

Es ist noch keine 30 Jahre her, als die Elektronikindustrie dazu überging, den bis dahin üblichen «Drahtverhau» in der Verbindungstechnik der Bauelemente einer elektronischen Schaltung durch die Leiterplatte abzulösen. Damit war der erste Integrationsschritt vollzogen, der flächenmäßig unteilbar die Verdrahtung erfaßte. Die erforderlichen passiven und aktiven Bauelemente wurden nachträglich hinzugefügt und in einem einzigen Lötvorgang mit der flächenhaften Verdrahtung verbunden. Ein nächster Integrationsschritt wurde erreicht mit der Schichttechnik, wobei bei der Dick- schichttechnik das Siebdruckverfahren eingesetzt wird. Dabei werden vor allem Widerstände in die flächenhafte Leiterstruktur integriert, während man meist Kondensatoren, Spulen und aktive Bauelemente danach einfügt. Eine weitere Verkleinerung sowie eine höhere Präzision bringt die Dünnschichttechnik, mit der sich im wesentlichen neben der Verdrahtung aber auch nur Widerstände und Kondensatoren flächenhaft erzeugen lassen.

Den wesentlichen Fortschritt in der Mikroelektronik brachte die Halbleiterblocktechnik. Bei dieser Technik, bei der passive und aktive Schaltungen nur Flächen im mm^2 -Bereich erfordern, lassen sich auf einer Sili-

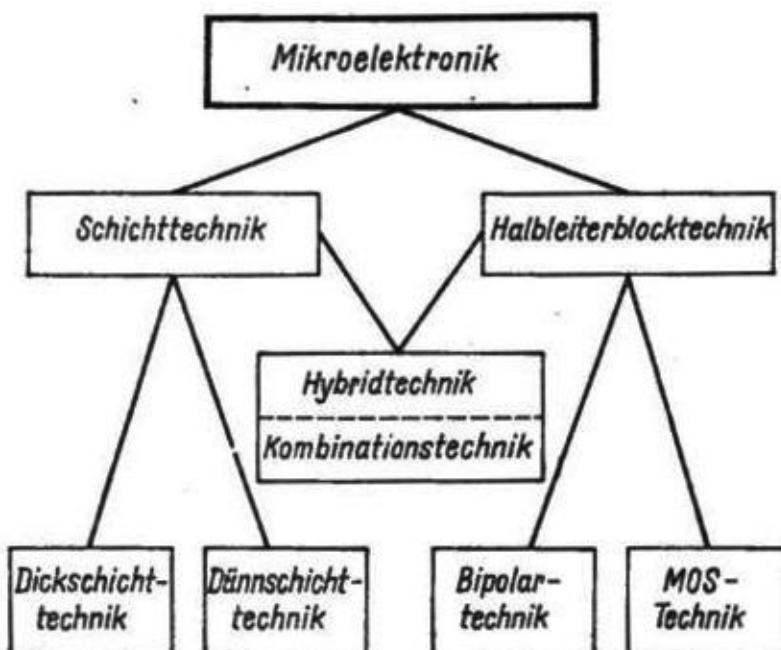


Bild 1
Überblick über die
Techniken in der Mikro-
elektronik

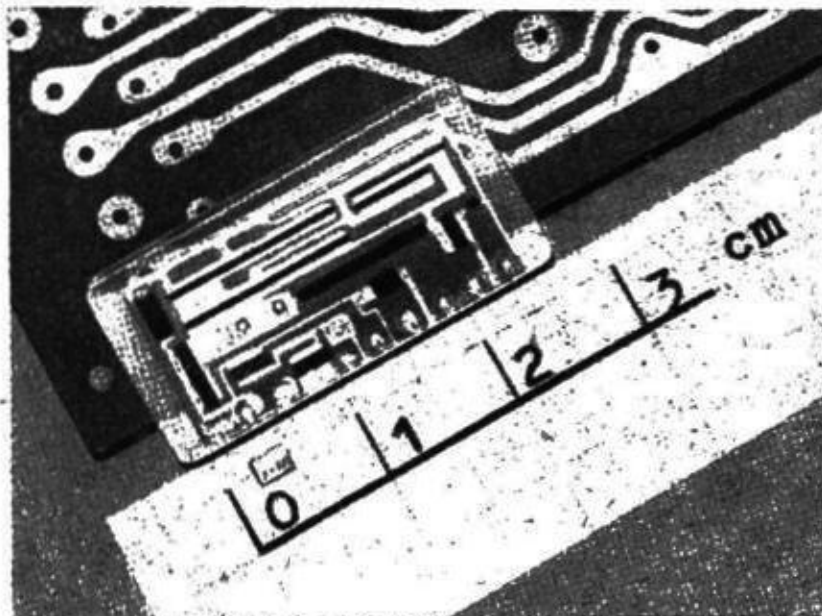
ziumsustratscheibe eine Vielzahl gleichartiger Schaltkreise parallel herstellen. Allerdings kann die Halbleiterblocktechnik nicht alle Erfordernisse der modernen Elektronik erfüllen. Deshalb hat heute die Schichttechnik weiterhin ihre Daseinsberechtigung, und sie wird auch für spezielle Anwendungsbereiche weiterentwickelt.

Die Dickschichtschaltung

Das Trägermaterial (Substrat) der Dickschichtschaltung ist eine 94%ige Al_2O_3 -Keramik, etwa 0,3 ... 1 mm dick, mit Flächen von 1 ... 30 cm^2 . Die Oberflächenrauigkeit liegt bei etwa 1 μm , die Erweichungstemperatur bei etwa 1600°C. Dieses Substrat hat eine ausreichende Wärmeleitung, übersteht gut die Einbrennprozesse bei etwa 900°C und weist auch eine genügende mechanische Festigkeit auf.

Unter Anwendung von Siebdruckmasken werden Leiterbahnen, Leitungskreuzungen, Widerstände und auch Kondensatoren mit Pasten aufgedruckt bei einer Schichtdicke von 25 ... 30 μm . Beim Einbrennen geht die Schichtdicke auf 15 ... 20 μm zurück. Die verwendeten Pasten bestehen aus Metall und dessen Oxid sowie einem Glasanteil. Weit verbreitet sind Silber-Palladium-Pasten mit unterschiedlichen Flächenwiderständen (je nach Zusammensetzung). Für Leitungskreuzungen wird eine Glasschicht aufgedruckt, die beide Leitungen gegeneinander isoliert.

Widerstände und Dickschichttechnik können für die Toleranzen 20% und 10% im Bereich 1 Ω bis 10 $\text{G}\Omega$ produziert werden. Kleinere Toleranzen (5%, 2%, 1%) sind im Bereich 1 Ω bis 100 $\text{M}\Omega$ möglich, wobei zum Abgleich ein rechnergesteuertes Laser- oder Elektronenstrahlverfahren eingesetzt wird. Dabei wird durch berührungsloses Abdampfen von Widerstandsmaterial der Widerstandswert bis zum Sollwert erhöht. Die Belastbarkeit der Dickschichtwiderstände geht bis etwa 2 W/cm^2 , der Temperatur-



*Bild 2
Vergleich der Größenordnungen in der Schaltungsintegration, dm-Bereich – gedruckte Leiterplattenschaltung, cm-Bereich – Schichtschaltungen, mm-Bereich – Halbleiterblockschaltungen*

koeffizient liegt im Bereich $+300 \dots -1000 \cdot 10^6 / ^\circ\text{C}$. Dickschichtkondensatoren haben eine geringe Bedeutung, meist werden vorgefertigte keramische Kondensatoren in Chipform eingelötet. Mit dielektrischen Pasten auf der Basis von Bariumtitanat ergeben sich Flächenkapazitäten von etwa 10 nF/cm^2 , wobei die Herstellung durch mehrfache Druckvorgänge erschwert ist. Allerdings wurden schon Dielektrizitätskonstanten bis 2000 erreicht. Induktivitäten bis $1 \mu\text{H}$ sind möglich durch gedruckte Spiralen, allerdings sind die Güten klein und schwer reduzierbar. Für aktive Bauelemente in Dickschichttechnik gibt es keine Lösungen.

Die Dünnschichtschaltung

Die Dünnschichttechnik erlaubt eine weitere Verringerung der Abmessungen. Als Substrat wird Aluminiumoxid-Keramik mit sehr kleiner Rauhtiefe oder Borsilikatglas ($0,2 \dots 0,5 \text{ mm}$ stark) verwendet. Zum Aufbringen der Schichten benutzt man das Aufdampfverfahren im Hochvakuum oder Katodenzerstäubung. Die Schichtdicken betragen bei der Dünnschichttechnik nur noch 20 bis 100 nm, bei Dünnschichtkondensatoren ist die Schichtdicke meist größer. Zur Strukturierung der Schaltung auf dem beschichteten Substrat kann einmal die Fotoätztechnik verwendet werden. Es können aber auch größere Strukturen über entsprechende Masken aufgebracht werden. Der Feinabgleich erfolgt rechnergesteuert mit Abtragen durch einen Laserstrahl oder mit einem Elektronenstrahl.

Bei der Aufdampf-Maskentechnik wird als Schichtmaterial Chromnickel aufgedampft. Der Flächenwiderstand liegt im Bereich $20 \dots 1000 \Omega$, je nach Schichtdicke. Somit können auf einer Substratfläche von 1 cm^2 als Summe der Widerstände maximal $2 \text{ M}\Omega$ hergestellt werden. Der übliche Fertigungsbereich für Widerstände liegt im Bereich 20Ω bis $1 \text{ M}\Omega$ bei Toleranzen von 10% bis $0,1\%$. Die Belastbarkeit ist etwa 300 mW/cm^2 . Dünnschichtkonden-

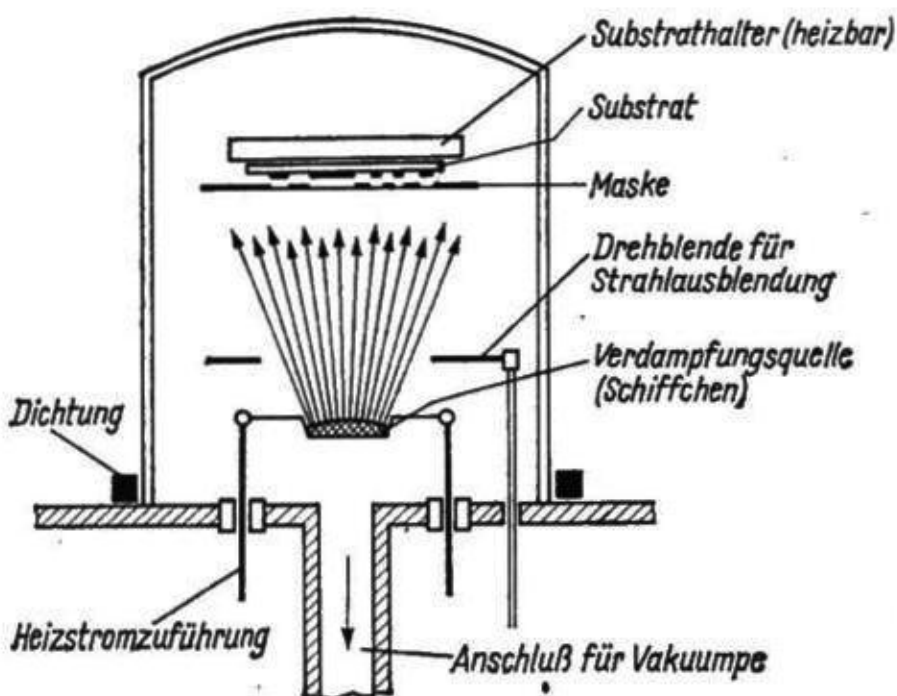


Bild 3
Prinzip des Aufdampfverfahrens im Hochvakuum

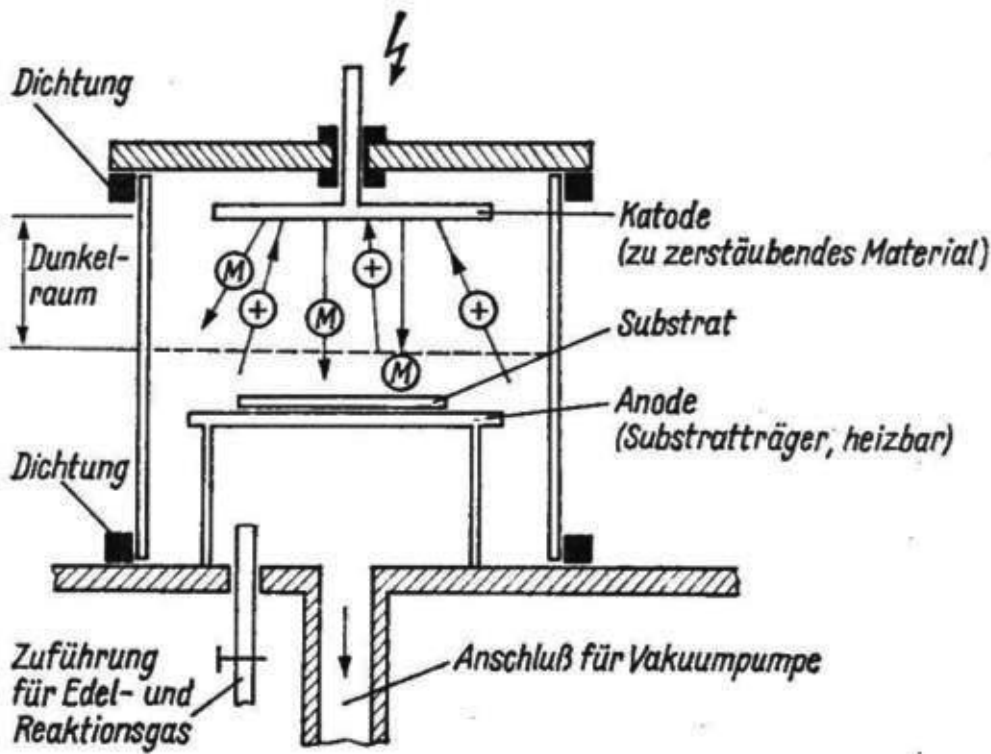


Bild 4 Prinzip der Katodenzerstäubung

satoren haben bei dieser Technologie ein Siliziumoxid-Dielektrikum, erreicht wird eine spezifische Kapazität von $20 \dots 100 \text{ pF/mm}^2$. Der reproduzierbare Kapazitätsbereich liegt von 10 pF bis etwa 1 nF . Für Leiterbahnen können Mischschichten eingesetzt werden (Gold, Aluminium, Eisen), die einen niedrigen Flächenwiderstand ($100 \dots 300 \text{ m}\Omega$) ergeben. Durch eine zusätzliche Verzinnung wird der Leiterbahnwiderstand noch erniedrigt. Das verwendete Glassubstrat enthält bei einer Größe von $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ bzw. $60 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ bis zu 36/48 Einzelschaltungen. Bei einem Durchlaufzyklus können auf diese Weise bis zu 10000 Schaltungen realisiert werden.

Schwer verdampfbare Materialien werden durch Katodenzerstäubung als Schicht auf dem Substrat aufgebracht. Dabei hat sich für Dünnschichtwiderstände vorwiegend Tantalnitrid durchgesetzt. Da sich durch anodische

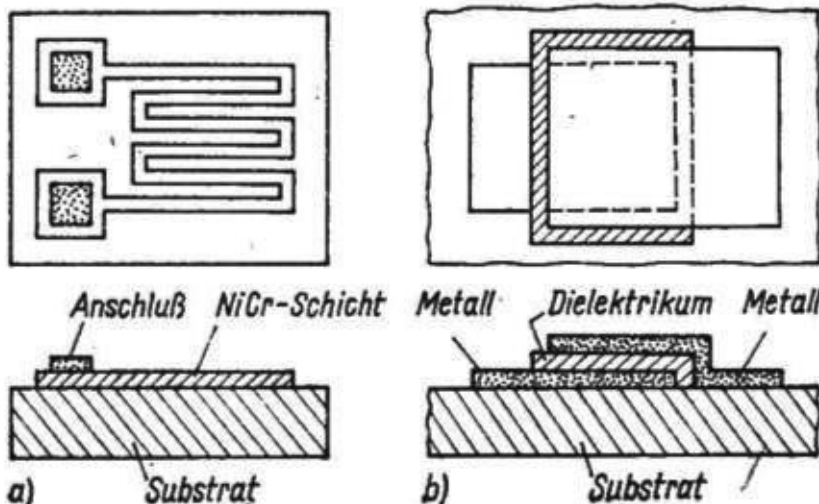


Bild 5 Aufbau des mäanderförmigen Schichtwiderstands (a) und Aufbau des Schichtkondensators (b)

Oxidation Tantalpentoxid bildet, das ein guter Isolator ist, kann man es gleich als Kondensator-Dielektrikum verwenden. Widerstände lassen sich im Bereich 10Ω bis $30 \text{ k}\Omega$ realisieren, Kondensatoren im Bereich von 50 pF bis 50 nF . Da der Temperaturkoeffizient bei solchen Kondensatoren positiv ist, dagegen bei solchen Widerständen negativ, lassen sich mit dieser Technologie hochkonstante RC -Netzwerke fertigen.

Dioden und Feldeffekttransistoren sind in der Dünnschichttechnik schon realisiert worden, aber es wurden noch keine konstanten Eigenschaften über einen längeren Zeitraum erreicht. Deshalb werden heute noch aktive Bauelemente nachträglich in die Schichtschaltung eingebaut.

Die Hybridtechnik

Merkmal der Hybridtechnik ist es, daß auf einem Baustein in Schichttechnik auch Schaltelemente enthalten sind, die mit einer anderen Technologie hergestellt wurden. Das können Chipkondensatoren in keramischer Ausführung sein, oder bei größeren Kapazitätswerten Folie- oder Tantalkondensatoren. Bei den aktiven Schaltelementen, die in Halbleiterblocktechnik hergestellt werden, dominieren für Hybridschaltungen Transistorchips in unterschiedlicher Bauform (Mikro-E, Flip-chip- und Beam-lead-Technik, Flying-wire). Komplette IS-Chips werden heute mit Drahtbonden eingefügt, neue Verfahren mit Filmträgerschaltkreisen sind vorgesehen.

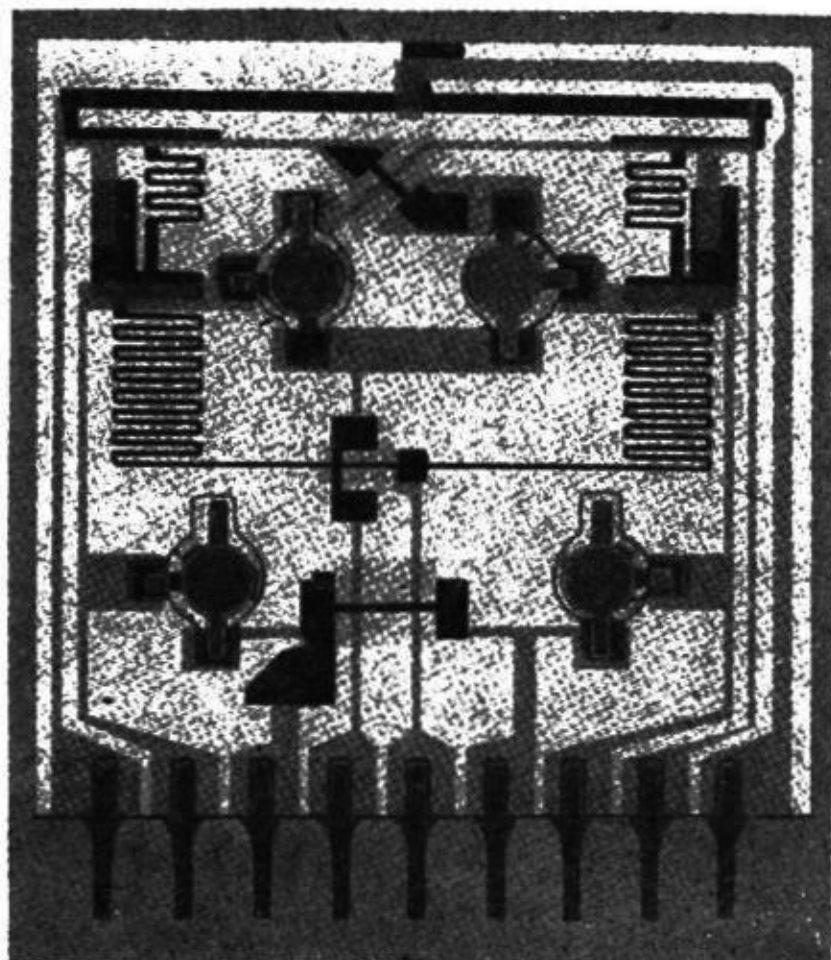


Bild 6
Ansicht einer Tantal-Dünnschichtschaltung. Die Hybridschaltung ist eine bistabile Kippstufe, bestehend aus 6 Widerständen, 3 Kondensatoren, 2 Dioden und 2 Transistoren. Die Abmessungen sind $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$

Vorteile der Hybridtechnik bestehen darin, daß sie schon bei kleinen Stückzahlen (ab etwa 1000) rentabel sein können, daß die Entwicklungskosten wesentlich geringer sind als bei der Halbleiterblocktechnik und auch die Entwicklungszeit sehr kurz ist. Es können Bauelemente in die Hybrid-schaltung einbezogen werden, die sich nicht integrieren lassen, außerdem weisen die Bauelemente der Hybridschaltung nicht die komplizierten Wechselwirkungen auf, wie sie zwischen den Bauelementen einer Halbleiterblock-schaltung existieren. Als Nachteile muß man ansehen, daß mit der Anzahl der verwendeten Bauelemente die Kosten für einen Hybridbaustein ansteigen und infolge der Lötstellen nicht die Zuverlässigkeit wie bei integrierten Schaltungen erreicht wird.

Größere Hybridschaltungen werden meist in Form der Multichiphybrid-technik aufgebaut. Dabei werden mehrere Dünnschicht- und Halbleiter-blockbausteine auf einem gemeinsamen Träger oder in einem Gehäuse zusammengefaßt. Damit lassen sich kurzfristig komplexe Schaltungen realisieren, d. h. neue großintegrierte Bausteine.

Die Kombinationstechnik

Im Gegensatz zur Hybridtechnik werden bei der Kombinationstechnik Dünnschichtschaltungen auf einer Halbleiterblockschaltung aufgebracht. Dabei werden aktive Bauelemente in Halbleiterblocktechnik hergestellt und dann passive Bauelemente (Widerstände, Kondensatoren) in Dünnschicht-technik aufgebracht. Im Fertigungsprozeß ist die isolierende SiO_2 -Schicht bei der Halbleiterblocktechnik gleich vorhanden, so daß man mit vor-handenen aktiven Halbleiterstrukturen schnell und billig neue Schaltungen auch in kleineren Stückzahlen herstellen kann. Da Dünnschichtbauelemente günstigere Werte aufweisen, kann eine optimale Funktion der Kombina-tionsschaltung erreicht werden.

Einsatzbereiche von Schichtschaltungen

In großem Umfang werden Widerstandsnetzwerke in Dick- und Dünnschichttechnik produziert. Diese setzt man als Spannungsteiler, als Dämpfungs-glieder oder als Netzwerke für D/A-Wandler, analoge Schaltungen usw. ein. Kombiniert mit hochwertigen Kondensatoren werden stabile RC-Netzwerke für RC-Oszillatoren, aktive RC-Filter usw. gefertigt. Wesentlich umfangreicher sind die Einsatzbereiche, wenn man aktive Bauelemente (Transistoren, IS) in Form der Hybridschaltung einbezieht. So gibt es eine Vielzahl von einfachen digitalen und analogen Hybridbausteinen, die in der Steuer-, Meß- und Regeltechnik eingesetzt werden. Geeignet für die Hybrid-technik ist der Operationsverstärker, weil sich damit die Probleme der Verstärkung gut lösen. Es gibt in der Hybridtechnik Operationsverstärker, die speziellen Anforderungen genügen, komplette aktive Filter usw.

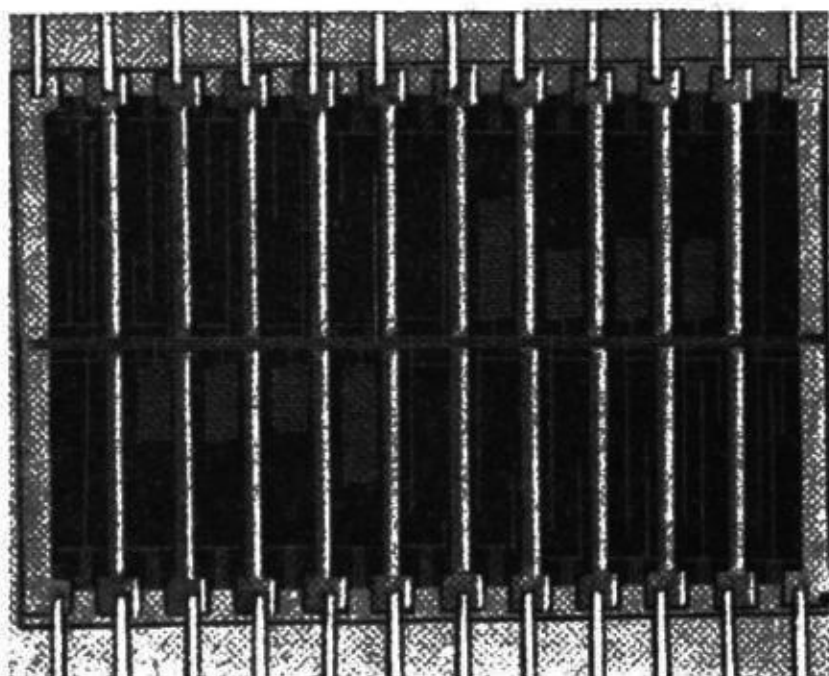


Bild 7 Ansicht eines elfstufigen Spannungsteilers (Kombinat Keramische Werke Hermsdorf) nach dem Verzinnen. Durch Trennen erhält man 2 Netzwerke. Für die Anfertigung der einzelnen Widerstände aus der vollbedampften Widerstandsschicht benötigt der rechner gesteuerte Elektronenstrahl nur Sekundenbruchteile

In größerem Umfang werden D/A- und A/D-Wandler in Hybridtechnik produziert, sowie in der Multichiphybridtechnik umfangreichere Schaltungen, wie sie in der Halbleiterblocktechnik nicht verfügbar sind (Schieberegister, Frequenzteiler usw.). Vorteilhaft lassen sich Hybridschaltungen vor allem auch dann einsetzen, wenn größere Wärmemengen abzuführen sind, z.B. bei NF-Leistungsverstärkern. Für die Ausführungen in Halbleiterblocktechnik werden schon bei NF-Leistungen von wenigen Watt mitintegrierte hochwirksame Schutzschaltungen benötigt, um ein sicheres Arbeiten zu gewährleisten. Im NF-Leistungsbereich von 30 ... 200 W sind daher Hybridbausteine üblich, die problemlos in HiFi-NF-Verstärkern eingesetzt werden können.

Die Schichtschaltung mit ihren Leiterstreifenstrukturen erschließt auch neue Gebiete, in denen die Technologie gut angepaßt ist. Das ist z.B. der Fall bei der Höchsthochfrequenztechnik, weil im Mikrowellenbereich bis etwa 100 GHz flächenhafte Leiterstrukturen mit hoher Genauigkeit durch die Dünnschichttechnik möglich sind. Solche Mikrowellenbausteine wie Oszillatoren, Mischer, Detektoren, Filter, Koppler und Verstärker werden zunehmend in Hybridschichttechnik ausgeführt.

Die Vorteile der Schichttechnik sind auch die Ursache dafür, daß es viele spezielle Kundensaltungen in Hybridtechnik gibt. Hersteller von Spielzeug, Autos, Kameras, Meßgeräten, Funksprechgeräten usw. lassen sich die benötigten Schaltungen als Bausteine in Schichttechnik produzieren, sie vermindern dadurch Prüf- und Montagezeit und gewinnen eine höhere Zuverlässigkeit.

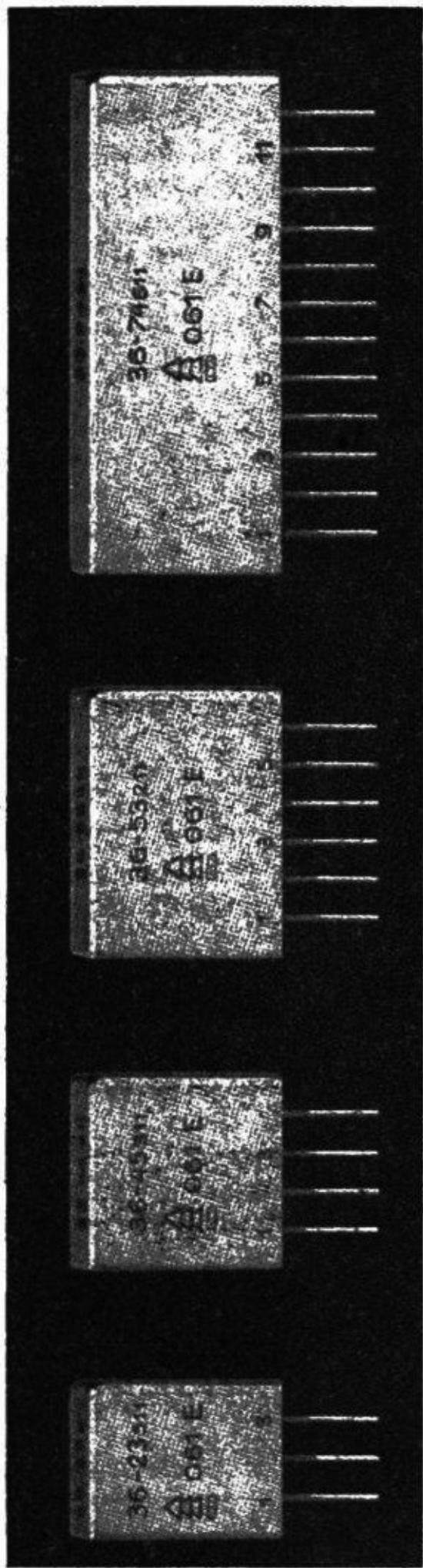


Bild 8 Präzisionswiderstands-Netzwerke in der Bauform mit Metallbecher. Etwa die gleiche Bauform weisen die KME-3-Bausteine auf (Kombinat Keramische Werke Hermsdorf)

Schichtschaltungen im RGW-Bereich

In der DDR werden Schichtschaltungen in Dick- und Dünnschichttechnik im Stammbetrieb des Kombinats VEB *Keramische Werke* Hermsdorf seit 1968 produziert. Sehr umfangreich ist das Angebot an Widerstandsnetzwerken für vielfältige Einsatzzwecke. Die Bauform ist meist tauchumhüllt, als Kennzeichnung benutzt man einen mehrstelligen Zahlenkode, aus dem aber die Widerstandsgrößen nicht hervorgehen. Für spezielle Anwendungen ist die Umhüllung mit Metallbecher vorgesehen. Seit 1968 werden auch Hybridbausteine produziert, sowohl analoge wie auch digitale Bausteine, die als KME-3-Bausteine bekannt wurden (KME = Keramik-Metall-Elektronenstrahl). Sie wurden umfangreich in der Steuer-, Meß- und Regeltechnik eingesetzt. Da sie heute in zunehmendem Maß in die Hand des Elektronikamateurs gelangen, werden sie im Tabellenteil dieses Bandes aufgeführt. Diese Hybridbausteine im Metallbecher enthalten Dünnschicht-Widerstände (NiCr) auf dem Substrat, als Transistoren und Dioden lötet man Miniplast-Ausführungen ein. Kondensatoren werden meist eingelötet in Form spezieller Folienkondensatoren oder keramischer Vielschichtkondensatoren.

Seit einigen Jahren werden für die Nachrichten- und Meßtechnik spezielle Hybridschaltungen produziert, die man hauptsächlich in Funksprechgeräten einsetzt:

- 23-11 ZF-Verstärker 10,7 MHz
- 23-12 Mischer 10,7/0,45 MHz
- 23-16 Oberwellenoszillator 20 MHz
- 23-17 Oberwellenoszillator 50 MHz
- 23-18 Frequenzvervielfacher 50 MHz
- 23-19 Grundwellenoszillator 11,150 MHz
- 23-21 Rauschsperrschaltung ($f_{\max} = 11$ kHz)
- 23-22 Stromsparschaltung für Empfängerendstufen
- 23-23 Regelverstärker für Modulator
- 23-24 Frequenzvervielfacher 40/80 MHz
- 23-25 Frequenzvervielfacher 20/40 MHz
- 23-26 Phasenmodulator
- 23-29 Preemphasisfilter (Dämpfung an 6 kHz)
- 23-31 Modulationsverstärker I
- 23-32 Modulationsverstärker II
- 23-33 Tonrufgenerator 1,25 kHz
- 29-31 Grenzwerttrigger für MSR-Technik
- 59-13 Spannungsgesteuerter Oszillator (VCO)

Neben Widerstandsnetzwerken werden in der UdSSR mehrere Baureihen von Hybridschichtschaltungen produziert. Erkennlich sind sie an der 1. Ziffer der dreistelligen Baureihennummer:

- 1; 5; 7 – monolithische Schaltkreise,
- 2; 4; 6; 8 – Hybridschaltkreise.

Bekannt sind z. B. die Baureihen 224 und 237 mit Hybridschaltungen für

Rundfunkempfänger und Magnetbandgeräte. Weitere analoge Hybridschaltungen, die vor allem in der MSR-Technik eingesetzt werden, sind die Baureihen 218, 219, 226, 228, 235, 264, 265, 272, 284. Digitale Hybridschaltungen werden mit verschiedener Logik produziert.

RTL: Baureihen 201, 205, 210, 211, 231.

DTL: Baureihen 201, 215, 217, 218, 221, 240.

ECL: Baureihen 223 und 229.

Die Baureihe 230 enthält großintegrierte Digitalschaltungen, die aus mehreren TTL-Chips auf einem Substrat bestehen. In der ČSSR werden vom TESLA-Betrieb Lanškroun Hybridschaltungen für analoge und digitale Anwendungen in größerem Umfang produziert. Speziell auf Dickschichtschaltungen hat sich die VR Polen spezialisiert. Im UNITRA-Betrieb *Telpod* in Krakow werden neben *R*- und *RC*-Schaltungen auch analoge und digitale Hybridbausteine in Dickschichttechnik hergestellt. Interessant sind die Hybridleistungsverstärker *GML-024* (10 W), *GML-025* (25 W) und *GML-026* (13 W), die als HiFi-Endverstärker eingesetzt werden. Das Gehäuse hat die Abmessungen 44 mm × 64 mm × 7,6/9,6 mm, weist an einer Längsseite 10 Anschlüsse auf und wird flach auf einem entsprechenden Kühlkörper befestigt. Die Betriebsspannung ist 32 V, der Lautsprecherwiderstand beträgt 8 Ω bzw. 4 Ω.

Wir klären Begriffe

VERSTIMMUNG

