = Charge Injection Devices \triangleq Verschiebeschaltungen mit lokaler Ladungsinjektion
- BBDL = Bucket-brigade Delay Lines \triangleq Eimerketten-Verzögerungsschaltungen
- CCID = Charge-coupled Imaging Devices \triangleq Sensoren für Halbleiterkameras

Bild 2 zeigt die Gliederung der verschiedenen Ladungsverschiebeschaltungen [2, 5, 10].

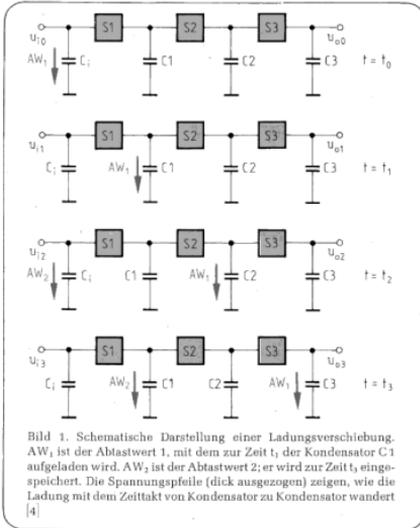
3 Die Ladungsverschiebeschaltungen

3.1 Die Eimerkettenschaltung (BBD)

Die prinzipielle Arbeitsweise zeigt Bild 3. Um nur mit positiven Werten arbeiten zu müssen, wird dem zu übertragenden Spannungsverlauf eine Gleichspannung U_0 überlagert (Bild 3a). Zum Zeitpunkt $t = t_0$ wird durch eine Abtastschaltung der Wert u_1 in den Kondensator C_1 eingespeichert. Die Kondensatoren C1 und C2 sind auf die Spannung U aufgeladen, die Transistoren T1 und T2 sind gesperrt (Bild 3a, b).

Zum Zeitpunkt t_1 (Bild 3c) wird an die Basis von T1 die Spannung U (und zwar $U > U_0 + \hat{u}$) gelegt. Der Kondensator C1, dessen obere Platte nun das Potential $2U$ gegen Masse führt, kann sich über T1 in den Kondensator C_2 entladen, aber nur so lange, bis die Spannung an $C_2 = U$ geworden ist, denn dann sperrt T1. Bei dieser Umladung hat C_1 die Ladung $C_1 \cdot (U - u_1)$ gewonnen. Demzufolge muß der Kondensator C1 die Ladung $C_1 \cdot (U - u_1)$ oder, da $C_1 = C_2$ ist, die Ladung $C_1 \cdot (U - u_1)$ verloren haben. Folglich ist die Spannung an

¹⁾ Auch PCCD = Peristaltic Charge-coupled Devices genannt (Peristaltic = wurmartig fortschreitende Zusammenziehung zur Beförderung eines Hohlkörperinhalts).



C_1 von U auf $U - (U - u_{11}) = u_{11}$ gesunken. D. h. u_{11} ist nun in C_1 gespeichert. Nach diesem Vorgang wird die Basis von T 1 an Masse gelegt.

Zum Zeitpunkt t_2 (Bild 3 d) wird die Basis von T 2 an die Spannung U gelegt. T 2 wird leitend, und u_{11} überträgt sich, wie bei Bild 3 b, nun von C_1 auf C_2 . Gleichzeitig wird von dem zu übertragenden Spannungsverlauf ein neuer Wert u_{12} abgetastet und mit ihm der Kondensator C_2 aufgeladen.

Bei dieser Betrachtung sind aus Gründen der Übersichtlichkeit unberücksichtigt geblieben: die Einflüsse, hervorgerufen vom Basisstrom des Transistors und von der Restspannung an der Basis-Emitter-Sperrschicht, ferner die Tatsache, daß beim Aufladen von C_1 , C_2 die Endspannung U in Abhängigkeit von Ladezeitkonstante und Taktzeit nicht ganz erreicht wird.

Die hier beschriebene Methode der Ladungsübertragung bezeichnet man als Ladungsdefizit-Verfahren, denn es wird nicht der abgetastete Spannungswert übertragen, sondern es wird eine Ladungsdifferenz (gegeben durch Sollspannung und abgetasteten Spannungswert) jeweils von einer Stufe zur vorhergehenden verschoben [4].

3.1.1 Die Eimerkettenschaltung in MOS-Technik

Schon frühzeitig wurde die Eimerkettenschaltung von bipolaren Transistoren auf die MOS-Technik umgestellt. Deren Vorteile sind: gute Integrationsmöglichkeit, der Strom zur Steuerelektrode (Gatestrom) ist praktisch Null, Integration der Kondensatoren als MOS-Kondensatoren bzw. als Vergrößerung der Gate-Drain-Kapazität.

3.1.1.1 Der MOS-Kondensator

Der Kondensator bildet, wie gezeigt, als Ladungsspeicher ein wichtiges Glied in der Eimerkettenschaltung. Die MOS-Technik erlaubt es nun, eine (kleine) Kapazität mit den gleichen technologischen Mitteln herzustellen wie einen MOS-Transistor. Darauf beruht die erwähnte gute Integrationsmöglichkeit der Eimerkettenschaltung bei Anwendung der MOS-Technik.

Bild 4 zeigt den Querschnitt eines solchen MOS-Kondensators. Es wird hier ein p-dotiertes Silizium-Substrat verwendet. Zwischen Metall-Elektrode 2 und Substrat liegt die Oxidschicht 3 (Isolationsschicht, Dielektrikum). Wird eine positive Spannung an die Metall-Elektrode angelegt, dann werden die Majoritätsträger (Löcher) in das Innere des Substrats gedrängt, d. h. der Raum unter der Elektrode verarmt an positiven Ladungsträgern (depletiert). Der positiven La-

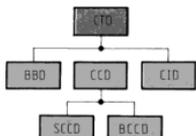


Bild 2. Die Familie der Ladungsverschiebelemente [2].

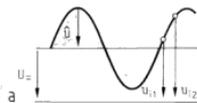
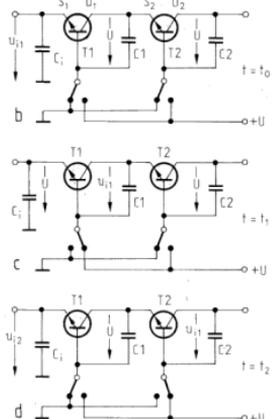


Bild 3. Funktionsweise der Eimerkettenschaltung [4]. a) Dem zu übertragenden Spannungsverlauf wird eine Gleichspannung überlagert; b) die Transistoren T 1 und T 2 sind gesperrt; c) T 1 ist leitend, der Kondensator C_1 kann sich zu einem Teil über T 1 entladen; d) T 2 ist leitend, C_2 entlädt sich teilweise, und ein neuer Abtastwert wird eingespeichert



◀ Bild 4. Schnitt durch einen MOS-Kondensator; 1 = Anschluß der Metallelektrode, 2 = Metallelektrode, 3 = Oxidschicht, 4 = P⁺-dotierte Schicht zur seitlichen Begrenzung des Potentialtopfes, 5 = Minoritätsträger in der verarmten Zone, 6 = verarmte Zone [6]

dung auf der Elektrode steht also eine negative Ladung im Substrat gegenüber..

Wesentlich ist der Verlauf des Oberflächenpotentials, also des Potentials φ_s an der Siliziumgrenzfläche zum Oxid. Man trägt ihn üblicherweise nach unten auf (Bild 5 a) und spricht dann von einem Potentialtopf. Man darf aber bei diesem Bild nicht vergessen, daß Ladung bzw. Potential φ_s stets dicht unter der Siliziumgrenzfläche liegen. Die Größe von φ_s wird durch die angelegte Spannung und das Verhältnis von Oxidschichtkapazität zur Kapazität der Verarmungszone bestimmt. Die seitliche Ausdehnung dieses „Potentialtopfes“ kann durch eine hohe p-Dotierung der Schicht 4 begrenzt werden.

In dem an Majoritätsträgern verarmten Bereich bilden sich thermisch unmittelbar nach Anlegen der Spannung an Metallelektrode und Substrat Elektron-Loch-Paare (Bild 5b). Die dadurch entstehenden Löcher werden in das Substrat abgedrängt, die Elektronen zur Siliziumgrenzfläche gezogen (Bild 5c). Die so entstehende Ladungsansammlung unter der Grenzschicht bezeichnet man als Inversionsschicht.

Diese zusätzliche, aus dem Substrat kommende Ladung ist unerwünscht, denn das erzeugte Potential φ_s soll ja nur von der angelegten Spannung abhängig sein. Die Aufbaugeschwindigkeit dieser Störladung ist jedoch durch die Beschaffenheit des Substrat-Materials und der Grenzfläche beeinflussbar. Man kann hier mit einer Zeitkonstante von einigen hundert Sekunden rechnen. Daraus folgt aber, daß die Signalverarbeitungszeit klein gegen diese Zeitkonstante sein muß (dynamischer Speicher).

Die Aufladung des Kondensators kann außer durch eine Spannungsquelle auch durch einen fotoelektrischen Prozeß bewirkt werden. Im letzteren Fall ist sie ein Maß für den auffallenden Lichtstrom. Von dieser Tatsache wird bei Halbleiter-Bildsensoren Gebrauch gemacht.

3.1.1.2 Die Integration eines MOS-Transistors und eines MOS-Kondensators zu einer Eimerkettstufe

In Bild 6 ist der Bild 3 entsprechende technologische Aufbau für die MOS-Technik gezeichnet. Zu jeder Eimerketten-

stufe gehören ein Transistor und ein Kondensator. Letzterer befindet sich zwischen Drain- und Gate-Elektrode des vor ihm liegenden Transistors. Wie sich aus Bild 3 ergibt, braucht jeder Stufe, die innerhalb der Eimerkettenschaltung liegt, nur eine Gatespannung zugeführt zu werden, denn die Drain-Elektrode von z. B. Stufe 2 ist mit der Source-Elektrode von Stufe 3 und entsprechend die Source-Elektrode von Stufe 2 mit der Drain-Elektrode von Stufe 1 galvanisch verbunden. Diese Tatsachen erklären den gezeigten technologischen Aufbau.

Aus dem MOS-Transistor (Bild 6a) entsteht unter Weglassen der Source- und Drain-Anschlüsse der Abschnitt a in Bild 6c und aus dem MOS-Kondensator (Bild 6b) der Abschnitt b in Bild 6c. Die Abschnitte a und b zusammen stellen eine Eimerkettstufe dar [2, 3, 4, 6, 7].

3.1.2 Ladungsverlust in den Eimerkettstufen

Die Ladungsverschiebung arbeitet im realen Betrieb nicht verlustfrei. Man definiert einen Übertragungsparameter

$$\epsilon = 1 - \frac{Q_n}{Q_{n-1}}$$

Darin ist Q_{n-1} die aus der Stufe (n-1) in die Stufe (n) zu verschiebende Ladung und Q_n die an die Stufe (n) tatsächlich übertragene Ladung. Je geringer die Differenz zwischen Q_{n-1} und Q_n ist, um so kleiner ist ϵ . ϵ gibt also den pro Umladung (Transfer) nicht übertragenen Ladungsbruchteil an. In der Praxis begrenzt dieser Wert die Anzahl der maximal zusammenschaltbaren Stufen [2, 6].

3.1.3 Tetroden-Eimerkettenschaltung

Als Folge des begrenzten Ausgangswiderstandes eines MOSFET-Kanals entsteht eine systembedingte Rückwirkung. Beim MOSFET nimmt g_{os} in der Regel mit I_D zu

$$g_{os} = g_{22s} = \frac{\partial I_D}{\partial U_{DS}} \Big|_{U_{GS} = \text{const}}$$

Da nun bei der Eimerkettenschaltung (Bild 6c) z. B. S_3 mit D_2 galvanisch verbunden ist, tritt eine solche Rückwirkung sowohl zwischen D_2 und S_2 als auch zwischen S_3 und S_2 (also

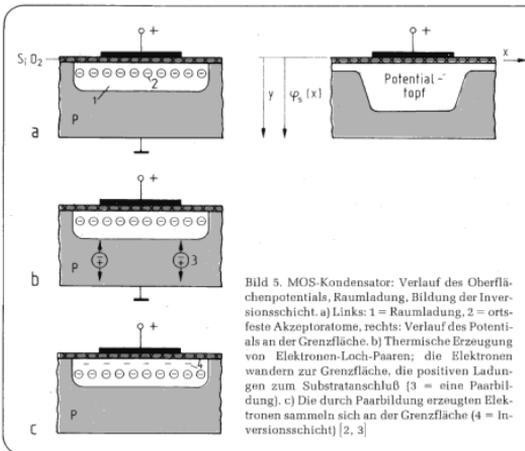


Bild 5. MOS-Kondensator: Verlauf des Oberflächenpotentials, Raumladung, Bildung der Inversionsschicht. a) Links: 1 = Raumladung, 2 = ortsfeste Akzeptoratome, rechts: Verlauf des Potentials an der Grenzfläche. b) Thermische Erzeugung von Elektronen-Loch-Paaren; die Elektronen wandern zur Grenzfläche, die positiven Ladungen zum Substratschluß (3 = eine Paarbildung). c) Die durch Paarbildung erzeugten Elektronen sammeln sich an der Grenzfläche (4 = Inversionsschicht) [2, 3]

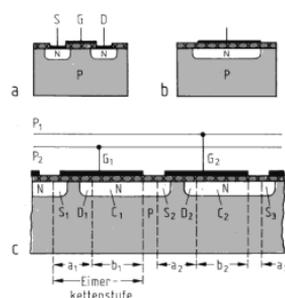
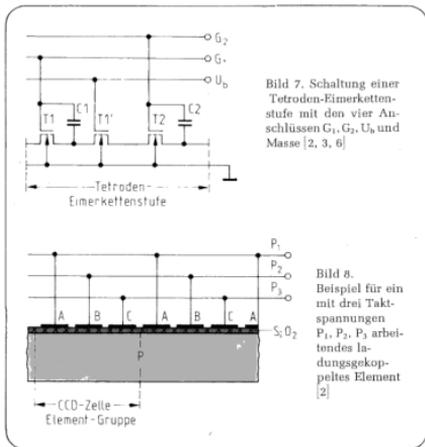


Bild 6. Die Zusammenführung eines MOS-Transistors (a) und eines MOS-Kondensators (b) zu einer Eimerkettstufe. c) Er scheint an G_1 eine positive Spannung, so wird dieser Spannungssprung über C_1 auf die Drainelektrode D_1 übertragen. Es kann ein Strom von S_1 nach D_1 fließen, denn zugleich ist auch für den Transistorabschnitt a_1 die Spannung $U_{G1, S1} > 0$ [2, 3]



von Stufe zu Stufe) auf. Deswegen fügt man eine Trennstufe ein (Bild 7). Ihr Gate liegt auf festem Potential. Mit dieser Maßnahme kann der störende Rückwirkungsseffekt um eine Größenordnung reduziert werden. Man erreicht ϵ -Werte von 10^{-4} , d. h. der Ladungsverlust je Transfer beträgt etwa 0,1%.

Der Ausdruck „Tetrode“ kann aus der Zahl der Anschlüsse je Stufe (Bild 7) und daraus erklärt werden, daß bei einer Röhren-Tetrode das Schirmgitter gleichermaßen entkoppelt und den Innenwiderstand erhöhend wirkt [2, 6, 11, 12].

3.2 Die Ladungsgekoppelten Elemente (CCD)

Ladungsgekoppelte Elemente werden aus einer größeren Zahl von MOS-Kondensatoren gebildet (Bild 8). Mit Hilfe von Taktspannungen, die in der Phase gegeneinander versetzt sind, lassen sich Ladungen von Kondensator zu Kondensator verschieben. Der Abstand zwischen zwei benachbarten Kondensatoren (Metallelektroden) muß so klein sein, daß sich ihre Verarmungsgebiete geringfügig überlappen. Das macht Abstände in der Größenordnung von 2...3 μm erforderlich und bedeutet eine wesentliche Erschwernis der Fertigung. Diese Technologie ist der Grund dafür, daß ladungsgekoppelte Elemente nur integriert, aber nicht diskret aufgebaut werden können.

Dieses Hemmnis läßt sich vermeiden, wenn das Verfahren der Ionenimplantation angewendet wird und dadurch Potentialschwelle, die bei der üblichen Fertigung an den Spalten zwischen benachbarten Kondensatoren (Elementen) auftreten, reduziert werden. Über eine solche Potentialschwelle kann nämlich die zu verschiebende Ladung nicht ungehindert weiter fließen, d. h. ein Teil der Ladung wird zurückgehalten. Der Vorteil des Ionenimplantationsverfahrens liegt nun darin, daß man Abstände (Spalten) von etwa 7 μm zulassen kann und daß trotzdem die Übertragungsverluste klein bleiben (bei einer CCD mit 150 Elementen betragen sie etwa 0,2%).

Der Ablauf einer Ladungsverschiebung

Bild 9 zeigt oben einen Teil des Aufbaus eines ladungsgekoppelten Bauteils, darunter den Verlauf des Potentials φ_s

Bild 8. Beispiel für ein mit drei Taktspannungen P_1, P_2, P_3 arbeitendes ladungsgekoppeltes Element [2]

an der Grenzschicht zu den Zeiten t_1, t_2, t_3, t_4 . Ferner sind die Spannungen an den drei Elektroden A, B, C über der Zeit aufgetragen.

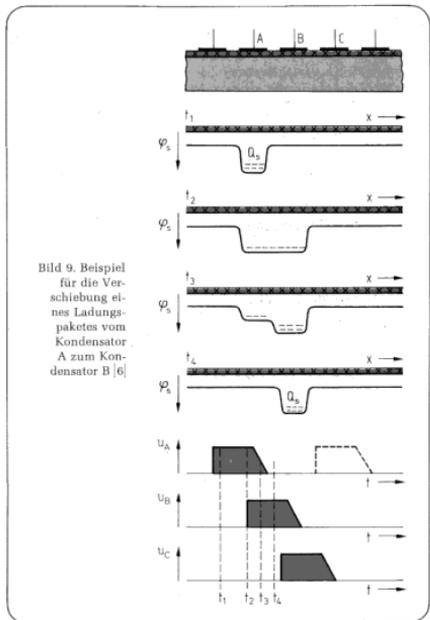
Es sei mit dem für t_1 gezeigten Zustand begonnen. Hier liegt die Spannung U_A an der Metallelektrode A. Demzufolge befindet sich darunter im Substrat der gezeichnete Potentialtopf. In ihm sei die Signalladung Q_s gespeichert.

Zur Zeit t_2 erhält die Elektrode B die Spannung U_B . Der darunter entstehende Potentialtopf schließt sich mit dem unter A befindlichen zu einem zusammen. Wegen der gegenseitigen Abstoßung gleichnamiger Ladungsträger (selbstinduzierte Drift) verteilt sich Q_s über den gesamten Raum unter den Elektroden A und B.

Wenn nun die Spannung an der Elektrode A abnimmt (s. Bild 9, Zeitbereich $t_3 \rightarrow t_4$), so gilt das gleiche natürlich auch für das Potential an der Grenzschicht unterhalb von A. Da die beweglichen Minoritätsträger immer zu der Stelle des höchsten Grenzschichtpotentials φ_s wandern, fließt nun der restliche Teil der Ladung Q_s nach rechts unter die Elektrode B ab. Um bei der bildlichen Ausdrucksweise zu bleiben, kann man auch sagen, daß die Ladung immer in den tiefsten Teil eines kombinierten Potentialtopfes fließt. Man bezeichnet das auch als Drift infolge eines von außen eingeprägten Feldes (fringing field).

Mit Beendigung der Schaltzeit t_4 ist die Signalladung Q_s von Element A zum Element B verschoben. Die dritte Elektrode C wird so gesteuert, daß benachbarte Ladungen nicht ineinanderfließen können (3-Phasen-CCD) [2, 3, 6, 7, 8].

(Fortsetzung folgt)



Ladungsverschiebeelemente

Blatt 3

3.2.1 Oberflächenladungsgekoppelte Elemente (SCCD) und ladungsgekoppelte Elemente mit versenktem Kanal (BCCD)

Bei den bisher besprochenen ladungsgekoppelten Elementen wird die Ladung unmittelbar unter der Grenzfläche verschoben. Man nennt sie deshalb „oberflächenladungsgekoppelte Elemente“ (SCCD). Das Verfahren hat jedoch einen Nachteil. In freien Oberflächenzuständen (Haftstellen) werden Ladungsträger festgehalten und erst nach einer bestimmten Verweilzeit wieder freigegeben. Das bedeutet Verluste, also Verfälschungen in der Übertragung eines Ladungspaketes.

Diese Schwierigkeit läßt sich zu einem großen Teil vermeiden, wenn durch die Schaltung immer eine kleine Grundladung mit verschoben wird. Mit dieser können die Oberflächen-Störstellen aufgefüllt gehalten werden, so daß den Nutzladungen (Signalladungen) dafür keine Ladungsträger entzogen werden. Bei hohen Anforderungen an die Übertragungsgeschwindigkeit und den Übertragungsparameter ϵ reicht diese Verschiebetechnik allerdings nicht aus. Es wird dann die als BCCD bezeichnete Technologie verwendet.

Der Kanal, in dem die Ladungspakete verschoben werden, liegt im Substrat, wenige μm von der Grenzfläche entfernt. Die Störungen durch die Oberfläche (Grenzfläche) sind damit ausgeschaltet. Dazu ist es notwendig, wie Bild 10 zeigt, im Substrat unter der Grenzfläche eine zum Substrat entgegengesetzt dotierte Schicht (z. B. durch zusätzliche Diffusion) zu erzeugen. Mit Hilfe der am Eingang und am Ausgang angelegten Spannung bildet sich ein Kanal, in dem die beweglichen Ladungsträger ausgeräumt sind. Es entsteht eine Raumladungszone, deren Maximum in der Nähe des pn-Übergangs liegt. In dieser können Ladungsträger (und zwar Elektronen bei der in Bild 10 gewählten Dotierung) gespeichert und verschoben werden.

3.2.1.1 Vorteile und Nachteile der beiden Ausführungen BCCD und SCCD

- Bei dem BCCD fallen die Störungen durch Haftstellen an der Oberfläche fort. Der Übertragungsbeiwert wird kleiner, man kann mit einem ϵ von 10^{-5} rechnen.
- Bei dem BCCD ist die Ladungsträger-Geschwindigkeit größer als beim SCCD. Der Grund dafür ist die größere Horizontalkomponente des treibenden Feldes (fringing field).
- Bei dem BCCD ist die transportierbare Ladung etwas kleiner, da ihr Abstand zur Steuerelektrode größer ist [2, 3, 6, 7].

3.2.2 Geschwindigkeit der Übertragung und Übertragungsbeiwert

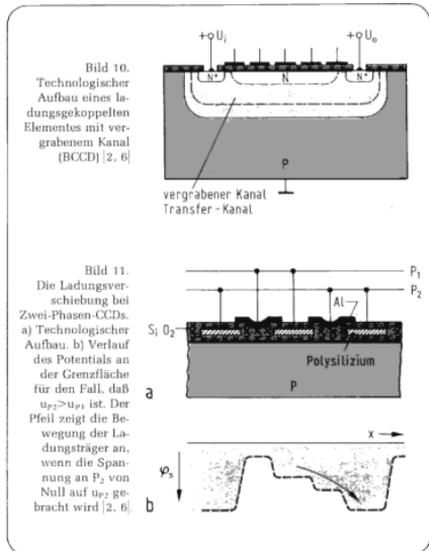
Die Ladungsübertragung zwischen zwei benachbarten Kondensatoren (Elementen) erfordert eine gewisse Zeit-

spanne und geschieht nicht verlustlos. Dadurch sind der Arbeitsgeschwindigkeit und der Zahl der hintereinandergeschalteten Elemente Grenzen gesetzt. Der in Abschn. 3.1.2 definierte Übertragungsbeiwert ϵ ist aus den gleichen Gründen keine Konstante, sondern von der für eine Umladung zur Verfügung stehenden Zeit abhängig. Bezeichnet man die für eine Signalübertragung notwendige Zahl von Umladungen mit n , so darf das Produkt $n \cdot \epsilon$ einen bestimmten Wert (z. B. 0,3) nicht überschreiten, wenn keine unzulässige Verfälschung eintreten soll. Bei gegebenem ϵ bestimmt sich daraus die mögliche Zahl der Verschiebestufen.

Je kürzer die für eine Umwandlung zur Verfügung stehende Zeit (Taktzeit, Übertragungszeit) ist, um so höhere Werte erreicht der Übertragungsbeiwert ϵ [7].

3.2.3 Die Zahl der Taktspannungen bei CCD

Bereits in Bild 9 wurde gezeigt, daß zu einem Ladungstransport in einer vorgegebenen Richtung drei in der Phase gegeneinander versetzte Impulsspannungen benötigt wer-



den. Durch die Spannung 1 wird das Ladungspaket zu dem nächsten Kondensator geschoben, durch die Spannung 2 von diesem aufgenommen und durch die Spannung 3 verhindert, daß die Ladung zurückfließt. Diese Anordnung nennt man Drei-Phasen-CCD. Daneben gibt es Zwei-Phasen-CCDs und Vier-Phasen-CCDs.

Davon interessieren die Zweiphasen-CCDs wegen der einfacheren Leitungsführung (weniger Kreuzungen; auch die Eimerkettenleitungen arbeiten mit zwei Taktspannungen). Es ist dann aber notwendig, eine unsymmetrische Struktur zu benutzen, um die gewünschte Übertragungsrichtung sicherzustellen. Eine mögliche Ausführungsform zeigt Bild 11. Man arbeitet hier mit zwei unterschiedlichen, in zwei Ebenen angeordneten Elektroden. In der oberen Ebene sind es Al-Elektroden, in der unteren Elektroden aus dotiertem Polysilizium. Entscheidend ist, daß die Dicke des Siliziumoxids unter der Al-Elektrode größer ist, als unter der Polysilizium-Elektrode. Demzufolge ist – trotz gleicher Spannung an beiden Elektroden –, wie Bild 11 zeigt, das unter ihnen an der Grenzfläche herrschende Potential unterschiedlich groß. An der Stelle der dünneren Oxidschicht wird die Signalladung gespeichert.

Bei entsprechender Wahl der Taktspannungen entsteht dann der in Bild 11b gezeigte Potentialverlauf. Man sieht, daß die Ladung in den Bereich der nächsten Verschiebestufe (Elementgruppe) fließen muß [2, 6, 7].

4 Anwendung

4.1 Allgemeines

Ladungsverschiebeelemente sind sowohl für die Verarbeitung analoger als auch digitaler Signale geeignet. Sie besitzen im Vergleich zu den Schieberegistern interessante Vorteile: einfachere Integration und kleineren Flächenbedarf je Stufe [3].

4.2 Umwandlung Bild in Signal (Bildaufnahme-Einrichtungen, Kamera, optoelektronische Bildsensoren)

Man erhofft sich hier, daß man in Zukunft Kameras bauen kann, die den mit Röhren bestückten voll ebenbürtig sind. Das bedeutet: Die vom Licht auf einem lichtempfindlichen Halbleiter erzeugte Ladungsverteilung muß in das Videosignal umgewandelt werden können, ohne daß es eines abtastenden Elektronenstrahls bedarf. Man braucht dann kein Vakuum und keine hohen Ablenkspannungen, der Aufbau wird kleiner, einfacher und robuster.

Die bisher z. T. für solche Zwecke benutzten Fotozellen-Anordnungen (Bild 12) eignen sich nur in begrenztem Umfang für solche Aufgaben. Neben dem recht großen Flächenbedarf für eine Stufe (einen Bildpunkt) ist die Koinzidenz-Ansteuerung von Nachteil. Bei diesem Verfahren gibt jeweils diejenige Fotodiode ihre Ladung an den Video-Ausgang ab, deren beide Ansteuerleitungen (x und y) gleichzeitig den notwendigen Impuls erhalten. Je größer nun die Anzahl der Elemente in einer Zeile ist, um so größer ist aber auch die Kapazität der Ausleseleitung. Die Videosignale werden also auf einer Ausleseleitung zusammengefaßt, deren Gesamtkapazität gegen Masse die Kapazität eines jeden Elements um mehrere Größenordnungen übersteigt. Bezeichnet man den Quotienten aus Kapazität der Ausleseleitung und Kapazität eines Elements mit k , so steigt das äquivalente Verstärker-Rauschen mit dem Faktor \sqrt{k} , bezogen auf den Rauschwert, der auftreten würde, wenn die Ausleseleitung nur an ein Element angeschlossen wäre. Dadurch wird bei geforderter Empfindlichkeit (Signal-/Rausch-Verhältnis) die Zahl der Elemente je Zeile begrenzt.

Verwendet man für diese Aufgabe dagegen ladungsgekoppelte Elemente im Schieberegister-Aufbau, so entfällt diese Schwierigkeit. Denn jedes Element hat die gleiche,

keine Kapazität, und jedes Ladung abgebende Element wirkt nur auf die Kapazität eines solchen Elementes. Das letzte Element einer Zeile schließlich ist auf eine besondere Ausgangsstufe geschaltet; erst von dieser geht die Ausleseleitung zur Video-Endstufe.

Die Einspeisung der der einfallenden Lichtintensität proportionalen Ladung ist in Bild 13 dargestellt. Das auf die ladungsgekoppelten Elemente auffallende Licht erzeugt Ladungsträger im Halbleiter. Liegt Spannung an den Elektroden, so sammeln sich unter ihnen die ausgelösten Minoritätsträger. Ihre Zahl ist der Beleuchtungsstärke proportional [3, 7, 9].

4.2.1 Eindimensionale oder lineare Sensoren

In diesem Fall wird von einem Bild jeweils nur eine Bildzeile übertragen. Die Anordnung wirkt wie ein Schieberegister. Alle Stufen werden gleichzeitig beleuchtet. Die dadurch unter den einzelnen Elektroden entstehenden Ladungspakete werden anschließend durch die Taktimpulse zum Video-Ausgang hin verschoben und dort zeitlich nacheinander abgenommen.

Dabei entsteht jedoch folgendes Problem: Während sich bei einem Schieberegister an der einmal je Stufe eingegebenen Spannung bis zur Löschung nichts ändert, wird der lineare Sensor dauernd beleuchtet. Betrachten wir in Bild 14 z. B. das Element 1, so erhält es zu Beginn des Aufnahmevorgangs die dem Bildpunkt 1 entsprechende Ladung. Diese wird beim Auslesevorgang zum Element 2 verschoben, und dort steht sie unter Einfluß der Helligkeit des Bildpunktes 2 usw. Man spricht hier von einem „Verschmieren“ (smearing).

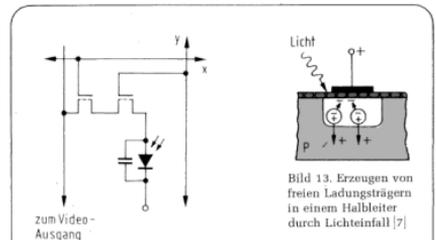


Bild 13. Erzeugen von freien Ladungsträgern in einem Halbleiter durch Lichteinfall [7]

Bild 12. Auslesen eines einzelnen Sensorelements, das in einer x/y-Matrix angeordnet ist. Nur wenn an beiden Transistoren gleichzeitig Gatespannung, zugeführt über die x- und y-Schienen, liegt, können die in der Fotodiode erzeugten Ladungsträger abfließen und einen Spannungsimpuls am Eingang des Videoverstärkers erzeugen [9]

Bild 14. Das „Verschmieren“ der eingepägten Ladung. Bild 14a zeigt den Ladungszustand (Ladung L_1 und L_2) am Ende der Integrationsperiode, kurz vor dem Verschiebe-/Ausleseprozeß.

Durch die hohe Leuchtdichte von Bildpunkt 2 wird unter dem zugehörigen Sensor 2 ein großes Ladungspaket erzeugt, unter Sensor 1, wegen der viel kleineren Leuchtdichte von Bildpunkt 1, dagegen ein kleineres. Bild 14b zeigt den Beginn des Auslesens. Die Ladungspakete sind durch den Verschiebepotential um ein Element nach rechts gerückt. Jetzt steht – während der Taktpause – die Ladung L_1 unter der am Element 2 herrschenden starken Beleuchtung. Es kann zur Neubildung von Ladungsträgern kommen, d. h. der Betrag von L_1 wird verändert

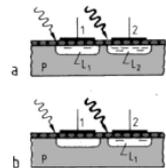
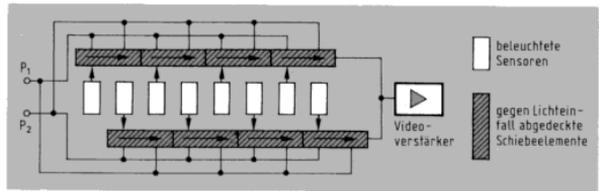


Bild 15.
Linearer Sensor. Die lichtempfindlichen Elemente (Sensoren) sind von den Verschiebeelementen getrennt und wechselweise an den einen oder den anderen Verschiebestrang angeschlossen [2, 9]



Vermindern läßt sich diese Störung z. T. dadurch, daß der Ladungstransport sehr schnell – im Vergleich zur Einspeicherzeit – erfolgt. Vermeiden läßt sie sich durch den in Bild 15 gezeigten Aufbau. Hier sind die Elemente, in denen Licht in Ladung umgewandelt wird, getrennt von denen, in denen die Ladung zum Ausleseanschluß hin verschoben wird. Letztere sind gegen Lichteinfall geschützt.

In den lichtempfindlichen Flächen erfolgt eine kontinuierliche Integration. Die erzeugte Ladung wird durch Taktimpulse in die Elemente der Schiebenschaltung übergeführt. Wie Bild 15 zeigt, verwendet man eine paarige Schiebenschaltung. Auf diese Weise erreicht man eine Verdopplung der Auflösung (ohne den für $n \cdot e$ gegebenen Wert zu überschreiten), verglichen mit der Auflösung bei nur einem CCD-Register. Dieses Verfahren hat zusätzlich den Vorteil, daß man in einer Mischtechnologie (Hybrid-Technik) für die Lichtumwandlung Fotozellen verwenden kann. Das ist z. B. für die Aufnahme von Infrarotbildern wichtig.

Lineare Sensoren verwendet man u. a. für Faksimileübertragungen (dafür wird in [6] ein Ausführungsbeispiel mit folgenden Daten genannt: 1728 Elemente/Zeile, $e < 5 \cdot 10^{-8}$, Taktfrequenz 2,5 MHz, Impulsspannung 6V) und für Profzsteuerungen [2, 6, 7, 9].

4.2.2 Zweidimensionale oder flächenhafte Sensoren

Bei schnellen Bildfolgen (Fernsehen) arbeitet man mit flächenhaften Sensoren. In der Art des Auslesens (man spricht hier von readout-organization²⁾) gibt es verschiedene Möglichkeiten. Das Ziel ist, alle Ladungspakete so zu verschieben, daß sie an einer kleinen, kapazitätsarmen Diode auslesen, d. h. in ein Videosignal umgewandelt werden können.

Dabei sind zwei Punkte wichtig: Das optische Verschmieren soll nach Möglichkeit verhindert werden, und bei der Wahl der „Auslese-Strategie“²⁾ müssen die Gegebenheiten der Fernseh-Übertragung (Format und Bildzerlegung in Zeilen) berücksichtigt werden.

Man unterscheidet nach [7]:

- die Zeilen-Auswahl,
- die Spalten-Auswahl und
- die Bild-Auswahl.

Bei der Zeilen-Auswahl werden durch eine Taktschaltung die Ladungspakete einer Sensorzeile in ein Schieberregister eingelsen. In diesem werden sie dann zum gemeinsamen Ausgang geschoben. Sobald diese eine Zeile ausgelesen ist, wird die nächste genauso verarbeitet. Der Lichteinfall für die Sensoren einer Zeile wird also über die gesamte Zeit integriert, in der alle übrigen ausgelesen werden.

²⁾ Es ist besser, den Ausdruck „Organisation“ für den inneren Aufbau, die Struktur des Sensors (des ICs) zu verwenden und bei der Art des Auslesens von „Auslese-Strategie“ zu sprechen.

Ein Beispiel für die Organisation bei der Spalten-Auswahl bringt Bild 16. Hier sind die fotoempfindlichen Elemente und die gegen Lichteinfall geschützten Schieberegister voneinander getrennt. Das Speichern (Integrieren) der Ladung der Fotoelemente erfolgt gleichzeitig mit dem Auslesen der Ladungen aus dem Register. Das nächste Ladungsbild wird während des Vertikalrücklaufs in die Schieberegister übernommen.

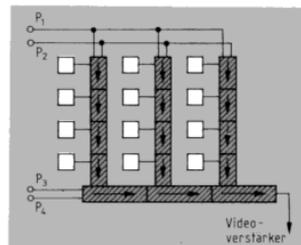
Die Register schieben im Zeilentakt (jeweils während des Zeilenrücklaufs) jede Zeile des gespeicherten Ladungsbildes in das Zeilenregister. Die so in ihm gespeicherten Ladungen werden zum Ausgang in den Videoverstärker getaktet.

Bild 17 zeigt die Organisation bei der Bild-Auswahl. Hier sind zwei Arbeitsflächen notwendig, und zwar eine als Sensorfläche und die zweite als Registerfläche. Während des Bildhinlaufs werden die Ladungspakete in den Sensorenzellen aufgebaut, und während des Bildrücklaufs wird dieses Ladungsbild in die Registerfläche verschoben. In der folgenden Bild-Hinlaufperiode werden die Ladungen Zeile für Zeile (wie in Bild 16) in das horizontale Ausgangsregister verschoben und dort ausgelesen [2, 6, 7, 9].

4.2.3 Verschiebeschaltungen mit lokaler Ladungsinjektion (CID = Charge Injection Device)

Für die Umwandlung Bild in Signal ist noch ein anderes Verfahren zu erwähnen. Es arbeitet nach dem Koinzidenzprinzip (x/y-Adressierung, s. a. Bild 12). Seine Funktion kann mit Bild 18 a erklärt werden. Es zeigt, daß ein (Bildpunkt-)Element aus zwei MOS-Kondensatoren besteht. Jeder Kondensator liegt an je einer der beiden Impulsspannung führenden Leitungen x und y. Über die x-Leitung wer-

Bild 16.
Flächenhafter Sensor mit Spaltenauswahl [2, 7]



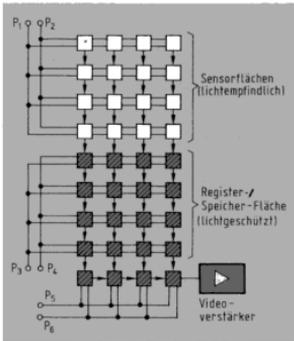


Bild 17. Flächenhafter Sensor mit Bild-Auswahl. Er arbeitet mit zwei Arbeitsflächen: einer Sensorfläche und einer Registerfläche [2, 7, 9]

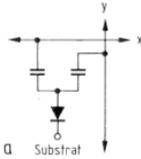


Bild 18a. Funktion eines CID-Sensors. x und y sind die beiden Matrix-Schienen für die horizontalen und vertikalen Abtastimpulse. Die Diode wird durch sie in Flußrichtung gesteuert; sie wird aber nur dann Strom-führend, wenn beide Impulse gleichzeitig anliegen. In den Pausen bleibt die Diode gesperrt, so daß die durch den Lichteinfall erzeugten Minoritäts-Ladungsträger gesammelt werden können [9]

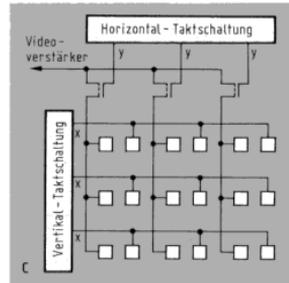


Bild 18c. Schema einer CID-Sensorschaltung [9]

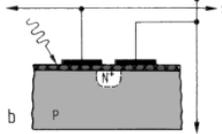


Bild 18b. Aufbau eines CID-Sensors. Die kleine Diode zwischen den zwei Kondensator-Bereichen dient dazu, die unter den Elektroden erzeugten Verarmungszonen miteinander zu verbinden, so daß die Ladungsträger ungehindert hin- und herfließen können (s. a. Abschnitt 3.2) [9]

den z. B. die Horizontal-, über die y-Leitung die Vertikal-Abtastimpulse zugeführt.

Solange mindestens an einer der beiden Elektroden Spannung steht, können unter ihr Ladungsträger gesammelt und gespeichert werden. Je nach der Spannung an den beiden Kondensator-Elektroden wandern die Ladungspakete hin und her. Voraussetzung dafür ist, daß die Verarmungszonen (Potentialtöpfe) unter den Elektroden ineinander übergehen. Dazu müssen die zu einem Paar (zu einem Sensorelement) gehörenden Elektroden dicht nebeneinanderliegen. Man kann das Ineinander-Übergehen aber auch durch die in Bild 18b gezeichnete kleine Diode erreichen.

Wird bei beiden Kondensatoren gleichzeitig die Spannung zu Null gemacht, so verschwinden die Potentialtöpfe, und die gesammelten Ladungspakete (Minoritätsträger), die durch den Lichteinfall erzeugt worden waren, werden in das Substrat injiziert (ausgeschüttet). Hier rekombinieren sie. Der resultierende Substratstrom erzeugt am Ausgang das Videosignal.

Streng genommen handelt es sich bei diesem Verfahren nicht mehr um Ladungsverschiebeelemente, denn die Ladungspakete werden nicht an vielen Elementen entlang verschoben, sondern sie pendeln zwischen den beiden Kondensator-Bereichen nur eines Sensor-Elements hin und her (Bild 18c).

Nimmt man, wie bei dieser Methode geschildert, das Videosignal am Substrat ab, so ist dessen Kapazität gegen Masse nachteilig für das Signal/Rausch-Verhältnis (s. Abschnitt 4.2). Man hat deshalb eine andere Organisationsform entwickelt. Bei dieser werden die beiden Vorgänge, nämlich Signalgewinnung und Injektion der Ladungspakete in das

Substrat, voneinander getrennt. Man spricht von „paralleler Injektion“ \triangleq paralleler Injektion.

In der Speicherzeit werden die durch Lichteinfall erzeugten Ladungsträger unter den Kondensator-Elektroden gesammelt, die an die Horizontal-Taktschaltung angeschlossen sind. Wird nun durch den Vertikalimpuls eine Zeile für den Auslesevorgang freigegeben, dann werden durch Impulse der Horizontal-Taktschaltung die Ladungspakete jeweils unter den Nachbarkondensator verschoben. Die dabei entstehenden Impulsspannungen gelangen über eine der beiden Matrix-Schienen zum Videoausgang. Erst beim nächsten Zeilenrücklauf werden die Ladungspakete in das Substrat injiziert.

Dieses Verfahren hat den Vorteil hoher Auslesegeschwindigkeit und eines guten Signal/Rausch-Verhältnisses. Außerdem kann ein Ladungsbild mehrmals hintereinander ausgelesen werden, solange die Ladungspakete noch nicht in das Substrat injiziert sind (in [6] ist z. B. angegeben, daß ein Bild mit 30 Bildwechseln/Sekunde über drei Stunden kontinuierlich ausgelesen worden ist, ohne daß eine Signalabnahme festgestellt werden konnte) [2, 6, 9].

4.2.4 Die Halbleiterkamera

Die Vorteile einer Halbleiterkamera sind: kompakter Aufbau, kleiner Stromverbrauch, stoßfeste Konstruktion, lange Lebensdauer. Als Beispiel für das bisher im Labor Erreichte sei die RCA-Sensorplatte 52501 mit 350 x 512 Bildelementen und einem Dynamikumfang von 100 : 1 genannt (beim 625-Zeilen-Fernsehen arbeitet man mit etwa 600 x 800 Bildpunkten) [2, 9]. (Schluß folgt)

Ladungsverschiebeelemente

4.3 Verzögerung

Bei der Dimensionierung einer Verzögerungsleitung ist zunächst die allgemeine Beziehung für die Verzögerungszeit zu berücksichtigen. Danach ist die Verzögerungszeit

$$\tau_0 = n \cdot \frac{1}{F}$$

mit n = Zahl der Stufen und F = Taktfrequenz, Abtastfrequenz.

Will man über diese Leitung ein Signal mit einer bestimmten Bandbreite schicken, so ist das Abtasttheorem zu beachten (s. FTA Mo 15, FUNKSCHAU 1979, Heft 2, Seite 91). Danach gilt, daß zur vollständigen Beschreibung bzw. Erfassung eines analogen Signals mindestens $2 \cdot B$ Abtastungen je Sekunde erforderlich sind, also:

$$F \geq 2 \cdot B$$

(mit B = Bandbreite) oder

$$n \text{ (Abtastwerte/s)} \geq 2 B$$

Für eine Verzögerung von τ_0 muß demnach das Register für

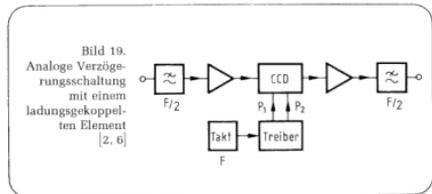
$$n = 2 \cdot B \cdot \tau_0$$

Werte (Elemente) eingerichtet sein. Ferner muß die Taktfrequenz $F \geq 2 \cdot B$ sein. Die Gleichung: $n = 2 \cdot B \cdot \tau_0$ zeigt schließlich, daß bei gegebenem Register (n) eine kleinere Verzögerungszeit durch Erhöhen der Taktfrequenz erreichbar ist.

Die Größe n ist (Abschnitt 3.1.2) begrenzt durch die Faustformel $n \cdot \epsilon < 0,3$. Sie ist noch zu erweitern durch den Faktor k (Anzahl der Übertragungen bzw. Phasen in einem Schiebenschritt) zu

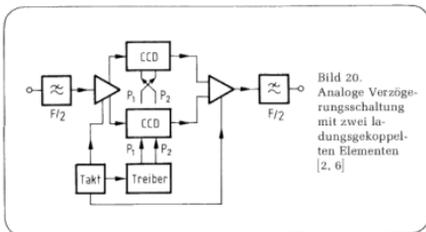
$$n \cdot \epsilon \cdot k < 0,3$$

Die Beschaltung einer solchen Verzögerungsleitung zeigt Bild 19. Am Ein- und Ausgang befindet sich jeweils ein Tiefpaß mit der Grenzfrequenz $F/2$.



Schaltet man zwei Verzögerungskanäle parallel (Bild 20), so kann das Produkt $2 \cdot B \cdot \tau_0$ verdoppelt werden. In diesem Fall läuft von zwei aufeinanderfolgenden Abtastwerten der erste durch die Verzögerungsleitung 1, der zweite durch die Verzögerungsleitung 2. Im Ausgangsverstärker werden die Signalfolgen wieder in der richtigen Reihenfolge zusammengesetzt (Multiplex-Betrieb).

Bei dieser Anwendung ist wichtig, daß die Verzögerungszeit durch Verändern der Taktfrequenz in einem größeren Bereich kontinuierlich eingestellt werden kann. Das gibt die Möglichkeit einer Zeitkorrektur, z. B. um Zeitfehler zu korrigieren oder eine Zeitskala absichtlich zu verzerrern. Damit kann man bei der magnetischen Aufzeichnung von Audio- und Videosignalen Zeitfehler (z. B. infolge Banddehnung oder Schwankungen der Bandgeschwindigkeit) ausgleichen. Ferner ist die Echoentzerrung bei der Sprachwiedergabe möglich; hier wird für die Verzögerungszeit ein Variationsbereich von Mikro- bis Millisekunden gebraucht. Man kann aber auch ein Bild oder eine Bildzeile mit hoher Frequenz in ein Ladungsverschiebeelement einlesen und mit kleinerer Frequenz wieder auslesen; das bewirkt ein Dehnen der Zeitskala [2, 4, 5, 6, 7, 10].



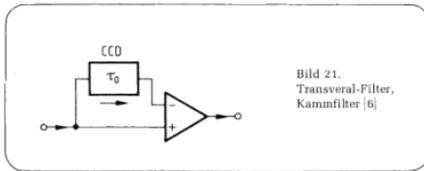


Bild 21.
Transversal-Filter,
Kammfilter [6]

4.4 Digitale Speicher

Hier sind zunächst zwei Eigenschaften der Ladungsverchiebelemente (CTD) festzuhalten:

- Sie bilden flüchtige Speicher (volatile memory), d. h. die gespeicherte Information muß periodisch regeneriert werden. Das ist bei Speicherung von Binärwerten ohne weiteres möglich (periodic thresholding operation). Die Information kann dann – bei einer sehr kleinen Fehlerrate – ständig umlaufen.
- Es können mit ihnen nur Speicher mit seriellem Zugriff aufgebaut werden, ein wahlfreier Zugriff ist nicht möglich.

Man rechnet damit, mit diesen Bausteinen die in der Speicherhierarchie vorhandene Lücke zwischen großen Halbleiter- und Kernspeichern (Zugriffszeiten 10^{-6} ... 10^{-7} s, kleine Speicherkapazität, hohe Bitkosten) und mechanischen Magnetspeichern (Trommeln, Platte, Band; Zugriffszeiten 10^{-1} ... 10^{-2} s, große Speicherkapazität, niedrige Bitkosten) zu T. auszufüllen. Bei Ladungsverchiebelementen liegen die Zugriffszeiten etwa bei 10^{-3} ... 10^{-5} s, und bezüglich Bitkosten und Speicherkapazität nehmen sie ebenso eine Mittelstellung zwischen den beiden genannten Speichergruppen ein.

Ein Beispiel dafür ist ein zeilenadressierbares RAM (LARAM = Line-Addressable RAM) mit 16 384 bit. Hier wird anstelle eines einzelnen Bits eine Zeile oder ein Register adressiert. Das LARAM besteht aus einer MOS-Adreßwahlmatrix und CCD-Schieberegistern [2, 3, 5, 6].

4.5 Filter

Ladungsverchiebelemente (CTD) sind, wie gezeigt, unentbehrlich für die Analogtechnik bei der Verzögerung von abgetasteten Werten (sampled data). Die Verzögerungszeit kann genau eingestellt werden und ist völlig unabhängig von der Signalfrequenz. Deshalb eignen sich CTDs auch optimal für verschiedene Arten von elektronischen Filtern.

Zwei Beispiele bringen Bild 21 und 22. Die Anordnung von Bild 21 ist unter der Bezeichnung Transversal-Filter, Kammfilter, die von Bild 22 als Rekursiv-Filter, Kammfilter bekannt.

In beiden Fällen werden verzögertes und unverzögertes Signal zusammengesetzt. Dabei werden Frequenzen ausgelöscht und andere durchgelassen. Es hängt von der Art der Schaltung und der Verzögerungszeit τ_0 ab, bei welchen Fre-

quenzen die Amplituden-Nullstellen bzw. -Maxima liegen.

In der Schaltung Bild 21 z. B. tritt bei $\tau_0 = \frac{T}{2}$ ein Maximum, bei $\tau_0 = T$ eine Nullstelle auf ($T =$ Schwingungszeit für die Frequenz f , $\tau_0 =$ Verzögerungszeit). Die einzelnen Amplitudenwerte wiederholen sich periodisch mit der Frequenz.

$$\frac{T}{2} = \tau_0$$

$$\frac{1}{2f} = \tau_0$$

$$f = \frac{1}{2\tau_0}$$

Durch Verändern der Taktfrequenz F kann man (s. Abschnitt 4.3) die Verzögerungszeit variieren und so das Filter abstimmen [6, 10].

Literatur

- [1] Funktechnische Arbeitsblätter Es 22. FUNKSCHAU 1977, Heft 1, Seite 19.
- [2] Rienecker, W.: CTD-Technologien und Anwendungen. ELEKTRONIK 1979, Heft 12, S. 39, und Heft 13, S. 74.
- [3] Goser, K.; Pfeleiderer, H.-J.: Ladungsverchiebeschaltungen. ELEKTRONIK 1974, Heft 1, S. 3.
- [4] Sangster, F. L. J.: Der „Eimerkettenpeicher“, ein Schieberegister für analoge Signale. Philips Technische Rundschau 1970/71, Heft 4, S. 97.
- [5] Lamprecht, H. J.: Ladungskoppelte Bauelemente, Radio Elektronik Schau 1976, Heft 8, Seite 16.
- [6] Séquin, C. H.; Tompsett, M. F.: Charge Transfer Devices. Suppl. 8 von Advances in Electronics and Electron Physics. Academic Press, Inc. New York.
- [7] Pfeleiderer, H.-J.: Optoelektronische Sensoren mit CCDs. ELEKTRONIK 1975, Heft 4, S. 88.
- [8] Siemens Presseinformation 2.372-ZFL.
- [9] Weimer, P. K.: Image Sensors for Solid State Cameras. Advanced in Electronics and Electron Physics, Bd. 37, 1975, Academic Press, New York.
- [10] Hollmann, J.: Wie funktioniert eigentlich die Eimerkettenleitung? FUNKSCHAU 1976, Heft 11, S. 434.
- [11] Sangster, F. L. J.: Integrierter Eimerkettenpeicher mit MOS-Transistoren. Philips Technische Rundschau, 31. Jahrg., S. 270.
- [12] Wüsthube, J.: Feldeffekt-Transistoren. Valvo GmbH, Hamburg.

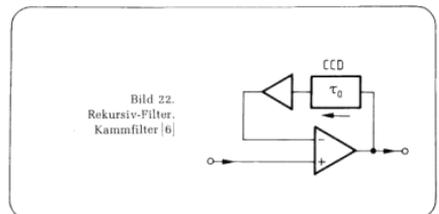


Bild 22.
Rekursiv-Filter,
Kammfilter [6]