

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Band: 48 (1970)

Heft: 5

Artikel: Dünnschichtschaltungen für die Nachrichtentechnik = Circuits intégrés en couches minces pour la technique des télécommunications

Autor: Kaufmann, Helmut

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-876053>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 13.10.2024

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

Dünnschichtschaltungen für die Nachrichtentechnik

Circuits intégrés en couches minces pour la technique des télécommunications

Helmut KAUFMANN, Balzers FL

621.38.049.75-181.4

Zusammenfassung. Bei der Herstellung von Dünnschichtschaltungen auf Tantalbasis sind die folgenden technologischen Schritte durchzuführen: Aufbringen der Tantal- beziehungsweise Tantalnitridschicht durch Kathodenzerstäubung, Definition der Geometrien durch Photolithographie, Erzeugung des Dielektrikums und Abgleich der Widerstände durch anodische Oxydation, Aufdampfen der Gegenelektroden und Verbindungsleitungen, Einbunden der aktiven Elemente. Typische Beispiele für Anwendungen in der Nachrichtentechnik sind Widerstandsnetzwerke und aktive Filter. Von besonderem Interesse sind verteilte Netzwerke, mit denen sich viele Schaltungen stark vereinfachen lassen.

Résumé. La fabrication de circuits en couches minces à partir du tantale se fait par étapes successives. Les principales sont: Déposition du tantale, par exemple sous forme de couche de nitrure de tantale, par pulvérisation cathodique. Définition de la géométrie par photolithographie. Création du diélectrique et ajustage des résistances par oxydation anodique. Déposition de la contre-électrode et des conducteurs de raccordement. Soudage des éléments actifs. Comme exemples typiques d'application dans la technique des télécommunications, citons par exemple les réseaux de résistances et filtres actifs. Les réseaux répartis permettant de simplifier un grand nombre de circuits sont particulièrement intéressants.

Circuiti a film sottili per la tecnica delle telecomunicazioni

Riassunto. Costruendo circuiti a film sottili sulla base del tantalio si devono seguire successivamente i seguenti procedimenti tecnologici: applicazione del tantalio, rispettivamente dello strato di nitrato al tantalio, mediante la polverizzazione catodica, definizione della geometria mediante la fotolitografia, realizzazione dello strato dielettrico e bilanciamento delle resistenze mediante ossidazione anodica, deposizione degli elettrodi opposti e delle linee di collegamento, incorporazione degli elementi attivi. Esempi tipici d'applicazione nella tecnica delle telecomunicazioni sono resistenze reticolari e filtri attivi. Particolarmente interessanti sono strutture di reti distribuite, con le quali si possono semplificare sensibilmente molti circuiti.

Die Entwicklung von Dünnschichtschaltungen für die Nachrichtentechnik geht vor allem auf Arbeiten zurück, die bei *Bell Telephone Laboratories* und *Western Electric* durchgeführt wurden. Man beschäftigt sich im Bell-Konzern seit ungefähr 10 Jahren [1] mit grosser Intensität mit dieser Technik, wobei Tantal als Ausgangsmaterial im Vordergrund steht [2]. Dementsprechend stützt sich auch diese Arbeit zu einem grossen Teil auf Veröffentlichungen von Mitarbeitern dieser Firma. Die hier zitierten Schaltungsbeispiele sind hauptsächlich in Tantaltechnik ausgeführt worden, obwohl sich auch andere Materialien, zum Beispiel Nickel-Chrom und Siliziummonoxyd durchaus dafür verwenden liessen.

Beim heutigen Stand der Technik werden nur die passiven Komponenten einer Schaltung in Dünnschichttechnik ausgeführt, wobei die Verwendung von Induktivitäten möglichst vermieden wird, weil sich zweidimensionale Induktivitäten nur bis zu Werten von wenigen nH mit erträglichem Platzbedarf realisieren lassen.

Dünnschichtdioden und -transistoren – zur Zeit vorwiegend aus CdS oder Te hergestellt – sind noch reine Laboratoriumsprodukte, die sich nicht für eine Serienproduktion eignen. Als aktive Elemente werden daher kommerziell erhältliche Halbleiterbauteile aus Ge, Si, usw. in den verschiedensten Ausführungen (gekapselt, chips, beam lead, usw.) verwendet. Diese Elemente werden in die aus Widerständen, Kondensatoren und Leiterbahnen bestehende Dünnschichtschaltung eingebondet, wobei alle Methoden des bonding (Thermokompression, Ultraschallschweissen usw.) verwendet werden können.

Le développement de circuits intégrés en couches minces pour la technique des télécommunications remonte à des travaux réalisés dans les laboratoires de *Bell Telephone* et *Western Electric*. Le groupe Bell s'occupe activement de cette technique depuis 10 ans environ [1], le matériel de base étant avant tout le tantale [2]. C'est pourquoi cet article repose en grande partie sur des publications des collaborateurs de ce groupe. Les exemples cités ici sont réalisés principalement en technique tantale, bien que d'autres matériaux puissent être utilisés, par exemple le nickel-chrome ou l'oxyde de silicium.

Dans l'état actuel de la technique, seuls les composants passifs d'un circuit sont réalisés en couches minces, et encore en évitant autant que possible l'utilisation d'inductivités. Seules des valeurs de self-induction de quelque nH peuvent être obtenues, compte tenu de la place nécessaire pour les bobines à deux dimensions.

Les diodes et transistors en couches minces, fabriqués actuellement en CdS ou Te, sont des réalisations de laboratoire, ne se prêtant pas encore à la fabrication en série. En tant qu'éléments actifs, certains composants semiconducteurs au Ge, Si, etc. peuvent être obtenus commercialement dans les exécutions les plus diverses, en boîtier, paillettes, à ruban (beam lead), etc. Ces éléments sont soudés sur les circuits en couches minces composés de résistances, condensateurs, etc. Toutes les méthodes de soudage connues (compression thermique, soudure par ultrasons, etc.) peuvent être utilisées.

1. Technologie

1.1 Materialien

Am Anfang der Entwicklung stand wohl der Gedanke, dass Tantal ein besonders stabiles Material ist und vor allem auch, dass sich Widerstände und Kondensatoren aus diesem Ausgangsmaterial herstellen lassen. Bald zeigte es sich, dass es zwei Tantal-Modifikationen gibt, das normale Tantal mit kubisch-raumzentrierter Struktur und ein beta-Tantal mit wahrscheinlich tetragonaler Struktur [3]. Dieses beta-Tantal konnte bisher nur in Form dünner Schichten hergestellt werden, und zwar sowohl durch Kathodenzerstäubung als auch durch Aufdampfen im Ultrahochvakuum. Für technische Anwendungen kommt jedoch nur die Kathodenzerstäubung in Frage.

Bei der Kathodenzerstäubung bombardiert man ein Targetmaterial, in diesem Falle also Tantal, mit Ionen hoher Energie, die dann aus dem Target einzelne Atome heraus schlagen. Um chemische Reaktionen auszuschalten, werden Ionen von Edelgasen, meist Argon, verwendet. Die Ionen werden in einer selbständigen oder unselbständigen Glimmentladung erzeugt und durch eine Spannung von einigen kV auf das Target beschleunigt [4]. Die Tantalatome, die das Target verlassen, schlagen sich auf den umgebenden Oberflächen nieder; dort werden die zu bestäubenden Substrate angebracht.

Beta-Tantal unterscheidet sich nicht nur in der Struktur, sondern auch in seinen elektrischen Eigenschaften vom normalen Tantal: der spezifische Widerstand beträgt etwa 200 gegenüber $13 \mu\Omega\text{cm}$ und der Temperaturkoeffizient des Widerstandes (TCR) $\pm 100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ gegenüber $+ 3800$ bei normalem Tantal. Es hat sich gezeigt, dass man aus beta-Tantal durch anodische Oxydation wesentlich bessere Kondensatoren erhält als aus dem normalen Tantal, offenbar enthält das Dielektrikum weniger Fehlstellen (siehe [2], p. 384).

Auch als Widerstandsmaterial wird heute nicht mehr einfach Tantal, sondern Tantalnitrid verwendet. Es wird durch Zerstäuben von Tantal in einem Argon-Stickstoff-Gemisch hergestellt (reaktives Zerstäuben). Dabei wird Stickstoff in die Tantalschicht eingebaut. Bei einer bestimmten Stickstoffkonzentration, die ungefähr einer stöchiometrischen Zusammensetzung Ta_2N entspricht, erhält man Widerstandsschichten mit optimaler Stabilität. Diese Schichten haben einen spezifischen Widerstand von ca. $200 \mu\Omega\text{cm}$ und einen TCR von $- 75 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$.

Als Substratmaterial wird entweder Glas oder Aluminiumoxyd-Keramik verwendet. Glas hat eine glattere Oberfläche, aber schlechtere Wärmeleitfähigkeit. Es muss alkali-freies Glas verwendet werden (zum Beispiel Corning 7059), weil die Alkaliionen unter dem Einfluss erhöhter Temperatur und elektrischer Felder in die Widerstandsschicht

1. Technologie

1.1 Matériaux

Au début du développement, on était d'avis que le tantale était un matériel particulièrement stable et que des résistances et condensateurs pouvaient également être réalisés à partir de ce matériel. Bientôt il apparut qu'il existe deux modifications du tantale, le tantale normal à structure cubique centrée et le tantale β dont la structure est probablement tétraédrique [3]. Ce tantale β ne peut être obtenu jusqu'à maintenant qu'en couches minces, tant par la méthode de pulvérisation cathodique que d'évaporation sous ultra-vide. Pour les applications techniques cependant, seule la méthode de la pulvérisation cathodique entre en ligne de compte.

Cette méthode consiste à bombarder une cible d'un matériel approprié, dans notre cas le tantale, avec des ions à haute énergie, pour en détacher des atomes. Pour éviter une réaction chimique, on utilise des ions d'un gaz inerte, le plus souvent l'argon. Les ions sont engendrés par décharge, entretenue ou non, puis accélérés sur la cible par une tension de quelques kV. Les atomes de tantale quittant la cible se déposent sur les surfaces environnantes, où sont placés les substrats à recouvrir.

Le tantale β ne se différencie pas seulement par sa structure du tantale normal, mais encore par ses propriétés électriques: sa résistance spécifique est d'environ 200 par rapport à $13 \mu\Omega\text{cm}$ et le coefficient de température de la résistance est de $\pm 100 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ contre $+ 3800$ pour le tantale normal. On a également remarqué que les condensateurs obtenus par oxydation anodique à partir du tantale β étaient de meilleure qualité que ceux réalisés en tantale normal, probablement parce qu'il y a moins de défauts dans le diélectrique (voir [2], page 384).

Pour la fabrication des résistances, on n'utilise plus de nos jours le tantale pur, mais du nitrure de tantale, obtenu par pulvérisation cathodique du tantale dans un mélange d'argon et d'azote (pulvérisation réactive). Il s'ensuit que de l'azote est incorporé dans la couche de tantale. Pour une certaine concentration d'azote, qui correspond environ à une composition stœchiométrique du Ta_2N , on obtient des résistances en couches de stabilité optimale. Ces couches ont une résistance spécifique d'environ $200 \mu\Omega\text{cm}$ et un coefficient de température de $- 75 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

En tant que substrat, on utilise le verre ou une céramique à l'oxyde d'aluminium. Le verre présente une surface plus lisse mais a l'inconvénient d'avoir une plus mauvaise conductibilité thermique. On doit utiliser un verre exempt de soude (par exemple Corning 7059), parce que les ions de soude se déplacent dans la couche résistante sous l'influence de la température élevée et des champs électriques. Il s'ensuit des modifications irréversibles des valeurs de la

hineinwandern. Dabei treten irreversible Änderungen des Widerstandswertes auf. Keramik wird oft glasiert, um die nach dem Brennen sehr raue Oberfläche zu verbessern. Die Wärmeleitfähigkeit ist dann noch ungefähr zweimal grösser als bei Glas.

1.2 Herstellung von Kondensatoren

Die zur Kondensatorherstellung notwendigen Schritte sind in *Figur 1* dargestellt. Ausgangsmaterial ist ein mit beta-Tantal beschichtetes Substrat (a). Auf das Tantal wird ein Photolack aufgebracht, wie er auch in der Halbleitertechnik zum Ausätzen von Geometrien verwendet wird. Der Photolack wird durch eine Maske belichtet, wodurch die Grundelektrode des Kondensators definiert wird (b). Es kann ein Positiv- oder Negativlack verwendet werden; dargestellt ist die Verwendung eines Negativlackes, der an den vom Licht getroffenen Stellen polymerisiert und nach dem Entwickeln stehen bleibt. (c) Nun wird das nicht durch Photolack geschützte Tantal mit Flußsäure weggeätzt (d) und der Photolack entfernt (e). Dieser ganze Prozess wird als Photolithographie bezeichnet. Als nächstes wird das Dielektrikum erzeugt, indem man die Grundelektrode anodisch oxydiert. Die Zuleitung, die nicht oxydiert werden soll, wird mit einem Lack abgedeckt (f) und die Schicht in einen schwachen Elektrolyten (etwa 0,01% Zitronensäure) getaucht (g). Die Schicht wird als Anode geschaltet und vorzugsweise mit konstanter Stromstärke anodisiert. Die Spannung an der Schicht wächst dabei

resistance. La céramique est souvent vitrifiée pour améliorer la surface rugueuse du support, due à la cuisson. Il n'en reste pas moins que la conductibilité thermique est encore environ deux fois meilleure que celle du verre.

1.2 Fabrication de condensateurs

Le procédé de fabrication des condensateurs est représenté par la *figure 1*. Au départ, on dispose d'un substrat recouvert de tantale β (a). On applique sur le tantale une laque photosensible identique à celle utilisée dans la technique des semi-conducteurs pour la gravure de certaines géométries. La laque photosensible est exposée à la lumière, à travers un masque, lequel définit l'électrode de base du condensateur (b). On peut utiliser une laque positive ou négative. Dans l'exemple cité, il s'agit d'une laque négative, laquelle est polymérisée aux endroits soumis à la lumière, et qui subsiste après développement (c). Puis le tantale, qui n'était pas protégé par la laque photosensible, est éliminé à l'acide fluorhydrique (d) et la laque enlevée (e). Ce procédé porte le nom de photolithographie. Dans l'étape suivante, on passe à la création du diélectrique, par oxydation anodique de l'électrode de base. Le conducteur d'amenée qui ne doit pas être oxydé est recouvert d'une laque de protection (f) et la couche plongée dans un électrolyte de faible concentration, par exemple de l'acide citrique à 0,01%. La couche est connectée en anode, puis alimentée à courant constant. La tension qui doit être appliquée à la couche pour maintenir le courant constant croît proportionnellement avec l'épaisseur de l'oxyde; 1 volt correspond à une épaisseur de 16Å d'oxyde. L'oxydation est maintenue jusqu'à ce que la tension appliquée atteigne quatre fois la valeur de la tension d'utilisation prévue pour le condensateur. Si par exemple la tension d'utilisation du condensateur est de 30 V, on anodisera jusqu'à une tension de 120 V et on obtiendra ainsi une capacité d'environ 0,1 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$. Il n'est pas possible de créer des couches d'oxyde d'épaisseur quelconque, car, pour des couches supérieures à quelque 1000 Å, l'oxyde se détache sous forme d'écaillés. Après l'anodisation, la laque de protection est enlevée (h) puis la contre-électrode et les conducteurs de raccordement sont vaporisés (i). Il est possible d'utiliser le même matériel pour les deux (électrode et conducteurs) et le plus souvent on fait appel à une combinaison de nickel-chrome et d'or, le nickel-chrome étant utilisé comme couche adhésive et l'or garantissant une bonne conductibilité électrique et une stabilité thermique suffisante. Cette couche est du reste également facilement soudable.

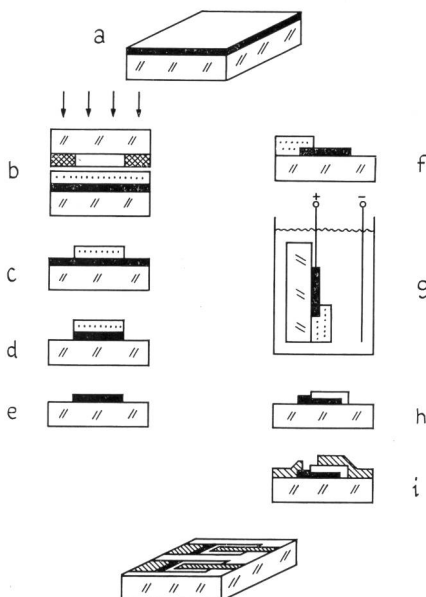


Fig. 1
Herstellung von Kondensatoren aus beta-Tantal
Fabrication de condensateurs au tantale béta

1.3 Fabrication des résistances

Pour la fabrication des résistances, on utilise en principe les mêmes méthodes que pour les condensateurs (*fig. 2*). Le substrat utilisé au départ est recouvert de nitrure de

entsprechend der Oxyddicke linear mit der Zeit an; 1 V entspricht 16 Å Oxyd. Man lässt den Prozess so lange dauern, bis die Spannung das Vierfache der gewünschten Betriebsspannung des Kondensators erreicht hat. Soll zum Beispiel die Betriebsspannung 30 V betragen, so anodisiert man bis 120 V, das ergibt eine Kapazität von etwa $0,1 \mu\text{F}/\text{cm}^2$. Man kann nicht beliebig dicke Oxydschichten auf diese Weise herstellen, weil bei Dicken über einigen 1000 Å das Oxyd abblättert. Nach dem Anodisieren wird der Abdecklack entfernt (h), anschliessend werden Gegenelektrode und Verbindungsleitungen aufgedampft (i). Man kann für beide dasselbe Material verwenden, häufig gebraucht wird eine Kombination von Nickelchrom und Gold, wobei das Nickelchrom als Haftschiicht dient und das Gold gute Leitfähigkeit und thermische Stabilität garantiert. Diese Schicht lässt sich auch sehr gut löten.

1.3 Herstellung von Widerständen

Bei der Widerstandsherstellung sind im wesentlichen dieselben technologischen Schritte vorzunehmen wie bei der Kondensatorherstellung (Fig. 2). Ausgehend von einem mit Tantalnitrid beschichteten Substrat (a) wird zunächst photolithographisch die Widerstandsgeometrie herausgeätzt (b-e). Dabei handelt es sich meist um Mäander. Bei der Berechnung der Geometrie muss die Flächenbelastung im späteren Betrieb berücksichtigt werden, ein üblicher Wert ist $1 \text{ W}/\text{cm}^2$ bei Glassubstraten. Ausserdem geht die kleinste Linienbreite ein, die man sinnvoll erreichen kann. Jede Schicht enthält kleine Löcher (pin holes), die bei sehr schmalen Linien einen Unterbruch des Mäanders bewirken können, so dass mit abnehmender Linienbreite die Ausbeute sinkt.

Anschliessend an den Ätzprozess werden die Kontakte und Verbindungsleitungen aufgedampft (f). Nun werden auch die Widerstände anodisch oxydiert. Man erreicht damit zwei Ziele: erstens bildet das Oxyd eine Schutzschicht, und zweitens kann man den Widerstand auf einen gewünschten Wert trimmen. Man macht die Schicht so dick, dass der Widerstandswert ursprünglich zu niedrig ist und oxydiert unter dauernder Kontrolle des Widerstandes, bis der gewünschte Wert erreicht ist. Falls jeder Widerstand für sich auf diese Weise abgeglichen wird, lassen sich Toleranzen von 0,1% ohne weiteres erzielen, der Prozess lässt sich auch gut automatisieren [2].

1.4 Stabilität

Bezüglich der Stabilität der so hergestellten Tantalnitridwiderstände liegen umfangreiche Untersuchungen vor [2]. Es hat sich gezeigt, dass Tantalnitrid wahrscheinlich das stabilste aller derzeit bekannten Widerstandsmaterialien ist. Als Stand der Technik gilt heute nach entsprechender Voralterung eine Stabilität von 0,1% in 15 Jahren ohne

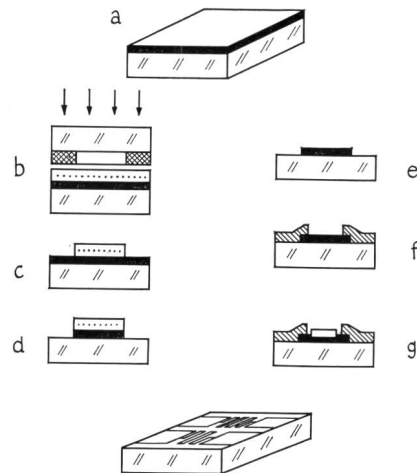


Fig. 2
Herstellung von Widerständen aus Tantalnitrid
Fabrication de résistances au nitrure de tantale

tantale (a). En premier lieu, on procède à la gravure de la géométrie de la résistance, par procédé photolithographique (b-e). Il s'agit dans la plupart des cas de méandres. Lors du calcul de cette géométrie, il faut tenir compte de la dissipation admissible par unité de surface. Une valeur courante est de $1 \text{ W}/\text{cm}^2$ pour les substrats en verre. Un autre facteur dont il faut également tenir compte est la largeur minimum des lignes que l'on peut obtenir pratiquement. Chaque couche présente une certaine porosité et les petits trous (pin holes) apparaissant peuvent créer une interruption complète des lignes minces. La pratique montre que plus on diminue l'épaisseur des lignes plus le nombre des pièces éliminées en fabrication augmente.

Après le procédé de gravure, on procède à la vaporisation des contacts et conducteurs de raccordement (f). Puis les résistances sont également oxydées. Ce procédé permet d'obtenir deux résultats: premièrement l'oxyde forme une couche protectrice et secondement il devient ainsi possible d'ajuster la résistance à une certaine valeur. La résistance est fixée tout d'abord un peu trop basse, puis l'on procède à l'oxydation, sous contrôle permanent, jusqu'à ce que la valeur nominale soit atteinte. En ajustant chaque résistance pour elle-même, on peut obtenir sans autres une gamme de tolérance de 0,1%. Ce procédé peut être du reste automatisé [2].

1.4 Stabilité

En ce qui concerne la stabilité des résistances au nitrure de tantale, de nombreux résultats de recherches sont connus [2]. Ils tendent à démontrer que le nitrure de tantale est de nos jours le matériel le plus stable qui soit utilisable

Last, beziehungsweise von 1% in 15 Jahren bei Belastung mit 1 W/cm^2 und 70°C Umgebungstemperatur (siehe [2], p. 349).

Leider liegen ähnlich eingehende Untersuchungen für Tantaloxyd Kondensatoren noch nicht vor. Nach allem, was wir wissen, sind auch sie aussergewöhnlich stabil, beispielsweise wird eine Stabilität von besser als 1% nach 6000 Stunden unter Spannung bei 85°C angegeben [5].

Wenn man RC-Kombinationen als frequenzbestimmende Glieder verwendet, so legt man oft Wert darauf, dass sich die Frequenz mit der Temperatur nicht ändert. Man kann das dadurch erreichen, dass man die Temperaturkoeffizienten von R (TCR) und C (TCC) entgegengesetzt gleich macht. Tantaloxyd Kondensatoren haben einen TCC von $+200 \text{ ppm}/^\circ \text{C}$, durch Zugabe von Sauerstoff kann man den TCR von Tantalnitrid gleich $-200 \text{ ppm}/^\circ \text{C}$ machen, ohne die übrigen Schichteigenschaften wesentlich zu beeinflussen. Dann ist also $\text{TCC} = -\text{TCR}$ und das RC-Produkt ist temperaturunabhängig.

2. Anwendung

2.1 Diskrete Komponenten

Tantalnitridwiderstände und Tantaloxyd Kondensatoren können als diskrete Bauteile wie andere Widerstände und Kondensatoren verwendet werden. Wenn man einzelne Widerstände fertigt, erhält man Metallfilmwiderstände sehr hoher Stabilität. Ein bereits in Produktion befindlicher Typ besteht aus einem Keramikplättchen, in das ein Mäander mit V-förmigem Querschnitt vertieft eingepresst ist [6]. Man stäubt zunächst über die ganze Oberfläche Tantalnitrid, nach dem Altern wird der erhöhte Teil abgeschliffen, bis der richtige Widerstandswert erreicht ist. Es ist zu erwarten, dass Tantalnitridwiderstände einen Marktanteil der Metallfilmwiderstände übernehmen werden, besonders in Anwendungen, wo es mehr auf Stabilität als auf extrem kleinen TCR ankommt.

Entsprechend kann man auch Kondensatoren auf einem flachen Substrat herstellen, wegen der hohen Dielektrizitätskonstante von Tantaloxyd ($\epsilon \approx 25$) kommt man auf ein sehr kleines Volumen für eine gegebene Kapazität.

2.2 Widerstandsnetzwerke

Eine andere Möglichkeit ist die Herstellung von Widerstandsnetzwerken, zum Beispiel für Spannungsteiler, Dämpfungsglieder oder Digital-Analog-Wandler. Hier kommt es oft darauf an, dass die in der Schaltung vorhandenen Widerstände identische Eigenschaften haben. Das ist bei Ausführung in Dünnschichttechnik in hohem Masse gegeben, weil alle Widerstände in einem Arbeitsgang hergestellt werden. Durch die enge räumliche Anordnung befinden sie sich ausserdem alle auf gleicher Temperatur, was im Blick auf die Alterung sehr wichtig ist.

pour la fabrication de résistances. L'état actuel de la technique permet d'atteindre une stabilité de 0,1% en 15 ans sans charge et de 1% avec 1 W/cm^2 , pour une température ambiante de 70°C , après un vieillissement prématuré correspondant du matériel (voir [2], p. 349).

Malheureusement de tels résultats d'expérience concernant les condensateurs à l'oxyde de tantale ne sont pas encore disponibles. D'après ce que nous savons, ces condensateurs sont exceptionnellement stables puisque les variations sont inférieures à 1% après 6000 heures de fonctionnement sous tension, à 85°C [5].

Lorsqu'on utilise la combinaison d'éléments RC en tant qu'étalons de fréquence, on attache souvent de l'importance à ce que la fréquence ne varie pas avec la température. Cette condition peut être remplie en choisissant les coefficients de température de R et de C égaux mais de signes opposés. C'est ainsi que les condensateurs à l'oxyde de tantale ont un coefficient de $+200 \cdot 10^{-6}/^\circ \text{C}$. Par adjonction d'oxygène, il est possible de porter le coefficient de température des résistances au nitrure de tantale à $-200 \cdot 10^{-6}/^\circ \text{C}$, sans influencer les autres caractéristiques des couches. Les caractéristiques d'un dispositif RC restent ainsi constantes, quelles que soient les variations de température.

2. Applications

2.1 Composants discrets

Les résistances au nitrure de tantale et les condensateurs à l'oxyde de tantale peuvent être utilisés, tout comme les autres résistances et condensateurs, en tant que composants discrets. Si l'on fabrique des résistances en tant qu'éléments séparés, on obtient des résistances à film métallique de très haute stabilité. Un type de résistance déjà en production se compose d'une plaquette céramique dans laquelle des méandres de section en forme de V ont été gravés à l'aide d'une presse [6]. En un premier procédé, la surface de cette plaquette est recouverte, par pulvérisation cathodique, de nitrure de tantale. Puis, après vieillissement, la partie supérieure est rectifiée jusqu'à obtention de la valeur de résistance désirée. Il faut s'attendre à ce que les résistances au nitrure de tantale remplacent sur le marché une partie des résistances à film métallique, particulièrement dans les applications où l'on exige plutôt une stabilité élevée qu'un très faible coefficient de température.

De façon analogue, il est également possible de réaliser des condensateurs sur un substrat plan, étant donnée la constante diélectrique élevée de l'oxyde de tantale ($\epsilon \approx 25$). On obtient ainsi une capacité donnée sous un très faible volume.

2.2 Réseaux de résistances

Une autre possibilité d'application est donnée par la réalisation de réseaux de résistances, tels qu'ils sont utilisés

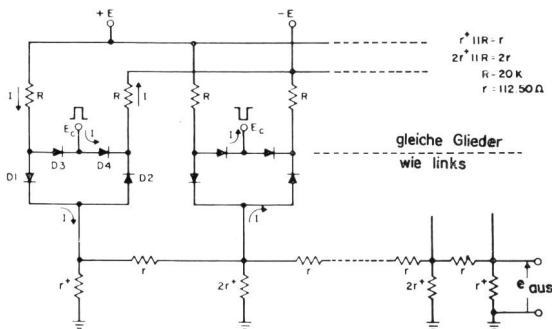


Fig. 3
PCM-Decoder. Schema
Schéma d'un décodeur MIC
Aus/de [7]

gleiche Glieder wie links - éléments identiques à ceux de gauche
*aus - *sortie

Als Beispiel möge ein Digital-Analog-Wandler für einen PCM-Decoder dienen [7]. Wie man aus dem Schema *Figur 3* ersieht, handelt es sich um einen 9 bit-Decoder mit Dioden als Schaltelementen. Zu jedem bit gehören 4 Dioden, die bei E_c angesteuert werden, und zwei Konstantstromwiderstände R in Verbindung mit einer positiven und einer negativen Spannungsquelle. *Figur 4* zeigt die Ausführung in Tantaltechnik. Man erkennt am oberen Rand der Keramikplatte eingebondete monolithische Schaltkreise die je vier Dioden enthalten. Von den Dioden führt ein breiter Leiterstreifen zum eigentlichen Decodernetzwerk am unteren Rand des Substrates. Rechts und links dieses Leiterstreifens befinden sich die Konstantstromwiderstände, deren feiner Mäander auf dem Bild nicht aufgelöst wird. Dieser Decoder hat im Labor mit einer Signalbandbreite von 3 MHz gearbeitet, entsprechend einer simulierten Last von 600 Telephonkanälen. Das Rauschen lag nur um 1,6 dB über dem theoretisch zu erwartenden Kodierungsrauschen.

2.3 Aktive Filter

Ein Gebiet, auf dem ein intensiver Einsatz von Dünnschichtschaltungen erwartet wird, sind die aktiven Filter. Die kommerzielle Realisierung aktiver RC-Filter anstelle passiver LC-Filter scheiterte bisher weitgehend am Preis der aktiven Elemente. Dieses Hindernis wird durch die Fortschritte auf dem Gebiet der linearen monolithischen Schaltungen überwunden.

Es sind mehrere Möglichkeiten bekannt, aktive Elemente in der Filtertechnik zu verwenden [8]. Die wichtigsten sind der Gyrator, der negative Impedanzkonverter und Schaltungen mit negativer oder positiver Rückkopplung, meist unter Verwendung eines Operationsverstärkers.

dans les diviseurs de tension, les atténuateurs ou les transcodeurs digitaux-analogues. Il est alors souvent important que les résistances utilisées dans un circuit aient toutes des caractéristiques identiques. Tel est le cas pour les résistances exécutées en couches minces, puisqu'elles sont toutes fabriquées en un seul processus de travail. De plus, se trouvant concentrées en un volume très restreint, elles sont toutes à la même température, ce qui est très important du point de vue du vieillissement.

Considérons comme exemple un transcodeur digital-analogue utilisé dans un décodeur pour système modulé par impulsions codées (MIC) [7]. Comme on peut s'en rendre compte en examinant le schéma de la *figure 3*, il s'agit d'un décodeur à 9 bits utilisant des diodes comme éléments de commutation. Quatre diodes, commandées par les tensions E_c , et deux résistances à courant constant reliées l'une à une source de courant positive et l'autre à une source de courant négative sont attribuées à chaque bit.

La *figure 4* montre la réalisation de ce décodeur en technique tantale. On reconnaît dans le bord supérieur les circuits monolithiques soudés sur la plaquette de céramique et qui contiennent chacun quatre diodes. De là conduisent des bandes conductrices assez larges au réseau de résistances proprement dit, situé sur le bord inférieur du substrat. A droite et à gauche de ces conducteurs se trouvent les résistances à courant constant dont les fins méandres ne sont plus visibles sur l'image. Ce décodeur a travaillé en laboratoire avec une largeur de bande de signal de 3 MHz, ce qui correspond à une charge fictive de 600 canaux télé-

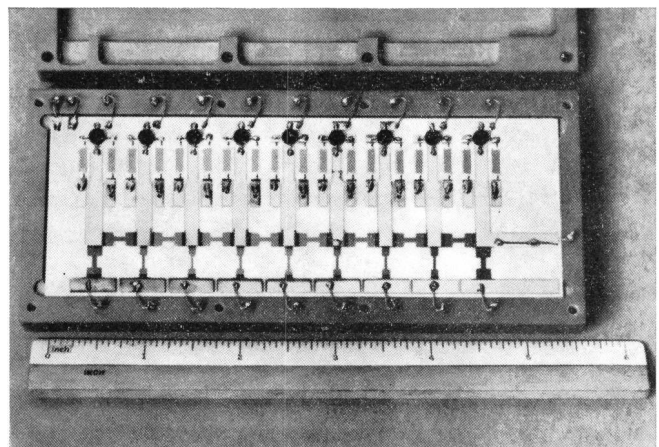


Fig. 4
PCM-Decoder. Ausführung in Tantal-Technik
Décodeur MIC. Exécution en technique tantale
Aus/de [7]

Operationsverstärker gibt es bereits seit einiger Zeit in monolithischer Form. Mit ihnen lassen sich unter Verwendung von Widerständen und Kondensatoren Filter mit beliebiger Übertragungscharakteristik herstellen. Die Möglichkeit, das ganze Filter in Form einer Dünnschichtschaltung aufzubauen, wird ausgenutzt, weil sich bereits Operationsverstärker mit beam leads auf dem Markt befinden, die direkt in die Schaltung eingebondet werden können.

Zum besseren Verständnis des Folgenden gehen wir noch kurz auf die Berechnung der Filter ein. Man kann bekanntlich die Übertragungsfunktion eines Filters ganz allgemein als Funktion zweier Polynome der Frequenz darstellen.

Tabelle I
Tableau I

$$T(s) = \frac{Z(s)}{N(s)} = \frac{Z_1(s)}{N_1(s)} \times \frac{Z_2(s)}{N_2(s)} \times \frac{Z_3(s)}{N_3(s)} \times \dots$$

Quadratisches Glied $\omega_0 = 1$
Élément quadratique $\omega_0 = 1$

$$\frac{Z_k(s)}{N_k(s)} = \frac{Z_k(s)}{1 + 2\xi s + s^2} \quad 2\xi = \frac{1}{Q}$$

Tiefpass: Filtre passe-bas:	$Z_k(s) = 1$
Hochpass: Filtre passe-haut:	$Z_k(s) = s^2$
Bandpass: Filtre passe-bande:	$Z_k(s) = s$
Bandsperre: Filtre de blocage:	$Z_k(s) = 1 - s^2$

Zur Synthese aktiver Filter spaltet man die Übertragungsfunktion in ein Produkt auf, wobei der Nenner der einzelnen Glieder quadratisch in s ist (quadratische Glieder). Die einzelnen quadratischen Glieder werden getrennt aufgebaut und dann hintereinandergeschaltet. Wegen des niedrigen Ausgangswiderstandes der Schaltungen mit Operationsverstärkern ergeben sich beim Hintereinanderschalten im allgemeinen keine Schwierigkeiten.

Die Aufspaltung in quadratische Glieder hat den Vorteil, dass die Berechnung einfacher wird. Ausserdem gilt, dass die Empfindlichkeit der Filter auf Toleranzen der Komponenten in erster Näherung proportional der Güte ist.

Wenn man zwei Filterstufen mit Güte 10 hintereinanderschaltet, so ist die Kombination viel weniger empfindlich als eine Stufe mit Güte 100.

Der Zähler der quadratischen Glieder definiert den Durchlassbereich. Je nachdem, wie die Güte Q gewählt wird, erhält man verschiedene Charakteristiken der Filterkurve.

phoniques. Le bruit n'était que de 1,6 dB supérieur à la valeur théorique du bruit de codage attendu.

2.3 Filtrés actifs

Un domaine dans lequel l'utilisation intensive des circuits intégrés à couches minces est attendue, est celui des filtres actifs. La réalisation commerciale de filtres RC actifs au lieu de filtres LC passifs se heurtait jusqu'ici avant tout au prix des éléments actifs. Cet inconvénient sera éliminé par les progrès réalisés dans la fabrication des circuits linéaires monolithiques.

Plusieurs possibilités sont connues pour l'utilisation d'éléments actifs dans la technique des filtres [8]. Les plus importantes sont le Gyrator, le convertisseur négatif d'impédance et les circuits à réaction négative ou positive, faisant appel le plus souvent à un amplificateur opérationnel. Les amplificateurs opérationnels existent depuis un certain temps déjà sous forme monolithique. A l'aide de ceux-ci, et en utilisant des résistances et condensateurs, il est possible de réaliser des filtres dont les caractéristiques de transmission peuvent être déterminées à volonté. Etant donné que l'on peut obtenir sur le marché des amplificateurs opérationnels à conducteurs de raccordement à ruban (beam lead), donc soudables sur circuits intégrés, les filtres actifs en technique à couches minces sont devenus réalisables.

Pour permettre une meilleure compréhension de la suite, nous donnons ci-après quelques précisions sur le calcul des filtres. Il est connu qu'il est possible de représenter la caractéristique de transmission d'un filtre par deux polynômes en fonction de la fréquence (tabl. I).

Pour faire la synthèse des filtres actifs, on décompose la fonction caractéristique de transmission en un produit dans lequel le numérateur de chacun des membres représente une fonction carrée de S (composants quadratiques). Chacun des composants quadratiques est construit pour lui-même, puis ils sont connectés en cascade. Etant donné les impédances de sortie basses des circuits avec amplificateurs opérationnels, ce genre de connexion n'offre en général pas de difficultés.

La décomposition de la fonction en membres quadratiques offre l'avantage de simplifier le calcul. De plus, avec cette méthode de calcul, la sensibilité du filtre aux écarts de la valeur nominale des composants est, en première approximation, proportionnelle au facteur Q . Si l'on connecte deux étages de filtres de facteur Q égal à 10 en cascade, cette combinaison est beaucoup moins sensible aux tolérances qu'un étage de facteur Q égal à 100.

Le numérateur des composants quadratiques définit la bande passante du filtre. On obtient diverses caractéristiques de la courbe de réponse, selon les valeurs choisies pour le facteur Q . La figure 5 [9] donne les caractéristiques

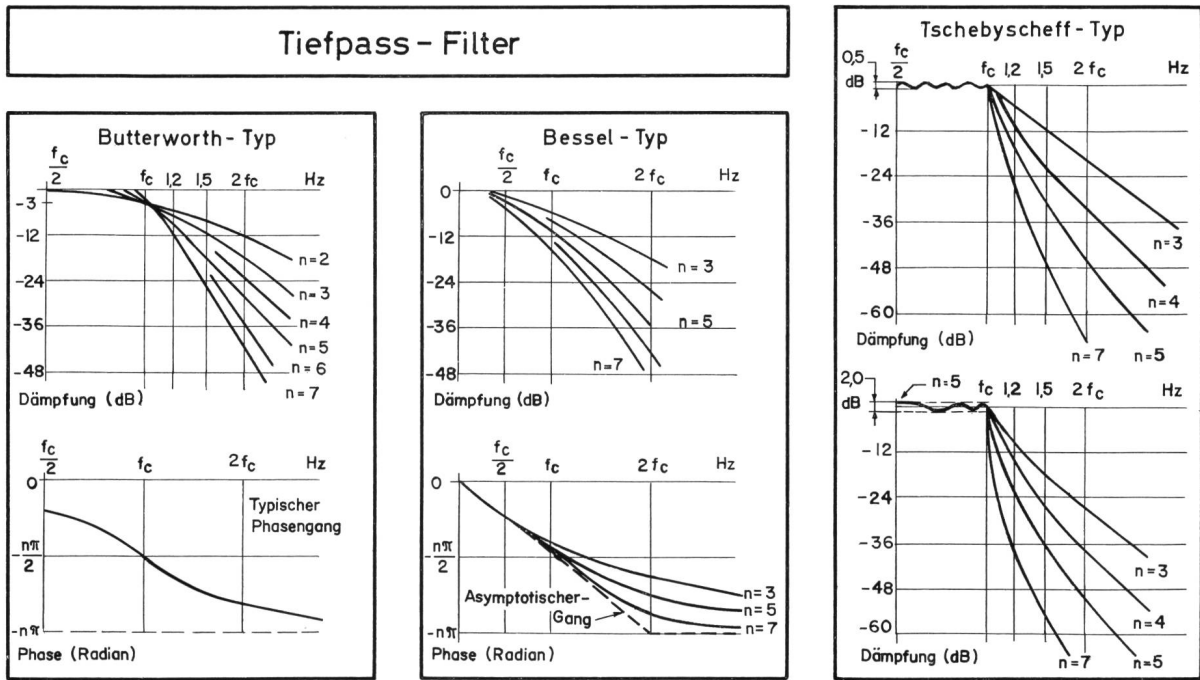


Fig. 5
 Frequenzgang von Tiefpassfiltern
 Courbes de réponse en fréquence pour filtres passe-bas
 Aus/de [9]

Tiefpass-Filter – Filtre passe-bas
 Butterworth-Typ – Type Butterworth
 Bessel-Typ – Type Bessel
 Tschebyscheff Typ – Type Tchebyscheff

Dämpfung (dB) – Atténuation (dB)
 Typischer Phasengang – Variation typique de phase
 Asymptotischer Gang – asymptotique

Figur 5 [9] zeigt die wichtigsten Filtertypen am Beispiel eines Tiefpasses, wobei n die Ordnung des Filters bezeichnet. Die Zahl der quadratischen Glieder ist gleich $n/2$, falls n ungerade ist, wird noch ein einfaches passives RC-Glied vorgeschaltet. Das *Butterworth*-Filter ist maximal flach im Durchlassbereich, beim *Bessel*-Filter ist die Phasenverschiebung annähernd eine lineare Funktion der Frequenz, das *Tchebyscheff*-Filter hat die steilste Flanke, jedoch Welligkeit im Durchlassbereich; eine Verringerung der Welligkeit geht auf Kosten der Flankensteilheit bei gleicher Anzahl der Glieder.

Ein Beispiel für die Verwendung positiver Rückkopplung ($K > 0$) zeigt Figur 6. Die obere Schaltung stellt einen Tiefpass 3. Ordnung, die mittlere einen Hochpass 3. Ordnung und die untere einen quadratischen Bandpass dar. Der Hochpass geht aus dem Tiefpass durch Vertauschen von R und C hervor. Beide Filter bestehen aus einem quadratischen Glied und einem vorgeschalteten Glied 1. Ordnung.

Figur 7 zeigt die Berechnung eines 1-dB-Tchebyscheff-Tiefpasses 5. Ordnung [10], bestehend aus einem Glied 3. Ordnung und einem quadratischen Glied. Oben die normierten Werte für $\omega_0 = 1$ und $R = 1$. Für die Werte der

pour les genres de filtres les plus courants, en choisissant comme exemple le filtre passe-bas, la lettre n étant le numéro d'ordre du filtre. Le nombre des composants quadratiques égale $n/2$. Lorsque n est impair, on connecte un élément RC passif à l'entrée du filtre. La courbe de réponse du filtre de *Butterworth* est la plus plate dans la bande passante, pour le filtre de *Bessel* c'est la distorsion de phase qui est presque une fonction linéaire de la fréquence, alors que c'est le filtre de *Tchebyscheff* qui présente la caractéristique la plus raide, bien qu'une certaine ondulation se fasse remarquer dans la bande passante; une diminution de cette ondulation ne peut se faire qu'au détriment de la pente de la caractéristique pour le même nombre d'éléments du filtre.

Un exemple pour l'utilisation d'une réaction positive ($K > 0$) est donné par la figure 6. Le circuit supérieur représente un filtre passe-bas de troisième ordre, le circuit du milieu un filtre passe-haut de troisième ordre également et le circuit inférieur un filtre passe-bande quadratique. Le filtre passe-haut est dérivé du passe-bas par interversion de R et C . Les deux filtres se composent d'un élément quadratique et d'un élément de premier ordre le précédant.

La figure 7 illustre le calcul d'un filtre passe-bas de cinquième ordre, selon Tchebyscheff, ayant une ondulation

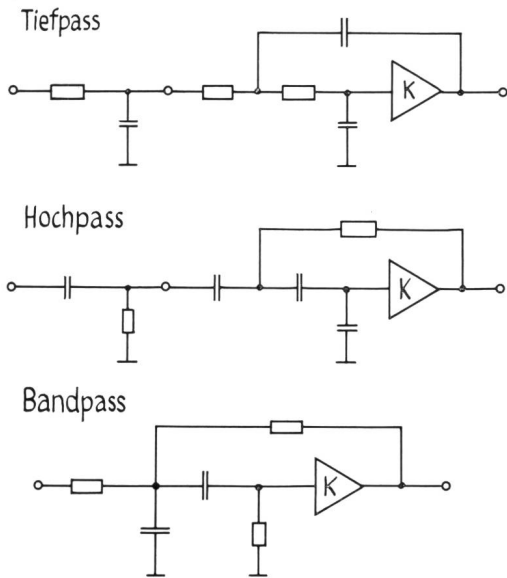


Fig. 6
Aktive Filter mit positiver Rückkopplung
Filtres actifs à réaction positive

Tiefpass – Passe-bas
Hochpass – Passe-haut
Bandpass – Passe-bande

Kapazitäten gibt es Tabellen [10]. Die Widerstandswerte sind in Ohm, die Kapazitätswerte in Farad angegeben. Wenn die Grenzfrequenz 1 kHz sein soll, werden die Kapazitäten durch $2 \cdot \pi \cdot 10^3$ dividiert, und man erhält das mittlere Schema. Nun kann man noch die Impedanz beliebig wählen. In diesem Beispiel wurde es so gemacht, dass die grösste vorkommende Kapazität $0,1 \mu\text{F}$ beträgt. In *Figur 8* sieht man den Einfluss von Toleranzen der Komponenten auf den Frequenzgang. Das innere Band gilt für $\pm 1\%$, das äussere für $\pm 5\%$.

Noch eine sehr interessante Methode zur Verwirklichung aktiver Filter sei hier erwähnt [11] (*Tab. II*).

Tabelle II
Tableau II

$$T(s) = \frac{\omega_Z^2 + 2 \xi_Z \omega_Z s + s^2}{\omega_N^2 + 2 \xi_N \omega_N s + s^2}$$

$$T(s) = (Y_{21})_R \cdot (Z_{21})_A$$

$$(Y_{21})_R = \frac{\omega_Z^2 + 2 \xi_Z \omega_Z s + s^2}{\omega_N^2 + 2 \xi_N \omega_N s + s^2}$$

$$(Z_{21})_A = \frac{\omega_N^2 + 2 \xi_N \omega_N s + s^2}{\omega_Z^2 + 2 \xi_Z \omega_Z s + s^2}$$

de 1 dB [10]. Il est composé d'un élément de 3^e ordre et d'un élément quadratique. Les valeurs données tout en haut de la figure le sont pour $\omega_0 = 1$ et $R = 1$. Pour les valeurs des capacités, il existe des tables [10]. Les valeurs des résistances sont données en ohms, celles des capacités en farads.

Si la fréquence de coupure doit être de 1 kHz, on peut diviser la valeur des capacités par $2 \cdot \pi \cdot 10^3$ et l'on obtient le schéma du milieu. On peut encore choisir une valeur quelconque de l'impédance. Les valeurs prises dans cet exemple l'ont été de façon que la plus grande capacité à utiliser soit de $0,1 \mu\text{F}$. Sur la *figure 8*, on a représenté l'influence des tolérances affectant les divers composants du filtre. La bande intérieure vaut pour une tolérance de $\pm 1\%$, la bande extérieure pour $\pm 5\%$.

Une autre méthode intéressante permettant la réalisation de filtres actifs est encore indiquée ici [11]. Il s'agit du calcul d'un filtre RC actif selon *Moschytz*. Nous en donnons les formules dans le *tableau II*.

La *figure 9* indique comment la fonction de transmission quadratique est décomposée encore une fois en deux éléments quadratiques, dans lesquels $(Y_{21})_R$ représente la conductance d'un réseau RC passif et $(Z_{21})_A$ l'impédance de transmission d'un réseau RC actif. A la connexion en cascade de ces deux éléments, le dénominateur de Y et le numérateur de Z s'annulent, si bien qu'il ne reste que la fonction $T(s)$.

Il s'ensuit que le numérateur de la fonction $T(s)$ (bande passante) est déterminé seulement par la partie passive et le dénominateur (caractéristique du filtre) au contraire par la partie active du système. La partie active se compose d'un filtre passe-bande, désigné souvent dans la littérature

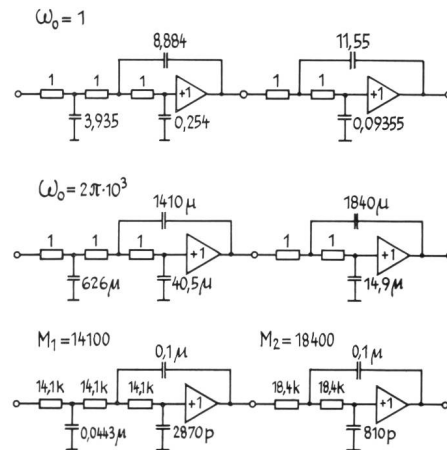


Fig. 7
Berechnung eines 1dB-Tschebyscheff-Tiefpasses 5. Ordnung
Calcul d'un filtre passe-bas type Tschebyscheff de 5^e ordre, pour 1 dB d'ondulation
Aus/de [10]

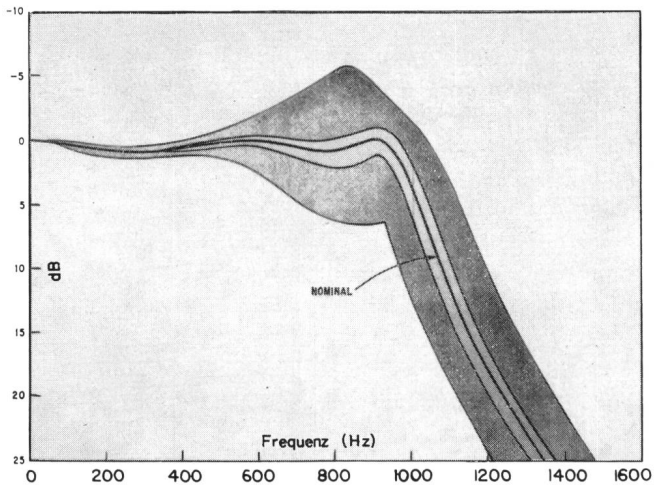


Fig. 8
Einfluss von Toleranzen der Komponenten auf den Frequenzgang des Tiefpasses
Influence de la tolérance des composants sur la réponse en fréquence d'un filtre passe-bas
Aus/de [10]

Diese Berechnung eines aktiven RC-Filters nach Moschytz zeigt, wie die quadratische Übertragungsfunktion noch einmal in zwei ebenfalls quadratische Glieder zerlegt wird, wobei $(Y_{21})_R$ den Übertragungsleitwert eines passiven RC-Netzwerkes und $(Z_{21})_A$ die Übertragungsimpedanz eines aktiven RC-Netzwerkes darstellt. Bei der Hintereinanderschaltung der beiden Netzwerke heben sich der Nenner von Y und der Zähler von Z gegenseitig auf, so dass die Funktion T (s) übrigbleibt. In diesem Fall wird also der Zähler von T (s) (Durchlassbereich) nur vom passiven Teil, der Nenner (Filtercharakteristik) hingegen nur vom aktiven Teil bestimmt. Der aktive Teil besteht aus einem Bandpass, in der Literatur als frequency emphasizing network FEN bezeichnet. Fig. 9 zeigt das Schema des FEN, die obere Schaltung wird für niedrige, die untere für hohe Selektivität verwendet. Es ist also in diesem Fall möglich, beispielsweise einen Tiefpass und einen Hochpass mit derselben Charakteristik mit identischen aktiven Teilen zu verwirklichen, nur der passive Teil muss geändert werden, vorausgesetzt natürlich, dass in beiden Fällen die gleiche Grenzfrequenz vorliegt. Es besteht aber auch die Möglichkeit, durch Trimmen der Widerstände im aktiven Teil diesen für verschiedene Grenzfrequenzen zu verwenden. Fig. 10 zeigt zwei Anwendungsbeispiele mit FEN, oben ein Bandpass 6. Ordnung, unten ein elliptischer Tiefpass, wobei die Nullstelle des Frequenzganges durch den Rückkopplungsteil eines FEN gebildet wird.

Ein weiteres Beispiel für die Verwendung aktiver RC-Schaltungen sind die Oszillatoren für das Drucktasten-

par «frequency emphasizing network» (FEN). La figure 9 montre le schéma d'un tel filtre (FEN). Le circuit supérieur est utilisé pour basse sélectivité, le circuit inférieur pour une sélectivité élevée. Il est ainsi possible, dans ce cas, de réaliser un filtre passe-bas et un filtre passe-haut de caractéristiques identiques, avec les mêmes composants actifs, seule la partie passive devant être modifiée, pour autant que les fréquences de coupure soient les mêmes. Il existe également la possibilité d'utiliser le même élément actif pour différentes fréquences de coupure, il suffit pour cela d'en ajuster les valeurs de résistances. La figure 10 illustre deux exemples d'application de FEN. Dans la partie supérieure, on a représenté un filtre passe-bande de sixième ordre, en bas un filtre passe-bas elliptique, dans lequel le

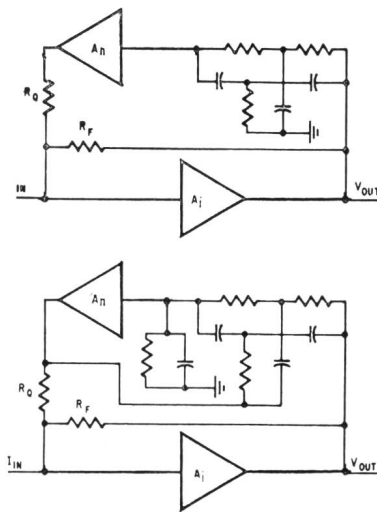


Fig. 9
Frequency Emphasizing Network (FEN)
Aus/de [11]

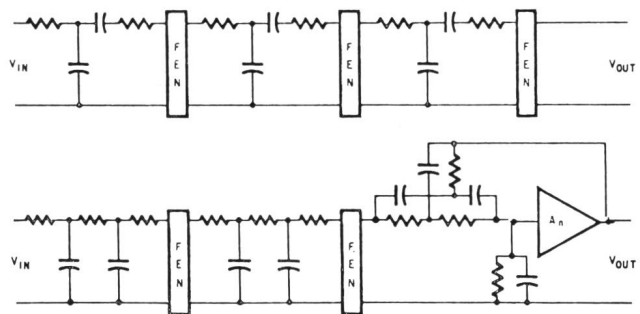


Fig. 10
Bandpass und Tiefpass mit FEN
Filtre passe-bande et passe-bas réalisés à l'aide de FEN
Aus/de [11]

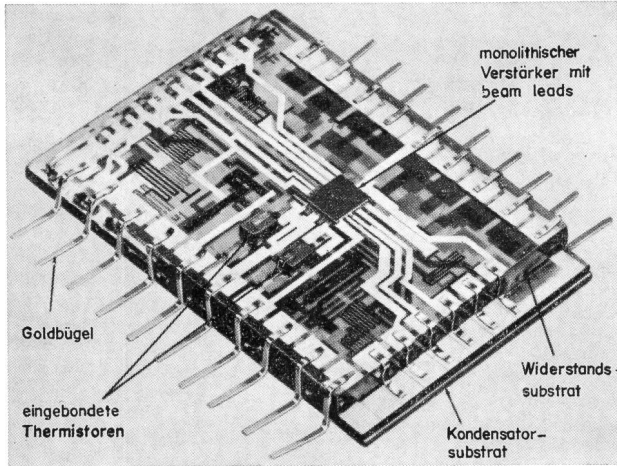


Fig. 11
RC-Oszillator für Drucktastentelephon
Oscillateur RC pour appareil téléphonique à clavier
Aus/de [2]

Goldbügel – Etrier en or
Eingebundene Thermistoren – Thermistors soudés
Kondensator substrat – Substrat du condensateur
Widerstandssubstrat – Substrat de la résistance
Monolithischer Verstärker mit beam leads – Amplificateur monolithique à bandes de raccordement (beam leads)

telephon [2]. Dieses enthält zwei Oszillatoren, die je vier Frequenzen erzeugen können. Mit jeder Drucktaste werden zwei Frequenzen ausgewählt, von jedem Oszillator eine. Die Oszillatoren sind mit einem Doppel-T-Rückkopplungsnetzwerk versehen. Widerstände, Kondensatoren und Verbindungsleitungen sind in Dünnschichttechnik ausgeführt. Der aktive Teil ist eine monolithische Schaltung, die die beiden Verstärker enthält. Der Aufbau ist aus *Figur 11* ersichtlich. Die Tantalnitridwiderstände, der monolithische Teil mit beam leads sowie zwei eingebundene Thermistoren befinden sich auf einem Substrat, die Tantaloxyd-kondensatoren auf einem zweiten. Die beiden Substrate werden an den Rückseiten verklebt und durch Bügel elektrisch verbunden. Der Frequenzabgleich erfolgt durch Trimmen der Widerstände nach dem Zusammenbau der Schaltung. *Figur 12* zeigt das Größenverhältnis von LC- und RC-Oszillator mit gleicher Funktion.

3. Verteilte Netzwerke

In diesem Abschnitt sollen noch Schaltelemente vorgestellt werden, die sich nur in integrierter Form herstellen lassen und mit denen man oft die Zahl der Komponenten in einer Schaltung wesentlich verkleinern kann.

point zéro de la courbe de réponse est déterminé par la partie réaction d'un FEN.

Un autre exemple d'application de circuits RC actifs est donné par les oscillateurs utilisés dans les appareils téléphoniques pour sélection à clavier (2). Ces appareils comportent deux oscillateurs pouvant engendrer chacun quatre fréquences. En pressant chacune des touches de sélection, on détermine deux fréquences émises chacune par un oscillateur. Ces oscillateurs sont équipés d'un réseau de couplage en double T. Les résistances, condensateurs et bandes de jonction sont réalisés en technique de couche mince. La partie active est constituée par un circuit monolithique contenant les deux amplificateurs. La construction de ce dispositif fait l'objet de la *figure 11*. Les résistances au nitrure de tantale, la partie monolithique et les bandes de raccordement, ainsi que deux thermistors soudés, se trouvent sur un premier substrat et les condensateurs à l'oxyde de tantale sur un second. Les deux substrats sont collés ensemble par le dos et reliés électriquement par un étrier. L'ajustage de la fréquence se fait en agissant sur la valeur des résistances, après le collage. La *figure 12* illustre le rapport des dimensions entre un oscillateur LC et un oscillateur RC, remplissant les mêmes fonctions.

3. Réseaux répartis

Ce chapitre décrit des éléments réalisés sous forme intégrée et à l'aide desquels il est souvent possible de réduire notablement le nombre des composants dans un circuit.

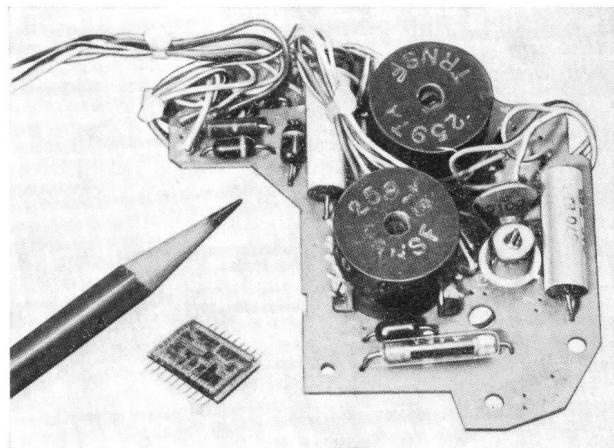


Fig. 12
Größenvergleich für RC- und LC-Oszillator
Comparaison des dimensions d'oscillateurs RD et LC
Aus/de [2]

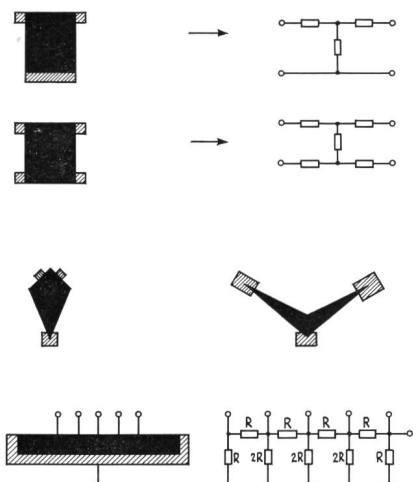


Fig. 13
Verteilte Widerstands-Netzwerke
Réseaux répartis de résistances

3.1 Verteilte R-Netzwerke

Durch ein verteiltes Widerstandsnetzwerk lässt sich eine grössere Anzahl diskreter Widerstände ersetzen [12]. Nehmen wir an, wir haben einen rechteckigen Fleck einer Widerstandsschicht, wie in *Figur 13* gezeigt. Wenn man diesen Fleck an drei oder vier Stellen kontaktiert, so erhält man das Äquivalent eines unsymmetrischen oder symmetrischen Dämpfungsgliedes. Um das Dämpfungsglied zu berechnen, müssen z. B. die Leerlaufwiderstände bekannt sein. Daraus kann man sowohl die Dämpfung als auch die Impedanz berechnen. Die Berechnung der Leerlaufwiderstände gelingt mit Hilfe einer konformen Abbildung unter Verwendung der *Schwarz-Christoffel-Transformation*. Dies führt auf elliptische Integrale und wird am besten mit einem Computer durchgeführt.

Interessanter als die Analyse ist natürlich die Synthese solcher Dämpfungsglieder. Leider hat das Syntheseproblem keine eindeutige Lösung. Am besten geht man so vor, dass man verschiedene Geometrien vom Computer durchrechnen lässt. Man bekommt dann Kurvenscharen, aus denen man für einen bestimmten Fall Geometrie und Flächenwiderstand entnehmen kann. Aus der Steilheit der Kurven lässt sich auch feststellen, bei welcher Geometrie Fertigungstoleranzen den kleinsten Einfluss haben.

Bei Dämpfungswerten unter 0,5 dB und solchen über 20 dB nehmen die Anforderungen an die Genauigkeit der Geometrie stark zu. Dasselbe gilt übrigens auch für die Widerstandstoleranzen bei konventionellem Aufbau. Man wählt dann besser nichtrechteckige Geometrien. Das ist in der Mitte der *Figur 13* gezeigt, links für kleine, rechts für hohe Dämpfung.

3.1 Réseaux répartis de résistances (R)

La confection d'un réseau réparti de résistances permet de créer un grand nombre de résistances discrètes [12]. Considérons que nous disposons d'une surface portant une couche résistante, comme le montre la *figure 13*. En assurant le contact avec cette surface en trois ou quatre points différents, on obtient l'équivalent d'un atténuateur symétrique ou asymétrique. Pour calculer l'atténuation de cet élément, il faut connaître par exemple les résistances à vide. On peut ensuite en tirer aussi bien la valeur de l'atténuation que celle de l'impédance. Le calcul des résistances à vide se fait à l'aide d'une représentation conforme, en faisant intervenir la transformation de *Schwarz-Christoffel*. Cela conduit à des intégrales elliptiques qui sont résolues le plus simplement à l'aide d'un ordinateur.

La synthèse de tels atténuateurs est encore plus intéressante que leur analyse. Ce problème n'a malheureusement pas de solution précise. Pour parvenir au but, on procède de la façon suivante: Plusieurs géométries sont calculées à l'aide d'un ordinateur. On obtient ainsi une famille de courbes de laquelle on peut tirer la géométrie et les surfaces résistances nécessaires pour un cas particulier. De la pente des courbes obtenues, on peut déduire également pour quelle géométrie l'influence des tolérances de fabrication est minimum.

Pour des valeurs d'affaiblissement inférieures à 0,5 dB et supérieures à 20 dB, la précision géométrique exigée prend une importance prépondérante. Il en est du reste de même pour les tolérances admissibles sur la valeur des résistances qui seraient utilisées en montage conventionnel pour arriver aux mêmes atténuations. On a avantage alors à recourir à des géométries non rectangulaires. La *figure 13* en donne une représentation. Au milieu à gauche, il s'agit d'un réseau pour faible atténuation, alors qu'avec le réseau de droite les valeurs d'affaiblissement obtenues sont élevées. Il est pratiquement possible de réaliser n'importe

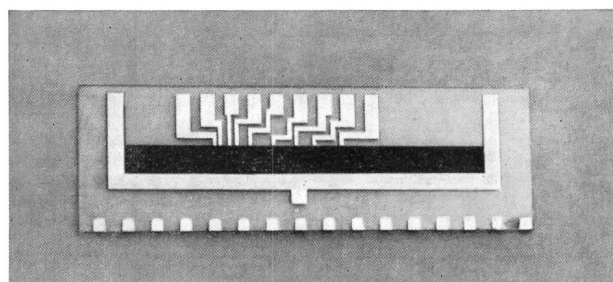


Fig. 14
Verteiltes Widerstands-Netzwerk für PCM-Decoder
Réseau réparti de résistances pour décodeur MIC
Aus/de [13]

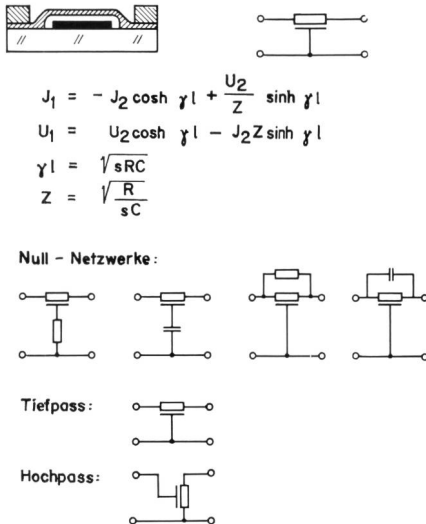


Fig. 15
Verteilte RC-Netzwerke
Réseaux répartis de résistances

Null-Netzwerke - Filtre de blocage
Tiefpass - Filtre passe-bas
Hochpass - Filtre passe-haut

Man kann fast alle Widerstandsnetzwerke auf diese Weise durch verteilte Glieder ersetzen. Ein eindrucksvolles Beispiel ist das Leiternetzwerk für einen Digital-Analog-Wandler. Die für n bits notwendigen $2n-1$ Widerstände lassen sich durch eine einzige Widerstandsschicht darstellen [13]. Das Leiternetzwerk für den PCM-Decoder von Fig. 4 wurde versuchsweise in dieser Form verwirklicht, die Ausführung zeigt Fig. 14. Der schwarze Streifen in der Mitte ist die Widerstandsschicht, die Masseleitung ist rund herum geführt, die neun Anschlüsse befinden sich oben.

Worin liegt der Vorteil dieser Glieder? Zunächst sieht man sofort, dass kleine Fehlstellen, zum Beispiel Löcher in der Schicht, praktisch keine Rolle spielen. Ausserdem sind die parasitären Impedanzen sehr klein, und die Netzwerke haben somit konstante Eigenschaften bis zu sehr hohen Frequenzen.

3.2 Verteilte RC-Glieder

Ein weiteres interessantes Element ist das verteilte RC-Glied. Man erhält dieses Glied, indem man eine Elektrode eines Kondensators als Widerstand ausbildet, wie in Fig. 15 links oben gezeigt, das Schaltsymbol befindet sich rechts daneben. Natürlich haben Kondensatorelektroden immer einen endlichen Widerstand, der meistens stört, weil die Verluste bei höheren Frequenzen dadurch ansteigen. Man

quel réseau de résistances à l'aide de ce procédé. Un exemple frappant est celui du réseau utilisé dans un transcodeur digital-analogue. Les résistances au nombre de $2n - 1$ nécessaires pour n bits sont réalisées à l'aide d'une seule couche résistante [13]. Le réseau utilisé pour le décodeur MIC de la figure 4 a été réalisé sous cette forme à titre expérimental. La figure 14 en donne l'illustration. La bande noire du milieu est la couche résistante. Le conducteur de masse est disposé à la périphérie et les neuf points de raccordement sont placés au haut de la plaquette.

Quels sont les avantages de ces éléments? Tout d'abord on se rend immédiatement compte que des petits défauts dans la couche, par exemple des trous, ne jouent pratiquement pas de rôle. De plus, les impédances parasites sont très faibles, si bien que les caractéristiques des réseaux restent constantes jusqu'à des fréquences très élevées.

3.2 Eléments RC répartis

Un autre élément intéressant est l'élément RC réparti. Il est obtenu en constituant une électrode du condensateur par une couche résistante, comme le montre la figure 1 en haut à gauche. Le symbole correspondant est représenté à droite. Les électrodes d'un condensateur ont naturellement toujours une résistance finie, qui dans la plupart des cas est parasite, puisqu'elle provoque des pertes supérieures aux fréquences plus élevées. Il est cependant possible de tirer un avantage de cet effet. Le comportement électrique de cet élément peut être décrit à l'aide des équations générales des lignes de transmission [14], dans lesquelles on introduit les valeurs portées dans la figure 15 pour la constante de propagation et l'impédance caractéristique. On peut utiliser cet élément en tant que filtre passe-bas par exemple. La courbe de réponse correspond à celle d'un filtre passe-bas à 10 cellules avec composants identiques. Une différence essentielle réside cependant dans le fait que pour un filtre passe-bas à dix cellules, le déphasage

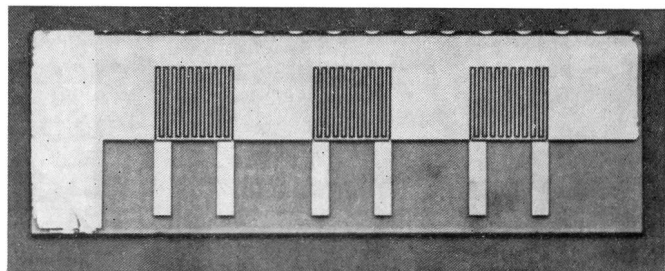


Fig. 16
Verteilte RC-Netzwerke in Tantaltechnik
Réseaux répartis de résistances en technique tantale
Aus/de [15]

kann sich aber diesen Effekt auch zunutze machen. Das elektrische Verhalten dieses Elements kann mit den allgemeinen Leitungsgleichungen beschrieben werden [14], mit den in Figur 15 gezeigten Werten für Wellenmass und Wellenwiderstand.

Man kann das Element beispielsweise als Tiefpass verwenden. Der Frequenzgang entspricht dem eines zehngliedrigen RC-Tiefpasses mit identischen Gliedern. Es besteht aber ein wichtiger Unterschied: beim zehngliedrigen RC-Tiefpass beträgt die Phasenverschiebung maximal $10 \times 90^\circ$, also 900° , während sie beim verteilten RC-Glied eine monoton wachsende Funktion der Frequenz ohne obere Grenze ist. Dieses Element kann auch als Kopplungsglied (Hochpass) verwendet werden. Noch interessanter sind wahrscheinlich die ebenfalls in Figur 15 gezeigten Schaltungen als Sperrkreis in Verbindung mit einem Widerstand oder Kondensator.

Figur 16 zeigt eine Ausführung von drei verteilten RC-Gliedern mit gemeinsamer Grundelektrode, der Anschluss für die Grundelektrode befindet sich links aussen [15].

Man kann mit Hilfe solcher Glieder die Zahl der Komponenten in einer Schaltung oft drastisch verkleinern. Figur 17 zeigt einige Schaltungsbeispiele. Oben ein aktives Tiefpassfilter 3. Ordnung. Gegenüber der in Figur 6 gezeigten Schaltung sind drei Widerstände und drei Kondensatoren durch zwei verteilte Glieder ersetzt. In der Mitte ein Bandpassfilter mit einem Sperrkreis im Rückkopplungsweig, der ein Doppel-T-Glied ersetzt, auch hier wurden sechs Komponenten durch zwei ersetzt. Unten ein Oszillator unter Verwendung der Phasenschiebereigenschaften des RC-Gliedes, hier sind 6 Komponenten durch eine Komponente ersetzt. Im letzten Fall muss man den Frequenzgang des Verstärkers entsprechend abfallen lassen, weil für unendlich viele Frequenzen die Phasenbedingung erfüllt wäre.

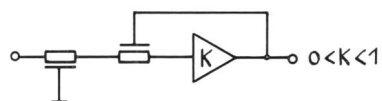
In Figur 18 ist gezeigt, wie man den Abgleich eines Sperrkreises mit verteiltem RC-Glied durchführen kann [16]. Es sei die Forderung gestellt, dass die Dämpfung bei der Resonanzfrequenz einen bestimmten Wert habe und dass die Resonanzfrequenz über einen gewissen Bereich abstimmbar sein soll. Wir haben zwei Variable, also müssen auch zwei Komponenten abgleichbar sein. In diesem Fall können die Widerstände A und B getrimmt werden. Im Diagramm sieht man die Resonanzkurven für verschiedene Werte von B bei konstantem A. In der Umgebung des Maximums der strichlierten Kurve ändert sich die Dämpfung nur sehr wenig bei Änderung der Resonanzfrequenz. Man kann also mit A zunächst die gewünschte Dämpfung einstellen und dann mit B die Frequenz trimmen.

Bestimmte Effekte lassen sich auch durch Änderung der Geometrie erzielen. Wenn man beispielsweise den verteilten Widerstand als Rechteck ausbildet, erhält man eine be-

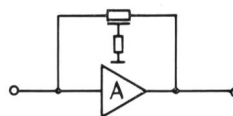
est au maximum de $10 \times 90^\circ = 900^\circ$, alors que pour un élément RC réparti il est représenté par une fonction monotone croissant avec la fréquence, sans limite supérieure. Cet élément peut également être utilisé comme élément de couplage (filtre passe-haut). Une possibilité probablement encore plus intéressante consiste à faire appel à cet élément pour en faire, en liaison avec une résistance ou un condensateur, un filtre de blocage (figure 15).

La figure 16 illustre l'exécution de trois éléments RC répartis avec électrode commune. Le raccordement de l'électrode commune se trouve à l'extérieur, à gauche [15]. A l'aide de tels éléments, il est souvent possible de réduire dans une très forte mesure le nombre des composants dans un circuit. La figure 17 illustre quelques exemples. En haut, il s'agit d'un filtre passe-bas actif de troisième ordre. Par rapport au circuit de la figure 6, trois résistances et trois condensateurs ont été remplacés par deux éléments répartis. Le milieu de la figure illustre un filtre passe-bande avec filtre de blocage dans la partie réaction, ayant le même effet qu'un filtre conventionnel en double T. Là également, six composants ont été remplacés par deux. Dans le bas de la figure, on a représenté un oscillateur utilisant les propriétés de déphasage d'un élément RC. Six composants ont été remplacés par un seul. Dans ce dernier cas, il est cependant nécessaire que la courbe de réponse en fréquence de l'amplificateur s'incurve vers le bas, aux fréquences élevées,

Aktives Tiefpass-Filter



Aktives Bandpass-Filter



Oszillator

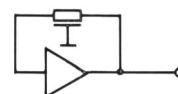


Fig. 17

Anwendungen verteilter RC-Netzwerke

Exemples d'application de réseaux répartis de résistances

Aktives Tiefpass-Filter – Filtre passe-bas actif

Aktives Bandpass-Filter – Filtre passe-bande actif

Oszillator – Oscillateur

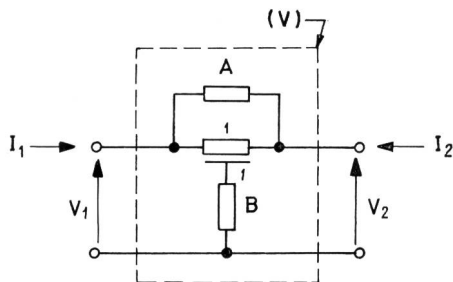
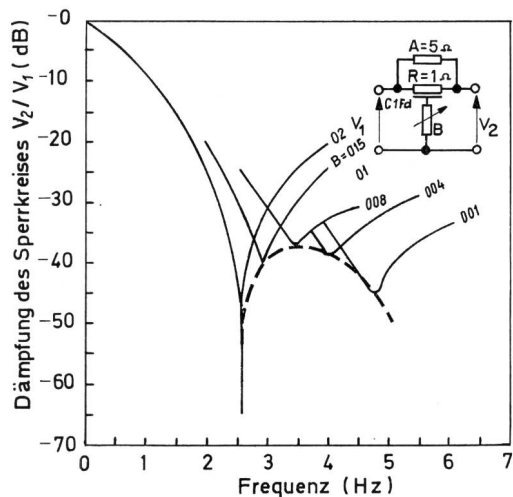


Fig. 18
Abgleich eines Sperrkreises mit verteiltem RC-Netzwerk
Alignement d'un filtre de blocage à l'aide d'un réseau réparti de résistances
Aus/de [16]

Dämpfung des Sperrkreises - Atténuation du circuit de blocage
Frequenz - Fréquence

stimmte Bandbreite eines damit aufgebauten Sperrkreises. Man kann nun die Bandbreite variieren, indem man die Widerstandsschicht trapezförmig macht (Fig. 19). Die Berechnung ist allerdings ziemlich schwierig und wurde bisher nur für exponentiellen Verlauf durchgeführt.

Wenn man den Widerstand eines verteilten RC-Gliedes mit Anzapfungen versieht, so erhält man eine Verzögerungsleitung mit wählbarer Verzögerung. Allerdings ist diese Verzögerungsleitung im Gegensatz zur reinen LC-Leitung dispersiv. Der Vorteil besteht darin, dass man kleinere und billigere Verzögerungsleitungen mit RC-Gliedern aufbauen kann, zum Beispiel braucht man für eine Verzögerung von 100 ms $1 \text{ H} + 100 \mu\text{F}$ oder $100 \text{ k}\Omega + 0,1 \mu\text{F}$.

Man kann eine solche Verzögerungsleitung zum Aufbau eines transversalen Filters verwenden [17]. Dabei werden die Spannungen an den einzelnen Anzapfungen mit einem bestimmten Faktor multipliziert und anschließend addiert.

étant donné que la condition de phase est remplie pour un nombre infiniment grand de fréquences.

La figure 18 indique comment il est possible de réaliser l'alignement d'un filtre de blocage constitué par un élément RC réparti [16]. La condition posée est que l'atténuation à la fréquence de résonance doit avoir une valeur déterminée, et que la fréquence de résonance doit pouvoir être ajustée dans certaines limites. Il y a donc deux variables, ce qui revient à dire que l'on doit pouvoir agir sur la valeur de deux composants. Dans l'exemple cité, les résistances A et B peuvent être ajustées. Le diagramme donne les courbes de résonance pour différentes valeurs de B, A étant maintenu constant. L'atténuation varie très peu en fonction de la fréquence de résonance, dans un certain domaine au voisinage du point qui peut être désigné par «local maximum of locus».

En agissant sur A, on peut donc d'abord arriver à l'atténuation désirée, puis en ajustant B obtenir la fréquence de résonance requise.

Certains effets peuvent être atteints également en modifiant la géométrie. Si l'on réalise une géométrie rectangu-

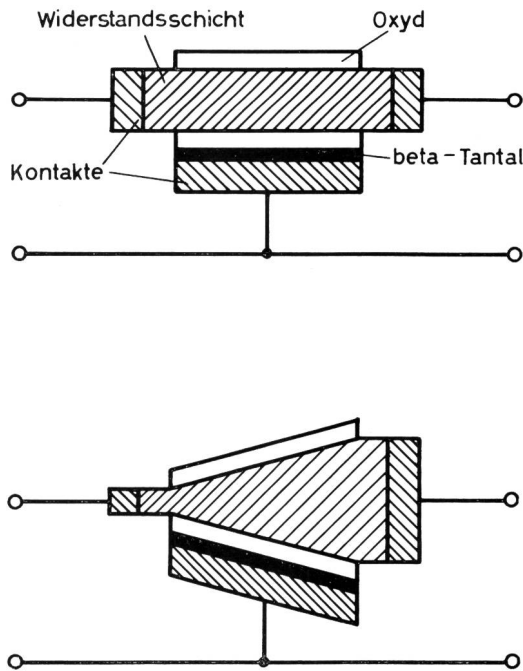


Fig. 19
Geometrie-Änderung beim verteilten RC-Netzwerk
Modification de la géométrie d'un réseau RC réparti

Kontakte - Contacts
Widerstandsschicht - Couche résistante
beta Tantal - Tantale béta
Oxyd - Oxyde

Auf diese Weise lassen sich die verschiedensten Filterfunktionen verwirklichen. *Figur 20* zeigt die Schritte bei der Herstellung einer solchen Verzögerungsleitung. Zunächst werden die Kontakte für die Anzapfungen und die oberen Verbindungslinien der Mäander aufgedampft. Dann wird über das Ganze Tantalnitrid gestäubt und die Widerstandsgeometrie ausgeätzt. Das Tantalnitrid wird zur Bildung des Dielektrikums anodisch oxydiert. In diesem Fall bildet also der Widerstand die untere Kondensatorelektrode, Tantalnitrid ergibt ein gutes Dielektrikum, die Dielektrizitätskonstante ist allerdings nur etwa halb so gross wie beim reinen Tantaloxyd. Zum Schluss wird über das Ganze mit Ausnahme der Anschlüsse die Gegenelektrode gedampft.

Es hat auf den ersten Blick den Anschein, als ob solche Verfahren sehr umständlich und teuer wären. Man darf aber dabei nicht vergessen, dass die Schaltungen sehr klein werden können, wie am Beispiel des Oszillators für das Drucktasten-Telephon (*Fig. 11*) zu sehen ist. Man kann daher wie bei der Halbleitertechnik auf einem Substrat eine Vielzahl identischer Schaltungen herstellen, wodurch die Kosten für den einzelnen Schaltkreis oft niedriger werden als beim Aufbau aus diskreten Elementen. Dies gilt besonders dann, wenn teure Präzisionsbauteile verwendet werden. Dazu kommt die Platzersparnis, die beim komplizierten Aufbau moderner elektronischer Systeme einen ganz wesentlichen Faktor bildet. Ausserdem gilt die integrierte Schaltung als wesentlich zuverlässiger, weil die Zahl der Verbindungsleitungen (Lötunkte!) stark verringert wird.

Für die Zukunft ist zu erwarten, dass die sinnvolle Verbindung von Dünnschichttechnik und monolithischen integrierten Schaltungen immer mehr Anwendungen finden wird, besonders dort, wo mit monolithischen Schaltungen allein die notwendige Präzision und Stabilität nicht erreicht werden kann, oder bei mittleren Stückzahlen, wo der Entwurf einer eigenen monolithischen Schaltung nicht wirtschaftlich wäre.

Literatur

- [1] R. W. Berry, D. J. Sloan. Proc. IRE 47 (1959), p. 1070.
- [2] R. W. Berry, P. M. Hall, M. T. Harris. «Thin Film Technology». Bell Telephone Laboratories Series. D. Van Nostrand, Princeton 1968.
- [3] M. H. Read, C. Altman. Applied Physics Letters 7 (1965) Number 3, p. 51.
- [4] F. Gaydou. Vakuu-Technik 15 (1966), Heft 7, p. 161.
- [5] D. R. Tibbets. Electronic Components, May 1968, p. 551.
- [6] J. L. Owens, N. G. Lesh. Proc. 1967 El. Comp. Conf., p. 405.

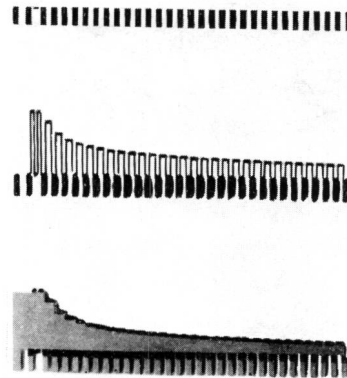


Fig. 20

Herstellung eines verteilten RC-Netzwerkes mit Anzapfung für eine Verzögerungsleitung

Fabrication d'un réseau RC à prises pour ligne à retard

laire pour une résistance répartie, on obtient une certaine largeur de bande pour un filtre de blocage équipé d'une telle résistance. Il devient possible de modifier cette largeur de bande en utilisant, par exemple, une géométrie trapézoïdale, comme l'illustre la *figure 19*. Le calcul des valeurs est cependant assez compliqué et n'a été fait jusqu'ici que pour des allures exponentielles.

Si l'on prévoit la résistance d'un élément RC réparti avec des prises intermédiaires, on obtient une ligne à retard variable. Il y a cependant lieu de remarquer qu'à l'encontre des lignes à retard idéales LC, les lignes RC ont un effet dispersif. L'avantage réside cependant dans le fait que l'on peut réaliser des lignes à retard de dimensions beaucoup plus réduites et meilleur marché avec les éléments RC répartis. Un retard de 100 ms par exemple peut être obtenu avec 1 H et 100 μ F ou 100 k Ω et 0,1 μ F.

L'utilisation de telles lignes à retard permet également la construction de filtres «transversaux» [17]. Les tensions disponibles sur chacune des prises sont multipliées par un facteur déterminé pour être ensuite additionnées. Des filtres aux fonctions les plus diverses peuvent être ainsi réalisés. La *figure 20* illustre le phénomène. La fabrication débute par la déposition des points de contact pour les prises et les lignes supérieures des méandres. Le tout est ensuite recouvert d'une couche de nitrure de tantale, puis la géométrie des résistances est gravée. La couche de nitrure de tantale est ensuite oxydée anodiquement en vue de former le diélectrique. La résistance remplit également, dans le cas particulier, le rôle de l'électrode inférieure du condensateur. Le nitrure de tantale forme un diélectrique

- [7] *W. H. Jackson, R. J. Moore.* Proc. 1965 El. Comp. Conf. p. s-45.
- [8] *L. P. Huelsman.* Theory and Design of Active RC Circuits. McGraw – Hill, New York 1968.
- [9] *Burr-Brown* 1968 Catalog. Solid State Multi-Function Circuits.
- [10] *R. R. Shepard.* Electronics, August 18, 1969, p. 82.
- [11] *G. S. Moschytz, R. W. Wyndrum Jr.* Electronics, December 9 (1968), p. 98.
- [12] *R. J. Dow.* IEEE Trans. Comp. Parts CP-10 (1963), p. 147.
- [13] *W. Worobey, R. W. Wyndrum.* IEEE Trans. Parts, Materials and Packaging. PMP-4 (1968), p. 22.
- [14] *W. Minner.* Archiv der elektr. Übertragung 15 (1961), p. 537.
- [15] *W. Worobey, M. H. Rottersman.* Proc. 1968 El. Comp. Conf., p.152
- [16] *J. J. Golembeski.* Proc. 1969 El. Comp. Conf., p. 111.
- [17] *D. Feldman, R. W. Wyndrum Jr.* Proc. 1968 El. Comp. Conf., p. 377.

Adresse des Auteurs: Dr. H. Kaufmann, Balzers AG für Hochvakuumtechnik und Dünne Schichten, Abt. Dünnschicht-Elektronik, FL-9496 Balzers (Liechtenstein).

de bonne qualité, dont la constante diélectrique est cependant environ de moitié inférieure à celle de l'oxyde de tantale pur. Pour terminer, la contre-électrode du condensateur est vaporisée sur toute la surface, à l'exception des conducteurs de raccordement.

Il peut paraître au premier abord que de tels procédés de fabrication sont compliqués et coûteux. Il ne faut cependant pas perdre de vue que les circuits ainsi obtenus sont très miniaturisés, il suffit de se souvenir de l'oscillateur pour appareils téléphoniques pour sélection à clavier (figure 11). Comme dans la technique des semi-conducteurs, il est possible de disposer plusieurs circuits identiques sur un seul substrat, ce qui permet d'obtenir un prix de revient par circuit souvent inférieur à celui exigé pour la fabrication d'éléments discrets. Cela est valable particulièrement lorsqu'il est nécessaire d'utiliser des éléments de construction de haute précision, toujours coûteux. De plus, l'économie de place réalisée dans la construction de dispositifs électroniques modernes toujours plus compliqués est également un facteur important. Les circuits intégrés offrent également une fiabilité largement supérieure à celle des circuits conventionnels, en partie du fait que le nombre des conducteurs de raccordement (points de soudure!) a pu être diminué dans une large proportion.