

Mikroelektronik und Integration

Dr.-Ing. Ulrich Kirschner, München

In gleichem Maße wie integrierte Schaltkreise preislich interessanter werden, gewinnen sie auch für den kommerziellen Sektor und die Unterhaltungselektronik immer mehr an Interesse. Der Autor gibt im folgenden einen Überblick zu dieser Entwicklung. Gleichzeitig weisen wir in diesem Zusammenhang auch auf die Rubrik „Elektronik im Ausland“ hin, unter der eine umfassende Abhandlung über die Fortschritte integrierter Schaltungen in den USA erscheint.

Die Abmessungen elektronischer Geräte und Baugruppen wurden in den letzten Jahren stetig verkleinert. Der Zug zur Miniaturtechnik hat verschiedene Gründe. Zunächst war es der mit dieser Technik erzielbare Raum- und Gewichtsgewinn. In der breiten Öffentlichkeit zeigen sich diese Erfolge in der Verkleinerung der kommerziellen Geräte wie auch der Rundfunk- und Fernsehgeräte oder der Geräte des mobilen Funks, um nur einige Entwicklungen anzuführen. Aber auch auf verschiedenen anderen Gebieten war der Raumgewinn sehr erwünscht. In der Weiterkehrtechnik z. B. hatte die Mehrfachausnutzung der einzelnen Übertragungswege ein starkes Anwachsen der notwendigen Umsetzungs- und Übertragungseinrichtungen zur Folge, so daß die einzelnen Verstärkerämter mit der herkömmlichen Technik riesige Ausmaße angenommen hätten. Ein weiteres markantes Beispiel sind die elektronischen Datenverarbeitungsanlagen, bei denen auf kleinstem Raum eine große Zahl

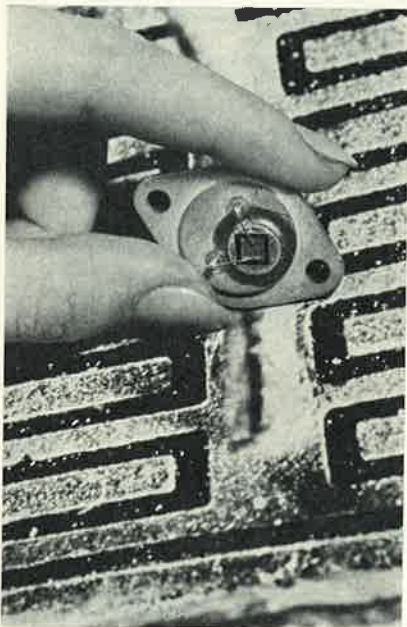


Bild 1: Geöffneter Silizium-Schalttransistor für hohe Ströme. Auffällig ist die Raumstruktur des elektrischen Systems, die im Hintergrund des Bildes vergrößert sichtbar ist

von Funktions-, Steuer- und Recheneinheiten untergebracht werden muß. Begrüßt wird die Raum- und Gewichtersparnis naturgemäß auch bei Flugzeugen: während die elektronischen Anlagen in Flugzeugen früher etwa 2000 Bauelemente enthielten, sind heute hierfür mindestens 150 000 erforderlich. Noch zwingender sind die Forderungen zur Miniaturisierung in der Raketen- und Satellitentechnik. Hier wirkt sich die Gewichts- und Raumsparnis bei den Steuerungs- und Übertragungseinrichtungen direkt in der Dimensionierung der Antriebssätze aus.

Den Einrichtungen für Raumfahrzeuge kam als weiterer Vorteil der Miniaturtechnik ihre hohe Betriebszuverlässigkeit zugute. Während bei einem Nachrichtengerät schlimmstenfalls eine Anzahl von Gesprächen ausfällt, wenn ein Bauteil schadhaft wird, kann der Ausfall von Steuereinrichtungen in Flugkörpern u. U. katastrophale Folgen haben. Versagen beispielsweise bei aktiven Satelliten Übertragungseinrichtungen, die nie mehr repariert werden können, so kann der gesamte Aufwand umsonst gewesen sein.

Weitere bestechende Vorteile der Miniaturtechnik liegen in der hohen Empfindlichkeitssteigerung durch Vergrößerung des Störabstandes, insbesondere des Rauschabstandes, in der Verbesserung der Übertragungsgüte, im geringeren Leistungsbedarf, in der Vereinheitlichung der Schaltungen und deren Anpassungsfähigkeit an die verschiedenen Anwendungsgebiete. Aber auch fertigungstechnische Gesichtspunkte, nämlich wesentlich wirtschaftlichere Herstellungsverfahren, spielen eine große Rolle.

Die Zwischenstufen der Miniaturtechnik wurden relativ schnell überwunden. Heute ist der wichtigste technisch-wissenschaftliche Trend das stürmische Wachstum der Mikroelektronik, deren im Augenblick noch sehr teure Erzeugnisse zunächst noch vornehmlich im militärischen Bereich und in der Raumfahrttechnik Verwendung finden. Dort fallen ihre Vorteile — die wesentlich höhere Zuverlässigkeit, die enorme Raum- und Gewichtersparnis — besonders ins Gewicht.

Auch auf diesem Gebiet wird sich in absehbarer Zeit eine Verlagerung nach dem kommerziellen Sektor hin ergeben. Parallelen zu dieser Entwicklung konnten in den vergangenen dreißig Jahren mehrmals beobachtet werden. Dinge, die ursprünglich für vornehmlich militärische Anwendungsgebiete entwickelt wurden (weil dabei die Preisfrage keine so wesentliche Rolle spielte!), griffen später auf den kommerziellen und zivilen Bereich über, sobald der Preis gesenkt werden konnte. Auf integrierte

DK 621.382-181.4

Festkörperschaltkreise trifft das heute z. T. auch schon zu, da sie aufgrund des besonderen Herstellungsverfahrens, der Planartechnik, wahrscheinlich schon bald so billig hergestellt werden können wie ein Einzeltransistor.

In zunehmendem Maße finden solche Schaltkreise schon in Datenverarbeitungsanlagen Verwendung. Man verwendet heute zwei Technologien bei integrierten Schaltungen: die Schaltkreise aus dünnen Schichten und die Halbleiterschaltkreise. Die mit dieser Technik erreichbare, beträchtliche Verminderung der Einbauvolumina ist ein entscheidender Grund für das stürmische Vordringen der integrierten Schaltungen auf allen Gebieten der Elektronik. Dazu kommt, daß es gelang, (durch Reduzieren der Anzahl der Verbindungsstellen), die Zuverlässigkeit der Schaltungen erheblich zu steigern. Das gleichzeitige Herstellen einer größeren Anzahl von Schaltungen ermöglicht eine große Gleichmäßigkeit der Charakteristiken und darüber hinaus auch günstige Herstellungskosten. All dies sind gute Vorbedingungen für eine umfassende Anwendung der integrierten Schaltungen.

Die Halbleiter- und die Dünnschichtschaltkreise, zu denen man auch die Dickschichttechnologie zählt, sind infolge ihrer unterschiedlichen technologischen Eigenarten auch unterschiedlichen Hauptverwendungsgebieten zugeordnet. Bisher wurden und werden die Halbleiterschaltkreise — vielfach auch monolithische Kreise genannt, weil sie aus Einkristallen aufgebaut sind — bevorzugt als digitale Schaltungen in Datenverarbeitungsanlagen eingesetzt, während die Dünnschichtschaltkreise überwiegend in linearen (analogen) Schaltungen verwendet werden, was aber bei entsprechender Schaltungsauslegung alternierende Anwendung nicht ausschließt. Analoge Schaltkreise sind inzwischen in großer Zahl und verschiedenen Variationen in den Rundfunk-, Fernseh- und Phonogeräten zu finden. Daher lag es nahe, daß man die Anstrengungen zur Einführung von Dünnschichtschaltkreisen in diese Geräte vorangetrieben hat.

In der Unterhaltungselektronik sind die Voraussetzungen für eine sinnvolle Anwendung von Dünnschichtschaltkreisen in weitestem Maße gegeben: eine absehbare und begrenzte Zahl von Schaltungsvarianten, von der Funktion her ganz klar umgrenzte Forderungen an die Eigenschaften der Schaltkreise und schließlich ein kontinuierlicher Bedarf. Diese Voraussetzungen bilden die günstigste Basis für eine Serienfertigung. Eine Serienfertigung ist aber unerlässlich, wenn man ein hohes Qualitätsniveau mit einem „günstigen“ Preis vereinbaren will. Bei Bauelementen, zu de-

nen man auch die integrierten Schaltungen zählen muß, ist der Einsatz in Geräten, deren Endpreis stark von den Bauelementekosten bestimmt wird, erst bei einer sehr niedrigen Preisschwelle lohnend.

Das bedeutet aber für Dünnschichtschaltkreise nun nicht unbedingt, daß der Preis eines Schaltkreises nicht höher sein dürfte als die Summe der Einstandspreise für die Einzelbauelemente, die er ersetzt. Man muß nämlich u. a. auch beachten, daß die Kosten für den Einbau der Einzelteile in die Verdrahtung höher sind als die für den Einbau des Schaltkreises. Darüber hinaus ist für die Entscheidung, ob konventionell oder in Dünnschichttechnik gebaut werden soll, nicht zuletzt auch noch der Anteil der Reparatur- und Serviceaufwendungen zu berücksichtigen. Dieser Faktor wird um so stärker ins Gewicht fallen, je höher die Kompliziertheit und der Aufwand an Bauteilen in einem Gerät wird.

Als Beispiel für diese Entwicklung möge das Farbfernsehgerät gelten, bei dem in vielen Teilen eine Verdreifachung der Bauelemente wegen der Übertragung der drei Grundfarben unerlässlich ist. Hier wird man aus Servicegründen mehr denn je bestrebt sein, in den Geräten die Zuverlässigkeit zu steigern. Funktionsteile, wie der Zf-Verstärker der Tonstufe, die Amplitudensiebe im Farbträger- oder PAL-Umschalter werden für die Auslegung in Dünnschichtschaltungen konzipiert. In tragbaren Rundfunkgeräten spielt die Raum- und Gewichtsfrage zusätzlich zum Preis eine wesentliche Rolle.

Spezielle Schaltungsprobleme

Widerstände in integrierten Schaltkreisen werden während der Basisdiffusion als streifenförmige, p-leitende Schichten gebildet. Der Schichtwiderstand sowie das Verhältnis von Länge zu Breite der Widerstandsbahn bestimmen den Absolutwert. Dabei wird vorausgesetzt, daß die p-leitende Schicht von der umgebenden n-Schicht sowie vom p-leitenden Substrat elektrisch isoliert ist. Jeder diffundierte Widerstand hat jedoch eine verteilte Parallelkapazität sowie einen parasitären npn-Transistor gegen das Substrat, wodurch Nebenschlüsse entstehen können. Beide Effekte lassen sich durch geeignete Maßnahmen beim Entwurf der Schaltung auf ein Mindestmaß herabsetzen. Der als verteilte Widerstands-Kondensatorkette wirkende Widerstands-pn-Übergang kann auch ausgenutzt werden, z. B. als selektives Filter bei Verstärkerschaltungen. Ebenso kann der hohe positive Temperaturkoeffizient zur Kompensation negativer Koeffizienten benutzt werden. Widerstände in integrierter Technik werden heute in Streifenbreiten von etwa 15 bis 25 μm hergestellt; dabei werden Widerstandswerte von 100 Ω bis zu 20 k Ω erreicht. Kapazitäten können in Form von Diodenkapazitäten (Raumladungs-kapazitäten) oder Metalloxyd-Halbleiterkapazitäten (sog. MOS-Kapazitäten) erhalten werden. In beiden Fällen beansprucht eine Kapazität von nur

100 PF eine Siliziumfläche, auf der sonst bequem zwei Transistoren untergebracht werden können. In Digital-schaltungen haben Kapazitäten meist die Funktion einer temporären Ladungsspeicherung. Diese Funktion kann aber auch eine Diode erfüllen. Die in solchen Dioden gespeicherte Ladung ist flächen-unabhängig und lediglich durch den Vorwärtsstrom der Diode bestimmt. Solche Ladungsspeicherdioden können die Funktion einer Kapazität von mehreren hundert Pikofarad übernehmen und dabei nur etwa den Flächenbedarf eines Transistors haben.

Da man in integrierten Schaltkreisen ohnehin Transistoren benötigt, ist es naheliegend, auch die Dioden aus der Transistorstruktur abzuleiten. Die sich daraus ergebenden Diodenkonfigurationen haben sich erst mit dem Aufkommen der integrierten Schaltungstechnik eingeführt. Strebt man Dioden mit hoher Ladungsspeicherkapazität an, so sind dafür Konfigurationen zu schaffen, bei denen die Kollektor-Basis-Strecke als Diode arbeitet.

In neuerer Zeit kommen immer mehr Digital-schaltungen auf, in denen komplementäre npn-ppn-Kombinationen verwendet werden. Es ist im allgemeinen schwierig, die Reihenfolge der einzelnen Diffusionsprozesse so einzurichten, daß man neben npn-Transistoren auch npn-Transistoren mit einigermaßen brauchbarem, gemeinsamen Substrat erhält. Eine Vereinfachung ergibt sich dann, wenn sämtliche npn-Transistoren der Schaltung einen gemeinsamen Kollektoranschluß haben dürfen, der mit dem gemeinsamen p-Substrat identisch ist. Da die n-Epitaxschicht die Basiszone solcher npn-Transistoren bildet, muß ihre Dicke sehr genau auf die Eindringtiefe der Basisdiffusion abgestimmt werden.

In Zukunft dürfte bei den aktiven Bauelementen neben der Weiterentwicklung der komplementären npn-ppn-Schaltkreise die MOS-Technik den entscheidenden Schritt in Richtung auf höchste Integrationsgrade ermöglichen. MOS-Feldeffekttransistoren werden heute schon z. T. als Eingangsstufen bei integrierten Verstärkerschaltungen eingesetzt.

Während früher der Systementwickler Einzelelemente zu Schaltkreisen zusammenfügte, ist in dieser Technik das Einzelelement als solches nicht mehr erkennbar. Es wird in eine Schaltung integriert. Dadurch entsteht eine Reihe von Problemen, zunächst ein technisches: bei dem aus Einzelbauelementen zusammengebauten Schaltkreis kann jedes Element für sich im Hinblick auf die optimale Funktion des Schaltkreises optimal dimensioniert werden. Diese Möglichkeit ist bei den neuen Technologien zumindest sehr stark eingeschränkt.

Fertigungsprobleme

Die Herstellungsverfahren für integrierte Halbleiterschaltkreise erfordern eine große Anzahl schwieriger Foto-, Ätz-, Diffusions- und Aufdampfprozesse. Diese vielen Herstellschritte und die Kleinheit der Bauelemente lassen das Verfahren bei oberflächlicher Betrachtung zunächst sehr teuer und aufwendig

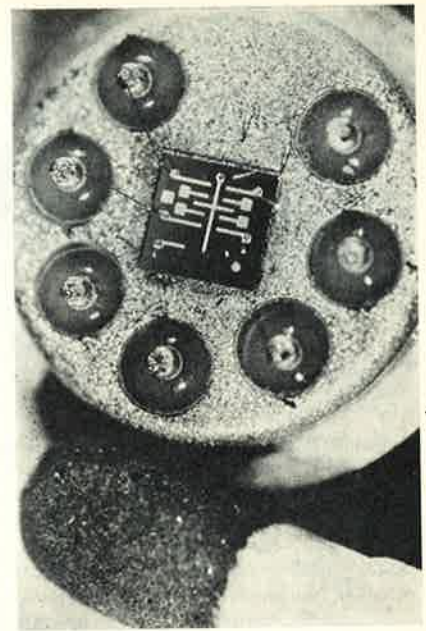


Bild 2: Typischer Festkörperschaltkreis mit z. Z. höchster Packungsdichte

erscheinen. Da jedoch jeweils mehrere Hundert vollständige Schaltkreise auf einer Siliziumscheibe von etwa 25 mm Durchmesser gleichzeitig hergestellt werden, ist der Aufwand je Bauelement gering. Die Ätz-, Diffusions- und Aufdampfprozesse können zudem noch an 20 bis 50 Siliziumscheiben gleichzeitig durchgeführt werden. Das bedeutet, daß die Rationalisierung durch Automatisierung in der Fertigung bereits in den Produktionsmöglichkeiten begründet ist.

Bei der Herstellung von Widerständen in Festkörperschaltkreisen können beispielsweise bis zu etwa 50 Siliziumscheiben mit je 2000 Widerständen gleichzeitig bedampft werden. Es entstehen dabei also 100 000 Widerstände in einem einzigen Aufdampfprozeß. Dieses Beispiel zeigt, daß die Kosten der Bauelemente wesentlich durch ihre geometrische Größe, d. h. durch ihren Flächenbedarf auf der Siliziumscheibe beeinflusst werden. Die Kosten eines „integrierten“ Widerstandes richten sich in den meisten Fällen nach seinem Widerstandswert und nach seiner Belastbarkeit.

Wegen der gegenüber der herkömmlichen Bauweise veränderten Technologie verschiebt sich auch das Kostenverhältnis der aktiven zu den passiven Bauelementen. Während früher aus wirtschaftlichen Gründen möglichst wenige Transistoren verwendet wurden, braucht in integrierten Schaltkreisen mit aktiven Bauelementen nicht gespart zu werden. Ein zusätzlicher Transistor kostet häufig weniger als ein Widerstand und fast immer weniger als ein Kondensator. Aus diesem Grunde wird für integrierte Halbleiterschaltkreise eine vollkommen neue Schaltkreistechnik angewendet, in der man mehr Transistoren und fast keine Kondensatoren verwendet.

In den letzten zwei Jahren hat neben der Aufdampf- und der Tantal-Dünnschichttechnik eine weitere Bauart der Filmschaltkreise mit keramischen Trägerplättchen großes Interesse gefunden, für die sich wegen der etwa 10 bis 20 μm

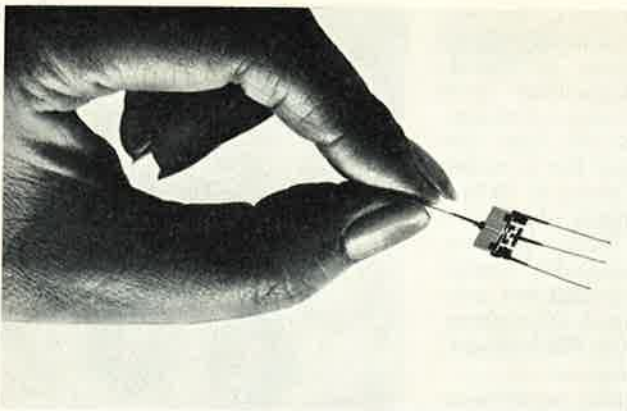


Bild 3: 8 Bauelemente auf einer Fläche von 1 cm² enthält diese komplette Kippstufe mit 1 mm Bauhöhe (4 Widerstände, 2 Kapazitäten und 2 Planartransistoren)

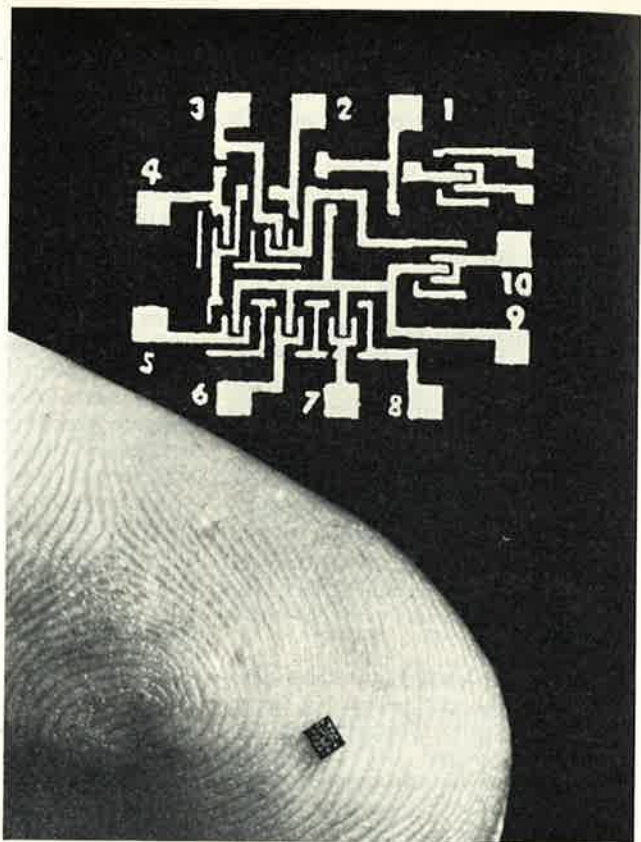


Bild 4: Schaltungen, zu deren Aufbau bisher eine Flachbaugruppe in der Größe einer Postkarte benötigt wurde, finden jetzt auf einer Fingerkuppe bequem Platz. Dieser Monolith enthält beispielsweise 15 Siliziumtransistoren, 13 Widerstände und die dazugehörigen internen Verbindungen →

dicken Schichten zur Unterscheidung von der Dünnschichttechnik der Name Dünnschichttechnik weitgehend durchgesetzt hat. Sie bietet den Vorteil, daß alle Schichten im Siebdruckverfahren aufgebracht werden können, ohne die fertigungstechnisch aufwendigeren Vakuumprozesse in Anspruch nehmen zu müssen.

Der heutige Stand der Technologie läßt bei hoher Produktionsrate und eingespielter Fertigung, d. h. bei einer hohen Produktionsausbeute, einen Preis von ungefähr 1 DM für ein Schaltkreisplättchen mit etwa 20 Bauelementen erwarten. Dieser Wert wird voraussichtlich innerhalb der nächsten drei Jahre erreicht. Dabei werden die Kosten im wesentlichen durch den Preis des Schaltkreises bestimmt. Es ergibt sich also die Tendenz, möglichst viele Bauelemente in einem integrierten Halbleiterschaltkreis unterzubringen. Als erschwerend kommt hinzu, daß die größere Komplexität der

heutigen Schaltungen dazu zwingt, mehr Schaltkreistypen je Gerät zu verwenden. Dies verursacht wiederum höhere Anfangskosten. Man wird also hinsichtlich der Zahl der Bauelemente je Plättchen zu einem Kompromiß gezwungen.

Dieses Problem läßt sich z. T. durch Verwendung des sogenannten Master-Slice-Prinzips umgehen. Das Master-Slice-Prinzip geht von der Tatsache aus, daß, wenn z. B. einer der verwendeten Transistoren unbrauchbar ist, auch die ganze Schaltung unbrauchbar wird. Daher werden auf einem Siliziumplättchen eine große Anzahl (1000 oder mehr) Transistoren, Dioden, Widerstände und Kreuzungselemente hergestellt. Das Prüfergebn jedes Einzelements wird in einem Rechner aufgespeichert. Der Rechner läßt die gewünschte Schaltung entstehen, indem er dafür sorgt, daß nur einwandfreie Bauelemente benutzt werden. Man nutzt also praktisch die Überzahligkeit von Einzelementen aus.

Die Tatsache, daß die Dünnschichttechnik die Herstellung präziser Widerstände und Verbindungsleitungen, die integrierte Halbleiterschaltkreistechnik andererseits die billige Herstellung von Transistoren und Dioden gestattet, legt nahe, die beiden Technologien gemeinsam zu verwenden und damit die jeweiligen Vorteile zu addieren. Diese Fortschritte auf dem Gebiete der Schaltkreistechnologien haben entscheidende Rückwirkungen auf die Konstruktion und Entwicklung nachrichtentechnischer Geräte.

In dieser Festkörperteknik hat z. B. die Endstufe eines 5-W-Verstärkers einen Rauminhalt von nur 0,02 cm³ und der dazugehörige Vorverstärker die Größe eines Streichholzkopfes. Ein Rundfunkempfänger wird nicht größer als eine Streichholzschatel. Die einzelnen

Funktionsblöcke lassen sich als ganze Bausteine zusammensetzen, aus denen man z. B. den gesamten logischen Teil digitaler Rechenwerke und in erweitertem Sinne alle informationsverarbeitenden Anlagen aufbauen kann. Das Rechenwerk eines Digitalrechners üblicher Größe würde damit die Dimensionen eines Ziegelsteines annehmen.

Nur durch die Mikroelektronik kann man erreichen, daß große und komplizierte Schaltungen oder eine Vielzahl von gleichen Schaltungen, wie sie ganz typisch bei Elektronenrechnern vorkommen, in ihren Abmessungen klein bleiben, klein im Verhältnis zu den Strecken, die ein Schaltvorgang, der sich auf einer Leitung annähernd mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, während der Zeit einer Operation zurücklegt. Ein Bauelement oder ein Leitungsstück, dessen Eigenschaften über einen größeren Frequenzbereich gleich bleiben sollen, muß klein gegen die Wellenlänge der höchsten Arbeitsfrequenz sein.

Zwei Vorgänge, die gleichzeitig gleichen Informationsgehalt haben sollen, dürfen, damit keine Verfälschungen durch Laufzeitdifferenzen auftreten, nicht weiter voneinander entfernt ablaufen, als einem Bruchteil der Wellenlänge der Arbeitsfrequenz entspricht. Die Schaltwege zwischen den einzelnen Elementen müssen so kurz sein, daß die dafür erforderliche Zeit, die ein übertragenes Signal braucht, kaum meßbar ist. Die Maßeinheiten sind hier Milliardstel Sekunden. Nur die Superminiaturtechnik ermöglicht eine solch unvorstellbare Steigerung der Arbeitsgeschwindigkeit.

Funktionswirkungen nach Programm

Auch hier ist es durchaus noch möglich, einen Schritt weiterzugehen. Statt wie bei den Festkörperschaltkreisen einen

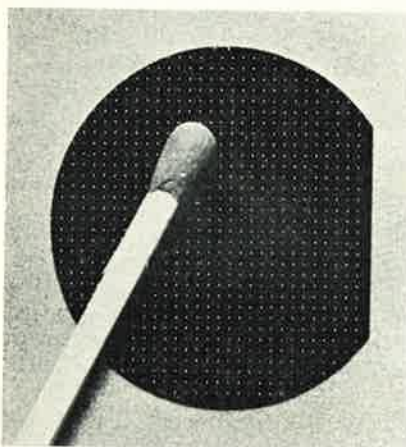


Bild 5: Germaniumscheibe mit 400 Mesa-Systemen (alle Bilder: Siemens)

Kristall örtlich umzuwandeln, um gewünschte Eigenschaften zu erhalten, können entsprechende Gebilde in molekularen Schichten aufgebaut werden. Das geschieht durch Aufdampfen im Vakuum, wobei die einzelnen Metalle und sonstigen Bestandteile in gasförmig atomarem Zustand kurz vor dem Niederschlagen gemischt werden. Durch die Wahl des Mischungsverhältnisses und die Art des Niederschlags werden die geforderten elektrischen Eigenschaften erzielt. Ionisiert man solche Gasstrahlen, so lassen sie sich durch elektrische und magnetische Felder wie Elektronenstrahlen ablenken. Somit können die Formen der aufgetragenen Schichten, ebenso wie ihre Zusammensetzung und Reihenfolge durch ein Programm gesteuert werden. Es ist sehr wohl zu erwarten, daß es eines Tages möglich sein wird, gewünschte elektrische Funktionen als Programm in ein Steuergerät einzugeben, das elektrische Wirkeinheiten produziert, so etwa, wie heute Mehrfarbendrucke entstehen.

An sich könnte mit dieser Technik die fast unglaubliche Dichte von 100 000 Bauelemente/cm³ bzw. 100 Bauelementen/mm³ erreicht werden, wenn nicht die notwendigen inneren Verbindungen und der Schutz gegen äußere Einflüsse zusätzlichen Raum beanspruchen würden. Noch ein anderer Gesichtspunkt ist ausschlaggebend. Schon die tatsächlich erreichte Bauelementedichte täuscht nicht darüber hinweg, daß es schwierig ist, bei einer derartigen Häufung von Bauelementen die umgesetzte Wärmeenergie abzuführen. Die Schwierigkeiten sind also nicht ausschließlich technologischer Art. Gegenwärtig liegt der durchschnittliche Verbrauch der Bauelemente bei etwa 1 mW, so daß ein komplettes Gerät, das 100 000 Bauelemente enthält, beispielsweise ein elektronischer Rechner, mindestens einen Raum von 1 dm³ haben müßte.

Dieser Block hat eine Energieaufnahme von etwa 100 W. Man erreicht dabei dann eine Dichte von etwa 100 Bauelemente/cm³, die auch in den meisten Fällen ausreicht.

Überintegration

Derzeit stehen wir bereits am Anfang einer weiteren Stufe dieser Integration, die man vielleicht als „Überintegration“ bezeichnen könnte. Nicht mehr ein einzelner Schaltkreis zur Durchführung einer logischen Operation befindet sich auf der Halbleiterplatte. Es sollen vielmehr eine Vielzahl solcher Schaltkreise mit bis zu 1000 Einzelementen integriert werden.

Die Tendenz, größere Schaltungskomplexe als bisher zu einer Einheit zusammenzufassen, stellt zusammen mit der Forderung, die Zahl der Schaltkreistypen soweit wie möglich zu beschränken, den Entwickler digitaler Geräte vor neue Aufgaben. Das Problem an sich ist nicht neu. Es stellte sich schon in der konventionellen Technik, wenn man versuchte, auf Steckeinheiten jeweils mehrere miteinander verdrahtete Grundschaltungen gemeinsam unterzubringen und trotzdem mit möglichst wenigen

Typen von Steckeinheiten auszukommen. Die heutige Aufgabenstellung ist insofern anders, als die Verwendung komplexer Halbleiterschaltkreise auch dann noch rentabel ist, wenn bis zu etwa 30% der angebotenen Funktionen gar nicht ausgenutzt werden. Für die Entwicklung digitaler Geräte ergeben sich daraus viele neue Aspekte und Probleme.

Während für die Entwicklung von Datenverarbeitungsanlagen bereits vor mehreren Jahren digitale Schaltkreise normiert wurden, ist man bei nichtdigitalen Geräten bisher nicht über erste Ansätze hinausgekommen. Heute ist es noch üblich, diese Funktionen in den angeführten Schaltkreisen miteinander zu vermengen. Dadurch können die Geräte mit einer minimalen Zahl von konventionellen Bauelementen ausgeführt werden. Die entstehende Vielfalt von Schaltkreisen wirkt sich jedoch in einer starken Erhöhung der Kosten für das Entwickeln und Aufstellen von Unterlagenaus und stellt ein Hindernis für den sinnvollen Einsatz integrierter Schaltkreise dar.

Man darf erwarten, daß in wenigen Jahren die in integrierter Technik hergestellten normierten Schaltkreise wesentlich billiger werden als solche, die aus diskreten Bauelementen aufgebaut sind. Diese normierten Schaltungen wird der Geräteentwickler in Zukunft in gleicher Weise als Bauelement betrachten wie er dies heute bei Transistoren, Dioden, Kondensatoren und Widerständen tut. Die Schaltkreisentwicklung, bisher eine der wichtigsten Aufgaben bei der Entwicklung von Geräten, wird in Zukunft mehr und mehr im Rahmen der Bauelemententwicklung durchgeführt werden. Der Schaltkreisentwickler muß sich in Zukunft in der Halbleitertechnologie ebenso auskennen wie in den Problemen des Geräteentwicklers. Mit dem steigenden Umfang der Geräte wird es notwendig, den Systemfragen, wie Redundanz, optimale Kodierung, Minimierung unter Berücksichtigung der von den Schaltkreisen vorgegebenen Verknüpfungsbedingungen, mehr Aufmerksamkeit zu wid-

men; eine Aufgabe, die dem Geräteentwickler zufällt.

Funktionsblöcke

Die Grenzen der Mikroelektronik liegen in der Fähigkeit, die Dotierung auf kleinstem Raum zu steuern und schließlich in der Kristallstruktur selbst. Deshalb ist es verständlich, daß bei der Festkörper-Schaltkreistechnik die notwendigen Genauigkeiten und vor allem die Temperaturkoeffizienten noch nicht zufriedenstellend beherrscht werden. Der nächste Schritt wären die sogenannten Funktionsblöcke. Bei den bisher geschilderten Monolithen kann man Transistoren, Dioden, Widerstände und Kondensatoren noch als Einzelbausteine räumlich identifizieren. Ihre Wirkungen sind zonal verteilt. Die Einzelwirkungen sind durch Leitungszüge miteinander verknüpft. Bei Funktionsblöcken dagegen fällt diese Differenzierung vollständig weg. Hier hat man es nur mit funktionellen Wirkungen zu tun, die die gleichen Aufgaben erfüllen, wie konventionelle, mit Einzelementen aufgebaute Schaltungen.

Ein Beispiel hierfür ist der Festkörpergleichrichter. Dieser wird als Funktionsblock mit drei getrennten Zonen dargestellt. Beim Anlegen der Netzspannung an die Widerstandszone 1 wird diese aufgeheizt. Die Wärme überspringt die Isolierzone 2, die nur elektrisch, aber nicht thermisch isoliert, erreicht die thermoelektrische Zone 3 und erzeugt hier unter Ausnutzung des thermoelektrischen Effektes eine elektrische Leistung.

Die Spannung läßt sich bei korrekter Beherrschung des Materials der Zone 3 auf einen genauen Wert einstellen. Es ist keine Siebung notwendig, weil der Heizübergang innerhalb des Blockes völlig gleichförmig erfolgt. Man sieht aus diesem Beispiel, daß man, will man spezifisch physikalische Effekte ausnutzen, diese genau kennen muß, um dann aufgrund der Analyse der Schaltfunktion deren physikalische Aufteilung auf die einzelnen Zonen vornehmen und deren Grenzen und Übergänge festlegen zu können.

Chopperstabilisierter Operationsverstärker

Integrierte Schaltungstechnik und Chopperstabilisierung mit Feldeffekttransistoren sind die Kennzeichen eines neuen epoxydharzgekapselten Operationsverstärkers. Bemerkenswert an diesem Verstärker sind die niedrige Drift von 2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ bzw. 3×10^{-12} A/ $^\circ\text{C}$, eine Verstärkung von 140 dB, eine Kleinsignalbandbreite von 1 MHz und eine nominale Ausgangsspannung von ± 10 V bei 4 mA. Die Abmessungen des gekapselten Verstärkers sind 5 cm \times 2,5 cm \times 1,75 cm, das Gewicht wird mit 40 g angegeben. Der besonders gegen Schock und Vibration unempfindliche Operationsverstärker ist für Anwendungen in

Luft- und Raumfahrt geeignet sowie für andere Meßaufgaben, die kleine Abmessungen und hohe Leistung erfordern.

