Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 54 (1963)

Heft: 17

Artikel: Neuere Anwendungen dünner Schichten in der Elektrotechnik

Autor: Zinsmeister, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916506

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Neuere Anwendungen dünner Schichten in der Elektrotechnik

Von *G. Zinsmeister*, Balzers

539.243 : 621.38.049.7

Kurze Beschreibung des Aufdampfens und der Kathodenzerstäubung im Vakuum zur Herstellung dünner Schichten. Stand der Entwicklung bezüglich ihrer Anwendung bei der Herstellung von elektrischen Bauteilen und Schaltungen. Im einzelnen: passive und aktive Elemente, Mikrominiaturisierung, Bauelemente für Digitalrechenanlagen, optoelektronische Bauteile und Schaltungen.

D'abord est donné une brève description de la technologie de l'évaporation sous vide et de la projection cathodique pour la fabrication des couches minces. L'application des couches minces à la production des éléments et circuits électriques est traitée en détail: éléments passifs et actifs, microcircuits, éléments pour calculateurs digitals, éléments et circuits opto-électroniques.

1. Einleitung

Dünne Schichten, die durch Aufdampfen oder Kathodenzerstäubung im Vakuum hergestellt werden, haben bis vor kurzem hauptsächlich in der Optik Anwendung gefunden. Die Entwicklung der letzten Jahre hat nun gezeigt, dass viele technologische Probleme in der Elektrotechnik mit dünnen Schichten in vorteilhafter Weise gelöst werden können. Im folgenden soll der gegenwärtige Stand der Entwicklung im einzelnen dargestellt werden, wobei besonders auf die Unterscheidung zwischen Verfahren, die bereits in Produktion sind und solchen, die erst in Erprobung stehen, Nachdruck gelegt wird.

Da hier nur über neuere Entwicklungen berichtet werden soll, wurden alle Verfahren, die schon seit längerer Zeit in der Praxis angewendet werden, weggelassen. Dazu gehören: Bedampfung von Kondensatorfolien mit Zn oder Al im kontinuierlichen Verfahren, Aufdampfen von Selengleichrichtern, Aufdampfen von Elektroden sowie Abstimmen von Schwingquarzen, Aluminisieren von Fernsehröhren, etc.

2. Herstellung dünner Schichten

Zur Erleichterung des Verständnisses seien die prinzipiellen Vorgänge der beiden Herstellverfahren für dünne Schichten noch kurz dargestellt.

2.1 Aufdampfverfahren

Das Schema einer Aufdampfanlage zeigt Fig. 1, die praktische Ausführung Fig. 2. Üblicherweise liegt der Betriebsdruck bei 10^{-5} bis 10^{-6} Torr (1 Torr = 1 mm Hg). Besonders bei Aufdampfungsschichten für elektrische Anwendungen (z. B. supraleitende Schichten) sind manchmal wesentlich niedrigere Betriebsdrücke erforderlich. Die Praxis hat gezeigt, dass durch Verwendung von Kühlfallen mit flüssigem Stickstoff und von Dichtungsstoffen mit geringer Gasabgabe (Fluorelastomere wie z. B. Viton) Drücke von 10^{-7} Torr erreichbar sind. Für noch niedrigere Drücke (10^{-9} Torr) sind Ganzmetallanlagen erforderlich, die auf 400 °C ausheizbar sind.

Der Vorgang des Aufdampfens selbst ist prinzipiell sehr einfach: Das zu verdampfende Material wird erhitzt; die wegdampfenden Moleküle breiten sich in Vakuum geradlinig aus und kondensieren dann an allen kälteren Stellen in der Anlage, auf die sie auftreffen. Um Schichten in brauchbarer Zeit, d. h. in einigen Minuten zu erhalten, muss das Material so hoch erhitzt werden, dass sein Dampfdruck etwa 0,01 Torr beträgt. Dies führt bei den üblicherweise verwendeten Metallen und anorganischen Verbindungen auf Temperaturen von 1000...1800 °C.

Die gebräuchlichste Methode der Erhitzung ist die Widerstandsheizung, bei welcher ein Blechstreifen eines hochschmelzenden Metalls (W, Ta oder Mo), auf dem sich das zu verdampfende Material befindet, im direkten Stromdurchgang erhitzt wird. In besonderen Fällen wird auch induktive

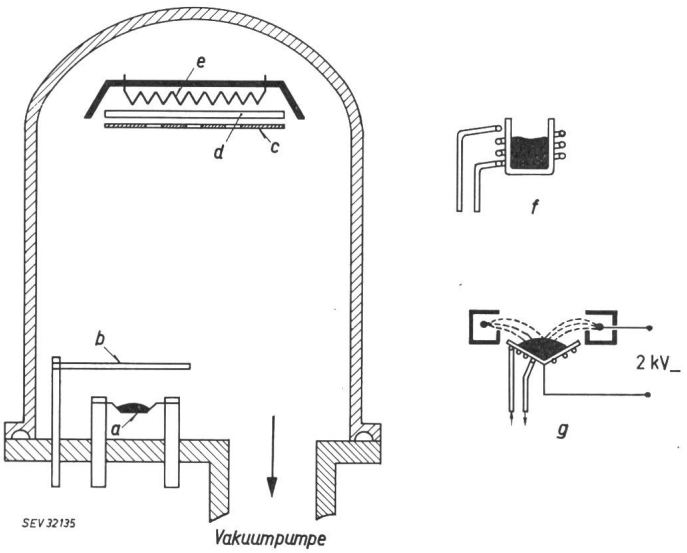


Fig. 1
Schema einer Aufdampfanlage

a Verdampfungsquelle; *b* Blende; *c* Maske; *d* Präparat; *e* Präparatheizung; *f* Verdampfungsquelle mit induktiver Beheizung; *g* Ringkathode zur Verdampfung mittels Elektronenbeschuss

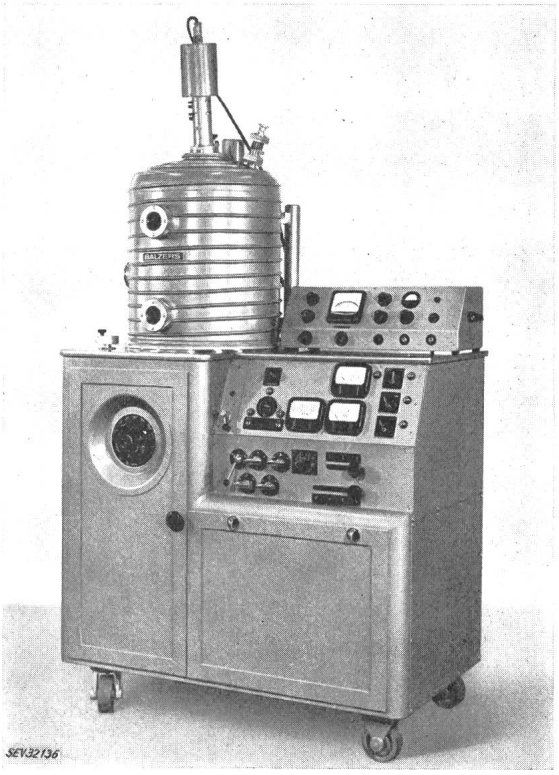


Fig. 2
Aufdampfanlage mit einem Glockendurchmesser von 500 mm

Heizung mittels Hochfrequenz verwendet. Eine neue Entwicklung ist die Erhitzung durch Elektronenbombardement. Die von einer Glühkathode emittierten Elektronen werden durch eine Hochspannung beschleunigt. Beim Auftreffen auf das zu verdampfende Material geben die Elektronen ihre Energie in Form von Wärme ab. Die hohen Leistungsdichten geben die Möglichkeit, auch Substanzen mit sehr hohem Schmelzpunkt zu verdampfen. Bei allen Heizungsverfahren sind Leistungen im Bereich von 0,5...3 kW üblich.

Die Eigenschaften der aufgedampften Schichten hängen ausser vom verdampften Material auch von der Beschaffenheit des Schichtträgers (üblicherweise Glas oder Keramik) ab. Die Reinheit der Oberfläche beeinflusst massgebend die Haftfestigkeit der aufgedampften Schicht, während die Rauhigkeit besonders die Reproduzierbarkeit der elektrischen Eigenschaften beeinträchtigt. Grosse Schwierigkeiten verursacht das Auftreten von Inhomogenitäten oder sogar von Löchern («pinholes») in der aufgedampften Schicht. Die Ursachen hierfür sind erst teilweise geklärt (Staubkörnchen usw.).

Die Temperaturen des Schichtträgers während des Aufdampfens beeinflusst die Oberflächenbeweglichkeit der auf der Unterlage kondensierenden Moleküle und damit das Kristallwachstum. Hat die Unterlage während des Bedampfens eine Temperatur von ca. 300 °C statt Zimmertemperatur, so führt dies im allgemeinen auf härtere Schichten. Besteht die Unterlage aus einem Einkristall, der während der Bedampfung bis in die Nähe des Schmelzpunktes erhitzt wird, so kann man bei sorgfältiger Prozessführung einkristalline Schichten aufwachsen lassen («Epitaxie»).

Während des Aufdampfvorganges kann die Schichtdicke optisch, durch Wägung oder mit elektrischen Methoden gemessen werden. Durch Verwendung von verschiedenen Verdampfungsquellen sowie von Blenden vor dem Präparatträger lassen sich die verschiedensten Schichtfolgen und Konfigurationen, wie sie z. B. für Miniaturschaltungen erforderlich sind, ohne Unterbrechung des Vakuums herstellen.

2.2 Kathodenzerstäubung

In einer elektrischen Entladung in verdünnten Gasen beobachtet man, dass die Kathode abgetragen (zerstäubt) wird und sich das Kathodenmaterial als dünne Schicht an den Wänden des Entladungsraumes niederschlägt. Dieser Prozess kommt dadurch zustande, dass die in der Entladung gebildeten Ionen mit grosser Energie auf die Kathode auftreffen und dadurch Atome des Kathodenmaterials freisetzen. Das Vakuum während der Entladung beträgt etwa 0,05 Torr. Obwohl eine mechanische Vakuumpumpe für die Erzeugung dieses Druckes ausreichend wäre, verwendet man Diffusionspumpen, und stellt den Druck durch Gaseinlass mittels eines Nadelventils her, um die Entladung in einer reineren Atmosphäre zu betreiben.

Die Kathodenzerstäubung war das erste Vakuumverfahren zur Herstellung dünner Schichten (Fig. 3). Es wurde später durch das Aufdampfverfahren im Hochvakuum verdrängt. Für gewisse neuere Anwendungen bietet die Kathodenzerstäubung jedoch Vorteile, so dass dieses Verfahren wieder häufiger in Betracht gezogen wird. Z. B. kann die Zerstäubung in einer Sauerstoffatmosphäre erfolgen. Man erhält dann als Niederschlag das Oxyd des zerstäubten Metalles. Bei sehr schwer zu verdampfenden Oxyden kann diese Art der Kathodenzerstäubung (reaktive Zerstäubung) einfacher als das Aufdampfen sein.

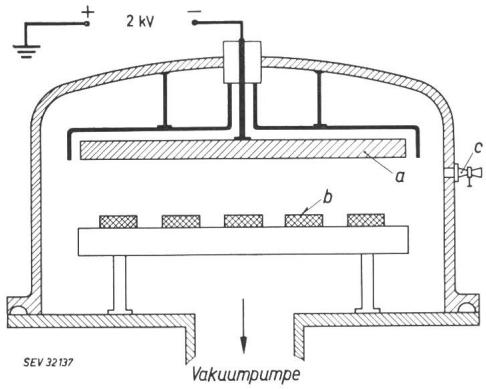


Fig. 3
Schema einer Anlage zur Kathodenzerstäubung
a Kathode; *b* Präparate; *c* Gaseinlassventil

3. Passive Elemente

Schon vor längerer Zeit wurden Aufdampfverfahren für die Herstellung von passiven Bauelementen in Betracht gezogen. Während bei Widerständen Aufdampfverfahren bereits in der Produktion angewendet werden, befinden sich diese bei Kondensatoren erst in den Anfängen. Die Eigenschaften von Induktivitäten auf der Basis von dünnen Schichten sind noch so unbefriedigend, dass hier nicht darauf eingegangen werden muss.

3.1 Widerstände

Das Aufdampfen im Vakuum gibt die Möglichkeit der einfachen Herstellung von hochqualitativen Schichten und von flächenhaften Widerständen. Dies hat zu den folgenden Anwendungen in der Produktion geführt:

3.1.1 Präzisionswiderstände

Ausser der Konstanz des Widerstandwertes unter verschiedenen Betriebsbedingungen werden an einen Präzisionswiderstand die folgenden Anforderungen gestellt: kleiner

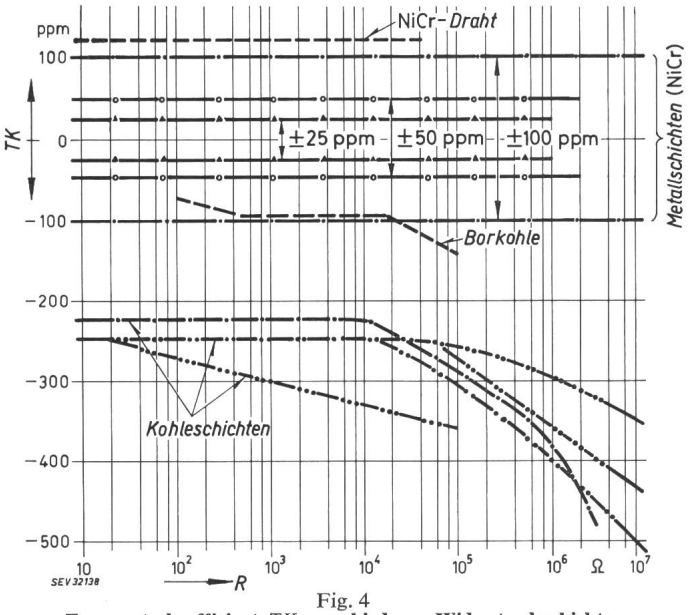


Fig. 4
Temperaturkoeffizient *TK* verschiedener Widerstandsschichten in Abhängigkeit des Widerstandes
Die Pfeile zwischen den NiCr-Metallschichten geben die durch die Herstellungstoleranzen bedingten Streuungen in ppm = 10^{-4} % an

Temperaturkoeffizient (TK), kleiner Spannungskoeffizient des Widerstandes, geringes Stromrauschen. Für kleinere Widerstandswerte (< 50 kΩ) werden Widerstände aus gewickeltem Draht (Ni Cr 80/20, Konstantan, etc.) verwendet, die in der Herstellung aber teuer sind. Die grösste Verwendung finden Präzisionskohlewiderstände, die durch pyrolitische Zersetzung von Kohlenwasserstoffen hergestellt werden. Derartige Widerstände sind preislich günstig, in ihren Eigenschaften aber nicht immer zufriedenstellend.

Im Vakuum aufgedampfte Widerstände sind im Vergleich dazu sehr vorteilhaft, da sie in ihren Eigenschaften drahtgewickelten Widerständen fast gleichwertig, gleichzeitig aber preislich günstiger sind. Fig. 4 zeigt den Temperaturkoeffizienten verschiedener Widerstandsarten in Abhängigkeit vom Widerstandwert. Einige weitere Eigenschaften sind zum Vergleich in Tabelle I zusammengefasst.

Eigenschaften verschiedener Widerstände

Tabelle I

Widerstandsart	Widerstands-toleranz bei Auslese %	Widerstands-bereich MΩ	Rauschen µV/V	Spannungs-koeffizient %/V
Kohleschicht	0,25	1...50	0,3...0,5	$2 \cdot 10^{-3}$
Metallschicht	0,1	1...10	0,1	10^{-4}
Draht gewickelt	0,01	1...0,05	nur thermisches Rauschen	0

Die Metallschicht wird üblicherweise durch Verdampfen von Ni Cr 80/20 in einem Vakuum von 10^{-5} Torr hergestellt [1] [1]). Die Verdampfung erfolgt bei ca. 1400 °C aus einem Wolframschiffchen. Es ist auch möglich, die Legierung durch Elektronenstrahlbombardement zu verdampfen. Man vermeidet dadurch den Schiffchenwechsel, der sonst mit jeder Charge erforderlich ist, muss aber anderseits eine aufwendige Einrichtung in Kauf nehmen. Da die Legierungskomponenten unterhalb des Schmelzpunktes bereits einen relativ hohen Dampfdruck aufweisen, kann die Widerstandschicht auch durch Sublimation bei ca. 1100 °C hergestellt werden.

Als Unterlage werden geschliffene Porzellanröhrchen verwendet, die während der Bedampfung auf einer Temperatur von 250...350 °C gehalten werden. In manchen Fällen wird auf die Metallschicht durch Aufdampfen von SiO eine Schutzschicht aufgebracht («Quarzschutzschicht»). Nach dem Bedampfen erfolgt eine künstliche Alterung durch Erhitzen der Widerstände an Luft auf 100...150 °C während einiger Stunden. Die Metallschicht hat im allgemeinen eine Dicke von rund 100 Å und einen Flächenwiderstand von ca. 300 Ω. Höhere Ohmwerte werden durch Schleifen einer Wendel hergestellt.

3.1.2 Mikromodul-Widerstände

Für die später ausführlich beschriebene Technik der Miniaturisierung werden z. T. auch Widerstände auf Keramikplättchen benötigt (Fig. 5). An diese Widerstände werden folgende Anforderungen gestellt: Widerstandsbereich 10 Ω... 200 kΩ, Toleranz des Widerstandswertes ± 2 %, Temperaturkoeffizient ± 100, bzw. ± 200 ppm. Es können ohne weiteres bis zu 4 Widerstände auf einem Blättchen untergebracht werden. Neben anderen Verfahren (Chemische Niederschläge etc.) wird das Aufdampfen verwendet, da mit

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

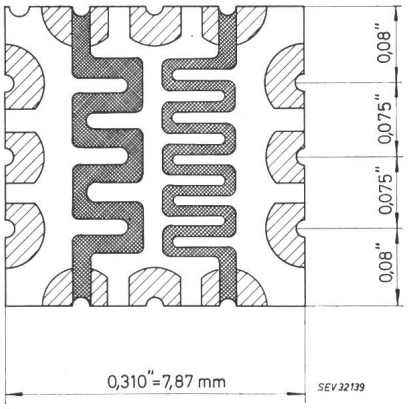


Fig. 5
Mikromodul-Widerstand mit zwei verschiedenen Widerstandstreifen

Ni Cr- Schichten die geforderten Werte leicht eingehalten werden können.

3.1.3 Dämpfungsglieder für Mikrowellen

Durch Aufdampfen im Vakuum können auf einfache Art flächenhafte Widerstandschichten mit grosser Gleichmässigkeit hergestellt werden. Für Dämpfungsglieder wird ebenfalls Ni Cr 80/20 aufgedampft, und zwar auf feste als auch auf flexible Unterlagen (z. B. Mylar). Die Flächenwiderstände liegen im Bereich 20...400 Ω.

Die Weiterentwicklung der Widerstandschichten zielt auf Schichten mit höheren Flächenwiderständen. Wenn diese Entwicklungen Erfolg haben werden, ist sicher damit zu rechnen, dass die bestehenden Verfahren der Widerstandherstellung durch aufgedampfte Widerstände weiter verdrängt werden.

3.2 Kondensatoren

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die laufenden Bestreben zur Herstellung von Kondensatoren im Rahmen von Mikrominiatur-Schaltungen. Es besteht hier die Forderung, sowohl die Metallelektroden als auch das Dielektrikum wenn möglich ohne Unterbrechung des Vakuums aufzudampfen. Als Unterlage dienen Keramikplättchen, wie für die in Abschnitt 3.1 beschriebenen Mikromodul-Widerstände, oder auch Glasplättchen, die ganze Schaltungen aufnehmen.

Das wesentliche Problem bei der Herstellung derartiger Kondensatoren besteht im Aufdampfen des Dielektrikums. Die Forderung nach hoher spezifischer Kapazität pro Flächeneinheit und kleinen dielektrischen Verlusten begrenzt die Auswahl der sich zum Aufdampfen eignenden Stoffe. Tabelle II gibt die wichtigsten Eigenschaften einiger bis jetzt untersuchten Materialien.

Die in Tabelle II aufgeführten Werte gelten für Aluminium als Elektrodenmaterial. Andere Metalle (z. B. Au, Ag, Cr) geben im allgemeinen schlechtere Werte. Die notwendige Schichtdicke des Dielektrikums ist von der Betriebsspannung und damit auch von der Durchbruchsfeldstärke abhängig.

Für die zum Betrieb von Transistoren erforderlichen niedrigen Spannungen (5...50 V) genügen Schichtdicken von 0,2...1 µm, unter Berücksichtigung des notwendigen Sicherheitszuschlages. Von den angeführten Dielektrika haben sich bisher nur die Oxyde des Siliziums und Tantaloxyd in grösserem Umfang durchgesetzt. Hiefür werden spezifische Kapazitäten von 0,005 bzw. 0,02 µF/cm² für eine Betriebs-

spannung von 50 V angegeben. Als maximalen Wert (Betriebsspannung von 5 V, mehrlagige Kondensatoren) findet man in der Literatur 0,1 μF/cm².

Wichtigste Eigenschaften einiger Materialien

Tabelle II

Material	Brechungsindex im sichtbaren Gebiet n	Dielektrizitätskonstante des massiven Materials ε	Dielektrizitätskonstante der dünnen Schicht $\bar{\varepsilon}$	Verlustfaktor $\operatorname{tg}\delta$	Durchbruchsfeldstärke E_D [MV/cm]
SiO [1])	1,9		6...7	$5 \cdot 10^{-2}$	2
Si_2O_3 [2])	1,53		4...5,5	$10^{-2}...10^{-3}$	1...2
SiO_2 [3])	1,46	3,7...3,8	4	$7...8 \cdot 10^{-4}$	3
Al_2O_3		8,6	6,5...11		
MgF_2	1,38	5	5..,6,5	$1 \cdot 10^{-2}$	
LiF		9,2	5,2	$3 \cdot 10^{-2}$	
Kryolith	1,33	6	7,5...10		1
ZnS	2,3	8,3	22		0,4...1,5
Ta_2O_5		27		$5 \cdot 10^{-3}$	0,8
Nb_2O_5		46			0,4
TiO_2	2,4	100			

[1]) Wird bei schnellem Aufdampfen in gutem Vakuum erhalten, an der stark gelben bis braunen Färbung erkenntlich.
[2]) Transparente Schichten dieser Zusammensetzung erhält man bei der üblichen Verdampfung von SiO.
[3]) Derartige Schichten können entweder durch Elektronenstrahlverdampfung von SiO_2 oder durch Zerstäuben von Si in einer Sauerstoffatmosphäre erhalten werden.

Die in Abschnitt 2.1 erwähnten «pinholes» machen sich bei aufgedampften Kondensatoren durch grosse Leckströme und durch eine verringerte Spannungsfestigkeit sehr unangenehm bemerkbar. Zur Abhilfe werden die Kondensatoren nach dem Aufdampfen kurzzeitig Spannungsimpulsen ausgesetzt, wodurch die Metallschicht der Elektroden in der Umgebung der «pinholes» verdampft, so dass kein weiterer Stromfluss stattfinden kann. Dieses Verfahren der Selbstheilung ist nur bei einlagigen Kondensatoren gut anwendbar. Dadurch sind die Möglichkeiten, höhere spezifische Kapazitäten durch Mehrfachschichten zu erhalten, ziemlich eingeschränkt. Die laufenden Entwicklungen gelten daher der Untersuchung von Substanzen mit hoher Dielektrizitätskonstante. Die Herstellung von TiO_2 und Titanaten in Form dünner Schichten ist bis jetzt noch nicht zufriedenstellend gelöst. Es besteht aber kein Zweifel, dass die laufenden Entwicklungsarbeiten zum gewünschten Ziel führen werden.

4. Aktive Elemente

Aufdampfverfahren finden bei der Herstellung von Dioden und Transistoren in steigendem Masse Verwendung. Unabhängig davon gehen die Bestrebungen dahin, aktive Elemente vollständig im Aufdampfverfahren zu erzeugen, so dass ganze Miniaturschaltungen mit aktiven und passiven Elementen in einem Prozess hergestellt werden können. Als Lösung kommt entweder das Aufdampfen von Halbleiterschichten mit Einkristallstruktur in Frage, oder neue Elemente, Dünnschichttrioden, die aus aufgedampften polykristallinen Schichten aufgebaut sind.

4.1 Aufdampfverfahren bei der Herstellung von Dioden und Transistoren

Den schematischen Aufbau eines Transistors zeigt Fig. 6a. Die gebräuchlichste Art der Herstellung der beiden p-n Übergänge ist das Legierungsverfahren, nach Fig. 6b. Nach der Herstellung der beiden p-n Übergänge wird der Transistor kontaktiert und wie in Fig. 6c gezeigt, in einem Gehäuse montiert. Ausgehend von einem Einkristallplättchen eines Halbleiters, findet das Aufdampfen für folgende Verfahrensschnitte Verwendung:

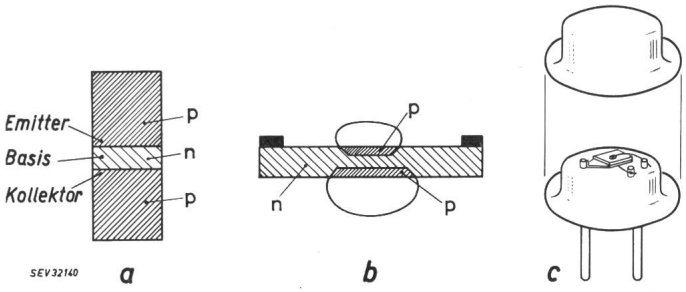


Fig. 6
Transistoraufbau
a schematischer Aufbau; *b* Legierungstransistor; *c* montierter Transistor

1. Aufdampfen von Ohmschen, d. h. nicht gleichrichtenden metallischen Kontakten;
2. Aufdampfen von Metallen zum Herstellen von p-n Übergängen durch Einlegieren.

Zur Veranschaulichung dienen im folgenden die Herstellungsprozesse für Mesa- und Planartransistoren.

4.1.1 Mesatransistor (Fig. 7)

Als Ausgangsmaterial dient ein p-leitendes Ge-Plättchen mit den Abmessungen ca. 0,3 × 20 × 30 mm. Durch Diffusion wird eine 1 μm n-leitende Schicht, und damit der erste p-n Übergang, erzeugt. Das derart vorbehandelte

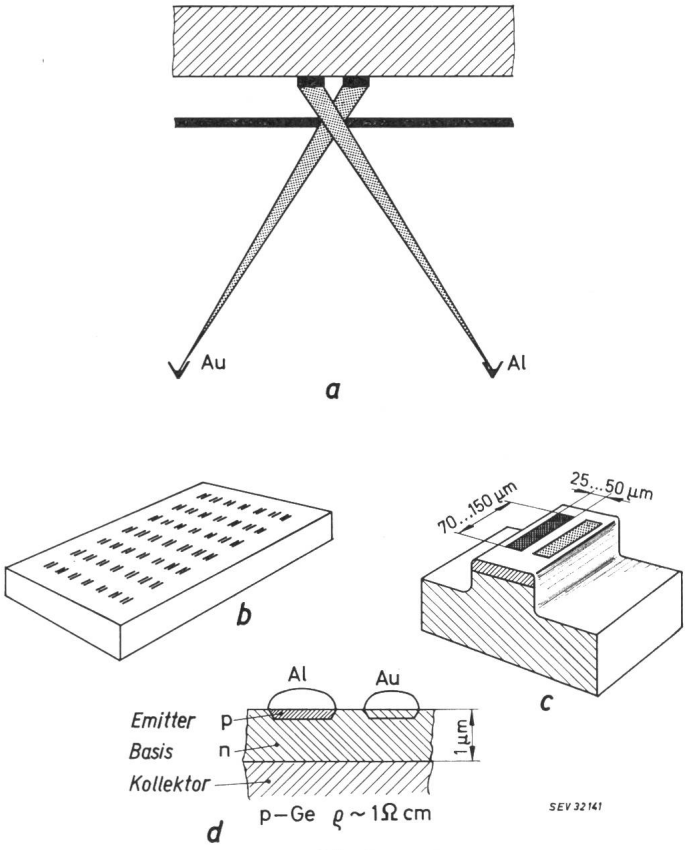


Fig. 7
Herstellungsverfahren für Mesatransistor
a Anordnung zum Aufdampfen durch die Maske; *b* bedampftes Ge-Plättchen; *c* einzelner aus dem Ge-Plättchen geschnittener und abgeätzter Mesatransistor; *d* Schnitt durch den oberen Teil eines Mesatransistors

Plättchen wird, wie in Fig. 7a gezeigt, in einer Bedampfungsanlage montiert. Durch eine Öffnung, in der vor dem Plättchen befindlichen Maske, wird zuerst Aluminium und dann Gold aufgedampft. Die Maske hat einige hundert rechteckige Öffnungen, so dass entsprechend viele Paare von Streifen auf dem Plättchen entstehen (Fig. 7b). Vor dem Bedampfen wird das Ge-Plättchen auf über 500 °C aufgeheizt, um die Oberfläche zu reinigen und die Benetzungsverhältnisse zu verbessern. Nach dem Aufdampfen des Aluminiums wird dieses bei einer Temperatur oberhalb 424 °C (Eutektikum Al-Ge) einlegiert, wodurch der zweite p-n Übergang entsteht (Fig. 7d). Infolge der geringen Dicke der aufgedampften Aluminiumschicht ($\approx$ 1500 Å) lässt sich der Legierungsprozess so steuern, dass Basisweiten kleiner als 1 μm reproduzierbar hergestellt werden können. Die anschliessende Aufdampfung des Goldes ($\approx$ 500 Å) liefert einen Ohm'schen Kontakt an die n-Basisschicht. Das Plättchen wird nachher zerteilt und geätzt, so dass man einige hundert Transistoren gemäss Fig. 7c erhält. Die Vorteile des Aufdampfverfahrens liegen hier darin, dass Metallstreifen mit sehr geringen Abmessungen und Schichtdicken reproduzierbar aufgebracht werden können (Fig. 8).

4.1.2 Planartransistor

Besonders kritisch bei einem Transistor ist die Stelle, an welcher der p-n Übergang an die Oberfläche stösst. Die Planartechnik ermöglicht nun den Aufbau von Transistoren, bei denen die p-n Übergänge an der Oberfläche immer durch eine Oxydschicht geschützt sind. Nur bei Silizium kann eine befriedigende Oxydschicht aufgebaut werden, so dass die Planartechnik bis jetzt nur auf dieses Halbleitermaterial angewendet werden kann. Dieses Verfahren, auf dessen Einzelheiten hier nicht eingegangen wird, liefert als Endprodukt einen Transistor gemäss Fig. 9, der bereits zwei p-n-Übergänge enthält. Das Aufdampfverfahren wird hier nur zur Kontaktierung der Basis und des Emitters verwendet. Es wird an beiden Stellen Aluminium aufgedampft, das p-dotierend wirkt. Man erhält damit einen Ohmschen Kontakt an die p-leitende Basis. Dass man für die Kontaktierung des

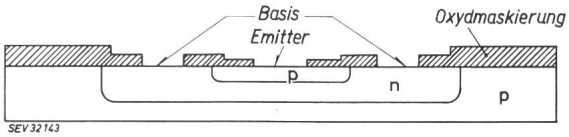


Fig. 9
Schnitt durch einen Planartransistor
Emitter und Basis werden durch Aufdampfen kontaktiert

n-leitenden Emitters auch Aluminium verwenden kann, liegt daran, dass beim Herstellen dieser n-leitenden Zone durch das Diffusionsverfahren an der Oberfläche eine derartige Überdotierung eintritt, dass das Aluminium nicht in der Lage ist, eine Umdotierung herbeizuführen. Die Dicke der aufgedampften Al-Schicht ($\approx$ 0,5 μm) ist nicht kritisch, da lediglich Kontakte, aber keine p-n-Übergänge, wie z. B. beim Mesatransistor, hergestellt werden müssen. Die Begrenzung der Aufdampfschicht erfolgt nicht mittels mechanischen Masken, sondern mit einer photolithographischen Technik. Im Vergleich zum Mesatransistor ist beim Planartransistor das Aufdampfverfahren stark vereinfacht.

Bei den beschriebenen Verfahren wird jeweils von einem Halbleiter-Einkristall ausgegangen. Neuere Bestrebungen, vor allem für die Herstellung von Miniaturschaltungen gehen nun dahin, den Aufbau von einkristallinen Schichten in den eigentlichen Fabrikationsprozess mit einzubeziehen. Es ist im Laboratorium auch bereits gelungen, durch Aufdampfen einkristalline Schichten von Germanium und Silizium zu erzielen (epitaxiale Schichten), und daraus Dioden und Transistoren anzufertigen (Fig. 10).

4.2 Dünnschicht-Trioden

Das Gemeinsame dieser Bauelemente ist, dass sie vollständig durch Aufdampfen, und zwar von polykristallinen Schichten hergestellt werden.

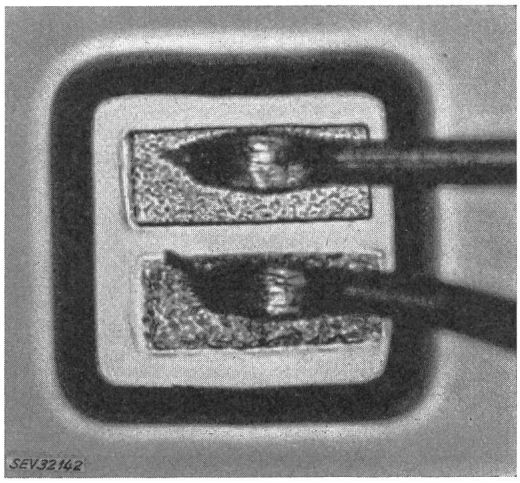


Fig. 8
System eines Ge-Hochfrequenz-Transistors von Siemens in Mesatechnik
Aufgedampfte Emitter- und Basisstreifen mit dünnen Golddrähten kontaktiert
Vergrösserung ca. 460fach

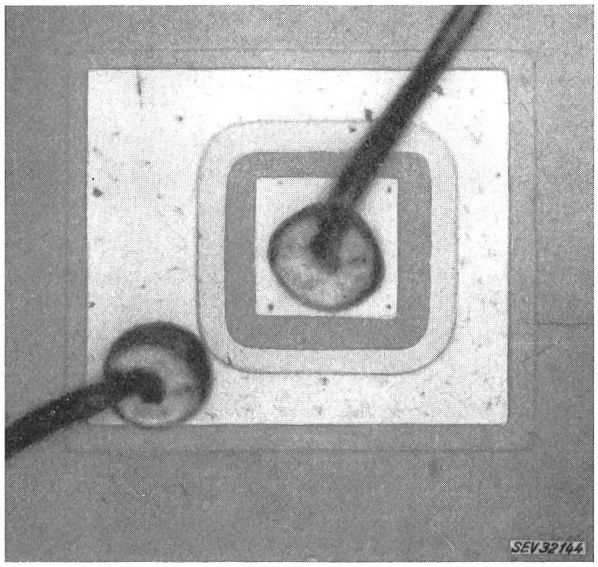


Fig. 10
Beispiel eines bedampften und kontaktierten Planartransistors von Intermetall
Die aufgedampften Al-Flächen erscheinen in der Abbildung am hellsten. Die verschiedenen anderen Bereiche rühren von der Oxydmaskierung her
Vergrösserung ca. 250fach

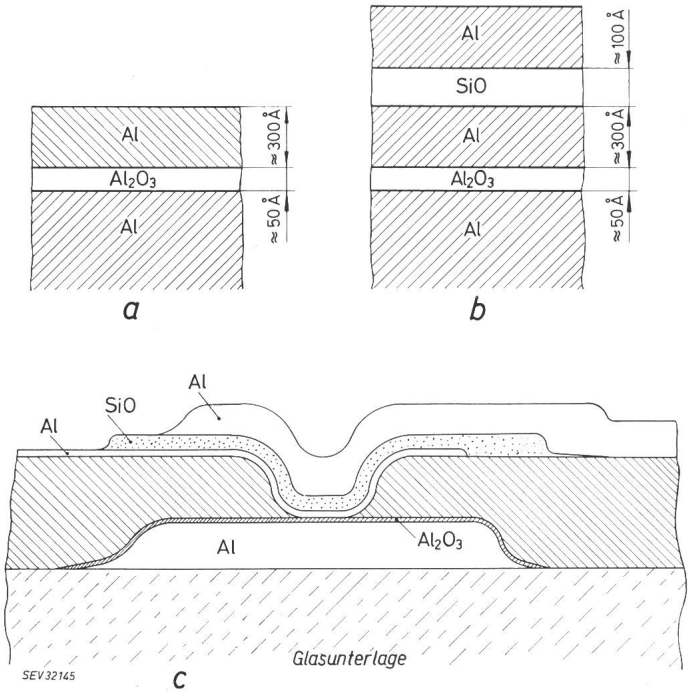


Fig. 11
Aktives Element nach C. A. Mead
a Diode schematisch; *b* Triode schematisch; *c* praktische Ausführung einer Triode

4.2.1 Bauelement nach C. A. Mead
(Hot Electron Triode)

Den prinzipiellen Aufbau zeigt Fig. 11a. Auf einer Aluminiumunterlage wird elektrolytisch eine Al_2O_3-Schicht von ca. 50 Å erzeugt, auf die als Gegenelektrode eine Al-Schicht von ca. 300 Å aufgedampft wird. Bei einer Spannung von 5 V zwischen den Elektroden treten Feldstärken in der Grössenordnung von 10^7 V/cm auf, die zu Feldemission im kalten Zustand führen. Die aufgedampfte Elektrode ist noch so dünn, dass sie von Elektronen durchquert werden kann. Im Vakuum lässt sich daher der austretende Elektronenstrom direkt messen. Werden die Elektroden aus verschiedenen Metallen gemacht, so erhält man eine Diodencharakteristik, die im wesentlichen durch die Differenz der Austrittsarbeiten der Elektrodenmetalle bestimmt ist. Wird eine zweite Isolierschicht und nochmals eine Al-Schicht aufgedampft (Fig. 11b), so erhält man ein Verstärkerelement, bei dem der Strom durch das Potential der mittleren Elektrode gesteuert werden kann.

Die Diode nach Fig. 11a kann auch dazu benützt werden, um Elektronen in einen Transistor zu injizieren. Eine derartige Anordnung, bei der ein p-n-Übergang (Emitter-Basis) durch eine Feldemissionsdiode ersetzt ist, wird als Metal-Interface-Amplifier (MIA) bezeichnet.

4.2.2 Thin Film Transistor
(oder auch Field Effect Transistor)

Der Aufbau nach Fig. 12 wird vollständig durch Aufdampfen hergestellt, auch der aktive Teil, der aus einer polykristallinen CdS-Schicht besteht. Beim Anlegen einer Spannung fliesst ein Strom von der Elektrode *S* (Source) zur Elektrode *D* (Drain), der durch den Widerstand des halbleitenden CdS gegeben ist. Durch Injection von Ladungsträgern mittels der Steuerelektrode kann der Widerstand des CdS und damit der Stromfluss moduliert werden. Mit derartigen Elementen wurde bisher eine Grenzfrequenz von 17 MHz erreicht.

Allen angeführten Elementen ist gemeinsam, dass sie sich erst im Entwicklungsstadium befinden und ihre Zukunftsaussichten sehr schwer zu beurteilen sind. Es ist aber nicht unmöglich, dass Dünnschichtelemente eines Tages die jetzt gebräuchlichen Halbleiterdioden und Transistoren verdrängen oder zumindestens teilweise ersetzen werden [2].

5. Mikrominiaturisierung

Die verschiedenen Verfahren der Miniaturisierung [3] können an Hand von Fig. 13 erläutert werden. Der obere Teil der Figur zeigt links Schaltungen mit hoher Packungsdichte, bestehend aus Bauteilen, wie sie handelsüblich erhältlich sind. Die Bezeichnungen sind nicht einheitlich: neben dem Ausdruck cordwood [2]) packing ist auch gedruckte Schaltung (printed circuit = PC) gebräuchlich. Die Pellet-Packung verwendet genormte Bauteile mit elliptischem Querschnitt, so dass bei einer vollautomatischen Fabrikation die zu montierenden Teile in ihrer Position genau fixiert sind. Diese Verfahren werden in der Praxis bereits in grösserem Umfange verwendet. Für die vorliegende Zusammenstellung sind sie weiter nicht von Interesse.

Dem System der Mikromodules (Fig. 13, oben rechts) liegt das Ziel zugrunde, alle Bauteile auf eine Einheitsgrösse zurückzuführen, um eine automatische Fertigung zu ermöglichen. Die Dimensionen der Standardkeramikunterlagen (wafers) wurden bereits in Fig. 5 angegeben. Es gibt verschiedene Verfahren zur Herstellung passiver Elemente auf den Keramikplättchen. Die hier interessierenden Aufdampfmethoden sind in Abschnitt 3 beschrieben worden.

Die untere Hälfte der Fig. 13 zeigt die verschiedenen Arten integrierter Schaltungen und zwar Dünnschicht- und Festkörperschaltungen. Bei den Dünnschichtschaltungen (Thin film circuits, 2 D circuits = 2 Dimensional circuits, flat plate circuits) werden die passiven Elemente nach denselben Verfahren wie bei den Mikromodules erzeugt, jedoch alle Elemente auf einem Plättchen. Dadurch erniedrigt sich nicht nur der Platzbedarf, sondern erhöht sich auch die Zuverlässigkeit durch den Wegfall von Lötverbindungen.

Für die geometrische Begrenzung der aufzudampfenden Schichten gibt es verschiedene Methoden. Die einfachste Lösung ist das Aufdampfen durch Masken, die sich über der Oberfläche des Trägerplättchens befinden. Die Schwierigkeit liegt bei der Herstellung von Widerständen mit hohen Ohmwerten. Da bis jetzt nur Widerstandschichten mit Flächenwiderständen von ca. 300 Ω gut beherrscht werden, müssen manchmal möglichst lange und schmale Streifen aufgedampft werden. Bei Verwendung von Masken liegt das

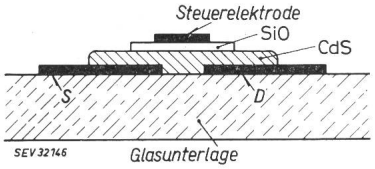
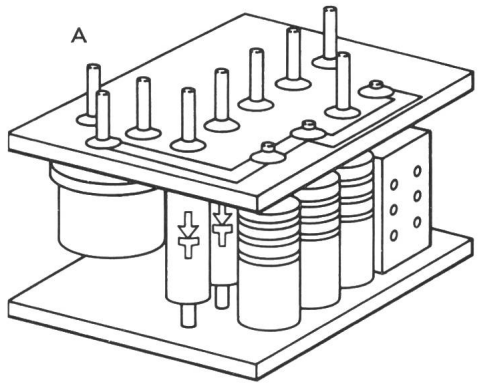


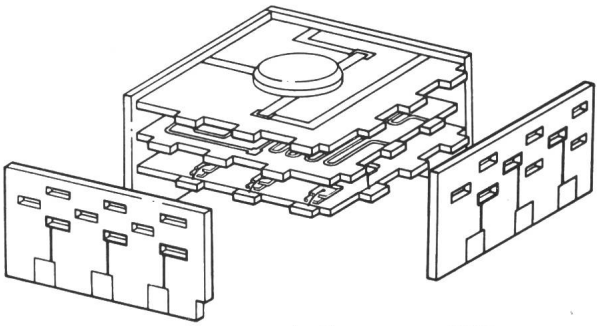
Fig. 12
Dünnschicht-Transistor
S, D Elektroden

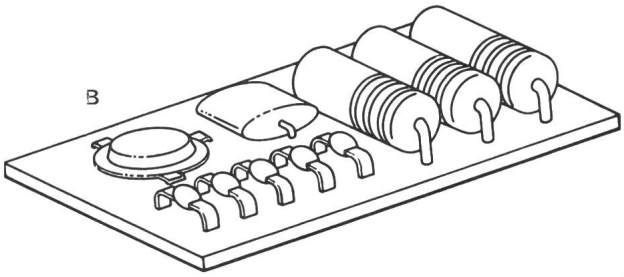
[2]) cordwood kann mit Feuerholz, d. h. Holz, das auf eine bestimmte Länge zugeschnitten ist, übersetzt werden.

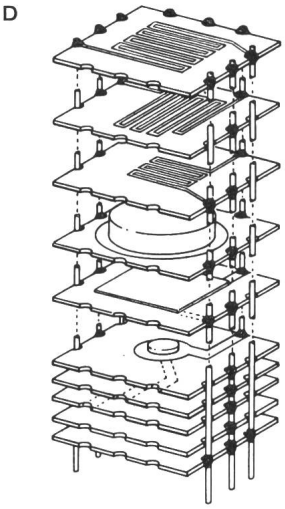
Packungen hoher Bauteildichte

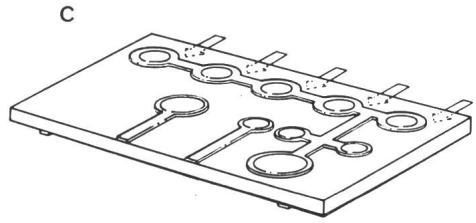
(Im Prinzip können die einzelnen Bauteile unterschieden und ersetzt werden)











C «Pellet Packing».
Alle Bauelemente sind zylinderförmig und werden in die Unterlage eingelassen.

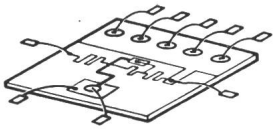
A gedruckte Schaltung mit genormtem Abstand der Trägerplatten (Cordwood Packing). Es werden Standardbauteile verwendet.

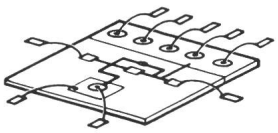
B reduzierte gedruckte Schaltung (reduced cordwood packing).
Es werden Miniaturbauteile verwendet.

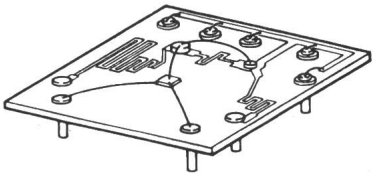
D Mikromodul, genormte Geometrie.
Passive Bauelemente, meistens Dünnschichtelemente.
Aktive Elemente werden getrennt montiert.

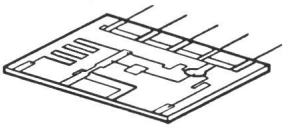
Integrierte Schaltungen

(einzelne Bauelemente können nicht immer identifiziert und auch nicht mehr ausgewechselt werden, ohne die Schaltung zu zerstören)









E Hybrid-Festkörperschaltung, Si-Einkristallunterlage.
Passive Elemente aus dünnen Schichten, aktive Elemente in die Halbleiterunterlage eindiffundiert.

F Si-Festkörperschaltung, Si-Einkristallunterlage.
Passive und aktive Elemente aus Halbleitermaterial.

G Dünnschichtschaltung, Unterlage: Isolator.
Passive Elemente aufgedampft, aktive Elemente nachträglich eingebaut.

H Fortgeschrittene Dünnschichtschaltung, Unterlage: Isolator.
Passive und aktive Elemente aus aufgedampften Schichten.

Fig. 13
Verschiedene Verfahren der Mikrominiaturisierung
(nach einer Veröffentlichung der Bendix Corp.)

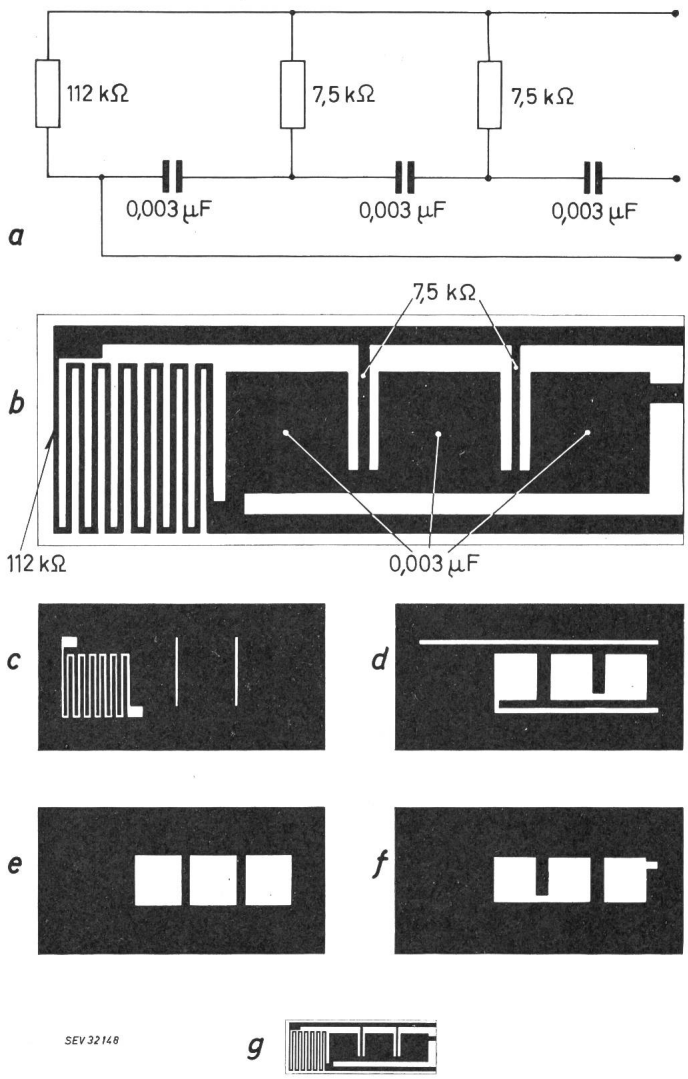


Fig. 14
Beispiel einer Dünnschicht-Schaltung
a Schema; *b* Anordnung der Schaltung in Dünnschichttechnik; *c...f* Aufdampfmasken; *g* Schaltung in Originalgrösse

Minimum der Streifenbreite bei etwa 30...100 µm, je nach Streifenlänge. Für höhere Anforderungen ist man gezwungen, auf photolithographische Verfahren überzugehen, bei denen die gewünschte Form aus der Aufdampfschicht herausgeätzt wird. Der grosse Nachteil dieses Verfahrens liegt darin, dass es nicht möglich ist, den ganzen Herstellungsprozess ohne Unterbrechung des Vakuums durchzuführen. Eine andere Möglichkeit ist die Bearbeitung der Aufdampfschicht mittels eines feingebündelten Elektronenstrahles («Fräsen»). Diese neue, noch sehr aufwendige Methode befindet sich erst im Erprobungsstadium. In Zukunft werden sich vermutlich mehrere der angeführten Methoden durchsetzen, da für verschiedene Grade der Miniaturisierung entsprechend verschieden teure Verfahren zulässig sind.

Als konkretes Beispiel einer Dünnschichtschaltung ist in Fig. 14 ein einfaches RC-Netzwerk angegeben [4]. Zuerst wird die Schaltung (Fig. 14a) in eine geeignete Anordnung von Aufdampfschichten umgezeichnet. Daraus ergeben sich dann die notwendigen Maskenformen. Bei Verwendung einer NiCr-Schicht mit einem Flächenwiderstand von 275 Ω wurden für die 7,5-kΩ-Widerstände je ein Streifen von 3,5 × 0,13 mm, und für den 112-kΩ-Widerstand 13 Streifen zu ca. 0,13 × 4 mm festgelegt. Derartige Streifen lassen sich mit Masken, die durch Ätzen von Folien aus Cu, Ta oder rostfreiem Stahl hergestellt werden, ohne weiteres reproduzierbar aufdampfen [Maske c in Fig. 14]. Für die Kondensatoren wird zuerst die Elektrode aus Aluminium durch die Maske d in Fig. 14 aufgedampft, dann als Dielektrikum eine 2700 Å dicke Schicht von SiO durch Maske e in Fig. 14 und als Gegenelektrode nochmals Al durch Maske f. Zur Kontaktierung kann entweder Einbrennsilber verwendet, oder Cu, bzw. Au aufgedampft werden, wofür nochmals eine Maske erforderlich ist. Die üblichen Schaltungen enthalten mehr Bauteile, als das hier gewählte einfache Beispiel. Zur Platzersparnis werden dann mehrere Schichten übereinander aufgedampft, die jeweils durch isolierende Schichten voneinander getrennt sind. (Auch als 3 D circuits bezeichnet.) Die obere Grenze liegt bei einer totalen Schichtdicke von ca. 10 µm. Dickere Aufdampfschichten blättern dann meistens infolge starker innerer Spannungen von der Unterlage ab.

Die aktiven Elemente, meistens besonders flach gebaute Dioden und Transistoren, werden getrennt in der Schaltung montiert. Die Weiterentwicklung strebt die Einbeziehung auch der aktiven Elemente in den Aufdampfprozess an, wobei die in Ziff. 4.2 beschriebenen Elemente als erste Ansätze zu betrachten sind.

In der Produktion bereits weiter fortgeschritten sind die Festkörperschaltungen (solid state circuits, molecular circuits). Dioden und Transistoren werden auf einem Einkristallplättchen nach der in Ziff. 4.1 erwähnten Planartechnik aufgebaut. Widerstände erhält man durch verschiedene Dotierungen von definierten Bereichen der Halbleiterunterlagen. Kondensatoren werden durch p-n-Übergänge erzeugt. Derart hergestellte passive Elemente haben sehr geringe Abmessungen, allerdings sind sie stark temperaturabhängig (TK der Widerstände 0,1...1 %) und die Kondensatoren auch noch spannungsabhängig. Trotzdem sind die bisher erzielten Schaltungen sehr eindrucksvoll bezüglich der Kleinheit der Abmessungen. Die Aufdampftechnik hat hier dieselbe Anwendung wie bei den bereits beschriebenen Planartransistoren, d. h. die Herstellung von Kontakten, sowie zusätzlich leitende Verbindungen zwischen den einzelnen Elementen.

Für höhere Ansprüche bezüglich der Temperaturstabilität wird auch bei Festkörperschaltungen die Herstellung passiver Elemente mittels aufgedampfter Schichten in Betracht gezogen. Derartige «Hybrid-Schaltungen» würden die Vorteile beider Verfahren vereinigen. Zur Zeit besteht die Schwierigkeit darin, dass bei Dünnschichtelementen die erforderlichen *R-C* Werte nicht auf den verfügbaren Flächen untergebracht werden können.

Die mit den verschiedenen Verfahren möglichen Bauteildichten sind in Tabelle III angegeben.

Bauteildichten

Tabelle III

Verfahren	Bauelemente/cm³
Gedruckte Schaltung	0,4
Mikromodul	15
Dünnschichtschaltung	200
Festkörperschaltung	1000

Bei den jetzt erhältlichen Schaltungen ist es sicherer, in der Praxis nur mit einem Fünftel bzw. Zehntel dieser Werte zu rechnen, insbesondere wenn auch die notwendigen Ver-

bindungsleitungen, Abstützungen und Kühlungsmöglichkeiten berücksichtigt werden.

6. Bauelemente für digitale Rechenanlagen

Die laufend zunehmende Anwendung von Rechenanlagen hat dazu geführt, dass die Entwicklung leistungsfähiger und billiger Anlagen mit grossem Aufwand betrieben wird. Die grosse Zahl von einfachen und gleichartigen Schaltungen die in diesen Anlagen vorkommen, bieten ein ideales Anwendungsgebiet für die Miniaturisierung.

Ein Digitalrechner besteht im Prinzip aus den folgenden Hauptteilen: Ein- und Ausgabe, Leitwerk, Rechenwerk und Speicher. Die neueren Entwicklungen gehen nun dahin, sowohl für die logischen Schaltungen, die in Leit- und Rechenwerken Verwendung finden, als auch für Speicher neue Elemente zu entwickeln, wobei es sich gezeigt hat, dass aufgedampfte dünne Schichten bevorzugt zur Lösung der damit verbundenen Probleme geeignet sind. Die am weitesten fortgeschrittenen Entwicklungen sind magnetisch anisotrope Schichten vor allem für Speicher, und supraleitende Schichten für Speicher und logische Schaltungen.

6.1 Anisotrope magnetische Schichten

Derartige Schichten werden folgendermassen hergestellt: durch Hochfrequenzerhitzung wird aus einem Keramiktiegel Permalloy (NiFe 80/20) verdampft und auf einer geheizten (300...400 °C) Glas- oder Metallplatte, die sich in einem Magnetfeld von einigen 100 Oe befindet, kondensiert. Die Anwesenheit des Magnetfeldes führt dazu, dass sich in der Schicht eine bevorzugte Richtung der Magnetisierung (leichte Achse) ausbildet, d. h. die Schicht ist magnetisch anisotrop. Beim Fehlen eines äusseren Feldes wird die Magnetisierung eine der beiden Lagen annehmen, die in Fig. 15a durch die Magnetnadel gekennzeichnet sind. Eine derartige Schicht ist daher geeignet, binäre Einheiten zu speichern. Zum Speichern einer binären Information ist die Magnetisierung in die jeweils gewünschte Richtung zu bringen. Eine Richtungsänderung kann auf zwei Arten erfolgen, indem die Magnetnadel in der Ebene gedreht, oder indem sie direkt umgeklappt wird. Dieser bildlichen Darstellung entspricht im letzten Fall im molekularen Bereich eine Richtungsänderung der Magnetisierung durch Umklappen der Weißschen Bezirke (Domänen). Dieser Vorgang verläuft relativ langsam ($\approx$ 1 µs), während die Drehung der Magnetisierung, die durch eine kohärente Rotation der Spins erfolgt, sehr rasch ($\approx$ 1 ns = 10^{-9} s) abläuft. Beim Schreiben und beim Ablesen einer Information sind die Magnetfelder, die den gewünschten Vorgang bewirken sollen, daher so auszubilden, dass die Magnetisierung durch Rotation ihre Richtung ändert. Von den verschiedenen Anordnungen die dies ermöglichen, ist in Fig. 15 ein Beispiel angegeben [5]. Der Impuls I_1 bringt die Magnetisierung in die harte Achse. Der Impuls I_2 ist schwächer und dreht die Magnetisierung nur geringfügig. Nach Abschalten des Impulses I_1 fällt die Magnetisierung von selbst in die ihr am nächsten liegende Richtung der leichten Achse.

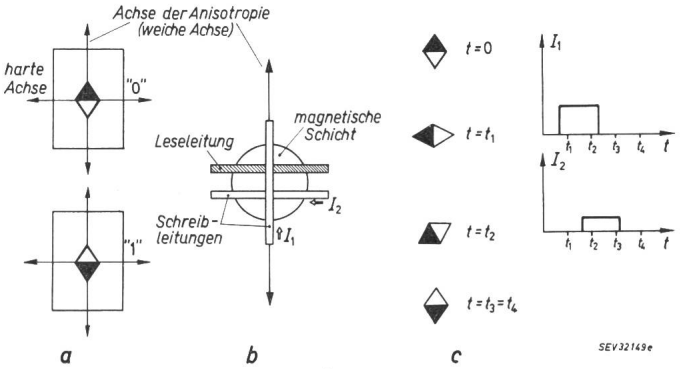


Fig. 15
Anisotrope magnetische Schichten für Speicher
a bevorzugte Lagen der Magnetisierung; *b* Anordnung der Schreib- und Leseleitungen; *c* Vorgang der Speicherung einer «I» durch zwei Stromimpulse

Das Ablesen der gespeicherten Information geschieht auf ähnliche Weise, wobei das beim Umschalten in der Leseleitung induzierte Signal, nach entsprechender Verstärkung dem Rechenwerk zugeführt wird. Fig. 15b zeigt die Anordnung der zum Schreiben und Lesen erforderlichen Leitungen. Die magnetische Schicht kann die ganze Fläche bedecken, wobei nur enge Bereiche um die Kreuzungsstelle der Leiter geschaltet werden, oder aus einzelnen Flecken, wie in Fig. 15b gezeigt, bestehen.

Die technologische Schwierigkeit bei der Herstellung magnetischer Speicherschichten liegt in der schlechten Reproduzierbarkeit der Schichteigenschaften. Vor allem die Anisotropieachse ist nicht überall gleich in ihrer Richtung. Die Ursachen hiefür sind Spannungen in der Schicht, eine ungleichmässige Schichtdickenverteilung, eventuell auch schräg auftreffende Atome beim Aufdampfen, die ebenfalls Anlass zur Anisotropie sein können. Theoretisch sollte die Koerzitivkraft H_c der Schicht in der Vorzugsachse gleich gross sein wie die Sättigungsfeldstärke H_k in der Achse senkrecht dazu. In der Praxis ist dies aber nur selten der Fall. Je nach den Herstellungsbedingungen kann $H_c < H_k$, oder $H_c > H_k$ (Inversionsfilme) sein. In den üblichen Schichten liegt H_c bei 0,5...3 Oe und H_k bei 2...5 Oe. H_c ist vor allem von der Schichtdicke abhängig, während H_k von der Aufdampfgeschwindigkeit, der Unterlagentemperatur während des Bedampfens und in noch ungeklärter Weise auch von Verunreinigungen beeinflusst wird.

Vor kurzem sind die Entwicklungen soweit gediehen, dass die ersten Magnetschichtspeicher auf den Markt gekommen sind.

6.2 Supraleitende Schichten (Cryotron)

Logische Schaltungen und Speicherelemente aus supraleitenden Schichten bieten solche Vorteile bezüglich Schaltgeschwindigkeit, Platz- und Energiebedarf, dass ihre Anwendung von Interesse ist, trotz des mit dem notwendigen flüssigen Helium verbundenen Aufwandes. Das Prinzip eines

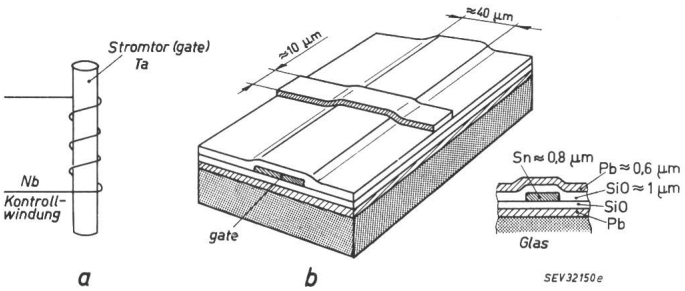


Fig. 16
Supraleitende Schichten
a Draht-Cryotron; *b* planares Cryotron aus Aufdampfschichten

supraleitenden Schalters ist einfach (Fig. 16a). Ein dünner Niobdraht wird um einen dickeren Tantaldraht gewickelt. Im Ausgangszustand sind beide Drähte supraleitend und stromführend. Nun wird der Strom in der Niobwendel so stark erhöht, bis sein Magnetfeld die Supraleitfähigkeit im Tantaldraht auslöscht. Die Voraussetzung dazu ist, dass die Supraleitfähigkeit der Niobwendel durch den eigenen Strom nicht vernichtet wird. Aus diesem Grund wird für die Kontrollwindung ein Metall mit einer möglichst hohen kritischen Temperatur T_c (= Temperatur bei welcher der Übergang von Normal- zur Supraleitung stattfindet) gewählt:

Metall	Kritische Temperatur T_c
Niobium (Nb)	8 °K
Blei (Pb)	7,2 °K

und für das Stromtor ein Metall mit niedriger kritischer Temperatur:

Metall	Kritische Temperatur T_c
Tantal (Ta)	4,4 °K
Zinn (Sn)	3,7 °K

Durch geeignete Dimensionierung lässt sich weiterhin erzielen, dass der Schaltstrom in der Kontrollwindung kleiner ist als derjenige Strom im Stromtor, der allein bereits in der Lage ist, die Supraleitfähigkeit des Stromtores zu zerstören. Daraus ergibt sich die Möglichkeit der Stromverstärkung, d. h. das Cryotron ist ein aktives Element. Bei der Zusammenschaltung mehrerer Cryotrons braucht man daher keinen Verstärker.

Für eine Massenfabrikation ist das sog. planare Cryotron, das aus dünnen Schichten aufgebaut ist (Fig. 16b), wesentlich besser geeignet als die Anordnung nach Fig. 16a. Da Nb und Ta sehr schwer aufzudampfen sind, werden an deren Stellen Pb und Sn verwendet. Zur Isolation dienen SiO-Schichten. Die geringe Induktivität (genauer das kleine Verhältnis L/R) dieser Anordnung ermöglicht Schaltzeiten im Bereich von Nanosekunden. Zur weiteren Verringerung der Induktivität wird auch auf der Glasunterlage eine Bleischicht aufgedampft.

Die Verwendung von Aufdampfschichten bringt jedoch auch verschiedene technologische Schwierigkeiten. Die kritische Temperatur hängt von der Reinheit der Schichten ab; man muss also bei sehr gutem Vakuum arbeiten. Weitere Schwierigkeiten bieten die unscharfen Ränder, die beim Aufdampfen der Streifen durch Masken entstehen. Es hat sich gezeigt, dass zu einer zufriedenstellenden Lösung dieses Problems die Aufdampfung bei Drücken unter 10^{-7} Torr erfolgen muss [6]. Die mit der Fabrikation zusammenhängenden Schwierigkeiten scheinen nach den erhältlichen Informationen aber doch so weit gelöst zu sein, dass unter Laboratoriumsbedingungen die ersten Rechenmaschinen mit supraleitenden Elementen in absehbarer Zeit in Betrieb genommen werden können.

7. Optoelektronische Bauelemente und Schaltungen

Dieses Gebiet umfasst alle Bauelemente bei denen optische und elektrische Vorgänge eine Rolle spielen, wie z. B. Photowiderstände, Photoelemente etc., sowie deren Kombinationen. Diese Bezeichnung hat sich deshalb eingeführt, weil die neueren Entwicklungen dieser Elemente zum Entstehen einer eigenen Schaltungstechnik führen.

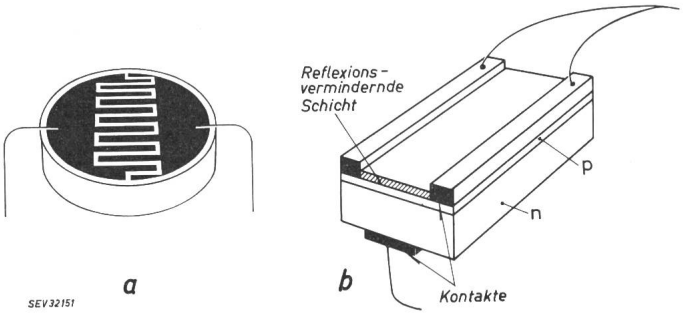


Fig. 17
Photowiderstand *(a)* **und Photozelle** *(b)*

7.1 Photowiderstände und Photoelemente

Der Vorteil der Aufdampftechnik bei der Herstellung von Photowiderständen liegt darin, dass auf einfache Art grossflächige Elemente erzeugt werden können. Die kammartigen Elektroden in Fig. 17a können beim Aufdampfen in demselben Arbeitsgang aufgebracht werden, wobei bei der Materialauswahl aber darauf zu achten ist, dass sperrschichtfreie Kontakte entstehen. Als fotoleitendes Material wird vorwiegend CdS verwendet. Die Verdampfung erfolgt bei 700...900 °C aus Molybdänschiffchen. Die Schichtunterlage wird während des Bedampfens auf einer leicht erhöhten Temperatur (50...100 °C) gehalten. Die Hauptschwierigkeit bei der Herstellung liegt in der Reproduzierbarkeit der elektrischen Eigenschaften der Schicht, die auch bei sorgfältigem Einhalten der Fabrikationsbedingungen nicht gewährleistet ist. Neue Versuche zeigen, dass durch Aufdampfen im Ultrahochvakuum ($< 10^{-7}$ Torr) diese Schwierigkeiten weitgehend beseitigt werden können.

Photoelemente erzeugen eine elektrische Spannung bei Beleuchtung. Hiezu ist es notwendig, dass im Element ein p-n-Übergang vorhanden ist, dessen Elektronenverteilung bei Beleuchtung geändert wird. Den Aufbau eines Siliziumphotoelementes (Sonnenbatterie) zeigt Fig. 17b. Man geht von einem n-leitenden Si-Plättchen aus, bei dem durch Diffusion eine p-leitende Oberflächenschicht erzeugt wird. Die Aufdampftechnik wird hier zur Herstellung von Ohmschen Kontakten an die p- und n-leitenden Gebiete verwendet, sowie zum Aufbringen eines reflexionsvermindernden Belages, der den Wirkungsgrad des Elementes erhöht.

7.2 Elektrolumineszente Zellen

Als Elektrolumineszenz bezeichnet man die Lichtemission, die in einem Stoff durch ein elektrisches Feld verursacht wird. Der Aufbau einer derartigen Zelle gleicht dem eines Kondensators, bei dem jedoch an Stelle des Dielektrikums ein elektrolumineszentes Material, vorwiegend ZnS, eingebracht wird, und ausserdem eine Elektrode transparent, aber elektrisch leitend ist. Transparente, leitende Schichten können durch Aufdampfen von Gold und Wismut- oder Indiumoxyd hergestellt werden (z. B. bei einem Flächenwiderstand von 300...500 Ω mit 90 % Transparenz). Die Intensität des emittierten Lichtes hängt von der Spannung und der Frequenz ab. Übliche Werte sind 150...500 V und 50...1000 Hz. Der Wirkungsgrad der Energieumwandlung ist gering und nur in optimalen Fällen werden Werte wie bei Glühlampen erreicht.

Elektrolumineszente Zellen bieten eine Reihe von Anwendungen: flächenhafte Beleuchtung, Anzeige von Zahlen oder

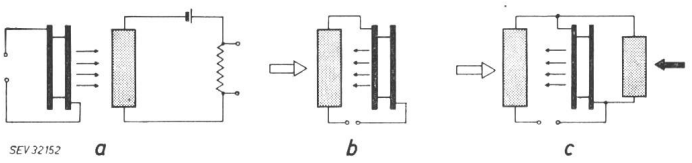


Fig. 18

Optoelektronische Schaltungen (Optrons) aus Photowiderständen und elektrolumineszenten Zellen

a Verstärker; *b* Speicher; *c* Speicher mit optischer Löschung

Buchstaben. Die weitere Entwicklung hat sogar den teilweisen Ersatz von Fernsehröhren durch elektrolumineszente Platten zum Ziel. Derartige Anordnungen hätten den Vorteil des äusserst geringen Platzbedarfes. Durch die Kombination von elektrolumineszenten Zellen mit Photowiderständen ist es möglich, auch Bildverstärker zu bauen.

7.3 Optoelektronische Schaltungen (Optrons) [7]

Mit Photowiderständen und elektrolumineszenten Zellen lassen sich auch die Funktionen normaler elektrischer Schaltungen nachbilden. Dabei ist es möglich, die einzelnen Elemente elektrisch oder optisch zu koppeln. In allen Fällen spielt aber die geometrische Anordnung eine entscheidende Rolle. Fig. 18 zeigt einige Beispiele von Optrons, deren Arbeitsweise ohne weitere Erklärung ersichtlich ist. Die mit diesen Elementen erreichbaren Schaltgeschwindigkeiten sind allerdings nicht sehr hoch, und werden auch in Zukunft wohl kaum unter den Bereich von einigen zehn Mikrosekunden gebracht werden können. Das grosse Interesse an diesen Elementen beruht vor allem auf der Möglichkeit der einfachen Massenfabrikation, so dass z. B. Rechenmaschinen beschränkter Leistung sehr billig hergestellt werden könnten.

Abschliessend sei noch auf einige Anwendungen von Aufdampfschichten hingewiesen, die in der vorliegenden Zusammenstellung nicht behandelt wurden: Aufdampfen von Edelmetallen für Relaiskontakte und Sicherungen, Herstellung des Spaltes für Tonbandköpfe, Aufdampfen von Thermoelementen, Bolometern, etc. Die Liste der bisherigen Anwendungen der Aufdampftechnik ist bereits eindrucksvoll; trotzdem besteht kein Zweifel, dass diese Entwicklung erst in ihren Anfängen steht, und die Bedeutung der Aufdampftechnik in der Elektrotechnik noch laufend zunehmen wird.

Literatur

[1] *Alderson, R. H.* und *F. Ashworth:* Vacuum-Deposited Films of Nickel-Chromium Alloy. Brit. J. appl. Phys. 8(1957)5, S. 205...210.

[2] *Tantraporn, W.:* How Good Are Thin-Film Triodes? Electronics 35(1962)52, S. 29...32.

[3] *Dummer, G. W. A.* und *J. W. Granville:* Miniature and Micro-miniature Electronics. London: Pitman 1961.

[4] *Taylor, K.:* The Deposition of Composite Passive Micro-miniature Circuits by Vacuum Evaporation in Trans. of the Eigth National Vacuum Symposium 1961; London: Pergamon Press. S. 981...987.

[5] *Bradley, E. M.:* Properties of Magnetic Films for Memory Systems. J. appl. Phys. Suppl. 33(1962)3, S. 1051...1057.

[6] *Caswell, H. L.:* Effect of Residual Gases on Superconducting characteristics of Tin Films. J. appl. Phys. 32(1961)1, S. 105...114.

[7] *Henisch, H. K.:* Electroluminescent Devices. Brit. J. appl. Phys. 12(1961)12, S. 660...667.

Adresse des Autors:

Dr. *G. Zinsmeister,* Balzers AG für Hochvakuumtechnik und dünne Schichten, Balzers (Liechtenstein).

Neuerungen auf dem Gebiet des Fernsehens

Von *W. Gerber,* Bern

621.397

Das Fernsehen hat schon vor Jahren seine Betriebsreife erlangt, doch ist die Entwicklung noch keineswegs abgeschlossen. Einige wesentliche Trends im öffentlichen Fernsehen, wie der Übergang zu Mehrprogramm-Systemen, das sich allmählich anbahnende Weltfernsehen, das in Europa bevorstehende Farbfernsehen, sowie die rasch zunehmende Anzahl der weiteren Einsatzmöglichkeiten der Fernsehtechnik in Wissenschaft, Wirtschaft und Verkehr, werden herausgegriffen und kurz beschrieben.

La télévision a atteint un niveau de qualité technique élevé mais son développement est loin d'être achevé. On fait ressortir et on décrit ici quelques tendances essentielles dans le service public de la télévision, tel le passage à des systèmes de programmes multiples, l'avènement d'une télévision mondiale, l'introduction dans un proche avenir de la télévision en couleur en Europe, ainsi que le rapide accroissement des possibilités d'application de la technique de la télévision dans les domaines de la science, de l'économie et de la circulation.

Am Anfang der Entwicklung standen die Wissenschaft und die Technik. Erst viel später, in den Jahren unmittelbar nach dem letzten Weltkrieg, erlangte das vollelektronische Fernsehen, wie wir es heute kennen, seine Betriebsreife. Anfänglich Selbstzweck, ist damit die Fernsehtechnik ein Mittel zum Zweck geworden. Der Mensch, ein vorwiegend sehendes Subjekt, was macht er nun damit?

Nach wie vor aber sind es zur Hauptsache die wissenschaftlich-technischen Bemühungen, welche die Entwicklung vorantreiben. Noch ist die inhärente Qualität der neueren Fernsehnormen keineswegs ausgeschöpft; sowohl der innere als auch der äussere photoelektrische Effekt sind Gegenstand weiterer Untersuchungen; damit werden die optisch-elektrischen sowie die elektrisch-optischen Wandler zusehends besser; die Bildaufzeichnung verlagert sich allmählich und soweit möglich von der photographischen zur magnetischen. Immer noch ist die Entwicklung, sozusagen auf der ganzen Breite im Fluss. Im folgenden seien nunmehr einige wesentliche Richtungen des allgemeinen Fortschrittes herausgegriffen und etwas näher betrachtet.

Mehrprogramm-Systeme

Im öffentlichen Fernsehen war man anfänglich froh, wenn überhaupt die Mittel für ein einziges Programm ausreichten. Mit der zunehmenden Verbreitung des Fernsehens folgte jedoch bald das Bedürfnis und die Möglichkeit, mit ein und derselben Empfangsanlage unter verschiedenen Programmen auswählen zu können. An vielen Stellen der USA